



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار - عنابة
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA
كلية العلوم
Faculté des sciences
قسم البيولوجيا
Département de biologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat

Spécialité: Protection, Conservation et Valorisation des Ressources Naturelles

Intitulée :

**L'influence des pratiques culturelles sur les propriétés physiques,
chimiques et biologiques des sols dans deux régions d'Algérie
« cas de Annaba et Sétif »**

par

M^{lle} : DAROUI Atika

Devant le jury

DJAMAI Rachid

Président

Pr. UBM Annaba

BENSLAMA Mohamed

Directeur de thèse

Pr. UBM Annaba

WEISSKOPF Peter

Co-directeur

Dr. Agroscope Zürich - Suisse

LAIFA Aziz

Examineur

Pr. UBM Annaba

FENNI Mohamed

Examineur

Pr. UFA Sétif

OBERHOLZER Hans-Rudolf

Invité

Dr. Agroscope Zürich – Suisse

Année universitaire 2017/2018

تأثير الممارسات الزراعية على الخواص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للتربة في منطقتين بالجزائر

"حالة عنابة و سطيف".

ملخص

الزراعة المحافظة على الموارد هو نهج لإدارة النظم البيئية الزراعية لتحسين الإنتاجية والتنمية المستدامة والحفاظ على الموارد الطبيعية والبيئية. ويستخدم الحد الأدنى من حرث التربة (الزراعة المباشرة) مع غطاء دائم للتربة (المهاد)، والممارسات الزراعية المستدامة للمستقبل. في الجزائر، تم إدخال الزراعة المستدامة منذ 10 سنوات. في هذه الدراسة، اوالعمل في التربة الحراثة التقليدية (ح.ت)، وانخفاض الحرث أو تقليل الحراثة (ت.ح) وبدون حرث أو تم تقييم البذر المباشر (ح.م) و آثارها على المعاملات المادية والكيميائية والبيولوجية للتربة في منهج البحث في مزرعتين منمنطقتين مختلفتين في ظروف و الموقع في الجزائر (عنابة وسطيف) مع الاختلاف في لإدارة الزراعية للتربة. تم جمع عينات من التربة حقول المزارع في عنابة التي تحتوي على الطين أساسا في مناخ البحر الأبيض المتوسط وسطيف على التربة مع الصخور الكلسية وشبه القاحلة مناخ البحر الأبيض المتوسط القاري. تم فحص التفاعلات بين الخصائص الهيكلية للأنشطة التربة والكتلة الحيوية والميكروبية باستخدام عينات التربة بدون أن يمسه خلل اتخذت مرتين في مستويات مختلفة من التربة لنظم الحراثة.

وأظهرت النتائج تأثير عموما أكثر وضوحاً (ح.ت) (ت ح) و (ح م) الأمر الذي أدى إلى أقل كثافة واضحة ومسامية أعلى. إعدادات النفاذية وماكروبيوسيتي الهواء أظهرت أن مساحة المسام مليئة بالهواء في التربة السطحية وكان مختلفاً في فعاليته للنقل بين نظم الحراثة، مع تنظيم عشوائي في (ح.ت) (ت ح) وتصرف أكثر استمرارية في (ح م).

الاستقرار الهيكلي من الطبقة من التربة السطحية ومقاومته للضغط كانت ارتباطاً عكسياً مع الكثافة لتخفيف العمل.

أظهرت محتويات الازوت و الكربون الكلي الارتباطات ارتباطاً كبيراً بين المنطقتين وجميع أنظمة الحراثة. الفروق المقارنة بين أنظمة الحرث والمناطق للالازوت و الكربون الكلي و علاقة بينهما في جميع العينات تشير إلى أن مساهمة أكبر من المواد العضوية الجديدة المستمدة مع نسب كبيرة يعزز تركيزات أعلى من الكربون الكلي في كلا الموقعين المدروسين. نتائج هذه التقارير تشير إلى أن لدينا تمعدن جيد على التوالي من المواد العضوية في (ت ح) (ح م) و (ح.ت)

بالنسبة للمنطقتين ، ولكن في عنابة ، كانت جيدة وسريعة على السطح وكانت بطيئة في العمق ، لكن التمدن في سطيف كان بطيئاً وأعاد فقط كمية صغيرة من النيتروجين المعدني إلى التربة.

اثنين من المعلمات الميكروبيولوجية والكتلة الحيوية والتنفس القاعدي ، تأثرت إيجابيا من قبل (ت ح) وأظهر تأثيراً متميزاً عن تاريخ أخذ العينات ، حيث تم ملاحظة أعلى القيم بعد وقت قصير من الحراثة. كما لوحظت آثار محددة للموقع.

بناءً على النتائج ، لم يكن من الممكن تحديد نظام حرث مثالي يرتبط فقط بالتأثيرات الإيجابية على معايير جودة التربة ، ولكن يبدو أنه (ت ح) تم تحديدها على أنها نظام حرث مثالي للمناطق التي تمت دراستها.

هذه النتائج الأولية للبحوث في المزرعة ذات طبيعة تجريبية وتحتاج إلى تأكيد من دراسات أخرى لتقديم توصيات موثوقة للمزارعين في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: الزراعة المحافظة على الموارد ، الاستقرار الهيكلي ، الكتلة الحيوية ، التنفس الأساسي

L'influence des pratiques culturales sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols dans deux régions d'Algérie « cas de Annaba et Sétif »

Résumé

L'agriculture de conservation est une approche de la gestion des agroécosystèmes pour une productivité améliorée et durable, préservant ainsi les ressources naturelles et l'environnement. Elle utilise une perturbation minimale du sol (semis direct) et une couverture permanente du sol (paille) en tant que pratiques de culture durables pour l'avenir. En Algérie, l'agriculture de conservation a été introduite il y a seulement 10 ans. Dans cette étude, le travail du sol, labour traditionnel, le travail réduit du sol ou les techniques culturales simplifiées, et le non-labour ou le semis direct ont été évalués selon leurs effets sur les paramètres physiques, chimiques et microbiologiques du sol dans une approche de recherche à la ferme dans deux régions agricoles d'Algérie (Annaba et Sétif) caractérisé par des conditions et de gestion des sols agricoles différentes. Des échantillons du sol ont été prélevés dans des champs de fermes à Annaba sous un bioclimat sub-humide et à Sétif sur des sols calcaires et sous un climat semi-aride. Les interactions entre les propriétés structurales du sol, la biomasse et les activités microbiennes ont été examinées à l'aide d'échantillons de sol perturbés et non perturbés prélevés à deux reprises dans des profils creusés dans les trois systèmes de travail du sol.

Les résultats ont montré un effet de relâchement généralement plus prononcé de LT comparé à TCS et SD, ce qui a conduit à une densité apparente plus faible et une porosité plus élevée. Les paramètres de macroporosité et perméabilité à l'air ont démontré que l'espace poreux rempli d'air dans la couche arable différait dans son efficacité de transport entre les systèmes de travail du sol, avec une organisation plutôt aléatoire dans LT et TCS et une disposition plus continue dans SD. La stabilité structurale de la couche de terre végétale et sa résistance au compactage étaient inversement corrélées avec l'intensité de desserrage du labour.

Le contenu de C-tot et N-tot a montré des corrélations significatives entre les deux régions et tous les systèmes de travail du sol. Des différences comparables entre les systèmes de labour et les régions pour C-tot et le rapport C/N dans l'ensemble des échantillons suggèrent qu'une plus grande contribution de nouvelles matières organiques dérivées de la litière avec de grands rapports C/N favorise des concentrations plus importantes de C-tot dans les deux sites étudiés. Ces résultats de rapport C/N indiquent que nous avons une bonne minéralisation successivement de la MOS dans TCS, SD et LT pour les deux régions, mais à Annaba, il a été

bonne et rapide à la surface et prend un régime lent en profondeur, mais la minéralisation à Sétif a été lente et ne restitue qu'une petite quantité d'azote minéral au sol.

Deux paramètres microbiologiques, la biomasse et la respiration basale, ont été positivement affectés par TCS et ont montré un effet distinct de la date d'échantillonnage, les valeurs les plus élevées étant observées peu de temps après le travail du sol. Des effets spécifiques au site ont également été observés.

Compte tenu des résultats obtenues, il n'a pas été possible d'identifier un système de labour idéal associé uniquement à des effets positifs sur les paramètres de qualité du sol, mais il semble que les TCS ont été identifiés comme un système de labour optimal pour les régions étudiées.

Ces résultats préliminaires de la recherche à la ferme sont de nature expérimentale et doivent être confirmés par d'autres études afin de fournir des recommandations fiables pour les agriculteurs en Algérie.

Mots clés: agriculture de conservation, stabilité structurelle, biomasse, respiration basale

The influence of cultural practices on the physical, chemical and biological properties of soils in two Algerian regions "case of Annaba and Setif"

Abstract

Conservation agriculture is an approach to management of agro-ecosystems for improved and sustainable productivity, thereby conserving natural resources and the environment. It uses minimal soil disturbance (no tillage) and permanent soil cover (mulch) as sustainable cultivation practices for the future. In Algeria, conservation agriculture was introduced only about 10 years ago. In this study, plough tillage (PT), reduced tillage (RT) and no-till (NT) were evaluated regarding their effects on physical, chemical and microbiological soil parameters in an on-farm research approach in two agricultural regions of Algeria (Annaba and Sétif) with differing site and agricultural soil management conditions. Soil samples were taken from fields on commercial farms, at Annaba on soils containing mainly recent clayey alluvium in a Mediterranean climate and at Sétif on soils with limestone rock parent material and a semi-arid continental Mediterranean climate. The interactions between soil structural properties and microbial biomass and activities were examined using disturbed and undisturbed soil samples collected on two occasions from the top 20 cm of soil in all three tillage systems.

The results showed a generally intensive loosening effect of PT compared with RT and NT, which led to lower bulk density and higher porosity. The parameters macroporosity and air permeability demonstrated that the air-filled pore space in the topsoil differed in its transport efficiency between the tillage systems, with rather random organisation in PT and RT and a more continuous arrangement in NT. Structural stability of the topsoil layer and its resistance to compaction was inversely correlated with tillage loosening intensity.

The content of tot-C and tot-N showed significant correlations between in the two regions and all tillage systems. Comparable differences between tillage systems and regions for tot-C and the C/N ratio in the entire set of samples suggest that more input of new, litter-derived organic matter with large C/N ratios promotes larger tot-C concentrations in the study two site. These results of C/N ratio indicate that we have a good mineralization of the SOM in RT, NT and PT successively for the two regions, but in Annaba, it was good and fast on the surface and takes a slow regime at depth, but the Sétif mineralization was slow and only returns a small amount of mineral nitrogen to the soil.

Two microbiological parameters, biomass and basal respiration, were positively affected by RT and showed a distinct effect of sampling date, with the highest values observed shortly after tillage. Site-specific effects were also observed.

Based on the results, it was not possible to identify an ideal tillage system associated with only positive effects on soil quality parameters, but it seems to be the TCS have been identified as an optimal tillage system for the regions studied.

These preliminary results from on-farm research are of a tentative nature and must be confirmed in further studies in order to deliver reliable recommendations for farmers in Algeria.

Key words: conservation agriculture, structural stability, biomass, basal respiration

Remerciements

Avant tout, Louanges à Dieu, le Tout Puissant de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce travail, et surmonter toutes les difficultés, pour terminer ce modeste travail.

La réalisation de cette thèse de doctorat a été une aventure de vie et une occasion de rencontrer des personnes, d'échanger avec elles de nombreuses idées et des connaissances ; de voyager pour acquérir plus d'informations et d'expériences, faire face à beaucoup de difficultés et de stress. Ce travail n'aurait pas pu être réalisé sans l'intervention d'un certain nombre de personnes qui ont contribué de près ou de loin, qui m'ont apporté une assistance précieuse pour me faire avancer tout au long de ce chemin. Je vais essayer ici de remercier tous ces gens, en sachant d'avance que ces quelques lignes ne suffiront jamais à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude pour tous les efforts qu'ils ont déployés durant les années de préparation de ce travail... Le mot « merci » risque de revenir un certain nombre de fois dans ces pages mais c'est le seul mot qui convient pour exprimer toute ma gratitude...

Tout d'abord, je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury pour avoir accepté de se pencher sur cette thèse et de juger mon travail: le Président de jury Pr. DJEMAAI Rachid et les examinateurs Pr. LAIFA Aziz et Pr. FENNI Mohamed.

Je remercie aussi très chaleureusement les personnes qui m'ont encadrée pendant un peu plus de six ans :

Mon directeur de thèse le Pr. BENSLAMA Mohamed, de m'avoir confié ce travail de recherche; l'aide, la contribution et le suivi qu'il m'a apporté durant ces années d'études malgré toutes ses préoccupations. Je le remercie pour ses conseils et pour l'apport de son expérience pour la réalisation de ce travail.

Mon co-directeur de thèse le DR; WEISSKOPF Peter responsable de groupe de recherche « fertilité et protection des sols » à Agroscope Zürich « Suisse » pour son suivi d'abord en stage, puis en thèse malgré la distance géographique. Il m'a permis de traduire les préoccupations spécifiques de la zone d'étude.

Un immense merci à Dr; OBERHOLZER Hans-Rudolf, responsable du laboratoire, biologie du sol, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire de biologie du sol, et d'avoir contribué largement à l'élaboration de ce travail.

Je remercie sincèrement DR, BUERGE Diane responsable du laboratoire de chimie du sol, pour son aide, les orientations et les explications qu'elle m'a apportées lors de mes expérimentations au niveau du laboratoire.

Je poursuivrai en remerciant les membres du Laboratoire du Sol et Développement Durable de l'université Badji Mokhtar Annaba et en particulier la technicienne du laboratoire Belghit Meriem pour son généreux soutien et aide, je lui adresse un immense remerciement.

Je remercie également l'ensemble du groupe de recherche à Agroscope et particulièrement les techniciennes, Marlies Sommer, Susanne Mueller et Andrea Bonvicini pour le soutien et la bonne compagnie pendant toute la durée de mon stage.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Mr Bouaricha Salim le directeur de la Direction des Services Agricoles (DSA) de Annaba, pour son accueil et ses interventions pour m'orienter vers les exploitations agricoles dans les zones arides et semi-arides.

Mes remerciements s'adressent également aux Agriculteurs Mr Said Mahnane à Sétif et Mr Bourjiba Abdelhak à Annaba qui m'ont permis de faire les profils dans leurs fermes.

Je remercie les gens qui m'ont accompagnés et travaillé avec moi sur le terrain pour les prélèvements; pour les très bons moments que nous avons pu passer ensemble, surtout avec mon père et mes frères Mohamed Adnane, Adbelwadoud et Abdeesslam, aussi mon meilleur souvenir allant à ma meilleure amie tout au long de mon cursus Karima, et aussi pour les moments difficiles que nous avons vécu ensemble Malgré tout, cela a toujours été fait dans de bonnes humeurs, ce qui m'a permis de surpasser les difficultés.

Malgré la collaboration avec toutes ces personnes, je ne dois pas oublier l'aide d'autres plus éloignées qui m'ont éclairée avec des idées et fourni des documents intéressants, dont les noms m'ont échappé.

Comme dans une thèse, il n'y a pas que du scientifique, je dois remercier les personnes qui m'ont aidée pour faire les démarches administratives. Donc merci à toute personne qui m'a aidée de près ou de loin et avec un bon cœur.

Enfin un grand MERCI également à ma famille et surtout à mes chers parents d'avoir été toujours présents et m'ont soutenue sans conditions avec beaucoup d'affection durant ces années d'études.

Dédicace

À mon cher **OUAISS**, Que Dieu te protège mon petit frère

Table des matières

ملخص

Résumé

Abstract

Remerciements

Dédicace

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des annexes

Introduction générale

Introduction générale.....1

1. Contexte général.....1

2. Problématique et objectifs de la thèse.....5

3. Organisation du manuscrit de thèse6

Chapitre I Synthèse bibliographique7

1. Les principes de l'agriculture de conservation.....8

1.1. La définition de l'Agriculture de Conservation (AC)8

2. Le développement de travail du sol en agriculture9

2.1. Le travail du sol en agriculture conventionnelle9

3. Les principes fondamentaux de l'agriculture de conservation11

3.1. Le travail minimum de sol.....11

3.2. Couverture permanente des sols12

3.3. Les rotations culturales12

4. Les avantages de l'agriculture de conservation et de semis direct12

4.1. Sur le plan environnemental12

4.2. Sur le plan Agronomique.....14

4.2.1. Un enrichissement des matières organiques des sols en surface14

4.2.2. Une amélioration de la structure du sol et de sa stabilité structurale.....15

5. L'influence des techniques de conservation du sol sur les propriétés physiques du sol.....15

5.1. La texture16

5.2. La structure.....	17
5.3. La densité apparente et la porosité du sol	20
6. L'influence des techniques de conservation du sol sur les propriétés biologique du sol	22
6.1. La biomasse microbienne	23
6.2. Respiration spécifique apparente	24
6.3. La matière organique du sol	25
7. L'influence des techniques de conservation du sol sur les propriétés chimiques du sol	25
7.1. La teneur en C total et N total.....	26
7.1. Azote minérale	27
7.3. Phosphore.....	28
7.4. La capacité d'échanges cationiques et d'autres éléments minéraux.....	28
Chapitre II Matériels et Méthodes	30
1. Présentation des zones d'études.....	31
1.1. Annaba	31
1.2. Sétif	35
2. Description morphologique des profils culturaux dans les deux régions.	37
3. Méthodes de prélèvement des échantillons.....	39
4. Analyses et traitement des échantillons	39
4.1. Les analyses physiques.....	39
4.2. Les analyses chimiques.....	41
4.3. Les analyses microbiennes du sol	43
4.4. Les analyses statistiques	44
Chapitre III Résultats et discussion	47
1. L'influence sur les propriétés physiques.....	48
1.1. L'analyse granulométrique	48
1.2. La densité apparente	48
1.3. La densité réelle.....	49
1.4. La porosité totale	50
1.5. La macroporosité	51
1.6. La perméabilité à l'air.....	53
1.7. Le coefficient de diffusion gazeuse (D_p / D_0).....	55
1.8. La porosité totale perdue à 250 kPa	57
1.9. La macroporosité résiduelle.....	59
1.10. Le coefficient de compression	60

○ Discussion	61
2. L'influence sur les propriétés chimiques	63
2.1. pH _{eau}	63
2.2. Carbone organique.....	63
2.3. Carbone total et Azote total	65
2.4. Les cations échangeables, le taux de saturation et la CEC	67
2.5. Phosphore assimilable	71
2.6. Le calcaire total et le calcaire « Actif ».....	72
○ Discussion	73
3. L'influence sur les propriétés microbiologiques.....	77
3.1. La biomasse SIR.....	77
3.2. Biomasse microbienne FE-C	79
3.3. La biomasse microbienne FE -N.....	80
3.4. La respiration de base 'basale' du sol ou la respiration spécifique	83
3.5. Quotient métabolique qCO ₂	85
3.6. Minéralisation de l'Azote	87
○ Discussion	88
Discussion générale.....	92
Conclusion et perspectives	97
○ Conclusion.....	98
○ Perspectives.....	99
Références bibliographiques	101

Liste des abréviations

AC : Agriculture de Conservation

BM : Biomasse Microbienne

BMC-SIR : C de la biomasse microbienne du sol avec la méthode SIR

CS : Couche Superficielle

C_P : Couche Physique

COS : Carbone Organique du Sol

C-tot : Carbone total

COT : Le carbone organique total

CEC : Capacité d'échange Cationique

Ca²⁺ : Calcium

Cmic : Carbone de la biomasse microbienne du sol

DA : Densité Apparente

DR : La Densité Réelle des particules

D_p : la diffusion de O₂ dans la structure testée (volume poreux rempli d'air de l'échantillon)

D₀ : la diffusion de l'O₂ dans l'air libre (sans structure)

D_p/D₀ : la diffusion d'O₂ dans la structure testée en pourcentage de diffusion dans l'air libre.

E.A.C : Exploitation Agricole Collective

FE : in English (fumigation extraction) Extraction par fumigation au Chloroforme

FE-C : carbone de la biomasse microbienne (avec la méthode Extraction par fumigation au Chloroforme)

FE-N : Azote de la biomasse microbienne (avec la méthode d'Extraction par fumigation au Chloroforme)

hPa : hecto Pascale

H⁺ : Hydrogène

K⁺ : Potassium

kPa : Kilo Pascale

LT : Labour Traditionnel

MOS : Matière Organique du Sol

Mg²⁺ : Magnésium

MP : Macroporosité

MP₃₀ : Macroporosité à 30 hPa

MP₆₀ : Macroporosité à 60 hPa
MPR : Macroporosité Résiduel
MS : matière sèche
N-tot : Azote Total
Na⁺ : Sodium
NOT : L'azote organique total
N-Min : minéralisation de l'azote
PA : Perméabilité à l'Air
Pc : Pré-consolidation
PT : Porosité Totale
PTP : Porosité Totale Perdu
PT : Porosité Total
P_{ass} : Phosphore assimilable
qCO₂: Le quotient métabolique
RBS : Respiration Basale du Sol
SD : le semis-direct
SIR : Respiration induite par le substrat
SS1 : sous-sol 1
SS2 : Sous-sol 2
TCS: les Techniques Culturelles Simplifiées

Liste des figures

Figure 1: Carte de situation géographique des deux zones d'études.....	31
Figure 2: Carte de situation géographique de la région d'Annaba.	32
Figure 3: Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (Annaba).	33
Figure 4: Carte de situation de site d'EL Hadjar.	34
Figure 5: Carte représentative des parcelles (SD, LT, TCS) de la région d'Annaba.	34
Figure 6 : Carte situation géographique de la région de Sétif.....	35
Figure 7 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (Sétif).....	36
Figure 8 : Carte de situation du site Beni-Fouda	36
Figure 9 : Carte représentative des parcelles (SD, LT, TCS) à Sétif.....	37
Figure 10: Les moyennes de la DA pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (Couche Superficielle 1 et 2 « CS1 », « CS2 », Sous-Sol1 « SS1 »et Sous-Sol 2 « SS2 »). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	48
Figure 11 : Les moyennes de la DR pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.....	50
Figure 12 : Les moyennes de la porosité totale pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	51
Figure 13 : Les moyennes de la macroporosité pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.....	52
Figure 14: Les moyennes de la perméabilité à l'air PA pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.....	53
Figure 15 : Corrélations entre le volume des macropores et la perméabilité à l'air à 30hPa pour la couche superficielle	55

Figure 16: Les moyennes de la diffusion de gaz pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	56
Figure 17 : Les moyennes de la PTP pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	58
Figure 18: Les moyennes de la MPR pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	59
Figure 19 : Les valeurs de Casagrande obtenu avec les courbes de précompression pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux et les deux campagnes d'échantillonnage.	60
Figure 20 : Les moyennes de pH eau pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	63
Figure 21: Teneur du COS pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS, SS1, SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	64
Figure 22: Teneur en carbone total C-tot et Azote total N-tot pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	65
Figure 23: Le rapport C/N pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	66
Figure 24: La concentration des cations échangeables [Mg^{2+} , Na^{+} , H^{+} , K^{+} et Ca^{2+}], pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage, et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	68
Figure 25: Le potentielle de la capacité d'échange cationique (CEC) pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.	69
Figure 26: Corrélation CEC/Argile et COS/Argile	70

Figure 27: Le taux de saturation des bases échangeables pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne..... 70

Figure 28: Le phosphore assimilable pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2) , et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne. 71

Figure 29: Le taux en calcaire total (Cal-tot) et calcaire actif (cal-A) pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage, et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne..... 72

Figure 30: Les moyennes de la biomasse SIR pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne. 77

Figure 31: Les moyennes de BM-C FE pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne..... 79

Figure 32: Les moyennes de la BM-N FE pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne. 81

Figure 33: Les moyennes de la RBS pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne..... 84

Figure 34: Les moyennes de le qCO_2 pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne..... 86

Figure 35 : Les moyennes de N-Min pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne..... 88

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classement des textures de Jamagne (1967) selon leur sensibilité au tassement et en fonction de leur classe texturale en condition humide (d'après Remy et Mathieu, 1972). . 17

Tableau 2: Résultats de l'ANOVA pour la DA et la DR. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leurs interactions ((Région*Procédé), (Région*Couche_physique), (Procédé*Couche_physique). 49

Tableau 3: Résultats de l'ANOVA pour la porosité totale. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leurs interactions ((Région*Procédé), (Région*Couche_physique), (Procédé*Couche_physique). 51

Tableau 4: Résultats de l'ANOVA pour la macroporosité. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leurs interactions ((Région*Procédé), (Région*Couche_physique), (Procédé*Couche_physique). 52

Tableau 5: Résultats de l'ANOVA pour la perméabilité à l'air PA. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leurs interactions ((Région*Procédé), (Région*Couche_physique), (Procédé*Couche_physique). 54

Tableau 6: Résultats de l'ANOVA pour la diffusion de gaz. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche _physique..... 56

Tableau 7: Résultats de l'ANOVA pour la PTP. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche _physique..... 58

Tableau 8: Résultats de l'ANOVA pour la MPR. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche _physique..... 59

Tableau 9: Résultats de l'ANOVA pour le pH eau. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction. 63

Tableau 10: Résultats de l'ANOVA pour COS. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction. 64

Tableau 11: Résultats de l'ANOVA pour C-tot et N-tot. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction. 65

Tableau 12: Résultats de l'ANOVA pour le rapport C/N. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction. 67

Tableau 13: Résultats de l'ANOVA pour la concentration des cations échangeables [Mg²⁺, Na⁺, H⁺, K⁺ et Ca²⁺]. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction..... 68

<i>Tableau 14: Résultats de l'ANOVA pour le potentielle de la capacité d'échange cationique (CEC). Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	69
<i>Tableau 15: Résultats de l'ANOVA pour le taux de saturation des bases échangeables. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	70
<i>Tableau 16: Résultats de l'ANOVA pour le phosphore assimilable. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	71
<i>Tableau 17 : Résultats de l'ANOVA pour Cal A et Cal-tot. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	73
<i>Tableau 18: Résultats de l'ANOVA pour la BM-SIR. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	77
<i>Tableau 19: Résultats de l'ANOVA pour la BM-C FE. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	80
<i>Tableau 20: Résultats de l'ANOVA pour la BM-N FE. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	82
<i>Tableau 21: Résultats de l'ANOVA pour la RBS. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	84
<i>Tableau 22: Résultats de l'ANOVA pour le qCO₂. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	86
<i>Tableau 23: Résultats de l'ANOVA pour la N-Min. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.</i>	88

Liste des annexes

Annexe 1-A : Description des profils de différente technique étudiée la région de Annaba au cours des deux prélèvements du terrain.

Annexe 1-B : Description des profils de différente technique étudiée la région de Sétif au cours des deux prélèvements du terrain.

Annexe 2 : Photos assemblées des profils cultureux et les échantillons prélevés de la région d'Annaba en Juin 2014 et novembre 2014.

Annexe 3 : Photos assemblées des profils cultureux et les échantillons prélevés de la région de Séif en Mai 2014 et octobre 2014.

Annexe 4 : Photos assemblées des expérimentations au niveau du laboratoire.

Annexe 5 : Les résultats physiques, chimiques et biologiques.

Annexe 6 : Représentations graphiques des Courbes pressions de consolidation « casagrande ».

Introduction générale

Introduction générale

1. Contexte général

La conservation des sols a été soulignée comme l'un des principaux défis pour la durabilité de l'écosystème agricole, plusieurs mesures ont été indiquées pour favoriser la bonne productivité des cultures et la conservation de la qualité des sols dans les zones agricoles, telles que: l'agriculture biologique, l'utilisation de terrassement des amendements du sol « biochars ou charbon à usage agricole à base de plantes », la rétention des résidus de culture, l'augmentation des ajouts de paille de plantes, la rotation des cultures diversifiées (Kahlon et al, 2013; Moacir, et al, 2015). Préserver la qualité des sols est actuellement une préoccupation forte, car il existe depuis plusieurs années des cadres législatifs stricts de surveillance et de protection de la qualité de l'eau et de l'air. En effet, les premières propositions en terme de qualité et d'utilisation durable des sols n'ont été adoptées qu'au Sommet de la Terre de Rio en 1992 et leurs mises en application a débuté en 1996. Or, à l'instar de l'eau et de l'air qui sont des milieux relativement simples, la qualité des sols est plus difficile à établir, à mesurer et à calibrer du fait de l'extrême complexité et la variabilité naturelle de ce milieu. Plusieurs auteurs ont alors tenté de définir ce que pouvait être la qualité du sol dans le contexte global ainsi (Chaussod., 2002) définie cette qualité par « l'aptitude d'un sol à remplir certaines fonctions vis-à-vis de la production ou de l'environnement, dans un écosystème donné ». La société américaine des sciences du sol (Soil Science Society of America) a pour sa part, retenu la définition suivante proposé par (Karlen et al. 1997) : « La capacité d'un certain type de sol à fonctionner, dans un écosystème naturel ou exploité, à soutenir la productivité des plantes et des animaux à maintenir ou améliorer la qualité de l'air et l'eau et à subvenir aux besoins naturels des humains ». Ces définitions font toutes les deux appel à la notion de fonction des sols. Or le fonctionnement global du sol fait intervenir de très nombreux paramètres d'ordre physique, chimique et biologique.

Historiquement, les sols étaient considérés uniquement en fonction de leur fertilité. La qualité d'un sol est une notion purement subjective souvent influencée par la fonction de production agricole que l'homme peut lui prêter. Les préoccupations sociales actuelles font que les sols ont été intégrés à l'ensemble des problématiques environnementales (Raphel., 2005). L'action de l'Homme sur la couverture pédologique est croissante en termes d'intensité et de superficie (Geoffroy., 2007).

Le travail du sol est une pratique ancestrale (Köller, 2003), qui remplit plusieurs fonctions, il s'agit en premier lieu, de créer un état du sol qui favorise la croissance et le développement de

la culture. Le travail du sol a aussi pour rôle d'enfouir les résidus de récolte et les fertilisants ou l'amendement (Viaux., 1999). Le travail du sol doit être assimilé à une perturbation avec des degrés différents selon l'outil utilisé et la profondeur d'utilisation. (Benvenuti., 2007). Même si l'outil et la profondeur peuvent être liés à la charrue qui effectue un travail souvent plus profond qu'un outil à disques tel qu'un cover-corp (Gaujour., 2010).

Les pratiques culturales évoluent constamment dans le monde des grandes cultures (Eric ,2000). Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) en 2005, les méthodes de travail du sol utilisées de nos jours par la plupart des agriculteurs présente une cause importante d'érosion des sols et de désertification sur de nombreuses terres agricoles. Des systèmes de travail du sol moins intensifs doivent être pratiqués de façon à ménager le sol, à assurer sa fertilité à long terme (LPE, 1983) et à améliorer le rendement économique. Depuis, les résultats de nombreuses recherches dans les différentes zones climatiques du monde qui ont révélé des problèmes communs aux sols labourés: tassement, baisse des teneurs en matières organique 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). Des explications ont été fournies portant notamment sur les aléas climatiques, mais ce seul aspect ne peut éclipser les méfaits de certaines pratiques culturales ayant souvent des objectifs à très court terme. Le système de culture doit permettre une amélioration des productions et en même temps une préservation des ressources naturelles et de l'environnement (Souici., 2010). Entre le maintien du labour et sa suppression, un choix intermédiaire semble mieux plaire aux réticents: sont les systèmes de conservation du sol désigne l'utilisation combinée de plusieurs techniques, il s'agit de réduire les travaux lourds et le maintien des façons superficielles qui permettraient l'ameublissement de la surface du sol sans la retourner complètement: ce sont les Techniques Culturales Simplifiées (TCS), sont un ensemble de techniques de travail du sol allant du pseudo-labour au semi direct en passant par le travail superficiel (ADEME 2007). L'agriculture de conservation (AC) désigne l'utilisation combinée de ces techniques. Du strict point de vue du travail du sol, on parle de techniques culturales simplifiées (TCS) et plus récemment de travail sans labour (TSL) (Goulet., 2008). Elle est encouragée par les organisations internationales et non gouvernementales comme un moyen de surmonter les contraintes de la production agricole, inverser la dégradation des sols, le coût de l'énergie financière (Corbeels et al., 2013) et l'atténuation des impacts du changement climatique (Monnier, 1994), l'AC fournit de nombreux services instrumentaux dans l'amélioration de la productivité agricole de l'écosystème: la réduction des insuffisances

d'humidité, briser les cycles de ravageurs et de maladies, ce qui minimise les mauvaises herbes, l'amélioration de la biodiversité du biote du sol, ce qui réduit l'érosion des sols, et l'augmentation de la séquestration du carbone, l'amélioration de leur capacité de production (fertilité et de la qualité) et le développement de leur capacité de production grâce à des pratiques appropriées. (Kassam et al, 2009; Bellemou ;2012). Les agriculteurs de conservation considèrent que la compréhension et le respect du fonctionnement naturel du sol sont les piliers d'une agriculture durable respectueuse de l'environnement (Goulet., 2011). 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 telle que le semis direct (SD), les techniques simplifiées (TS) ou techniques culturales simplifiées (TCS) (Abbasi et Hemmat, 2000). Dans ce contexte, le SD a été considéré comme l'une des pratiques de gestion les plus importantes pour permettre l'intensification des cultures durables pour répondre aux besoins agricoles au futur et au présent, pour préserver la qualité du sol en réduisant l'érosion des sols, l'augmentation de la teneur en carbone organique du sol et la biodiversité, (Moacir, et al., 2015), la formation de la structure du sol et l'activité biologique (P. Weiskopf et al., 2013).

Un des objectifs principaux des techniques de conservation de la qualité des sols est l'amélioration de la structure du sol et ses fonctions. La structure de sol est un composant complexe de qualité de sol, en partie selon des caractéristiques de site comme la distribution de dimension particulaire, la minéralogie d'argile, les minéraux disponibles, le pH, le type et la teneur en la matière organique, du régime de l'eau ou du climat, mais également sur des influences anthropogènes liées à la gestion d'utilisation de sol. Les propriétés structurelles des sols agricoles changent constamment, d'une part en raison des effets des pratiques de gestion tels que le labourage, la fertilisation ou le trafic de champ (Yang et al, 2008 ; Obalum et Obi, 2010), d'autre part causé par des facteurs de formation naturelle de structure tels que des conditions atmosphériques et les activités des organismes de sol (Weiskopf et al, 2010).

Cependant, en plus des conséquences physiques de compactage du sol, sur les propriétés physiques et mécaniques de la structure du sol, les effets de la structure du sol sur les propriétés et les processus sol biochimiques et biologiques (ex: sur le «sol vivant de l'environnement») devraient également être considérés afin de trouver les paramètres pertinents pour une évaluation fonctionnelle des conséquences de compactage du sol, on a besoin d'informations nécessaires et du temps suffisant pour reconnaître les interactions entre

la structure physique du sol et la stabilité des agrégats, et cela exige a priori reconnaître l'ensemble des racines des plantes, le pourcentage des pores remplis de l'eau et d'air, respectivement, ainsi que les caractéristiques importantes pour l'environnement du sol. Le régime physique de l'eau est déterminé par l'eau et l'oxygène disponible, les organismes du sol et les racines des plantes, ce qui entraîne des conséquences sur l'activité biologique du sol, les voies métaboliques favorables, et donc indirectement aussi sur les propriétés du biochimiques comme l'état d'oxydo-réduction chimique et ses effets sur la disponibilité et la mobilité des substances comme des nutriments, les micro-nutriments ou contaminants du sol. Une compréhension plus profonde de la formation des structures et des processus s'intéresse beaucoup plus (i) à une description complète de la qualité souhaitable de la structure de sol, (ii) sa dépendance sur des facteurs externes, des états de site et la gestion agricole de sol, et (iii) l'importance de l'état structurel de sol pour le fonctionnement et la qualité de sol (Weisskopf et autres, 2010). Par conséquent, des paramètres biologiques ensemble avec des propriétés chimiques et physiques du sol sont reconnus comme nécessaires pour évaluer globalement la qualité des sols affectés par des changements dans les activités de gestion (Parkin et al., 1996).

Un certain nombre d'études ont été menés en système conventionnel pour appréhender l'impact de ces techniques sur la qualité des sols. En Afrique du Nord, les sols sont extrêmement variés en raison de la diversité des substrats géologiques et des topographies mouvementées qui continuent à évoluer sous l'effet du climat et de l'homme (Kassam, 1981). Les sols y conditionnent l'agriculture et son avenir sous trois aspects : le maintien de leur existence (lutte contre l'érosion), l'amélioration de leur capacité de production (fertilité et qualité) et la mise en valeur de leur capacité productive par des pratiques appropriées (Bellemou; 2012). AC est encore au stade embryonnaire alors qu'au Maroc (Mrabet, 2001) et en Tunisie (Raunet, 2002). Cette technique qui se développe chez quelques Agriculteurs en Algérie et principalement dans les régions suivantes : (Sétif, Annaba, Guelma, Bouira, et Mila), depuis l'année 2002, mais la plus grande part des travaux concerne les aspects phytotechniques (rendement, contrôle des résidus, contrôle des mauvaises herbes, la recherche de techniques nouvelles susceptibles à réduire la charges par hectare et d'améliorer, en même temps, leurs revenus. (Bouguendouz ; et al 2012). Avec l'introduction de nouvelles techniques culturales de sol basées sur les techniques simplifiées, on s'est attendu à ce qu'elles atteignent plusieurs buts : une production agricole dans l'environnement saine et viable (Bouzrara et Feroukh, 2010), la conservation et même l'amélioration de la fertilité du sol (Lahmar, 2007,

Lahmar et Bouzerzour, 2010), et une augmentation de la productivité des cultures et de la rentabilité économique globale de l'agriculture (Mekhlouf et al, 2011, Bouguendouz et al, 2012). Les études ont montré des effets significatifs des systèmes de labourage sur des caractéristiques structurales de sol. Ces effets ont été attribués à plusieurs facteurs, tels que le climat (Munkholm et al, 2013), la texture de sol (Alvarez et Steinbach, 2009), le contenu de matière organique (Mahboubi et al, 1993), la période d'échantillonnage (Tangyuan et al, 2009), le système d'exploitation agricole (Munkholm et al, 2013), et l'intensité du trafic de champ (Mahboubi et al, 1993 ; Logsdon et al, 1999).

En Algérie, les phénomènes de la dégradation et de l'érosion physiques de sol sont particulièrement apparentés aux déficits d'eau dans la production de grain sur les hautes plaines. De nouveau, ces problèmes sont tracés aux pratiques agricoles inadéquates et à la surexploitation de la terre. Ce qui n'est pas conforme à l'évolution pédoclimatique. La technique de gestion du labourage du sol en jachère a atteint ses limites de croissance de production met également une question dans les phénomènes de la dégradation de sol sur ces régions. En fait, les sols labourés sont sujets à l'érosion et à une baisse dans la fertilité du sol (Fortas, et al 2013).

2. Problématique et objectifs de la thèse

La problématique posée dans cette thèse est l'étude de l'impact des différentes pratiques de travail du sol en agriculture de conservation (AC) sur le comportement et les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Les pratiques de mises en place d'une culture : tel que le travail du sol classique dit « conventionnel », les techniques culturales simplifiées, et particulièrement le travail du sol sans labour qui se trouve négligé dans la recherche en Algérie.

Dans cette problématique, deux sites expérimentaux avec des conditions agro-pédoclimatiques et historiques différentes ont été retenus (Annaba et Sétif); sur lesquels est étudié trois techniques de travail du sol, qui sont différentes par le degré de fragmentation de la couche arable, par l'effet de retournement ou non de la couche du sol travaillé, par leur degré de mélange de la matière organique au sol et par le tassement du sol sur chacun des deux sites. Ce travail soulève plusieurs objectifs relatifs aux modifications structurales, chimiques et biologiques engendrées par le travail du sol à savoir :

- L'évaluation des effets des trois techniques de travail du sol (labour traditionnel (LT), les techniques culturales simplifiées (TCS), et le semis-direct (SD) sur les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques.
- L'examinations des interactions entre les paramètres (technique de travail du sol en fonction de la région) en caractérisant la structure du sol, la biomasse microbienne et les activités microbiennes du sol.
- La connaissance des effets de ces pratiques sur la teneur en carbone totale, l'azote totale, la qualité chimique et environnementale du sol.
- La caractérisation des systèmes de travail du sol en fonction de leurs effets sur la qualité des sols dans les deux régions.

3. Organisation du manuscrit de thèse

Cette thèse est composée de 4 chapitres dans lesquels on doit répondre à notre problématique et nos objectifs :

Le premier chapitre a pour objectif de faire une synthèse bibliographique sur l'impact de travail du sol, sur les différentes propriétés du sol. Ce chapitre est scindé en plusieurs sous-titres, pour décrire le travail du sol en agriculture de conservation, tout en détaillant son effet sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques de sol.

Dans le deuxième chapitre, on présente les deux zones étudiées avec les sites correspondant ainsi que les méthodes mises en œuvre pour traiter notre problématique et répondre à nos objectifs de thèse. On décrit aussi les méthodes de prélèvements sur terrain, les méthodes d'analyses au laboratoire et les méthodes d'analyses statistiques.

Le troisième chapitre est divisé en trois parties dans lesquelles nous allons répondre à chacun des objectifs de la thèse cités précédemment, avec des détails d'interprétation suivis d'une petite discussion selon les cas de chaque région dans l'intention de quantifier l'influence sur chaque propriété du sol.

Enfin, la discussion générale, résume les résultats obtenus dans le troisième chapitre avec des réponses de l'objectif principal de la thèse, suivi d'un petit rappel des principaux résultats obtenus. Ainsi qu'une discussion comparative entre les différentes pratiques culturales étudiées dans les deux régions.

Finalement, une conclusion générale envisageant les perspectives de recherche à mettre en œuvre pour répondre à l'objectif principal de cette thèse.

Chapitre I Synthèse bibliographique

1. Les principes de l'agriculture de conservation

1.1. La définition de l'Agriculture de Conservation (AC)

Le terme « Agriculture de Conservation » (des sols) est le terme générique à employer. Sa définition a été retenue lors du « First World Congress on Conservation Agriculture : a world wide challenge » qui se tenait à Madrid du 1-5 octobre 2001. Cette définition est la suivante :

- Absence de retournement profond du sol et implantation des cultures en semis direct.
- Maintien d'un couvert végétal permanent (mort ou vivant).
- Adoption judicieuse de cultures dans une rotation suffisamment longue.

Le semis direct est un facteur essentiel de l'agriculture de conservation. Cependant, la présence d'un couvert végétal permanent et les cultures présentes dans la rotation doivent être absolument compatibles de cette technique d'implantation (Benites et Ashburner, 2001). En d'autres termes, l'agriculture de conservation a pour objectif de conserver, d'améliorer et de mieux utiliser les ressources naturelles liées à la gestion des sols, de l'eau, et de l'activité biologique (Derpsch, 2001). L'AC n'est pas un but en elle-même mais plutôt un concept : la gestion de la fertilité des sols est l'objectif final (FAO, 2001).

L'agriculture durable (« sustainable agriculture » en anglais) est un des aspects du développement durable. Selon (Girardin.,1993), le concept couvert par « sustainable agriculture » dans les pays anglophones se traduirait plutôt par « agriculture intégrée » en Europe. La première définition de l'agriculture intégrée a été proposée en 1977 par des zoologistes et des agronomes à partir de leur expérience de lutte intégrée en vergers. Selon eux, l'agriculture intégrée est « un mode de production comportant la mise en œuvre des techniques les plus conformes à des exigences d'ordre économique et écologique dans la perspective d'optimiser la qualité des produits qui en sont issus » (Girardin., 1993).

Cette définition souligne 4 idées fortes correspondant à des modes de production :

- Economiquement viables.
- Respect de l'environnement et préservant les ressources naturelles.
- Assurant la qualité des produits et limitant les risques pour la santé humaine.
- Permettant une bonne intégration sociale des personnes intervenant dans le processus de production et de transformation.

Selon Girardin (1993), à partir du moment où les décisions relatives à l'exploitation sont prises non seulement selon des critères économiques, mais en tenant également compte d'objectifs concernant l'environnement ou la qualité des produits (gestion raisonnée des intrants, mise en place de techniques de lutte intégrée ou de pratiques anti-érosives), l'exploitant pratique l'agriculture intégrée. L'agriculture de conservation, au travers de la gestion de la fertilité des sols et de la lutte contre l'érosion est donc l'un des moyens à mettre en œuvre pour pratiquer une agriculture intégrée. Nous allons présenter les atouts de l'agriculture de conservation du point de vue environnemental, agronomique et économique.

L'AC se définit comme un non retournement du sol. Le semis des cultures se fait dans un couvert vivant ou mort. Ces caractéristiques ont des impacts au niveau du sol, de l'agronomie, de l'environnement et de l'économie. Les termes relatifs aux techniques de travail du sol employés dans les différentes références mentionnées sont ceux utilisés par les auteurs. Par manque d'informations, les termes n'ont pas été redéfinis selon la terminologie qui se trouve dans le lexique. Des études portant sur les Techniques Culturelles Simplifiées, le terme utilisé en France pour désigner les pratiques de non retournement du sol.

2. Le développement de travail du sol en agriculture

2.1. Le travail du sol en agriculture conventionnelle

2.1.1 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 diminuer les coûts de production en plus de l'amélioration de la qualité (aspect) des produits (Monnier, 1994a). Les problèmes de fertilité des sols communs aux sols labourés (baisse des teneurs en MOS, 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 dans 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). En 2008 la superficie des terres cultivées sous ce système à atteint 150 millions d'hectares soit environ 7 pour cent des terre cultivable dans le monde. (Derpsch., 2009). Ces techniques se sont d'abord et surtout développées aux Etats-Unis et ont rapidement gagné l'Amérique du sud, notamment le Brésil entre 1969 et 1972 et en 1981 et 1982 dans la zone tropicale du 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). Cependant, les travaux de recherche et de développement sur l'agriculture de conservation et particulièrement sur le semis direct en Algérie sont très limités. En effet, comparativement au Maroc (25 ans de recherche) et à la Tunisie (15 ans de recherche) où ce système a été testé et où les superficies qui lui sont réservées ne cessent pas de s'accroître (Zaghouane et al., 2006), l'Algérie, n'a démarré des études sur le système du semis direct que depuis 2002 (Bouguendouz, ; et al 2012). Selon, Bouzerzour et al., 2006, a eu l'idée d'introduire ces techniques directement aux niveau des exploitations. Elle a évoluée par la suite pour se matérialiser en la création d'une association entre les chercheurs et Agriculteurs poursuivant le même objectif.

Les premiers travaux de recherches sont réalisés par Mahdi, 2004 et Beram, 2004 dans les conditions pluviales le premier à travailler sur le blé et le deuxième sur la luzerne, depuis plusieurs travaux sont réalisés en particuliers dans les conditions de semi-arides de Sétif dont on trouve les travaux de Bouzerzour et al., 2006 et dans les conditions pluviales dont, Abdellaoui et al., 2006 et Zaghouane et al., 2006 et bien d'autres.

3. Les principes fondamentaux de l'agriculture de conservation

3.1. Le travail minimum de sol

Le système de labour simplifié du sol comprend un gradient continu allant de réduction du nombre de passage d'outils aratoires jusqu'à l'élimination complète de toute action mécanique sur le sol. La perturbation ou la manipulation du sol doit respecter la présence d'un mulch d'au moins 30% de sol couvert et l'élimination de toute action de retournement ou mixage des horizons. Il s'agit surtout d'utilisation d'outils à dents ou à lames, la situation extrême est le zéro-labour ou semis direct. (Mrabet, 2001b).

Selon, Coufourier., 2008, on distingue différentes techniques sans labour selon le degré de travail du sol :

Le décompactage : Le sol n'est pas retourné mais un travail est réalisé à la même profondeur que le labour soit sans mélange des horizons (outils à lames obliques ou droites), soit avec mélange des horizons (cultivateurs lourds, on parle alors de pseudo- labour).

Le déchaumage profond : Le sol est mélangé sur 10 à 20 cm, et le déchaumage superficiel : Le sol est mélangé sur moins de 10 cm.

Le semis direct / non-labour : Le semis direct est une simplification plus poussée du travail du sol, qui consiste à planter une culture sans travail préalable du sol, tout en effectuant une ouverture dans le sol pour déposer la semence à la profondeur souhaitée et ceci afin d'assurer à la graine les conditions les plus favorables, à la germination, à la levée et à la croissance pour obtenir les rendements escomptés. Cette simplification du travail se caractérise par une absence totale d'un outil aratoire. (Mrabet, 2001a). D'après, Benites et Ashburner, 2001, le semis direct est un facteur essentiel de l'agriculture de conservation. Cependant, la présence d'un couvert végétal permanent et les cultures présentes dans la rotation doivent être absolument compatibles à cette technique d'implantation. Le semis direct est plus qu'une technique c'est un système, il est basé sur quatre principes :

- La suppression totale du travail du sol y compris le labour.
- La couverture permanente du sol par des résidus de récolte.
- Le semis avec un semoir spécial à travers cette couverture de résidus.
- Le contrôle des mauvaises herbes par des herbicides.

Sous-systèmes classique des mauvaises herbes sont maîtrisés par des labours, mais aussi avec des herbicides. Toutefois, en semis direct, seul l'option chimique, intégrée à la pratique de la rotation des variétés compétitives, est possible. (Mrabet, 2001b).

3.2. Couverture permanente des sols

Le second principe consiste à ne jamais laisser le sol à nu ou le maintien permanent d'une couverture végétale sur les sols. La couverture permanente est assurée par un mulch végétal vivant (plantes de couverture) ou mort (paille). Elle peut se faire de différentes façons :

- Maintien sur le sol des résidus de la culture précédente.
- Présence d'une végétation naturelle.
- Installation des plantes cultivées (cultures intercalaires ou dérobées) qui en dehors de leur fonction de protection du sol peuvent également être utilisées pour l'alimentation humaine ou du bétail. (FAO.2007).

3.3. Les rotations culturales

La rotation des cultures est tout aussi importante que le maintien d'une couverture végétale en surface. C'est la troisième porte d'entrée et souvent la dernière à l'agriculture de conservation car la plus difficile (Thomas et Archambeau, 2011). La rotation des cultures n'est pas seulement nécessaire pour assurer la couverture des besoins des micro-organismes du sol en éléments nutritifs. Grâce à la différence entre les systèmes racinaires des cultures utilisées, la rotation culturale opère comme une pompe biologique dans la mesure, car elle permet de remonter et de recycler les éléments minéraux situés dans les couches profondes du sol. Cette fonction est importante pour limiter les fuites hors système cultivé et pour améliorer ou restaurer les sols pauvres afin de les rendre productifs.

4. Les avantages de l'agriculture de conservation et de semis direct

L'AC présente un grand potentiel pour tous les types d'exploitations agricoles et d'environnements agro-écologiques, c'est un moyen de concilier la production agricole, amélioration des conditions de vie et protection de l'environnement.

4.1. Sur le plan environnemental

4.1.1. Limitation de l'érosion

L'érosion est la dégradation de la surface du sol sous l'action de l'eau et de l'air. Il existe plusieurs formes d'érosion : hydrique, éolienne et mécanique. Environ 3 millions d'hectares des terres arables disparaissent progressivement chaque année dans le monde (Benmansour et al., 2006). Les facteurs d'influence des phénomènes d'érosion sont la morphologie du terrain,

les propriétés du sol et le climat ainsi qu'une exploitation intensive et imprudente des terres agricoles ou encore par la mauvaise gestion des champs agricoles (Nouira et al., 2007). Par contre les techniques de travail du sol peuvent limiter ses influences. (Chevrier et Barbier, 2002). Le taux de recouvrement du sol par les résidus est très élevé en semis direct, ce qui correspond à un effet protecteur important du couvert végétal et donc à une limitation de l'érosion. (Chevrier et Barbier, 2002), le fait de ne plus travailler le sol et d'implanter une couverture végétale ou d'avoir un mulch permet une meilleure stabilité du sol. En outre la compaction ou le tassement des sols sont d'autant plus limités que la présence de couvert végétal ou de mulch est importante (INRA, 2004). Le travail du sol en semis direct conduit à des taux d'érosion plus faible par rapport au labour conventionnel. Donc cette technique constitue une mesure efficace pour protéger les sols contre l'érosion, réduisant ainsi les charges de sédiments contaminés évacués vers les cours d'eau. (Nouira et al., 2007).

4.1.2. L'amélioration et protection de la qualité des eaux

Parmi les avantages de l'AC la limitation de la pollution des eaux de surface par les substances fertilisantes et les résidus des produits phytosanitaires a un fait sur la réduction de l'érosion. En plus elle contribue à limiter la pollution des eaux par le lessivage de nitrates en réduisant la lixiviation de l'azote, car la minéralisation de l'azote contenu dans les matières organiques est ralentie tant à l'automne qu'en printemps. (Chevrier et Barbier, 2002). Selon Viaux, 1999, la présence d'un couvert végétal vivant pendant la période hivernale permet donc, en complément de TCS, de limiter la lixiviation des nitrates dans le sol pendant les périodes pluvieuses de l'hiver. De plus la présence de couvert végétal augmente l'adsorption et la dégradation des matières actives, ce qui réduit la fuite de cette dernière dans le milieu. En outre, d'après les travaux de Abdellaoui et al., 2006, la couverture du sol a permis de limiter l'évaporation du sol suite à la limitation de la remontée par capillarité de l'eau contenue en profondeur de sol.

4.1.3. Un accroissement de la biodiversité et de l'activité biologique

Les TCS favorisent l'augmentation de l'activité biologique du sol au travers de deux phénomènes :

La concentration des matières organiques en surface favorise sa décomposition et sa minéralisation par voie biologique

L'absence de retournement et la réduction du travail du sol réduisent le stress mécanique du milieu et minimisent la destruction des micro-habitats. (Chevrier et Barbier, 2002). D'après,

Granval et al.,(1993), quand on ne travaillant plus le sol, on constate que la biomasse lombricienne est presque multipliée par cinq. Ainsi, la présence de cultures intermédiaires dans des systèmes en travail minimum contribue également à l'accroissement de leurs populations.

Cependant, les galeries générées par les pérégrinations lombriciennes, favorisent un meilleur drainage et stabilisent le sol, évitant ainsi l'érosion. En outre, le maintien d'un couvert permanent sur le sol fournit un habitat pour plusieurs espèces qui se nourrissent des pestes, et qui vont à leur tour attirer des insectes, les oiseaux et d'autres animaux. La rotation des cultures et des plantes de couverture permet de maintenir et d'augmenter la biodiversité génétique contrairement à un système de monoculture (Chevrier et Barbier, 2002).

4.1.4. Une contribution à la réduction de l'effet de serre

Il est aujourd'hui largement admis que l'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre contribue au processus de réchauffement climatique. L'agriculture serait responsable de 30% des émissions des gaz à effet de serre dans le monde, dont 25% des émissions de CO₂ et 70% des émissions de NO₂ (FAO, 2001). Les systèmes agricoles basés sur le maintien d'un couvert végétal et le non labour du sol stockent plus de carbone, comparé aux quantités que les systèmes utilisant le labour à la charrue. Pendant les premières années de mise en œuvre de l'AC, l'accumulation de la matière organique du sol augmente en raison de la décomposition des racines, et des résidus de cultures qui restent à la surface du sol. La décomposition de la matière organique est lente, et une bonne partie est incorporée dans le profil du sol, conséquemment la libération du carbone dans l'atmosphère est ralentie. Dans le bilan global, le carbone est piégé dans le sol. (Chevrier et Barbier, 2002). L'AC est dit une « agriculture de carbone ». Elle présente un grand intérêt pour la réduction des émissions des gaz à effets de serre grâce : au stockage du carbone dans la matière organique, à la réduction de l'érosion, à la réduction de la consommation des carburants et, à terme, un recours limité à la fertilisation azotée. Son intérêt pour la prévention des effets désastreux du réchauffement climatique est avéré. (FAO, 2007).

4.2. Sur le plan Agronomique

4.2.1. Un enrichissement des matières organiques des sols en surface

Les techniques de conservation des sols contribuent, par le non retournement des sols, à localiser les matières organiques en surface. Cependant, l'accumulation des résidus des cultures entraîne une augmentation de la matière organique du sol. Dans un premier temps,

ceci se limite à la première couche superficielle du sol, mais avec le temps ce phénomène va toucher les couches en profondeur. La matière organique joue un rôle important dans le sol : utilisation des engrais, capacité de rétention d'eau, agrégats du sol et environnement du système racinaire sont fortement influencés par la teneur du sol en matière organique. (Chevrier et Barbier, 2002, et Bénites, 2001).

Bessam et Mrabet, 2001, démontre que l'état de la matière organique et l'activité biologique sont les pivots de l'amélioration de la structure du sol sous semis direct avec couverture de résidus. Ce système présente un taux de matière organique toujours plus élevé.

4.2.2. Une amélioration de la structure du sol et de sa stabilité structurale

Les techniques de conservation des sols contribuent tout d'abord à protéger le sol des « accidents structuraux ». En effet, la formation du mulch augmente la densité de la couche arable, ce qui a pour conséquence d'améliorer la résistance du sol au tassement et de limiter la battance. (Chevrier et Barbier, 2002.; Mrabet et al., 2001c). Avec l'adoption des techniques de conservation des sols, la structure du sol se modifie progressivement pour atteindre un profil cultural continu après quelques années. Il a été constaté que la semelle de labour est ameublie sous semis direct (par les nombreux canaux de vers de terre reliant la surface aux couches inférieures du sol). Selon Chervet et al., 2000, les techniques de semis direct sont une nouvelle démarche agronomique qui vise à développer, voir restaurer le sol vers une fertilité naturelle. Cette amélioration de la fertilité du sol s'appuie sur une redynamisation organique des sols et une restructuration de sa partie superficielle qui, au lieu d'être sensible à la dégradation deviendra un support pour une agriculture durable (Mrabet et al., 2001a). D'après, Guerif, 1991, les changements de la stabilité de la structure peuvent être détectés après deux à trois ans du changement de pratiques culturales, l'équilibre est atteint en trois années seulement.

5. L'influence des techniques de conservation du sol sur les propriétés physiques du sol

De nombreux chercheurs ont constaté que l'étude physique du sol en agriculture, fournissant une description de ces processus constitue ainsi un instrument indispensable à une bonne gestion des sols, non seulement du point de vue de l'amélioration de la production végétale, mais également à l'égard de leur protection et de leurs conservation (Musy et Soutter ; 1991). La protection physique des sols touche plusieurs domaines : le compactage encore appelé « le tassement » du sol, qui résultant de la pression exercée aux passages de machines lourdes, correspond à une réduction de la densité apparent d'un sol qui se traduit par une augmentation

de la masse volumique et inversement par une diminution de la porosité ou de l'indice des vides. Lorsque la réduction du volume de pores s'accompagne d'une expulsion d'eau, on parle de consolidation. D'autre part, la diminuant la perméabilité du sol à l'eau et à l'air ; l'érosion hydrique ou éolienne provoquant des pertes irréversibles de matériaux terreux ; le décapage, le stockage et le remblai de terre liés à l'exploitation de matières premières et aux travaux de chantier ; l'affaissement des sols organiques après des corrections des eaux souterraines à grande échelle (Tobias, et al.,1999).

Le passage des engins agricoles entraîne un tassement provoquant une diminution et une réorganisation de la porosité structurale des sols. (Richard et al., 2001) soulignent qu'en contexte tassé, la manière dont les pores structuraux sont connectés évolue. Le tassement induit une déconnection de certains pores structuraux, ce qui réduit les chemins d'infiltration de l'eau. Cette diminution de la porosité induit la conductivité hydrique à saturation (Assouline et al ., 1997).

Le passage répété des outils de travail agricole, notamment la charrue, peut induire la formation d'une semelle de labour en profondeur (entre 20 et 30 cm, selon la profondeur du labour). Il s'agit d'une très fine couche (cm) très compacte qui a été lissée par les outils (Tebrugge et During, 1999). Elle est caractérisée par une très faible infiltrabilité qui contraint les exploitants à travailler le sol plus profondément (sous-solage, décompactage) afin de restaurer l'infiltrabilité du profil (Soltner,2000).

Toutes ces contraintes données appliquées en surface, certains sols résistent plus que d'autres au tassement. Cette résistance mécanique du sol dépend de ses propriétés mécaniques caractérisées par la courbe de compression. Ces propriétés varient dans le temps, notamment avec les variations de la teneur en eau. Nous décrivons les différents facteurs qui ont un effet sur les paramètres mécaniques.

5.1. La texture

La texture des sols joue un rôle complexe sur la sensibilité au tassement car un sol n'est jamais constitué d'un seul type de particules. En effet, la capacité de portance d'un sol, caractérisée par la pression de pré-consolidation P_c , a tendance à augmenter, lorsque la teneur en argile augmente (seulement dans des conditions sèches). Imhoff et al. (2004) expliquent cet effet par les propriétés des argiles qui ont la faculté d'augmenter les forces de cohésion entre les particules solides. Cependant, Larson et Gupta (1980) observent une augmentation du

paramètre Pc jusqu'à un certain point : au-delà de 33 % d'argile le paramètre Pc diminue. Smith et al. (1997).

De manière générale et en condition humide, les sols sableux sont moins sensibles au tassement que les sols argileux car l'argile affecte les propriétés mécaniques des sols (Imhoff et al., 2004). Horn et al. (2005). Un sol à texture limono-sableuse est très vulnérable au tassement du fait de l'arrangement des grains sableux (particules grossières) laissant des interstices facilement comblés par des particules de limon (particules fines) (Dexter, 2004). Remy et Mathieu (1972) expliquent que plus la granulométrie d'un sol est variée, plus il est sensible au tassement. Le tableau N°1 montre la classification des textures définies par Jamagne (1967) des moins sensibles au plus sensibles au tassement.

Tableau 1 : Classement des textures de Jamagne (1967) selon leur sensibilité au tassement et en fonction de leur classe texturale en condition humide (d'après Remy et Mathieu, 1972).

texture	sensibilité au tassement					
	très faible	faible	modérée	assez importante	importante	très importante
Sable						
Limon léger						
Limon léger sableux						
Argile sableuse						
Argile lourde						
Sable limoneux						
Sable argileux						
Limon moyen						
Limon moyen sableux						
Argile						
limon sableux						
Limon argileux						
Limon sablo-argileux						
Argile limoneuse						
Limon argilo-sableux						

5.2. La structure

La structure du sol est un concept qualitatif, qui fait référence à une propriété du sol intégrative. La définition la plus acceptée est celle de Dexter (1988) qui est très générale mais prend en compte les différents aspects de la structure qui se manifestent à différentes échelles : «La structure de sol est l'hétérogénéité spatiale des différents constituants ou

propriétés du sol». Dexter (1988) propose donc que la structure est un synonyme de l'arrangement de particules ou propriétés à toutes les échelles.

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 compactions 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).

Donc la structure du sol définit la façon dont le sol est organisé dans l'espace (Dexter, 1988) et dans le temps (Roger-Estrade, 1995). Cette organisation peut s'évaluer à différentes échelles et selon des processus différents Kay (1990), propose une description de la structure du sol en trois composantes : la stabilité, la résistance et la forme.

5.2.1. Facteurs influençant la stabilité structurale

Les principales propriétés du sol influençant la stabilité structurale, ont fait l'objet de nombreuses études et revues (Le Bissonnais, 1996b ; Kay, 1997 ; Bronick et Lal, 2004). Les principales caractéristiques sont les suivantes :

- La texture du sol, la stabilité structurale augmente avec la teneur en argile principalement en condition humide du sol, sans toutefois qu'il soit possible d'établir de corrélations significatives généralisables à tous les types de sols (Le Bissonnais., 1996b). L'effet de la teneur en argile dépend en particulier de la teneur en eau (Gollany et al., 1991). Les sols limoneux et sableux sont plus fragiles que les sols argileux.
- La minéralogie des argiles, le type d'argile joue un rôle ambivalent sur la stabilité structurale. Les argiles avec une capacité d'échange cationique forte induisent des agrégats plus résistants, car elles offrent une surface de contact plus importante, mais elles peuvent se disperser plus facilement quand les conditions s'y prêtent (Samuel., 2004).
- La matière organique. La matière organique influence la stabilité structurale par plusieurs mécanismes. Elle joue le rôle de liant entre les particules et modifie les propriétés hydriques du sol. Certaines études montrent une relation directe entre la teneur en carbone total et la

stabilité structurale (Dutartre et al., 1993 ; Le Bissonnais et al., 2002). Mais ce n'est pas toujours le cas, selon le type de sol (par exemple Martens, 2000b ; Kushwaha et al., 2001) ou le test de mesure de la stabilité structurale utilisé (Le Bissonnais et al., 1995 ; Le Bissonnais et Arrouays, 1997 ; Chenu et al., 2000), suggérant ainsi que la relation n'est probablement pas linéaire et dépend de la nature des interactions particules minérales de sol – matière organique (Le Bissonnais, 1996b). Autrement, la présence d'un mulch en surface dans les systèmes de conservation augmente également la stabilité structurale des sols (Kandeler et Murer, 1993 ; Balesdent et al., 2000), protège les sols des fortes pluies et limite les phénomènes de battance et les risques d'érosion hydrique (Rasmussen, 1999 ; Tebrügge et Düring, 1999 ; Köller, 2003 ; Blanco-Canqui et Lal, 2007). 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).

5.2.2. Facteurs influençant la résistance mécanique du sol

Le plus souvent, on la caractérise par la densité apparente car c'est une variable facile à mesurer. Il existe, cependant, d'autres variables plus difficiles d'accès qui la caractérisent (indice des vides, volume spécifique,...). Les paramètres mécaniques P_c et C_c sont influencés de manière linéaire et avec une corrélation étroite par la densité apparente : l'indice de compression (C_c) diminue et la pression de pré-consolidation P_c augmente avec la masse volumique (Lebert et Horn, 1991 ; Alexandrou et Earl, 1998 ; Canarache et al., 2000 ; Imhoff et al., 2004 ; Rücknagel et al., 2007). Imhoff et al. (2004) expliquent que l'augmentation de la masse volumique du sol réduit d'une part, les possibilités de réarrangement des particules de sol, ce qui rend le sol de moins en moins sensible au tassement, et augmente, d'autre part les forces de friction internes du sol, ce qui augmente sa capacité de portance. Alexandrou et Earl (1998) observent que l'effet de la masse volumique sur le paramètre P_c varie avec la teneur en argile des sols. Il semble que les effets de la masse volumique soient plus importants pour les sols sableux que pour les sols argileux. D'après Lebert et Horn (1991), ce serait dû au fait que la teneur en argile a une tendance de diminuer la masse volumique du sol en augmentant la porosité et le contact entre les particules de sol (renforce l'agrégation du sol). La pression de pré-consolidation est donc moins influencée par la masse volumique dans les sols argileux.

○ La matière organique

Le rôle direct de la matière organique dans les phénomènes de tassement des sols n'est pas clairement démontré. Ainsi, Quiroga et al. (1999) et Soane (1990) observent une diminution

de la sensibilité des sols au tassement lorsque leur teneur en matière organique augmente, de même que Lebert et Horn (1991) observent une diminution de la pression de pré-consolidation P_c . Au contraire, Imhoff et al. (2004), Smith et al. (1997) observent peu d'effets significatifs de la matière organique sur les paramètres mécaniques des sols. Pereira et al. (2007). Tous sont d'accord pour mettre en évidence l'importance majeure de la teneur en eau des sols sur les effets de la matière organique. La matière organique a donc un effet direct sur les propriétés mécaniques des sols au travers de son effet sur la capacité de rétention en eau des sols (qui dépend des propriétés hydrodynamiques des sols).

5.3. La densité apparente et la porosité du sol

L'indicateur le plus souvent utilisé dans les études de qualité physique des sols est la densité apparente, (Noémie, 2012). La densité apparente du sol (et la porosité) varie en fonction de la texture du sol, de la structure, et de la teneur en matière organique, mais pour un type de sol donné, il peut être utilisé pour surveiller le degré de compactage du sol et la formation de flaques. Les variations de densité apparente affectent d'autres propriétés et les processus qui influence de l'eau et l'apport d'oxygène (Schoenholtz et al., 2000). De plus, plusieurs travaux ont démontré que la variation de densité apparente était en fait un indicateur peu sensible pour quantifier l'impact du passage d'engin sur le fonctionnement du sol (Hånkansson & Lipiec, 2000 ; Frey et al., 2009 ; Ampoorter et al., 2011). En particulier, les conditions de transfert des gaz et d'eau sont plus affectées par la diminution du volume de pores grossiers plutôt que par la diminution de la porosité totale (Alaoui et al., 2011).

La densité apparente du sol ne donne qu'une image très imparfaite de l'impact d'un engin sur la structure du sol (Alaoui et al., 2011). Ainsi, il est probable que la dynamique des gaz de l'atmosphère du sol après un tassement soit plus sensible à la dégradation physique, due à des contraintes externes, comme les paramètres physiques plus globaux, la densité apparente ou la résistance à la pénétration (Ampoorter et al., 2011). Par ailleurs, la vitesse de transfert d'un gaz donné est essentiellement déterminée par le flux de diffusion gazeuse et donc par le gradient de concentration du gaz et le coefficient de diffusion gazeuse. Le coefficient de diffusion gazeuse est très sensible à la dégradation physique, à la fois à cause de la déstructuration de la phase solide et du changement de régime hydrique Ranger., 2012.

D'autre part, 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). Cette augmentation de la

densité apparente 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 ($<0,2 \mu\text{m}$) et la méso-porosité ($0,2-30 \mu\text{m}$) du sol 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 la préparation du lit de semences 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). 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). 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 dans la couche de surface du sol (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 (Guérif, 1994 ; Tebrügge et Düring, 1999 ; Blanco-Canqui et Lal, 2007).

L'effet des différentes techniques de travail du sol sur la structure diffère selon le type de sol, les sols sensibles aux tassements, 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). En effet le non retournement des couches de sols par la charrue ou les techniques de travail superficielles, 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 à long terme (au-delà de 10 années d'adoption de ces techniques) (Huwe, 2003 ; Munkholm et al., 2003). 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. (Dirgo, 2006). Autrement, 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 (Germon et al., 1994 ; Balesdent et al., 2000 ; Baker et al., 2007)

6. L'influence des techniques de conservation du sol sur les propriétés biologique du sol

Les indicateurs biologiques de la fertilité actuellement utilisés sont ceux liés à la structure de la biomasse microbienne et à leur activité. L'intérêt de l'évaluation de la biomasse à un moment donné, plus encore, sa variation dans le temps, est lié à son rôle dans la métabolisation des composés organiques, la formation structurale et la stabilisation des sols, ainsi qu'à sa fonction de marqueur écologique (Smith et Paul, 1990 ; Davet, 1996 ; Franco et al., 2004). À cause de leur rôle dans le fonctionnement du sol, les populations microbiennes et leurs activités sont considérées comme des indicateurs utiles de l'amélioration et de la dégradation des sols. Etant donné que la biomasse microbienne est considérée comme une partie de la matière organique du sol qui est constituée par les cellules microbiennes vivantes, les paramètres les plus utilisés pour estimer la biomasse microbienne sont le C et N microbiens (Smith et Paul, 1990 ; Joergensen, 1995 ; Davet, 1996). Parmi les activités microbiennes, certaines réactions, comme la respiration du sol, peuvent être réalisées par la plupart de microorganismes du sol, alors que d'autres sont catalysées par un nombre restreint d'espèces microbiennes particulières (activités enzymatiques) (Nannipieri et al., 1990).

Les activités enzymatiques dans les sols, comme la respiration et la biomasse microbienne, sont sensibles aux modifications environnementales, et sont de ce fait considérées comme des indicateurs des perturbations naturelles et anthropiques (Schloter et al., 2003). Les enzymes les plus souvent mises en évidence dans le sol sont celles appartenant aux groupes des oxydoréductases (déshydrogénases, nitrate-réductase, catalase, etc.) et des hydrolases (phosphatases, nucléases, lipase, amylase, cellulase, etc.). Comme pour la biomasse microbienne du sol (Groffman et al., 2001 ; Cookson et al., 2005 ; Shi et al., 2006 ; Pérez-de-Mora et al., 2006) et la respiration du sol (Borkenet al., 2002 ; Wang et al., 2003), plusieurs

auteurs démontrent que l'activité enzymatique est positivement corrélée avec la teneur en matière organique (Garcia-Gil et al., 2000). Cependant, la qualité de cette dernière est aussi importante que la quantité. En revanche, à l'échelle de l'écosystème, la respiration est augmentée du fait d'une augmentation de la production de biomasse (Ryle et al., 1992 ; Schapendonk et al., 1997 ; Casella et Soussana, 1997 ; Aeschlimann, 2003).

6.1. La biomasse microbienne

Le concept de biomasse microbienne a été initialement proposé par Jenkinson (1966). Il fait référence à la fraction vivante de la matière organique, considérant l'ensemble des microorganismes du sol. Les techniques permettant de mesurer la biomasse microbienne donnent des valeurs en $\mu\text{gC.g}^{-1}$ et les 4 principales méthodes sont : (1) la fumigation-incubation, (2) la fumigation extraction, (3) la respiration induite par un substrat, (4) l'extraction ATP (Martens, 1992b). Les mesures de biomasse microbienne ont été très utilisées (Chaussod, 1996 ; Kandeler et al., 1999) afin d'évaluer les impacts de différentes perturbations dans les agrosystèmes (pratiques agricoles, pollutions...), sont souvent les seules à être prises en compte dans les modèles de minéralisation de la matière organique du sol pour représenter la composante microbienne (Hadas et al., 2004 ; Shibu et al., 2006). Même si elle reste un bon bio-indicateur de la qualité des sols (Marschner et al., 2003), la biomasse microbienne souffre d'un manque de résolution et nécessite d'être complétée par des méthodes plus informatives sur les processus étudiés. En effet, cette mesure, qui prend en compte l'ensemble des microorganismes présents (vivants ou non), ne fait pas de différence entre les domaines des microorganismes (archaea-champignons-bactéries) et donne seulement une mesure quantitative et non qualitative.

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. 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 (; Meyer et al., 1996 ; Kandeler et al., 1998 ; McCarty et al., 1998 ; Andrade et al., 2003 ; 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., 2001 ; 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. VIAN Jean-François 2010

6.2. Respiration spécifique apparente

La respiration est une réaction d'oxydo-réduction qui intervient au niveau cellulaire. Une réaction d'oxydo-réduction est une réaction chimique au cours de laquelle se produit un échange d'électron. D'après Prosser (1997), la respiration est la plus commune et ancienne mesure indirecte de l'activité microbienne globale dans les sols. En effet, les cellules microbiennes actives et vivantes du sol ont constamment besoin d'une source d'énergie, qui pour la microflore hétérotrophe provient de la transformation des matériaux organiques. 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). En revanche, les capacités métaboliques et cataboliques apportent aussi une mesure fonctionnelle des communautés microbiennes du sol. Elles sont appréhendées par des techniques utilisant les aptitudes des communautés microbiennes à utiliser certains substrats organiques comme la méthode SIR (substrate-induced respiration). Cette méthode permet de caractériser et classer les communautés microbiennes hétérotrophiques suivant leurs capacités métaboliques et cataboliques et de visualiser rapidement des structures de communautés comme un composite de capacités fonctionnelles (Garland et al., 1991 ; Degens et al., 1997). La méthode SIR

s'affranchit de ce problème et semble plus précise même si moins utilisée (Degens et al., 1997 ; Nannipieri et al., 2003).

6.3. La matière organique du sol

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 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 particulières, 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. 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 particulières (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 retournées au sol, affecte également la qualité des MOS. Ainsi, les systèmes de conservation ont une plus grande part de MOS (Franzluebbers 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). Dans les zones semi-arides où la décomposition de la MOS est influencée par les conditions de sécheresse (Campbell et al., 1996), l'adoption du non labour réduit l'évaporation et par conséquent les pertes en eau, améliore les rendements et favorise l'accumulation de la MOS par l'incorporation des résidus de récolte (Campbell et Janzen, 1995).

7. L'influence des techniques de conservation du sol sur les propriétés chimiques du sol

Les systèmes de travail du sol de conservation laissent plus de 30 % des résidus de cultures en surface ou les concentrations dans les premiers centimètres du sol. Le labour quant à lui enfouit et répartit ces résidus de cultures sur la profondeur de la couche 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.

7.1. La teneur en C total et N total

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 décroissant fortement dans les horizons sous-jacents (Needelman et al., 1999 ; Pekrun et al., 2003 ; Al-Kaisi et Yin, 2005 ; Koch et Stockfisch, 2006 ; Gál et al., 2007 ; D’Haene et al., 2008a). Par conséquent, les stocks de C et N organiques (t.ha⁻¹) dans les systèmes de conservation sont supérieurs en surface par rapport aux systèmes labourés (Franzluebbers et al., 1995 ; Al-Kaisi et Yin, 2005 ; 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-tot et N-tot plus importante en profondeur en labour (15-30 cm), les stocks de C-tot et N-tot 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-tot et N-tot 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-tot et N-tot 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 ; Franzluebbers 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 (D’Haene et al., 2008 ; McCarty et al., 1998 ; Needelman et al., 1999).

L’augmentation des stocks de C-tot et N-tot 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 (Koch et Stockfisch, 2006 ; Conant et al., 2007). Cette augmentation dépend aussi du type de texture du 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-tot dans les sols. Ainsi, Gál et al. (2007) indiquent que les stocks de C-tot et N-tot 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-tot et N-tot. Baker et al. (2007) montrent que cette perte de C-tot en profondeur dans les systèmes de conservation conduit à une perte globale de C-tot d'environ 0,23 t.ha⁻¹.an⁻¹ par rapport aux systèmes labourés.

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).

7.1. Azote minérale

L'azote inorganique du sol constitue la fraction disponible pour les cultures. Le sol en contient rarement plus de 10% d'azote inorganique total (Scheiner, 2005). Dans le sol, l'azote minéral se présente généralement sous la forme de nitrate (NO₃-), qui est très mobile et qui peut facilement être lixiviée avec les eaux de percolation, notamment pendant la saison pluviale (Spiess, 2005). Les travaux sur l'effet des techniques de travail de sol sur les niveaux de l'azote minéral au cours de l'année donnent des résultats parfois divergents. Langlet et Remy (1976) ont montré que dans la plupart du temps, au cours de cycle cultural, les niveaux d'azote minéral sont semblables dans les sols labourés ou en semis direct, voire quelques fois supérieurs en fin d'hiver dans les sols en semis direct. La minéralisation de l'azote se déroule d'une manière plus continue et dure plus longtemps en semis direct qu'avec le labour (Zihlman et al., 2001).

La dynamique de minéralisation des composés organiques modifiés en semis direct et la minéralisation concomitant au travail du sol n'existe plus ; la composition des microorganismes décomposeurs, dominé par les champignons, favorise l'immobilisation de l'azote au détriment de sa minéralisation (Carteret., 1987). Qu'il s'agisse de sols argileux (Catt et al., 2000), de sols sableux (Hansen et Djurhuus (1997) ou de sols limoneux (Zhu et al. 2003, Stoddard et al., 2005, Gupta et al., 2004, Al-Kaisi et Licht 2004), En revanche, Drury et al. (1993) ont observé des concentrations mais aussi des pertes d'azote plus élevées (bien que non significativement) dans le cas du labour que dans celui du semis direct. Ammann et al., (2003) ont observé une différence de perte d'azote de 30 kg N/ha entre semis direct et labour une année parmi les 3 années de leur étude.

7.3. Phosphore

Les techniques de travail du sol influencent en premier lieu le mode de distribution dans le sol du phosphore apporté par l'engrais, les matières organiques exogènes et les résidus des cultures. Quelles que soient les techniques mises en œuvre, elles sont sans effet notable sur les teneurs en phosphore, en général très faibles, des couches de sols situées au-dessous de la plus grande profondeur de travail. A ce niveau, en raison de la capacité qu'ont les racines à absorber du phosphore dans la solution du sol jusqu'à des concentrations de quelques mg/L (Barber, 1995), les teneurs du sol en phosphore demeurent généralement très faibles avec pour corollaire l'existence d'un fort pouvoir fixateur pour cet élément. Dans l'horizon de surface, les opérations culturales qui réalisent un retournement ou un malaxage du sol tendent à homogénéiser le phosphore dans le volume travaillé. Par contre celles qui n'engendrent pas de mélange des couches travaillées, conduisent à l'instauration d'un gradient de teneurs décroissantes avec la profondeur (Sharpley, 2003), très fortement marqué dans le cas du semis direct. La création de ce gradient s'accompagne d'un enrichissement de la couche de surface qui peut interagir avec l'eau qui ruisselle. Ce phénomène est d'autant plus fort que les apports de phosphore sont abondants.

7.4. La capacité d'échanges cationiques et d'autres éléments minéraux

Les réactions d'échange cationiques entre la solution du sol et le complexe adsorbant réfèrent à deux importants paramètres chimiques des sols à savoir la capacité d'échange cationique (CEC) et les cations échangeables. La CEC, qui est une expression de charges négatives par unité de masse d'un sol, est l'une de plus importantes caractéristiques du sol. Or, il est connu que seules les argiles et l'humus, par leurs propriétés colloïdales, peuvent développer des charges importantes à leur surface (Brady et Weil, 2002). 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, 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^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+}) semble être plus liée à la nature et à la répartition des éléments minéraux du sol qui sont en général plus concentrés en profondeur à proximité de la roche mère (Wright et al., 2007).

Le non retournement du sol en semis direct conduit à un enrichissement en éléments minéraux des premiers centimètres de sol par rapport à une situation avec labour (Follett et Peterson, 1988 ; Edwards et al., 1992). D'un autre côté, en semis direct, les quantités

d'éléments minéraux peuvent être réduites en profondeur, notamment le phosphore et le potassium (Pekrun et al., 2003). L'émission de protoxyde d'azote est favorisée dans un sol non travaillé (Six et al., 2002 ; Baggs et al., 2003 ; Liu et al., 2006).

Chapitre II Matériels et Méthodes

1. Présentation des zones d'études

Cette thèse est faite dans deux régions algériennes aux conditions agro-pédo-climatiques, et historiques différentes : la région d'Annaba et la région de Sétif

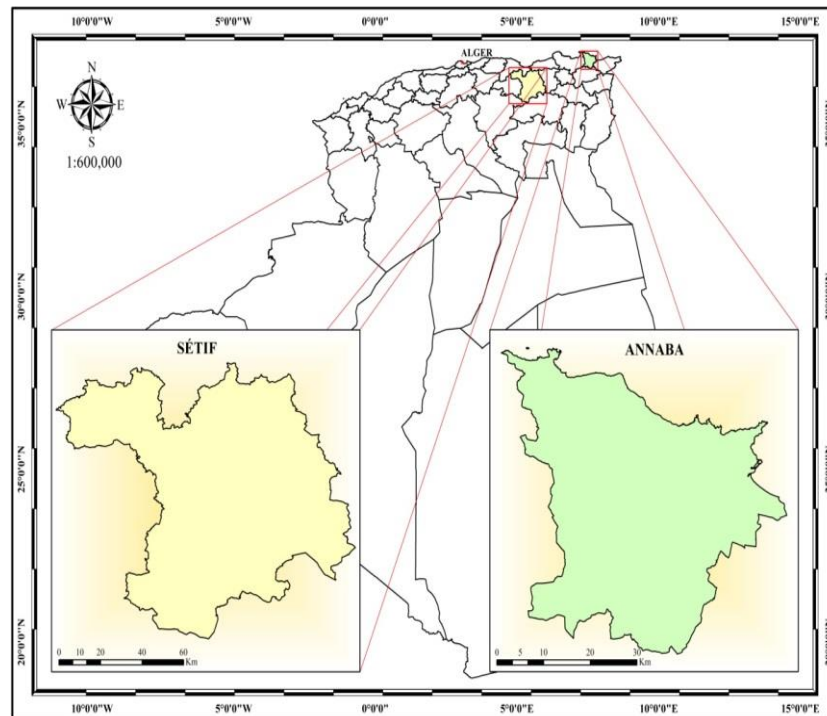


Figure 1: Carte de situation géographique des deux zones d'études

1.1. Annaba

1.1.1. Situation géographique

La zone d'étude est située dans la wilaya (région administrative) d'Annaba dans extrémité orientale de la côte algérienne à 600 km à l'est d'Alger. Elle est limitée par la mer Méditerranée, au Nord et à l'Ouest par les wilayas de Skikda, à l'Est par la wilaya d'Al-Tarf et au Sud par la Wilaya de Guelma (Carte 1). La géomorphologie du site se caractérise par une topographie globalement plane (plaine alluviale) avec, en bordure ouest, des inclinaisons importantes au pied du massif de l'Edough. Elle est caractérisée par un climat méditerranéen, ouverte à la mer Méditerranée au nord, allant du cap Rosa (8_150E et 36_580N) à l'Est, au Cap de Garde (7_470E et 36_580N) dans l'Ouest, avec une distance de 40 km entre les deux. L'Oued Seybouse dans le Sud-Est, le deuxième plus long fleuve en Algérie (avec un bassin versant d'environ 6470 km²), et de l'Oued Mafrag dans le drain (Belabed et al., 2013).

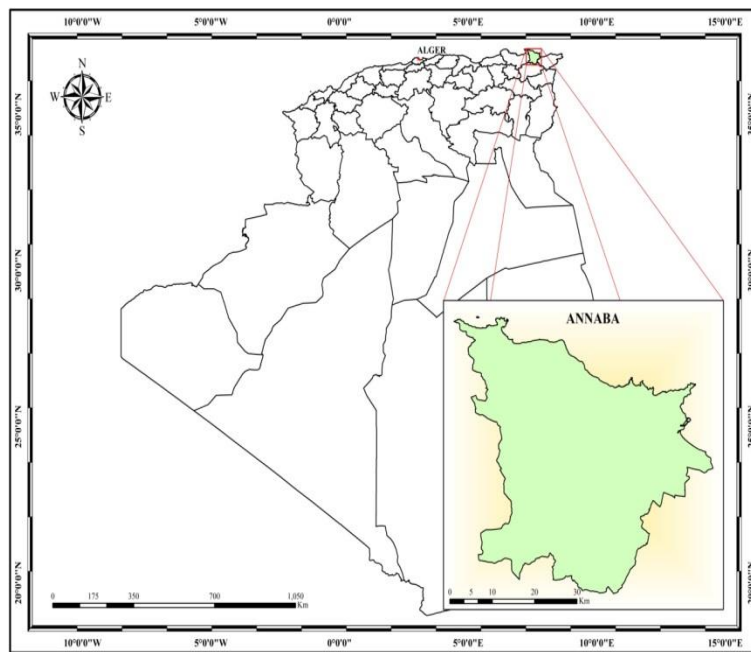


Figure 2: Carte de situation géographique de la région d'Annaba.

1.1.2. Pédologie

D'après les études effectuées par Durand (1954), il résulte que la région d'Annaba est caractérisée par différents types de sol et principalement les plaines de la région sont des sols alluviaux. La plaine d'El Hadjar qui constitue le prolongement de la plaine ouest d'Annaba, s'étend sur une superficie de 7980 ha. Du point de vue pédologique, la zone d'étude est caractérisée par une homogénéité lithologique où les sédiments du quaternaire (récents) constituent la quasi-totalité des terrains avec prédominance de sables, limons et galets.

La couverture pédologique prospectée permet d'avancer que la plaine d'El Hadjar présente une fertilité moyenne avec des sols peu évolués et d'origine non climatique:

C'est la classe la plus présente dans la zone d'étude et où on distingue : les sols alluviaux, les sols colluviaux, des vertisols, des sols hydromorphes, des sols halomorphes, des sols calcimagnésiques et des sols minéraux brut (Zenati, 2010).

1.1.3. La topographie

Elle est caractérisée par une topographie globalement plane (plaine alluviale) avec, en bordure ouest, des inclinaisons importantes au pied du massif de l'Edough. Avec des sols qui sont principalement des alluviaux.

1.1.4. Climat

La plaine est soumise à un climat méditerranéen, caractérisé par une période humide qui s'étale du mois d'octobre au mois de mai, et une période sèche qui s'étend sur le reste de l'année. Selon les données climatiques de la station météorologique des moyennes mensuelles depuis l'année 2006-2015, nous avons tracé le diagramme Ombrothermiques Bagnouls et Gaussen (Figure: 3)

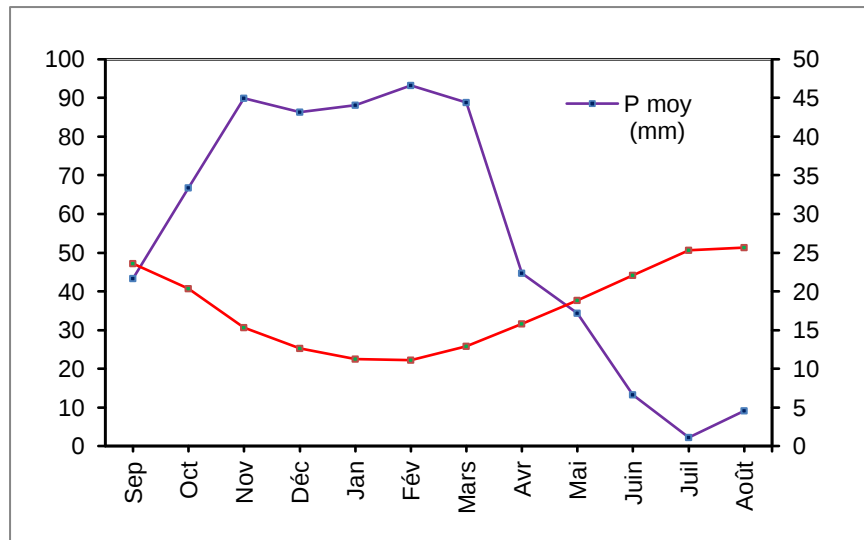


Figure 3: Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (Annaba).

1.1.5. Sites expérimentaux El hadjar

La plaine Ouest d'El Hadjar, qui s'étend sur une superficie de 7980 ha, est située au sud-ouest de la wilaya d'Annaba (Nord-Est de l'Algérie). Elle est bordée au Nord par djebel Beliéleta, au Sud par le massif gréseux de AinBerda, à l'Ouest par le Lac Fetzara et à l'Est par l'oued Seybouse. (N. Zenati, D. Messadi).

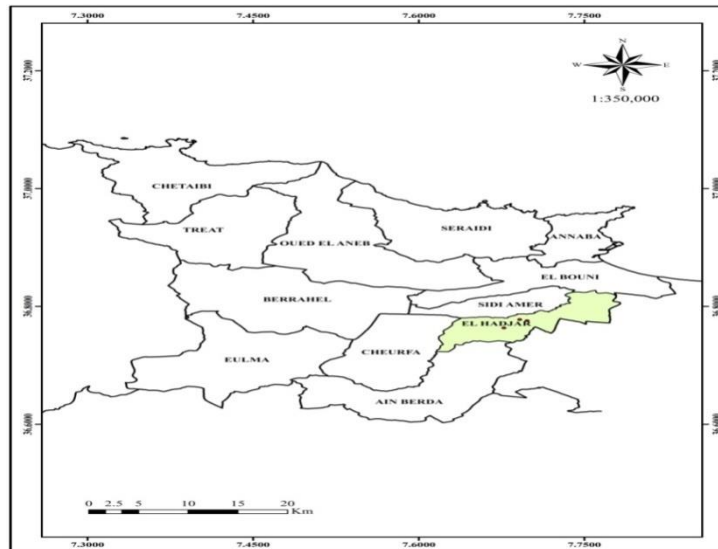


Figure 4: Carte de situation de site d'EL Hadjar.

1.1.6. Les parcelles d'échantillonnage

L'échantillonnage des sols a été réalisé dans la ferme de Bourjiba à El Hadjar à proximité de la zone industrielle. Les prélèvements ont été faits en fonction des fosses pédologiques qui s'étendent jusqu'à 160 cm sur les trois parcelles expérimentales : SD : Semis-direct, LT : Labour traditionnel, TCS : Technique culturale simplifiée

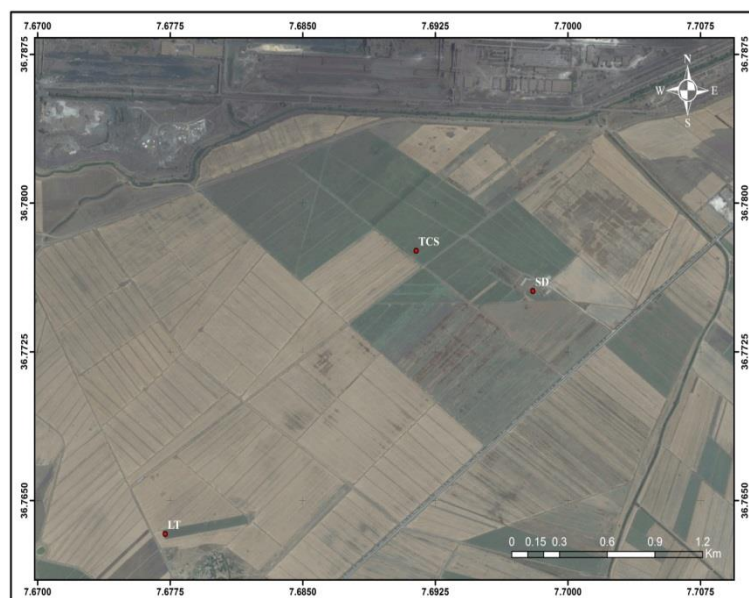


Figure 5: Carte représentative des parcelles (SD, LT, TCS) de la région d'Annaba.

1.2. Sétif

1.2.1. Situation géographique

La Wilaya de Sétif est située au Nord-Est de l'Algérie, entre 36° et 35° de latitude Nord et entre les points de longitude 5° Ouest et 6° Est. La Wilaya de Sétif est limitée au Nord par Bejaia et Jijel, au Sud par Batna et M'Sila, à l'Est par Mila et à l'Ouest par Bordj Bou Arreridj. Sa superficie est de 6504 Km².

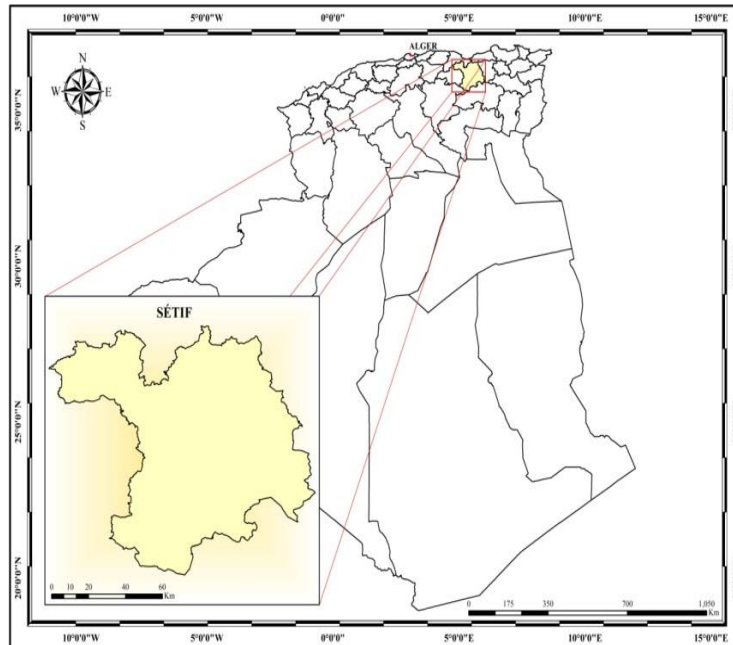


Figure 6 : Carte situation géographique de la région de Sétif

1.2.2. Pédologie

Les sols de la région de Sétif présentent, tout comme le climat, de grandes variations. Au nord, ils sont profonds, peu calcaires et plus fertiles alors qu'ils sont calcaires (croûtes et encroûtements) et peu profonds au sud. La majeure partie des sols des hautes plaines Sétifiennes sont des Calcisols développés sur alluvions, sur colluvions ou encore sur marnes. Ces sols contiennent du carbonate de calcium soit sous forme de fractions fines, ou bien sous forme d'individualisations continues et discontinues en profondeur. Dans la partie nord de la région, les sols sont développés sur des alluvions. Ils sont plus profonds et se caractérisent par des teneurs élevées en argile. La principale contrainte pédologique des sols de Sétif est la faible profondeur du sol offerte au développement racinaire. Cette réduction est souvent due à la présence d'une accumulation calcaire endurée (dalle, croûte) ou d'un horizon fortement limoneux et très calcaire ou d'une semelle de labour (Kribaa, 2003).

1.2.3. Climat

La région appartient à l'étage bioclimatique semi-aride, caractérisé par un climat continental typiquement méditerranéen. (ITGC, 2011). Le diagramme Ombrothermique, montre l'existence de deux périodes sèches séparées par une période humide enregistrée durant la campagne agricole. Selon les données climatiques de la station météorologique des moyennes mensuelles depuis l'année 2006-2015, nous avons tracé le diagramme Ombrothermiques Bagnouls et Gaussen (Figure: 7)

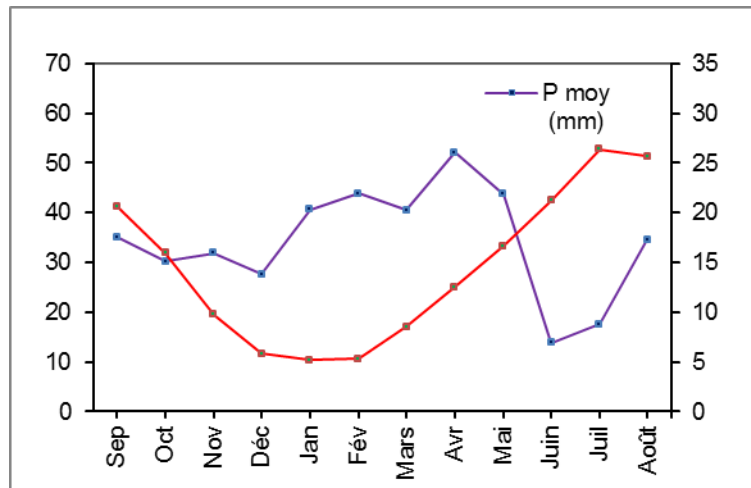


Figure 7 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (Sétif)

1.2.4. Site expérimental Beni-Fouda

L'Exploitation Agricole Collective (E.A.C.) DEHAL Nouari dans la commune de Beni Fouda au Nord de Sétif.

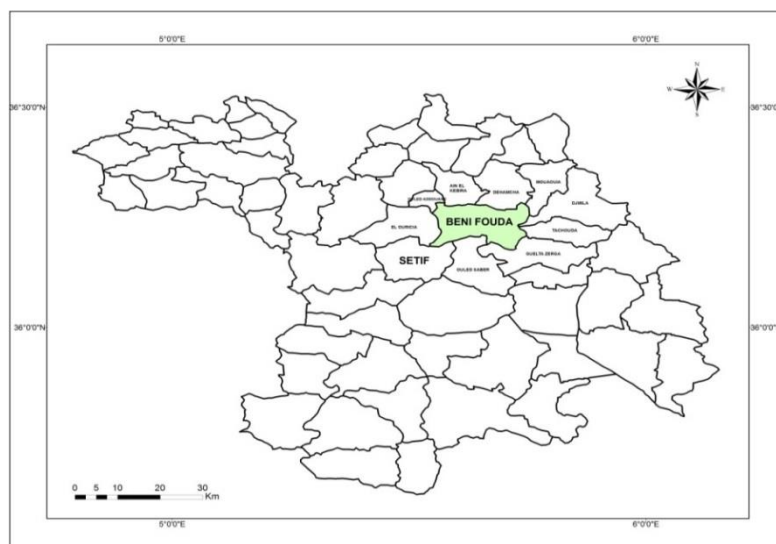


Figure 8 : Carte de situation du site Beni-Fouda

1.2.5. Les parcelles d'échantillonnages

Les prélèvements ont été faits en fonction des Fosse pédologiques qui attendre jusqu'à 85 cm sur les quatre parcelles expérimentaux. SD : Semis-direct, LT : Labour traditionnel, TCS : Technique cultural simplifiée (dans le bas-fond et dans la crête).

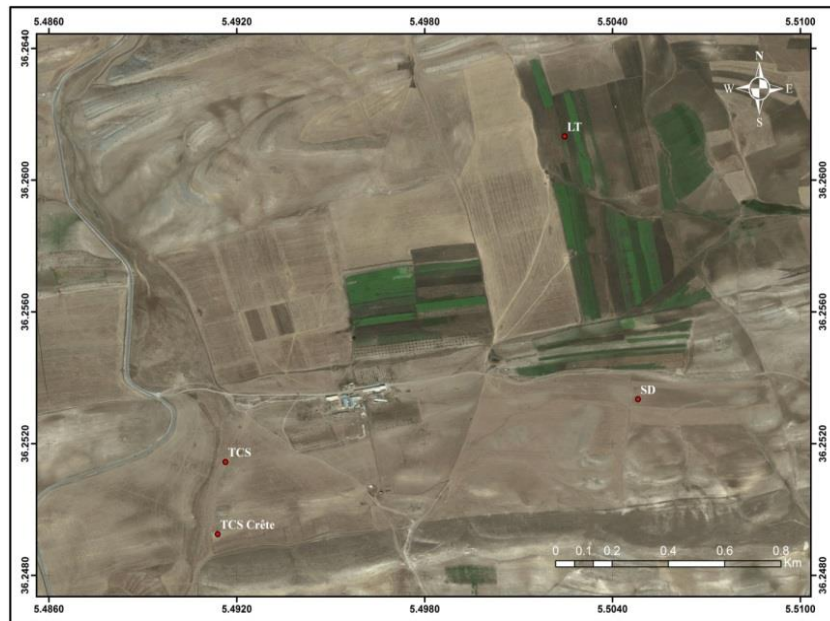


Figure 9 : Carte représentative des parcelles (SD, LT, TCS) à Sétif

2. Description morphologique des profils culturaux dans les deux régions.

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 du 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 des profils culturaux pour les deux régions, la première campagne d'échantillonnage a eu lieu durant la saison de croissance, (i) à Annaba début juin 2014, pour LT, les pois chiches, blé dur pour LT en (stade de maturation 'maturation des grains'), et SD

en jachère (ii) à Sétif fin mai 2014 avec du blé tendre en LT, du blé dur en TCS (stade de croissance 'développement des grains') et pour SD en sol en jachère labouré pour la dernière fois en octobre de l'année précédente. (2) La deuxième campagne d'échantillonnage a été réalisée après la saison de travail du sol, début novembre 2014 à Annaba et fin octobre 2014 à Sétif, après la récolte du blé commun et du blé dur respectivement et 2 semaines après le travail du sol, la préparation du lit de semence et semis de la culture suivante. Dans chaque campagne d'échantillonnage, un profil de sol a été creusé dans chaque traitement du sol dans les champs des deux fermes commerciales. Les emplacements des profils de sol ont été choisis au hasard. Ces sites du profil ont été identifiés par un GPS dans la première campagne d'échantillonnage et pour la deuxième campagne d'échantillonnage ont été pris sur les mêmes sites. Ces profils ont été ouverts, parallèles au sens du travail du sol, sur une profondeur qui ne dépasse pas 80 cm à Sétif et 160 cm à Annaba, sur 1.50 m de large au centre des parcelles.

Le sol à Sétif est à texture limono-argileuse dans les TCS et SD, et une texture argileuse dans le LT. Pour SD et TCS (crête) possédant une couche arable réduite (sol superficiel) où les profondeurs maximales sont inférieures à 35 cm, sa structure est fragmentaire. Dans les TCS (bas fond) la profondeur peut aller à plus de 80 cm mais la texture toujours limono-argileuse avec une forte présence des cailloux de différentes tailles qui résultent de l'altération de la roche mère. Dans tous les profils culturaux effectués (SD, TCS, TC) à Sétif, la limite entre les horizons est diffuse. Le deuxième horizon se place avec des limites au premier horizon (les horizons sont tangentiels). Le sol est très riche en éléments calcimagnésiques (vive effervescence) où des nodules blancs et friables sont répartis sur tout le profil. Quelques galeries et débris de coquille apparaissent aussi dans les profils étudiés. En ce qui concerne l'activité biologique, les racines des plantes cultivées sont nombreuses (SD, TCS) à très nombreuses surtout à TCS jusqu'à la profondeur du profil, par contre dans le LT elles sont peu nombreuses. En revanche, les sols d'Annaba ont une texture dominante argileuse dans tous les profils effectués. On ne trouve pas de transition de couleurs entre les horizons du profil sauf dans les SD à la profondeur de 140 cm. La réaction d'effervescence est forte ce qui explique la richesse du sol en élément calcimagnésiques. Une forte présence de l'activité biologique surtout les vers de terre dans les SD et TCS par comparaison au LT qui sont presque négligeables. La densité racinaire est forte dans tous les profils (TCS, SD et LT) et atteint les 30 cm dans le LT et 50 cm dans SD et TCS.

3. Méthodes de prélèvement des échantillons

○ Prélèvement pour les paramètres physiques du sol

Les échantillons sont prélevés à l'aide des cylindres en PVC (échantillons de sol non perturbés) de (6 cm de hauteur et 10 cm de diamètre) avec 3 trois répétitions sous-jacentes pour chaque horizon du profil et conservés jusqu'au moment d'analyses (voir annexe 4).

○ Prélèvement pour les paramètres biologiques du sol

Les échantillons sont prélevés de bas en haut en fonctions des horizons et du profil et conservés au réfrigérateur à la température (- 4°C), jusqu'au moment d'analyses.

○ Prélèvement pour les paramètres chimiques et environnementaux du sol

Les échantillons sont prélevés de bas en haut en fonctions des horizons du profil, séchés à l'air libre et conservés jusqu'au moment d'analyses.

4. Analyses et traitement des échantillons

4.1. Les analyses physiques

Plusieurs paramètres physiques ont été réalisés au niveau du laboratoire physique du sol en « fertilité et protection des sols » à Agroscope, à savoir : la densité apparente, la porosité totale, la distribution de la taille des pores" (les macropores), la perméabilité à l'air, la préconsolidation (test œdométrique) et la diffusion du gaz (O₂).

4.1.1. Préparation des échantillons du sol

Les échantillons du sol transportés dans des cylindres en PVC, ont été transférés au laboratoire dans des cylindres de référence avec différents volumes : cylindres de (3 cm de hauteur×10 cm de diamètre), cylindres de (4.5 cm de hauteur × 4.5 cm de diamètre), cylindres de (6 cm de hauteur× 10 cm de diamètre). Voir les photos (Annexe 4).

Les étapes de travail au niveau du laboratoire se sont déroulées selon un plan de travail effectué comme suit :

- ✓ Préparation les échantillons des cylindres en les partageants en trois groupes, les analyses ont été faits pendant 4 semaines pour chaque groupe.
- ✓ La première semaine : Saturation des échantillons: les cylindres sont plongés dans un bac mi- remplie d'eau déminéralisée (H₂O, conductibilité < 5 µS/cm) durant une semaine.
- ✓ La deuxième semaine : Mesure du poids et la hauteur, la perméabilité à l'air, la diffusion du gaz avant et après les avoir soumis dans un bac de dépression à un potentiel matriciel de 30 hPa.

- ✓ La troisième semaine : Mesure du poids et la hauteur, la perméabilité à l'air, la diffusion du gaz avant et après les avoir soumis au bac de dépression à un potentiel matriciel de 60 hPa.
- ✓ Quatrième semaine : Détermination du coefficient de consolidation avec l'utilisation d'un œdomètre.
- ✓ Finalement : Détermination du poids sec, de la densité apparente, et calcul de la porosité totale.

4.1.2. Modes opératoires

4.1.3. Les analyses physiques (paramètres de la géométrie, de la fonctionnalité et de la stabilité structurale) :

- **La texture** a été analysée à l'aide de la méthode de la pipette après destruction de la matière organique avec du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2).
- **La densité des particules** (DR) a été déterminée sur des échantillons non perturbés en utilisant le principe de pesée par immersion.
- **La densité apparente** (DA) a été déterminée en pesant des échantillons secs passés au four à 105 ° C pendant 24h et en se référant au poids du volume témoin, déterminé à partir de diamètre intérieur du cylindre et de la hauteur d'échantillon mesurée au gonflement maximal après saturation complète.
- **La porosité totale** (PT) a été calculée en fonction des valeurs DA et DR mesurées pour les échantillons de sol.
- **Le volume des macropores** a été déterminé en pesant les échantillons de sol après la désorption à 30 hPa (MP_{30}) et au potentiel matriciel de 60 hPa (MP_{60}).
- **La perméabilité à l'air** : la PA a été évaluée avec des échantillons de sol équilibrés pour les deux potentiels matriciels (30 hPa et 60 hPa) respectivement, en mesurant l'air traversant les pores remplis d'air de l'échantillon à une surpression de 2 hPa. C'est la méthode à l'état stable semblable à celle décrite par Iversen et al. (2001).
- **Le coefficient de la diffusion du Gaz** (D_p/D_0) : la diffusion de gaz moléculaire dans les sols est contrôlée par le gradient de concentration et le coefficient de diffusion. La diffusivité de gaz a été mesurée avec un appareil constitué d'une chambre similaire à celle décrite par Schjønning et al. (2013), en utilisant le dioxygène (O_2) comme un gaz diffusant, voir la photo (Annexe 4). La constante de diffusion de l' O_2 , « D_p », est obtenue par la relation entre le temps et le logarithme de la concentration en O_2 entre la chambre et l'air ambiant en supposant que la diffusion de l'état stationnaire comme

décrit avec Schjønning et al. (2013). Toutes les mesures ont été effectuées selon les méthodes de référence des stations suisses en recherche agricole (FAL et al., 1996).

- **La perte de la porosité totale** : la porosité totale perdue après une contrainte de 250 kPa (PTP_{250}), correspond à la valeur typique pour l'effort imposé aux sous-sols pendant la récolte et les effets de véhicules de transport avec l'équipement standard des pneus, elle a été déterminée en utilisant un essai confiné d'œdomètre et calculé sa valeur en se référant au diamètre du cylindre témoin et un temps de référence évalué après 30 minutes d'effort jusqu'à 250 kPa. Une valeur PTP_{250} plus élevée est interprétée comme une pire stabilité structurale du sol.
- **Le volume résiduel des macropores** : la macroporosité résiduelle à 60 hPa après avoir imposé sur le sol une contrainte de 250 kPa (RMP_{250}). On calcule le volume résiduel des macropores en supposant l'effet le plus défavorable du compactage du sol: La PTP après 30 minutes de contrainte du sol avec 250 kPa est soustrait de la valeur MP_{60} d'échantillon du sol non compacté, en supposant que toute la sédimentation au cours du test de l'œdomètre s'est produite dans les macropores allant jusqu'à 60 hPa (ou le diamètre de pore équivaut à 50 μm). L'intention était d'évaluer la qualité de la structure du sol après un stress élevé du sol et, par conséquent, la même valeur de seuil que pour MP_{60} pourrait être utilisée pour interpréter les valeurs du RMP_{60} . Une valeur de RMP plus élevée est interprétée comme une bonne stabilité structurale du sol.
- **Le coefficient de compression** : est défini par tassement par unité d'augmentation de contrainte dans la courbe de compression vierge. Les échantillons de sol cylindriques avec différents diamètres et hauteurs, ont été utilisés pour déterminer la pression de pré-consolidation à un potentiel matriciel de 60 hPa. À partir des courbes de pression-compression jusqu'à 1000 kPa, nous avons déterminé (i) la valeur de pré-consolidation d'après la méthode de Casagrande (1936) (voir les graphes en annexe 6) ainsi que (ii) le coefficient de compression.

4.2. Les analyses chimiques

- **pH eau** : le pH a été déterminé en utilisant une électrode en verre (norme AFNOR X 31- 103) dans la solution surnageant d'un mélange (sol / liquide), avec la proportion 1/5 mesurée à l'aide d'un pH-mètre.
- **Analyse du carbone total et azote total** : la concentration du carbone total (C-tot) et de l'azote total (N-tot) a été mesurée (par la méthode de glutamine-Acide) en utilisant un chromatographe en phase gazeuse avec un analyseur automatique pour le carbone et

l'azote (vario MAX CN elementar). Une fraction aliquote de sol (≈ 10 mg) a été précisément pesée dans des tasses en acier inoxydable ou des tasses en céramique. Les échantillons de sol à analyser ont été brûlés à 850°C et à 1150°C . Les divers composants gazeux résultants de la combustion ont été séparés par Chromatographie sur la colonne et détectés par un cathétomètre. La concentration en carbone de l'échantillon de sol a été calculée à partir d'un calibrage de la première unité réalisée avec un niveau d'atropine, qui a un rapport C/N proche de celui du matériau du sol analysé. (149-151 method Boden1000), (FAL et al., 1996).

- **Carbone organique**: la teneur en carbone organique a été déterminée par oxydation humide « la méthode Anne (norme AFNOR X 31-109 [172]) qui consiste en une oxydation de la matière organique par une quantité en excès de dichromate de potassium en milieu sulfurique à température contrôlée ou à ébullition. On considère que l'oxygène consommé est proportionnel au carbone de l'échantillon. Enfin, on applique le titrage par la solution de dichromate de potassium. La teneur en carbone organique est exprimée en pourcentage. Pour passer du taux de carbone au taux de matière organique totale, on utilise le coefficient multiplicateur (1.72) (Denis., 2000).
- **Analyses de la capacité d'échange cationique** CEC : la capacité potentielle d'échange cationique (CEC) des échantillons de sol a été déterminée par l'extraction d'une solution de chlorure de baryum (FAL et al., 1996).
- **Les cations échangeables** Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} et H^{+} sont dosées dans la solution d'extraction obtenue pour déterminer la CEC. K^{+} , Na^{+} , H^{+} sont dosées par la spectrophotométrie d'absorption atomique à flamme et Ca^{2+} , Mg^{2+} sont dosées avec EDTA.
- **Le taux de saturation** du complexe adsorbant par les quatre cations alcalins et alcalinoterreux, est un précieux indicateur pédologique et agronomique, quant à la «richesse» chimique du milieu, elle détermine l'activité biologique, la qualité de la structure, les réserves en éléments fertilisants, etc. Cependant, nous avons trop souvent établi une sorte d'équivalence automatique entre le taux de saturation et «le niveaux trophiques ».Le taux de saturation qui est exprimé avec la somme des cinq cations alcalins et alcalinoterreux exprimée en $\text{m}\ddot{\text{e}}\text{q}/100\text{g}$ ou en $\text{cmol}^{+}/\text{kg}$
- **Le phosphore assimilable** : dans l'extrait de sol par une solution d'acétate d'ammonium + EDTA (Méthode AAE1o-Ex), le phosphore forme à chaud avec le molybdate d'ammonium un complexe coloré bleu dont l'intensité est mesurée au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 750 nm (FAL et al., 1996).

- **Calcaire Actif et calcaire Total : le calcaire actif** : Le sol est mis en contact avec un acide fort qui dissout le calcaire, en milieu fermé. L'attaque du calcaire (CaCO_3) se traduit par un dégagement gazeux de CO_2 dont on mesure le volume. Cette méthode d'analyse courante est mise en œuvre par le LANO et décrite dans la norme internationale NF ISO 10693. **Le calcaire total** : Le sol est mis en contact avec un réactif spécifique (oxalate d'ammonium), qui attaque une fraction du calcaire total seulement. Le calcium extrait est ensuite dosé. Cette méthode d'analyse courante est mise en œuvre par le LANO et décrite dans la norme AFNOR NF X31-106.

4.3. Les analyses microbiennes du sol

- Les analyses microbiennes sont faites parallèlement avec les mesures des paramètres physiques au niveau du laboratoire des analyses microbiennes à Agroscope: Tout d'abord les échantillons de sol sont tamisés à 2 mm et conservés au frigo à température de 4°C.
- **La détermination de la biomasse microbienne** avec deux méthodes

** La respiration induite par le substrat (RIS) selon Heinemeyer : la biomasse microbienne C de sol (C_{mic}) par la respiration induite par le substrat (SIR) a été réalisée selon Anderson et Domsch (1978) après une période de pré-incubation de 7 jours à 22°C. 150 mg de glucose ont été ajoutées à 50 g du sol tamisé (équivalent de poids sec) et mélangés. La réaction des 4 répétitions de production de CO_2 initiale a été mesurée à l'aide d'un analyseur de gaz à infrarouge (IRGA) selon Heinemeyer et al. (1989). La valeur BMC-SIR ($\mu\text{g g}^{-1}$ sol) a été calculée à partir du taux initial de respiration, car 30,0 μl de CO_2 g^{-1} le sol h^{-1} équivaut à 1 μg de carbone microbien (C_{mic}) g^{-1} (Kaiser et al., 1992).

**L'extraction par fumigation au chloroforme (FE) (FE-C et FE-N) : cette méthode « Extraction par fumigation au Chloroform » : Consiste à gazer le sol au chloroforme afin de tuer les microorganismes qui y vivent et de détruire leurs parois cellulaires. La matière organique présente dans le sol ne se modifiant guère, on peut ensuite en extraire la teneur de la biomasse microbienne en carbone (C_{mic}) et celle en azote (C_{min}) (Vance et. al., 1987) par extraction et fumigation au chloroforme (FEC). Le FEC a été effectué avec trois répétitions sur 20 g d'échantillons du sol, qui ont été extraites avec 80 ml d'une solution de K_2SO_4 0,5 M. En effet, les vapeurs de chloroforme, en détruisant les membranes des micro-organismes présentes dans l'échantillon du sol étudié, provoquent la libération de leur contenu cytoplasmique dans la fraction soluble du sol. La différence de teneurs en carbone soluble des

échantillons exposés au chloroforme et des échantillons non exposés correspond au carbone de la biomasse microbienne. Un facteur de correction (K_{ec}) caractéristique de la nature du sol est ensuite appliqué pour déterminer le carbone total et l'azote total de la biomasse microbienne.

* Le carbone organique total (COT) dans ces extraits a été déterminé par spectrométrie infrarouge après combustion de l'extrait à 850 °C (DIMA-COT 100, Dimatec, Essen, Allemagne).

* L'azote organique total (NOT) a été ensuite mesuré dans le même échantillon et le flux de gaz par chimoluminescence (TNb, Dimatec, Essen, Allemagne).

- **La respiration du sol** (respiration basale) : la respiration basale du sol (RBS) a été mesurée dans des échantillons de sol pré-incubés (7 jours à 22 ° C) en déterminant l'évolution du CO_2 sur une période de 72 h (FAL et al., 1996). Environ 20 g des échantillons de sol (poids sec) ont été pesés dans des tubes centrifuges perforés et placés dans des bouteilles (Schott, 250 ml) contenant du NaOH 0,025 N en tant que piège à CO_2 pendant une période de pré-incubation de 24 heures. La mesure réelle a commencé après la pré-incubation de 24 h, en ajoutant exactement 20 ml de NaOH 0,025 N. Après 72 h, la solution de NaOH a été titrée avec du HCl 0,025 N. La respiration a été calculée en fonction de la quantité de HCl utilisée, où 22 mg de CO_2 est égal à 1 ml de HCl 1 M.
- **Le quotient métabolique** (qCO_2) : Le rapport RBS, BMC-SIR a été utilisé pour calculer le quotient métabolique (qCO_2), qui représente la quantité de CO_2 -C produite par unité de carbone de biomasse microbienne.
- **La minéralisation de l'azote par incubation aérobie** : cette mesure consiste à déterminer le potentiel de minéralisation des microorganismes actuellement présents dans le sol, aux conditions pédochimiques, et à une température donnée, un taux d'aération et une humidité optimale. Pour cela, les échantillons du sol sont incubés à 25 °C en conditions aérobies et la quantité d'azote minéral (NH_4^+ -N et NO_3 -N) libérée par la dégradation des composés organiques azotés est mesurée après 28 jours d'incubation.

4.4. Les analyses statistiques

Les effets des trois facteurs expérimentaux suivants ont été évalués: travail du sol (trois niveaux: labour = LT, Technique cultural simplifiée = TCS, Semis-direct = SD), région (deux

niveaux: Annaba, Sétif) et campagne d'échantillonnage (la première campagne début d'été 2014: pendant la saison de croissance des végétations, la deuxième campagne, fin d'automne 2014: peu après le travail du sol).

L'analyse descriptive permet de connaître la corrélation entre les traitements (LT, TCS, SD), la profondeur (Couche Superficielle: (CS) la couche arable / Sous-Sol : SS1, Sous-Sol 2: SS2), et les deux régions (Annaba et Sétif).

L'analyse de la variance (ANOVA) a été employée pour analyser les effets des procédés de facteurs expérimentaux (3 niveaux : LT, TCS, SD), région (2 niveaux : Annaba, Sétif), et campagne d'échantillonnage (2 niveaux : début de l'été 2014 et fin d'automne 2014), selon un modèle factorisé avec tous les facteurs traité en tant que facteurs fixes. L'ANOVA a modelé les effets des trois facteurs principaux « procédés », « régions » et « couches » et l'interaction entre ces derniers « régions × procédés », « campagnes d'échantillonnages × régions », « couches × procédés » et « couches × la région × procédée ».

En raison du nombre restreint de valeurs (beaucoup de cellules vides sans valeurs), l'ANOVA de quelques paramètres de la stabilité physique a été exécutée en limitant les effets d'interaction à la « région × procédée ». Le niveau de signification a été libellé comme suit : $p \leq 0.001$ = très hautement significatif, $p \leq 0.01$ hautement significatif, $p \leq 0.05$ = significatif et $p \leq 0,1$ = presque significatif. Les différences entre les moyennes des procédés, régions, et couches ont été comparées par un essai de Tukey-Kramer selon à un $p \leq 0.05$.

Des corrélations ont été calculées entre les paramètres physiques, chimiques et biologiques (utilisant toutes les différentes valeurs par échantillon) et entre ces groupes de paramètres (utilisant les valeurs moyennes par facteur et couche du sol). Toutes les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant la version 12 de STATISTICA (StatSoft, Tulsa/OK, Etats-unis).

Remarque :

Avant de commencer l'interprétation il est important de noter que nous avons choisi d'interpréter nos résultats par couche. Le tableau suivant montre les différentes couches selon la profondeur :

Couche Superficielle: (CS) = La couche arable

Sous-Sol : SS1, Sous-Sol 2: SS2

Physiques (cm)	SD	TCS	LT	chimique et biologique (cm)	SD	TCS	LT	
CS1 (0-10)	CS1	CS1	CS1	(0-10)	CS	CS	CS	
CS2 (10-20)	CS2			(10_20)	SS1			SS1
CS2 (20-30)		(20-30)						
SS1 (30-80)	SS1			SS1 (30-80)	SS1			
SS2 (80-140)	SS2			SS2 (80-140)	SS2			

Chapitre III Résultats et discussion

1. L'influence sur les propriétés physiques

Pour les paramètres physiques étudiés, il nous a manqué quelques résultats de différentes couches, à cause de la perte de quelques cylindres (durant notre voyage, lors du changement des cylindres PVC en cylindres de référence, et au moment des manipulations de quelques analyses), cela nous a empêché de trouver de différences significatives pour renforcer nos résultats statistiques.

1.1. L'analyse granulométrique

D'après le triangle textural du sol, la texture de la région de Sétif est limono-argileuse dans les TCS en couche superficielle (CS), sous-sol 1(SS1) à argileuse en profondeur sous-sol 2 (SS2). La texture en SD est limono-argileuse pour la deuxième campagne à argileuse dans la première campagne d'échantillonnage parce que nous avons changé de fosse (loin environ de 2 m de la première, ceci indique l'existence d'une hétérogénéité de texture spatiale du sol surtout en profondeur). Concernant le LT sa texture est argileuse avec un pourcentage d'argile qui dépasse 60% dans la CS et SS1. La texture des sols de la région d'Annaba est argileuse, sauf que pour la première campagne d'échantillonnage dans le SD en profondeur nous avons rencontré une texture argilo-limoneuse. (Voir les triangles texturaux en annexe 5).

1.2. La densité apparente

Il convient de dire que la DA n'a pas montré des différences significatives avec les facteurs principaux (région, procédé et couche); mais nous avons trouvé des tendances avec les procédés et les couches.

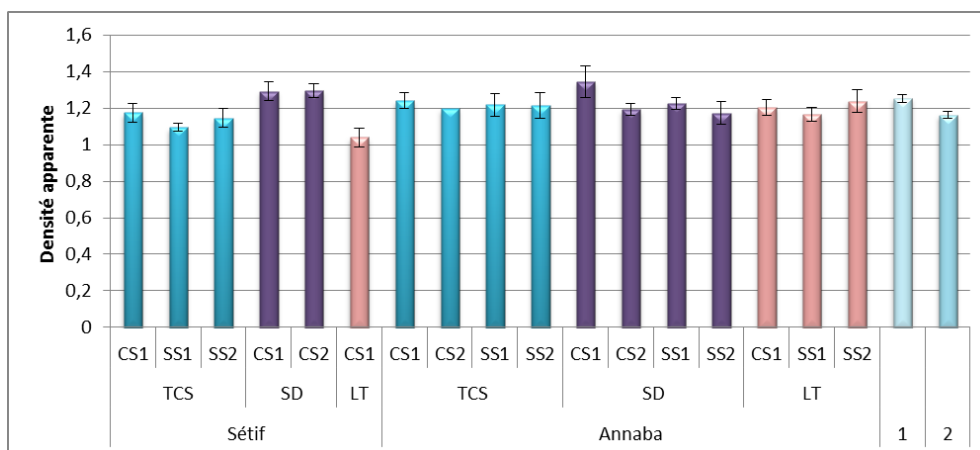


Figure 10: Les moyennes de la DA pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (Couche Superficielle 1 et 2 « CS1 », « CS2 », Sous-Sol1 « SS1 » et Sous-Sol 2 « SS2 »). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 2: Résultats de l'ANOVA pour la DA et la DR. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leurs interactions ((Région*Procédé), (Région*Couche_physique), (Procédé*Couche_physique)).

	REGION	PROCEDE	COUCHE_P	R*P	R*C_P	P*C_P
DR	0,90	0,89	0,29	0,02	0,35	0,03
DA	0,15	0,72	0,34	0,58	0,66	0,75

À Sétif, la plus haute moyenne de DA a été enregistrée en SD, approximativement avec la même moyenne en CS1 et CS2. Ensuite en TCS, la DA a été plus haute en CS1, qu'en profondeur (SS1, SS2). Le LT présente la moyenne la plus faible en CS1. En revanche, les moyennes à Annaba ont été plus élevées par rapport à celles de Sétif, de sorte qu'on trouve les moyennes les plus élevées enregistrées successivement en SD, TCS et LT, avec une variation dans les couches (CS1, CS2, SS1, SS2). Toutefois, nous avons remarqué que la CS a gardé la plus haute moyenne, sauf en LT, nous n'avons pas noté une grande différence dans la variation des moyennes entre les couches (fig:10).

Concernant les deux périodes d'échantillonnage, les plus hautes moyennes ont été relevées dans la 1^{ère} campagne, mais, elles ne diffèrent pas significativement. Ces résultats ont prouvé que le travail du sol affecte la DA avec les différents procédés étudiés, de telle façon qu'il réduit respectivement la DA dans le LT, TCS et SD ce qui signifie que le degré d'ameublissement du sol affecte la DA. L'effet de l'échantillonnage sur la DA diminue pour la deuxième campagne, ceci dit que les DA réduites ont été dues à la perturbation mécanique lors du travail du sol. En outre, les valeurs élevées de la densité apparente pour les premières campagnes (exp : « 1.30 et 1.31 g/cm³ » pour le LT) signifient que les vides sont réduits et que les particules du sol sont compactées (voir les résultats: annexe 5).

1.3. La densité réelle

La DR a montré l'existence de différences très hautement significatives avec l'interaction des deux facteurs (Région × Procédé) et (procédé × couche_P). Cette variation a été principalement significative entre les deux régions. On peut dire donc, que la DR a été influencé par la région et les procédés. On peut noter également que les TCS ont un effet plus fort sur la DR par rapport au LT et SD.

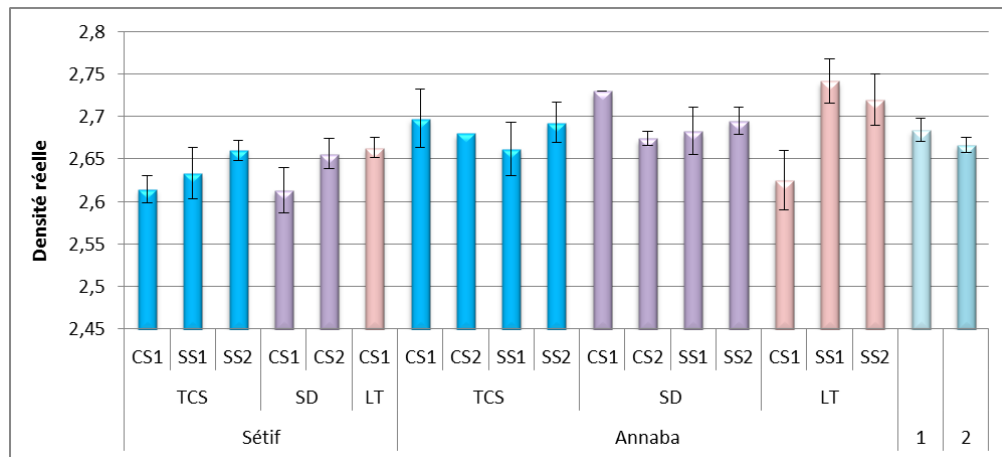


Figure 11 : Les moyennes de la DR pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Les moyennes de la DR ont été plus élevées à Annaba par rapport à Sétif avec une variation aléatoire pour les couches. A Sétif, les moyennes de DR ont été augmentées en fonction des couches dans l'ordre suivant (CS1, CS2, SS1, SS2), avec une moyenne élevée en CS dans le LT par rapport au SD et TCS. Concernant Annaba, le SD, dans les deux campagnes, exerce un effet plus élevé sur la DR par rapport au TCS et LT. Les plus hautes moyennes de DR à Annaba ont été enregistrées en CS dans le SD (2.73 g/cm^3) ; LT (2.68 g/cm^3) et TCS (2.64 g/cm^3). Il est à noter également que la variation des moyennes des couches (CS2, SS1 et SS2) varie en fonction des procédés (Fig: 10), de sorte qu'elle diminue successivement dans (CS2, SS1 et SS2) et avec les procédés suivants (TCS, SD et LT). En général la comparaison entre les deux campagnes d'échantillonnage fait apparaître que la DR est plus élevée dans la première campagne par rapport à la deuxième.

1.4. La porosité totale

La porosité totale a enregistré des moyennes élevées à Sétif, et avec une moyenne plus élevée dans CS1 pour TCS et SD. Mais elle a été moins élevée dans les autres couches. Par contre à Annaba les moyennes de la porosité ne sont pas autant élevées que celles de Sétif marquant une légère différence entre les procédés de façon que les moyennes les plus élevées ont été enregistrées en TCS, LT et SD. En générale la porosité totale a été plus élevée dans la deuxième campagne d'échantillonnage par rapport à celle de la première, ceci pourrait être expliqué par la période d'ameublissements des sols où le travail du sol contribue à modifier l'environnement du sol et l'amélioration de la porosité.

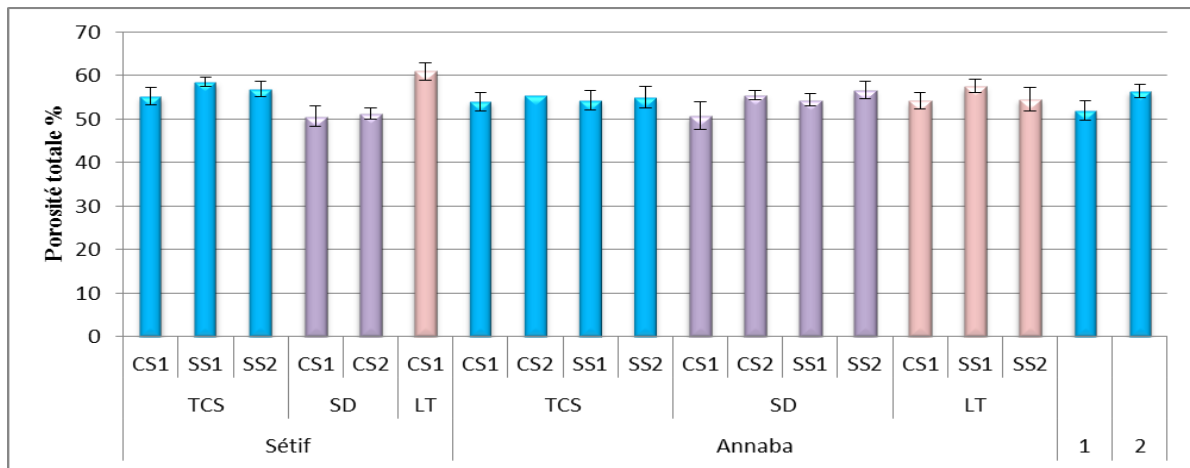


Figure 12 : Les moyennes de la porosité totale pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 3: Résultats de l'ANOVA pour la porosité totale. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leurs interactions ((Région*Procédé), (Région*Couche_physique), (Procédé*Couche_physique).

Porosité totale	REGION	PROCEDE	COUCHE_P	R*P	R*C_P	P*C_P
	0,16	0,66	0,21	0,23	0,78	0,80

Par ailleurs, on n'a pas trouvé des différences significatives pour la porosité totale. Mais le graphique nous a montré clairement la variabilité des valeurs avec les procédés, d'où nous avons déduit que le SD et le LT ont un effet élevée sur la porosité totale que celui des TCS. Concernant les autres facteurs (région, procédé et même leurs interactions) on n'a pas trouvé de très forts effets.

La DA et par conséquent la PT ont généralement montré des effets et des variations différents avec les divers types de travail du sol « les procédé LT, TCS, et SD ». Ces effets n'ont pas été très distincts à Annaba, à l'exception du LT qui a présenté une légère augmentation due à une structure du sol plus ameublie. Cependant, les effets du travail du sol ont été clairement visibles à Sétif, avec des différences considérables entre la densité de structure du sol. Ces effets ont été particulièrement confirmés lors de la seconde campagne d'échantillonnage après le travail du sol, avec des valeurs de DA plus élevées et des valeurs PT plus faibles dans TCS. Les valeurs de la DA les plus faibles et les PT les plus élevées sont observés en LT, ce qui prouve et confirme que le travail du sol modifie la DA ainsi que la PT.

1.5. La macroporosité

La macroporosité désigne la fraction grossière de porosité occupée par l'air dans le sol. Ses valeurs ont montré un degré de variabilité plus élevé par rapport aux valeurs de DA et PT

pour les trois procédés, elle a été moins faible dans la région d'Annaba en condition 30 hPa et 60 hPa par rapport à celle de Sétif ; ce qui a réduit la signification statistique des effets du procédé.

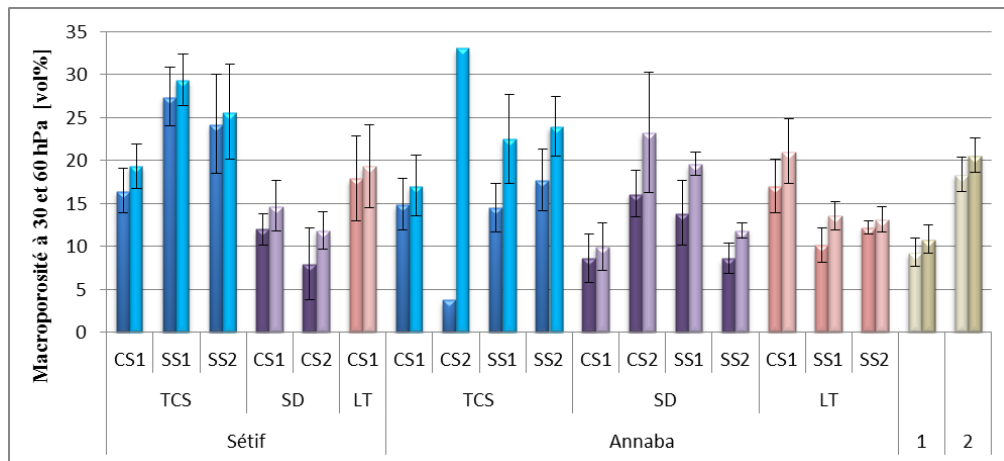


Figure 13 : Les moyennes de la macroporosité pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 4: Résultats de l'ANOVA pour la macroporosité. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leurs interactions ((Région*Procédé), (Région*Couche_physique), (Procédé*Couche_physique).

	REGION	PROCEDE	COUCHE_P	R*P	R*C_P	P*C_P
MPOR 30	0,28	1,00	0,39	0,95	0,24	0,14
MPOR 60	0,68	0,12	0,38	0,71	0,31	0,12

Pour les deux classes de MP (30 et 60 hPa), il n'y a pas d'effets clairs de travail du sol sur les deux sites. Cependant, à Sétif, un effet de travail du sol a été signalé pour les macropores (MP₃₀) un volume plus larges lors de la seconde campagne d'échantillonnage après le travail du sol : des valeurs extrêmement élevées pour MP₃₀ allant de 12% en SD à 16 et 17 % en LT et TCS, respectivement pour la couche superficielle 1 (CS1). Lors de la première campagne d'échantillonnage pendant la saison de croissance « première campagne d'échantillonnage », cet effet n'a pas été confirmé, avec des valeurs de MP₃₀ comprises entre 9 et 11% en volume. Ce qui révèle un volume de macropores plus étroits lors de la première campagne d'échantillonnage à (30hPa).

Notons, que pour les toutes couches, la MP a marqué progressivement dans la CS1 des valeurs faibles pour les trois types du travail du sol (SD, TCS et LT), mais les valeurs de SD ont diminué dans la CS2. Par contre en TCS la MP a augmenté en fonction de la profondeur. Généralement pour les deux campagnes d'échantillonnage, la macroporosité a suivi la même

évolution que la porosité totale. Ces moyennes de macroporosité n'ont pas marqué des différences significatives.

A Annaba, il existe une différence remarquable entre les valeurs de MP_{30} et MP_{60} . Elles sont plus élevées lors de la première campagne d'échantillonnage, particulièrement celles de la MP_{30} qui ont été plus élevées en CS1 dans le LT que dans les TCS et le SD (17 contre 8.6 vol.%, respectivement). La CS2 en SD a été plus élevée qu'avec les TCS, par contre en SS1 et SS2 ont été plus élevées en TCS, SD et LT. Dans la deuxième campagne d'échantillonnage à Annaba, nous avons marqué une légère différence de macroporosité entre les procédés, mais il y a eu une variabilité élevée, en particulier dans les MP_{60} , les macropores ont eu des volumes plus petits (pores étroits). Dans ce cas, la macroporosité dans SD et LT a été concentrée sur des macropores MP_{30} plus vastes, tandis que dans les TCS, la macroporosité MP_{60} a impliqué principalement des macropores plus étroits.

En général, nous avons remarqué aussi que la moyenne la plus élevée a été toujours enregistrée dans la deuxième campagne d'échantillonnage dans les deux conditions à 30 hPa et à 60 hPa (annexe 5). Ces résultats nous ont permis d'expliquer que la perturbation du sol par le travail a entraîné un ameublissement du sol et donc une augmentation de la macroporosité de la zone travaillée.

1.6. La perméabilité à l'air

De par sa définition même, la notion de perméabilité relève de la théorie de l'écoulement des fluides en milieu poreux. Il est donc naturel de relier la perméabilité à l'air aux possibilités d'écoulement en masse de l'air dans le sol.

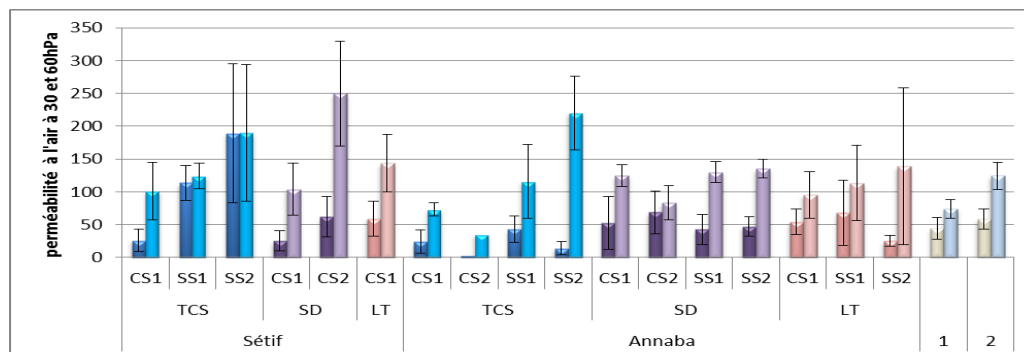


Figure 14: Les moyennes de la perméabilité à l'air PA pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 5: Résultats de l'ANOVA pour la perméabilité à l'air PA. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leurs interactions ((Région*Procédé), (Région*Couche_physique), (Procédé*Couche_physique).

	REGION	PROCEDE	COUCHE_P	R*P	R*C_P	P*C_P
PERM 30	0,04	0,66	0,17	0,91	0,09	0,97
PERM 60	0,30	0,77	0,81	0,84	0,49	0,79

Bien que les différences n'ont pas été significatives pour la perméabilité avec les deux conditions à 30 hPa et à 60 hPa, nous avons trouvé une variation des moyennes entre les procédés. La perméabilité d'air a augmenté dans l'ordre croissant des procédés (TCS, LT et SD). Pour la région de Sétif nous avons trouvé des moyennes plus élevées qu'à Annaba qui ont augmenté dans l'ordre suivant (TCS, SD et LT). En ce qui concerne les périodes d'échantillonnage la perméabilité a été plus élevée dans la deuxième campagne par rapport à la première pour les deux régions.

En revanche, à Sétif les moyennes moins faibles se sont localisées dans les TCS pour la couche CS1. Nous avons enregistré aussi qu'en condition de 60 hPa pour le SD la perméabilité d'air a enregistré une valeur très élevée. A 30 hPa, nous avons remarqué que la plus faible valeur de PA est localisée dans le SD mais elle a augmenté dans le LT et TCS. En condition de 60 hPa, la perméabilité d'air a augmenté dans l'ordre des procédés suivants TCS, SD et LT. En général, la perméabilité d'air dans la deuxième campagne d'échantillonnage a été plus élevée par rapport à celle de la première du fait de l'ameublissement du sol qui a provoqué l'augmentation de l'aération du sol. De plus, la perméabilité d'air a augmenté en fonction de la profondeur du profil (fig: 24), les TCS ont toujours conservé les plus hautes moyennes. Ces moyennes élevées en profondeur ont été principalement dues à une bonne activité biologique surtout des vers de terres à Annaba, et à la richesse racinaires jusqu'au fond du profil spécialement en TCS à Sétif.

A propos de la CS2 dans la région d'Annaba en condition de 30 hPa, la PA a augmenté successivement dans TCS, SD et LT mais en condition de 60 hPa la plus haute valeur a été détectée successivement dans les SD, TCS et LT. Pour tous les profils et dans les trois procédés nous avons remarqué qu'en TCS les moyennes ont été respectivement faibles pour toutes les couches de SD et LT.

Le fonctionnement des macropores MP_{30} et MP_{60} a été évalué en mesurant leur perméabilité à l'air. Ce paramètre fonctionnel a montré une variabilité encore plus élevée des valeurs des macropores des procédés, qui nous ont empêchés de détecter la signification statistique des

effets du traitement. En général, les valeurs absolues pour PA ont été élevées par rapport à celles rapportées pour les sols typiques d'Europe centrale (REF).

Bien que les variabilités générales des effets des procédés pour le volume des macropores ont été également détectées avec la perméabilité à l'air, les valeurs de la perméabilité à l'air ont été relativement plus élevées par rapport aux valeurs de la macroporosité dans les TCS et surtout le LT. Cela signifie que les macropores et surtout les MP_{60} possèdent une efficacité à transporter les gaz, à titre d'exemple, à Annaba la PA dans le SD a été plus élevée qu'en LT. Ceci a été confirmé par les corrélations entre le volume des macropores et la perméabilité à l'air à 30hPa surtout pour la couche superficielle (fig : 15). Lors de la première campagne d'échantillonnage la PA a été plus élevée en TCS et LT pendant la saison de croissance végétale ; cependant, dans la deuxième campagne d'échantillonnage, après le travail du sol, la PA a été faible. En revanche, les valeurs PA_{60} ont été généralement plus élevées dans le SD que dans les TCS et le LT dans les deux campagnes d'échantillonnage, ce qui signifie que les macropores à 60 hPa détiennent une forte efficacité de transport de l'air.

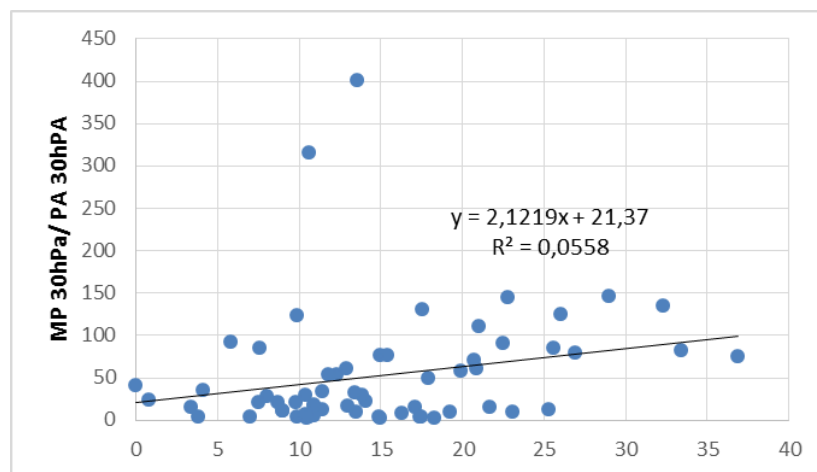


Figure 15 : Corrélations entre le volume des macropores et la perméabilité à l'air à 30hPa pour la couche superficielle

1.7. Le coefficient de diffusion gazeuse (D_p / D_0)

Dans les pores du sol remplis d'air, le transport de gaz s'établit en fonction des effets combinés de la diffusion tout au long de gradient de concentration et du flux volumique par advection due aux variations de pression à proximité de la surface. Tandis que la diffusion est pratiquement indépendante du rayon des pores, le flux volumique par advection est proportionnel à la puissance quatre du rayon des pores, selon la loi de Hagen-Poiseuille.

Pour cette analyse, nous devons signaler que nous avons perdu les résultats à 30hPa des échantillons de la région de Sétif par erreur lors de l'expérimentation.

Malgré l'insuffisance des résultats de D_p/D_0 , les moyennes que nous avons obtenues, nous ont permis de renforcer les résultats obtenus auparavant avec la PA, PT et DA pour caractériser les pores du sol et sa structure. De manière qu'à Sétif, généralement la D_p/D_0 a été plus faible dans le sous-sol que dans la couche superficielle. A propos d'Annaba, dans la couche superficielle, le D_p/D_0 a été plus élevé dans le SD que dans TCS et LT, mais il est inférieur dans le sous-sol à l'exception, dans TCS à 60 hPa qui a été très élevée.

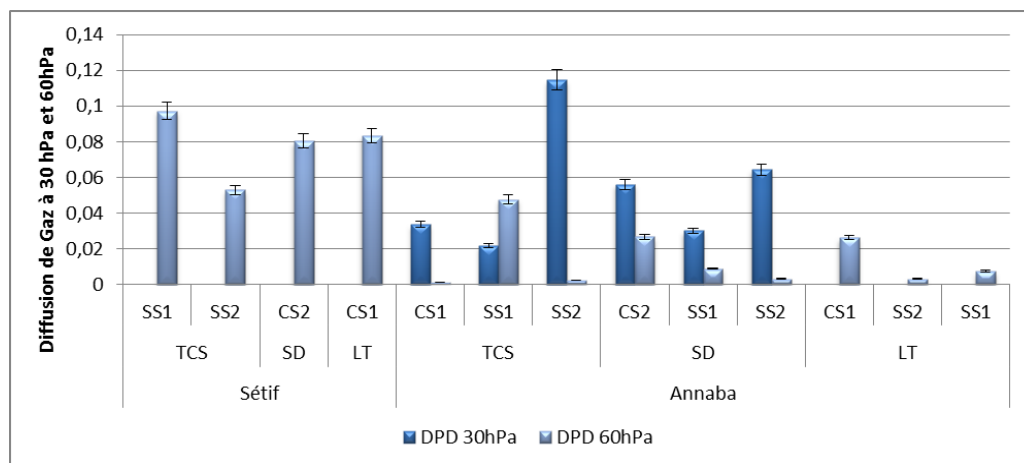


Figure 16: Les moyennes de la diffusion de gaz pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 6: Résultats de l'ANOVA pour la diffusion de gaz. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche _physique.

	REGION	PROCEDE	COUCHE_P
DPD030	0,84	0,10	0,03
DPD060	0,00	0,83	0,54

Ces résultats indiquent que la continuité du système poreux « biopores » dans le SD a été élevée pendant la saison de croissance, alors qu'elle ne diffère pas de celle de TCS et de LT peu après le travail du sol.

Ceci pourrait être interprété comme indice de la continuité du système poreux en SD, qui a été développé pendant la première campagne principalement par des processus biophysiques et physicochimiques. La continuité vaste des macropores MP_{30} pourrait être perturbée par des impacts de compactage durant les opérations de récolte. En revanche, les valeurs PA_{60} dans SD sont toujours supérieures à celles dans TCS et LT, ce qui montre que les macropores MP_{60}

sont plus résistants aux impacts mécaniques et peuvent donc maintenir leur fonctionnalité en dépit du risque de compactage dans les deux régions étudiées.

Le fait de considérer les valeurs absolues de la perméabilité à l'air, cela n'a jamais posé de problème sur les sites d'étude, elle nous a fourni des informations intéressantes concernant les propriétés du système poreux des différents systèmes de travail du sol, et les processus de formation de la structure impliqués. En général, le système macroporeux de SD semble être plus efficace, car il permet une plus grande perméabilité à l'air par unité de volume de macropores. Ceci est probablement le résultat des processus clés de formation de la structure qui ont été actifs dans les différents traitements de travail du sol. Le détachement mécanique LT domine, conduisant à un système de pores plus orienté aléatoirement directement après labour, tandis que les processus structuraux dominants dans SD ont été biophysiques et physicochimiques, ce qui conduit à un système poreux plus continu avec une conductivité et stabilité plus élevée au cours de la saison de croissance.

Les résultats physiques pour les paramètres de structure du sol (DA, PT et MP) ont montré en général l'effet de l'action de desserrage des traitements de labour, avec un ameublissement intensif du LT entraînant une structure très poreuse surtout après le travail du sol et un ameublissement réduit du SD. En conséquence de processus physico-chimiques et biophysiques conduisant à une structure généralement plus dense et moins poreuse. Le sol TCS a montré un comportement intermédiaire, avec des éléments LT et SD. Sur un seuil à base des valeurs pour le volume absolu des macropores (ex: TCS=30 cm³/cm³, SD=26 cm³/cm³, LT=11 cm³/cm³), la qualité de la structure dans les deux régions a été généralement satisfaisante, et même bonne, malgré les effets observés du traitement. La seule exception a été dans la première campagne d'échantillonnage à Annaba, lorsque SD (22.8 cm³/cm³) a présenté quelques valeurs MP₆₀ basses combinées avec des valeurs DA élevées.

1.8. La porosité totale perdue à 250 kPa

Avec une contrainte de 250 kPa, la porosité totale perdue, a présenté à Sétif la plus forte moyenne en couche superficielle principalement dans le LT, puis diminue respectivement en TCS et SD. Nous avons observé ensuite une variation alternative entre les couches pour le SD et pour les TCS. À Annaba, nous avons trouvé les plus fortes moyennes de la porosité totale perdue successivement dans les TCS en CS1, CS2, SS1 et SS2. En seconde position, nous avons trouvé le SD qui a signalé une porosité totale perdue plus élevée en CS1; ensuite les

moyennes accroissent avec la profondeur. Pour les LT les moyennes de la PTP, ont vu une augmentation en fonction de la profondeur des procédés.

Ces résultats sont statistiquement significatifs pour l'interaction « région × procédé » ce qui signifie que les sols d'Annaba sont très stables par rapport à ceux de Sétif, en particulier avec les TCS, vu la richesse de cette terre en argile ainsi que la bonne pratique du travail simplifié.

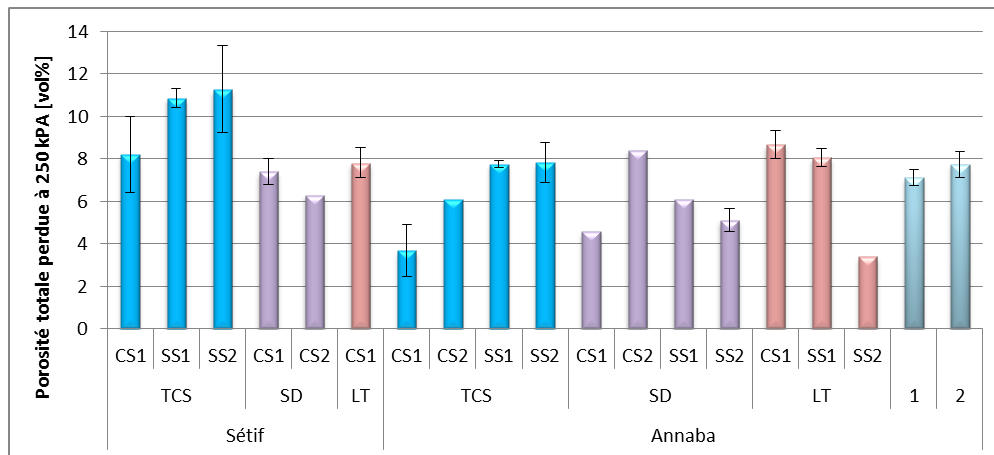


Figure 17 : Les moyennes de la PTP pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 7: Résultats de l'ANOVA pour la PTP. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche _physique.

PTP	REGION	PROCEDE	COUCHE_P	R*P	R*C_P	P*C_P
	0,18	0,81	0,31	0,02	0,21	0,22

La perte de volume poreux causée par une contrainte verticale de 250 kPa, appliquée à un potentiel matriciel de 60 hPa, a été utilisée comme indicateur de la stabilité de la structure du sol (Weisskopf et al., 2013). L'analyse statistique de PTP_{250} a prouvé que les traitements du travail du sol produisent un effet sur ces valeurs. A Annaba les valeurs dans le LT ont été significativement plus élevées que dans les TCS, signifiant que la stabilité de structure du sol a été plus élevée dans les TCS que dans le LT (fig: 27). Il y a eu également un effet interactif très net entre la région expérimentale, la campagne d'échantillonnage et le traitement du sol pour ce paramètre: PTP 250 kPa dans la deuxième campagne d'échantillonnage, après le travail du sol, la PTP a été très élevée dans les TCS (ce qui montre une très faible stabilité) à Sétif, alors qu'il a été très bas à Annaba ce qui conduit donc à une bonne stabilité. Ceci confirme que le travail du sol affecte la stabilité structurale de façon différente dans les deux régions.

1.9. La macroporosité résiduelle

Pour les différentes contraintes étudiées, il y a eu une relation inversement proportionnelle, lorsque le tassement augmente la macroporosité diminue. D'où, nous avons calculé la MPR à 250 kPa à titre d'exemple. Bien que la MPR n'a pas montré des différences significatives, sauf avec « région × procédé », ou nous avons trouvé des variations très claires. Ceci a été enregistré à Sétif, pour la CS1 les moyennes ont été plus élevées par ordre décroissant dans les LT, le SD et les TCS, qu'est due principalement à l'effet de travail du sol. Ces moyennes diminuent dans la CS2 en SD, et augmentent dans les sous-sols pour les TCS.

Par contre, à Annaba les TCS enregistrent respectivement une moyenne en CS1 très élevée par rapport au LT et SD. Ces moyennes de la MPR ont été enregistrées avec des variations en fonction de la profondeur (du CS1 jusqu'au SS2) pour tous les trois procédés, conséquence due à l'effet de travail du sol en couche superficielle.

Selon l'analyse de Tukey pour la MPR_{250} , la CS1 a montré une différence significative entre le TCS ($2.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) à Annaba qui a eu une structure stable par rapport à celle de Sétif ($10.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

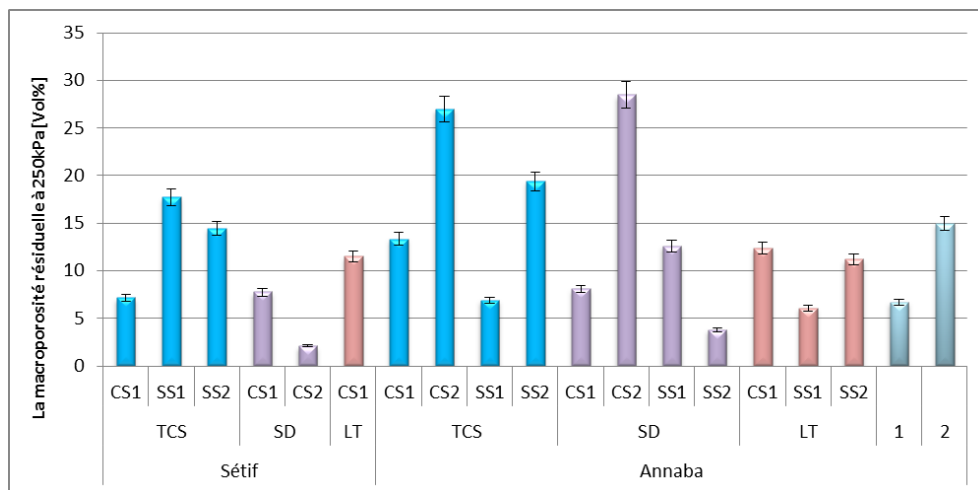


Figure 18: Les moyennes de la MPR pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, CS2, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 8: Résultats de l'ANOVA pour la MPR. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche _physique.

Macroporosité résiduelle	REGION	PROCEDE	COUCHE_P	R*P	R*C_P	P*C_P
	0,33	0,87	0,40	0,89	0,08	0,21

Les résultats pour MPR_{250} ont été généralement très semblables à ceux de MP_{60} , ce qui signifie que la perte de volume poreux à une contrainte de 250 kPa a été similaire dans tous les traitements (voir PTP_{250}), donc le volume MP_{60} des échantillons du sol sans contrainte verticale supplémentaire principalement définit la valeur de ce paramètre (MPR_{250}). La seule exception a été la valeur de la PTP_{250} élevée lors de la seconde campagne d'échantillonnage à Sétif, ce qui indique une très faible stabilité structurale dans ce domaine, entraînant une perte plus importante de volume poreux et donc des valeurs MPR_{250} inférieures à la MP_{60} dans tous les autres traitements. Allons vers la profondeur, la perte de la porosité (PTP_{250}) a été moins faible et une macroporosité résiduelle (MPR_{250}) plus élevée, entraîne une bonne stabilité structurale en profondeur.

1.10. Le coefficient de compression

Sachant que nous avons perdu la plupart des résultats par erreur, lors de la manipulation du test œdométrique, les résultats que nous avons pu obtenir sont présentés, et leurs interprétations ont été réalisées sans l'analyse statistique. Nous avons mesuré le tassement d'un cylindre du sol en fonction du temps pour un intervalle de chargement donné, ce qui nous a permis d'établir une courbe de consolidation définie. A partir des courbes de compression obtenues, nous avons déterminé la contrainte de précompression qui est définie par la contrainte la plus élevée exercée sur la structure jusqu'à présent (voir en annexe 6), de quelques points représenté ci-dessus, et à partir de la méthode Casagrande (1936) nous avons déterminée l'indice de compression, qui est habituellement appliqué pour déterminer la contrainte de précompression, lorsque le passage de la déformation purement élastique à la déformation plastique se produit brusquement.

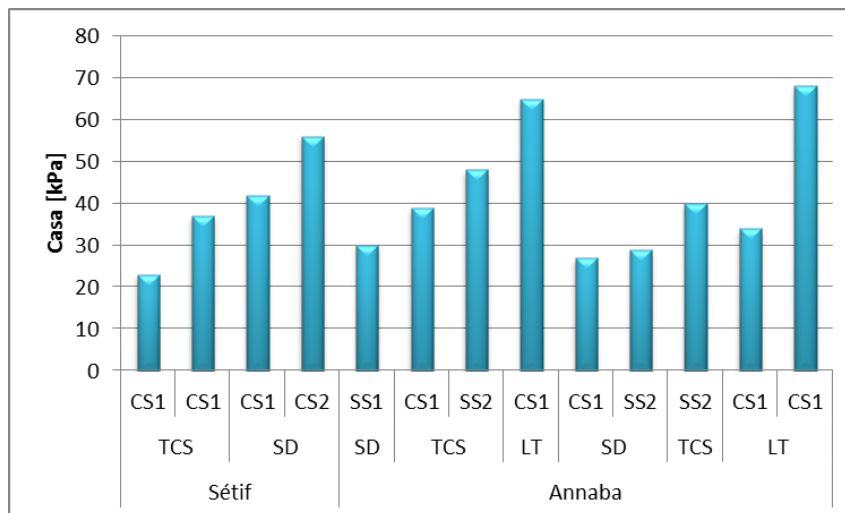


Figure 19 : Les valeurs de Casagrande obtenu avec les courbes de précompression pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux et les deux campagnes d'échantillonnage.

À Sétif, nos résultats ont montré que les TCS ont des coefficients de compression plus faibles en CS par rapport à ceux de SD, ce qui peut signifier une stabilité structurale plus élevée en SD qu'en TCS. A Annaba, le LT a présenté une valeur plus élevée de précompression en CS désignant une structure plus stable avant le travail du sol. Le TCS aussi en SS2, a marqué une stabilité structurale dans la première campagne que dans la deuxième, et dans la profondeur mieux qu'en surface. Le SD a donné une structure moins stable en SS1 à celle et TCS. Généralement, Annaba présente une bonne stabilité structurale qu'à Sétif.

Le concept de stress de précompression a été testé dans plusieurs études sur le terrain avec un sous-sol non perturbé. Gysi et al. (1999) ont constaté qu'après une seule passe de véhicule, la contrainte de précompression augmente en fonction de la pression maximale du sol là où la stabilité du sol est dépassée. Semmel et Horn (1995) ont signalé également que le trafic intensif pendant plusieurs années augmente le stress de précompression par rapport au sol soumis à un labour de conservation. Keller et al. (2002) ont observé un déplacement permanent distinct du sol aux endroits où la contrainte verticale exercée par la machine dépasse la contrainte de précompression et beaucoup moins, mais toujours mesurable, le déplacement résiduel dans des conditions où la charge appliquée n'excède pas la contrainte de précompression. Arvidsson et al. (2001) ont trouvé un bon accord entre la profondeur de compactage calculée et la profondeur à laquelle le déplacement vertical du sol est observé.

○ Discussion

Pour les sols argileux, une étude précédente de Franzluebbbers et Arshad (1996) a trouvé des valeurs de DA généralement plus élevées dans la couche du sol supérieure de 20 cm dans le SD que dans les traitements LT. De même, Jay et al. (2016) ont montré que, comparé à d'autres systèmes de travail du sol, le descellement intensif par labourage conduit à des valeurs de DA et de macroporosité plus élevées dans les 10 premiers centimètres. L'utilisation continue de SD améliore la qualité physique du sol principalement dans les couches plus profondes, comme Moacir et al. (2016) pour la porosité totale, la perméabilité à l'air et la stabilité structurale. De plus, la densité des racines montre parfois des valeurs plus élevées en SD que dans d'autres systèmes, révélant la possibilité de bonnes conditions du sol pour la croissance des racines dans le SD (Lampurlanes et Cantero-Martinez, 2003). Le sol sous SD peut avoir des valeurs de DA élevées, mais McVay et al. (2006) ont constaté que ces valeurs de DA demeuraient inférieures aux valeurs seuils critiques pour la croissance et l'activité des racines. Alvarez et Steinbach (2009) ont démontré que la résistance à la pénétration du cône et DA dans la couche superficielle peut être plus élevée qu'en profondeur sous TCS et SD que

sous LT, tandis que dans une expérience décrite par Ji et al. (2013), LT a abaissé la résistance à la pénétration et abaissé la DA. De plus, les résultats de notre étude concordent généralement avec ceux de Kay et van den Bygaart (2002) et de Diego (2006), confirmant que les sols SD ont généralement une structure plus compacte et moins poreuse que les sols labourés. La baisse de l'intensité du dessèchement mécanique du sol entraîne une augmentation de la DA, ce qui réduit les PT et MP, qui sont les principaux critères d'évaluation du compactage du sol (Badalikova, 2010). Pour DA et PT, nos données appuient les résultats de recherches menées dans des zones semi-arides, au Maroc par Mrabet (2001) et en Algérie par Kourougli et Ait Ouali (2010) et Mekhlouf et al. (2011). Cependant, ils ne sont pas cohérents avec les résultats présentés par Abdellaoui et al. (2010), qui ont trouvé dans leur expérience une différenciation claire de la structure de la couche arable entre les traitements de labour, avec des valeurs de DA plus élevées en LT, probablement causées par le compactage du sol et la faible teneur en matière organique du sol.

2. L'influence sur les propriétés chimiques

2.1. pHeau

Bien que le pH des sols dans les deux régions de Sétif et Annaba, n'a pas été significativement différent entre les traitements de travail du sol et les couches, nous avons quand même observé une légère tendance des valeurs entre neutre à alcalin.

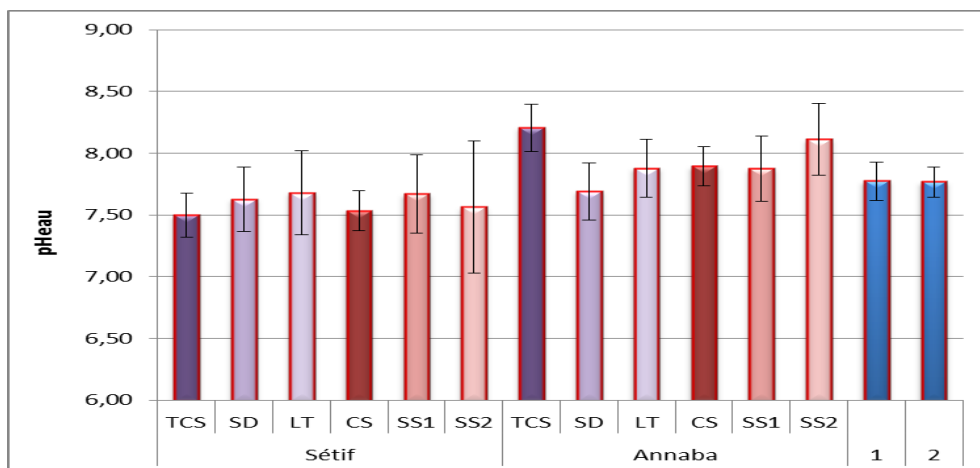


Figure 20 : Les moyennes de pH eau pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 9: Résultats de l'ANOVA pour le pH eau. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

pHeau	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,26	0,81	0,85	0,36	0,94

A Annaba, la valeur moyenne de pH est de l'ordre de 7.46 dans le SD, puis en TCS avec une moyenne de 7.85 et 7.67 en LT. A Sétif le pH augmente en fonction des procédés suivants (TCS, SD LT) avec des valeurs respectives. Cependant, une différence considérable a été appariée dans les deux régions entre les deux campagnes d'échantillonnage: les valeurs du pH de la première campagne d'échantillonnage (pendant la saison de croissance) ont été inférieures aux valeurs correspondantes de la deuxième campagne d'échantillonnage (après labour).

2.2. Carbone organique

Les résultats du carbone organique pour la région de Sétif ont présentés des pourcentages très élevés, variables entre [2.07% - 6.37%] (voir les tableaux des résultats en annexe 5) dans la

première campagne d'échantillonnage, avec tous les procédés (TCS, SD et LT) et distribuées arbitrairement en fonction des couches, ce qui signifie que le travail du sol a un effet sur la distribution de COS% dans les différentes couches du sol, même à la présence des cultures. Par contre dans la deuxième campagne d'échantillonnage nous avons observé des faibles teneurs par rapport à la première campagne variant entre [1.53%- 4.93%] et restent toujours faibles en profondeurs. En ce qui concerne la région d'Annaba, nous avons observé dans le SD des teneurs élevées en CS et SS1, dans les TCS le COS % se distribuent dans tout le profil avec des teneurs élevées variables entre [2.48% et 3.58%]. Nous avons trouvé aussi la même chose pour le LT ainsi que pour les TCS (voir l'annexe 6). La MO% a suivi la même évolution que le carbone, qui présente des teneurs très élevées dans les deux régions avec tous les types de travail du sol et les profondeurs (voir les tableaux des résultats en annexe 6).

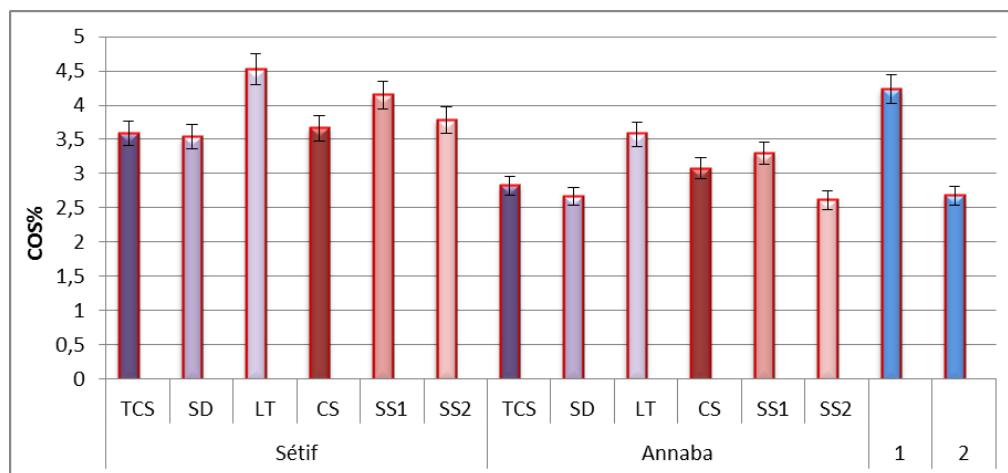


Figure 21: Teneur du COS pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS, SS1, SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 10: Résultats de l'ANOVA pour COS. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

COS	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,13	0,39	0,92	0,96	0,88

La variation des moyennes du carbone n'a pas montré de différences significatives. Mais les teneurs maximales en carbone se situent respectivement dans les LT, TCS et SD, et particulièrement en CS dans les trois modalités du travail du sol et dans les deux régions étudiées (Sétif et Annaba). En outre, nous avons trouvé que cette teneur en COS % du sol est toujours élevée dans le SS1, CS et SS2. La teneur la plus élevée du COS% dans LT à Sétif est directement liée à la teneur élevée d'argile dans ce traitement. Dans la première campagne d'échantillonnage, le COS% a été sensiblement plus haut que la deuxième, probablement

parce que les échantillons de la première campagne ont été prélevés pendant la croissance de culture, par conséquent ils sont riches en racines et résidus des plantes.

2.3. Carbone total et Azote total

La concentration du C-tot a été élevée en TCS, elle varie entre [4.02 % et 7.92%], celle du SD diminue légèrement par rapport au TCS. Les variations de ces concentrations, ont été plus hautes en surface et diminuent à la profondeur du profil, dans les deux campagnes d'échantillonnage. Concernant le LT nous avons trouvé que les moyennes du carbone total ont été faibles par rapport à celles de TCS, SD et qui ont diminué successivement à la profondeur CS, SS1 et SS2. Aussi, l'Azote total suit la même évolution que le C-tot mais avec des valeurs faibles variables entre [0.17 % et 0.28%].

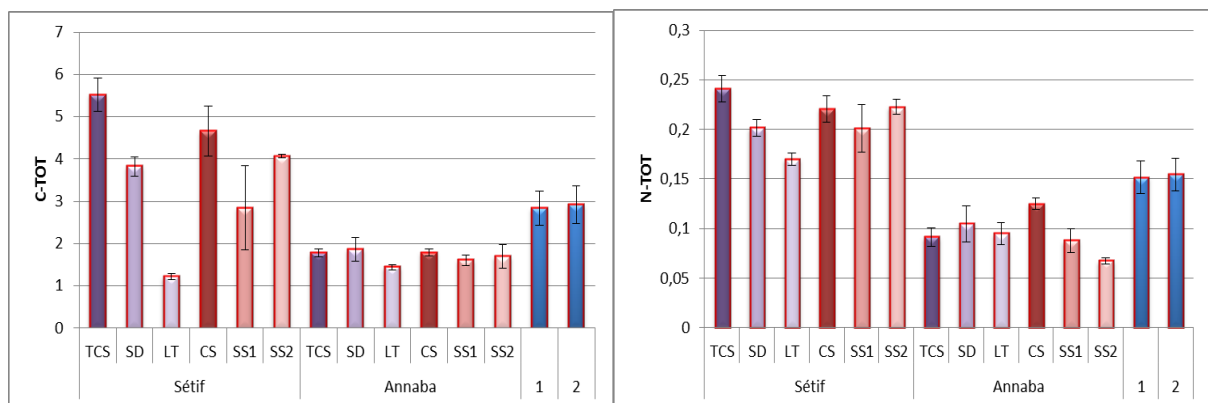


Figure 22: Teneur en carbone total C-tot et Azote total N-tot pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 11: Résultats de l'ANOVA pour C-tot et N-tot. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
C-tot	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
N-tot	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,31

Les variations du C-tot ont montré statistiquement des moyennes hautement significatives pour les Couches, Région et Procédé et leurs interactions. Les moyennes ont été plus élevées dans la région de Sétif que celle d'Annaba : Pour la région de Sétif, nous avons trouvé que les plus hautes moyennes sont significativement signalées dans les TCS, puis dans le SD et LT. Aussi les teneurs les plus élevées dans les couches ont été repérées dans les CS et diminuent significativement dans les SS1, puis augmentent significativement dans les SS2. Quant à la région d'Annaba, nous avons trouvé que les moyennes de SD et TCS ont été presque

identiques, mais avec des concentrations significativement décroissantes suivant l'ordre suivant SD, TCS et LT, et les teneurs sont élevées dans les CS et diminuent dans les SS1 et augmentent dans les SS2.

L'Azote total a varié avec une différence très hautement significative avec les régions pour la couche superficielle et tout le profil, et hautement significative avec les autres facteurs. Les moyennes les plus élevées ont été observées dans la région de Sétif par rapport à Annaba. À la région de Sétif, les concentrations les plus élevées se présentent dans l'ordre suivant TCS, SD et LT et principalement dans la CS, SS2, SS1. Mais dans la région d'Annaba les concentrations ont été presque égales, et se concentrent respectivement dans la CS, SS1 et SS2. Ceci peut être dû à l'apport des engrais azotés principalement en CS et aussi à une texture riche en argile.

1.4.1. Rapport carbone sur azote C/N

À Sétif, le rapport C/N pour les TCS dans tous les échantillons varie entre [18.7%- 47.43%], (voir tableaux des résultats en Annexe 5), et a diminué en fonction de la profondeur dans les deux campagnes d'échantillonnage. Il a suivi respectivement la même évolution dans les deux autres types (SD et LT). À Annaba, les TCS ont été différentes à celles de Sétif, le rapport C/N a été presque identique au SD dans tous les échantillons prélevés mais a augmenté en profondeur du profil et a varié entre [16.5%-28.68%]. Le LT a repéré des moyennes faibles par rapport à celles de TCS et SD.

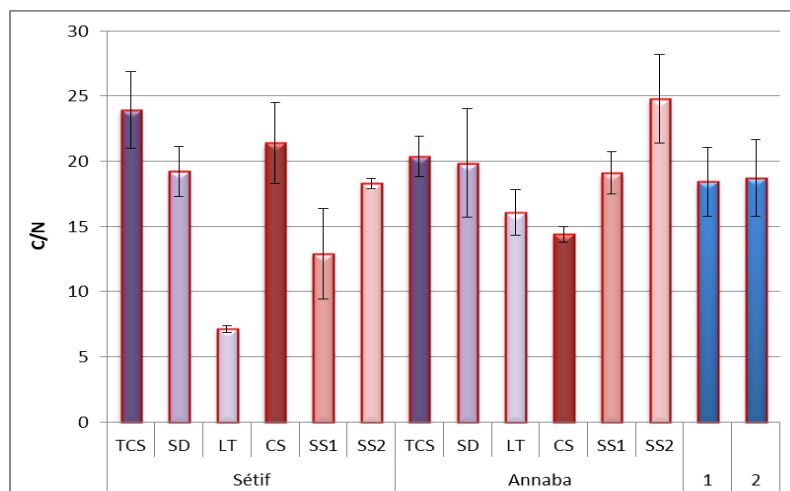


Figure 23: Le rapport C/N pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 12: Résultats de l'ANOVA pour le rapport C/N. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

C/N	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00

Le rapport C/N a montré des différences très hautement significatives avec les procédés et l'interaction (région $\times$ procédé) pour la couche superficielle, ce qui signifie que le travail du sol a influencé la minéralisation de la MOS% en fonctions des régions et des procédés. Il a été significatif aussi avec tous les facteurs pour la profondeur du profil à l'exception des couches. À Sétif, les moyennes ont été significativement élevées en fonction des procédés dans l'ordre suivant (TCS, SD, et LT), mais ont été distribuées arbitrairement avec la profondeur. Le rapport le plus élevé est enregistré dans le SS1 ensuite il a diminué dans les profondeurs SS2 et CS. Pour la région d'Annaba les moyennes du rapport C/N ont diminués en fonction des procédés suivants (TCS, SD et LT) et ont augmenté avec les couches dans l'ordre suivant (CS, SS1 et SS2).

Ces résultats nous ont indiqué l'existence d'une bonne minéralisation de la MO respectivement en TCS, SD et LT pour les deux régions, mais elle est meilleure à Annaba, bonne et rapide en surface et prend un régime lent en profondeur. Par contre à Sétif la minéralisation a été un peu lente et ne reste au sol qu'une faible quantité d'azote minéral.

2.4. Les cations échangeables, le taux de saturation et la CEC

La plus forte teneur des cations échangeables a été généralement enregistrée avec Mg^{2+} . La variation des moyennes à Annaba nous a permis de les classer selon la concentration moyenne croissante dans l'ordre suivant : $[Mg^{2+}, Na^+, H^+, K^+ \text{ et } Ca^{2+}]$, le LT a conservé les moyennes les plus élevées par rapport au TCS, SD.

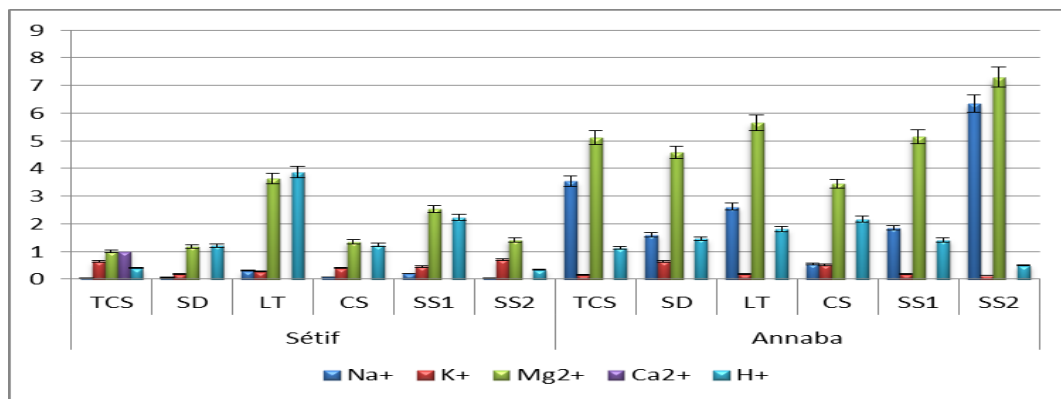


Figure 24: La concentration des cations échangeables [Mg^{2+} , Na^+ , H^+ , K^+ et Ca^{2+}], pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage, et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 13: Résultats de l'ANOVA pour la concentration des cations échangeables [Mg^{2+} , Na^+ , H^+ , K^+ et Ca^{2+}]. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
Sodium (Na^+)	0,00	0,01	0,52	0,00	/	/
Potassium (K^+)	0,00	0,53	0,45	0,65	/	/
Magnesium (Mg^{2+})	0,00	0,00	0,02	0,00	/	/
Calcium (Ca^{2+})	0,00	0,63	0,00	0,07	/	/
Hydrogène (H^+)	0,00	0,75	0,00	0,04	/	/

Pour la région de Sétif, les cations échangeables ont varié d'un procédé à un autre. Leur concentration totale permet leur classement selon l'ordre décroissant suivant : [Mg^{2+} , H^+ , K^+ , Ca^{2+} et Na^+], et avec les types de travail du sol croissant LT, SD et TCS. Les cations échangeables, en particulier le Mg^{2+} a eu une différence très hautement significative avec les régions, les couches et significative avec les procédés. Le cation Na^+ aussi a eu une différence hautement significative avec (région et couche). De plus, le K^+ ne diffère pas significativement avec tous les facteurs. Le Ca^{2+} a eu une différence hautement significative seulement avec les procédés, et ne présente aucune différence significative avec les autres procédés. Finalement le H^+ enregistre des différences hautement significatives avec les procédés et significatives avec les couches.

○ La CEC

Les moyennes de la CEC n'ont pas montré des différences hautement significatives qu'avec les procédés, et ont présenté des différences peu significatives avec la région. Ces effets significatifs ont été beaucoup plus clairs avec les TCS et LT à Sétif.

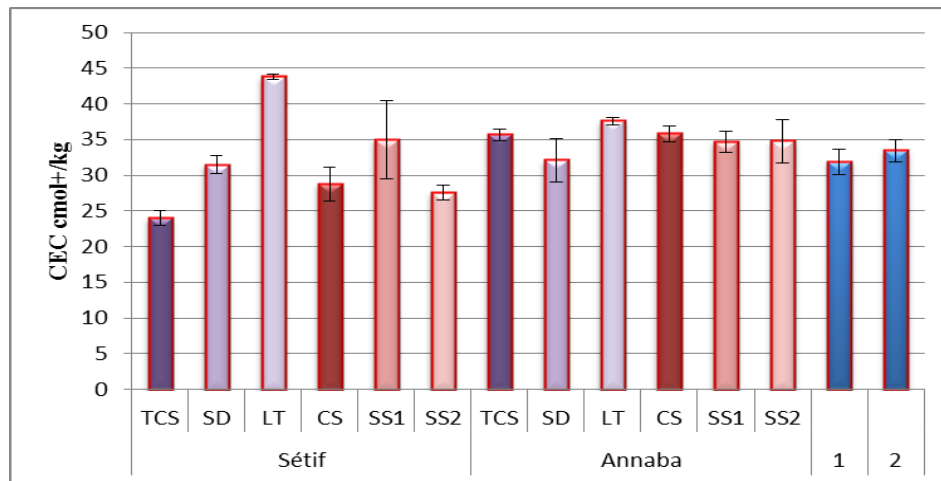


Figure 25: Le potentielle de la capacité d'échange cationique (CEC) pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne

Tableau 14: Résultats de l'ANOVA pour le potentielle de la capacité d'échange cationique (CEC). Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

CEC cmol+/kg	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,05	0,00	0,79	/	/

À Sétif, l'interaction de tous les facteurs a montré que le plus grand effet significatif a été principalement signalé dans les TCS, LT et le SD dans l'ordre successif. Par contre dans la région d'Annaba nous avons trouvé que l'effet est presque similaire avec tous les facteurs.

Le graphe ci-dessus a enregistré des variations des moyennes, présentes dans la région d'Annaba. La plus forte moyenne de CEC a été enregistrée respectivement dans les LT, TCS et SD. A propos de la région de Sétif, la moyenne la plus élevée a été toujours enregistrée pour le LT suivie par le SD et le TCS. Généralement pour les deux campagnes d'échantillonnage la moyenne du CEC a été presque identique.

Les valeurs de CEC ont marqué des variations très significatives entre les facteurs expérimentaux, en particulier à Sétif, où les valeurs de LT ont été considérablement plus élevées que celles de SD et de TCS (Fig: 26). Ainsi, la CEC a été positivement corrélée avec la teneur en argile (mais pas avec COS%, voir Fig: 17). L'effet significatif à Sétif pourrait être, dû principalement à un effet de l'hétérogénéité dans le plan expérimental. À Annaba, la CEC a eu tendance à être plus élevée en LT qu'en TCS, mais cet effet n'a pas été statistiquement significatif.

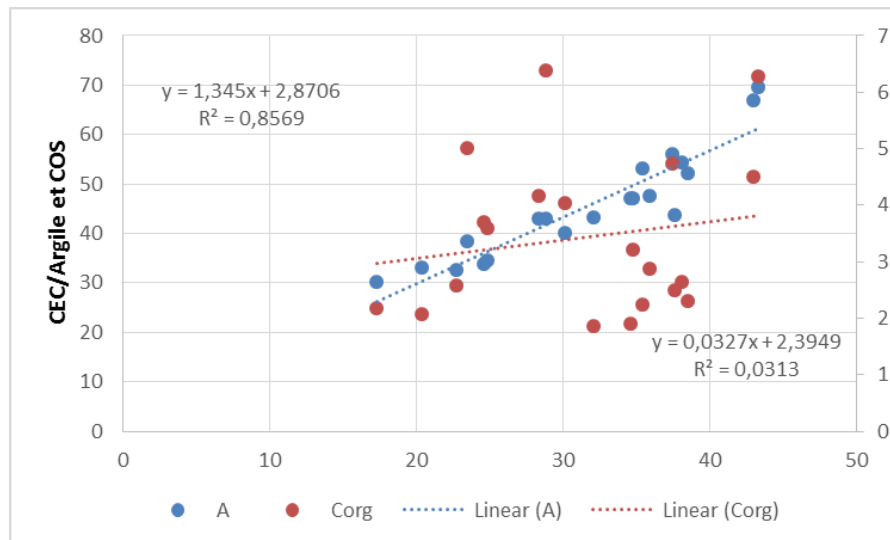


Figure 26: Corrélation CEC/Argile et COS/Argile

○ **Le taux de saturation des bases échangeables**

Le taux de saturation des bases a montré des différences hautement significatives avec les procédés et les couches. Il est considérablement plus élevé en TCS qu'en SD et LT dans les deux régions, mais il a été variable avec les couches (fig: 18). Ces résultats nous ont indiqué que le complexe adsorbant est qualifié comme saturé dans tous les types de travail du sol, avec une saturation qui pourrait atteindre 100% dans les TCS en surface (CS) ; par contre, le taux de saturation dans les autres couches a été supérieur à 90%.

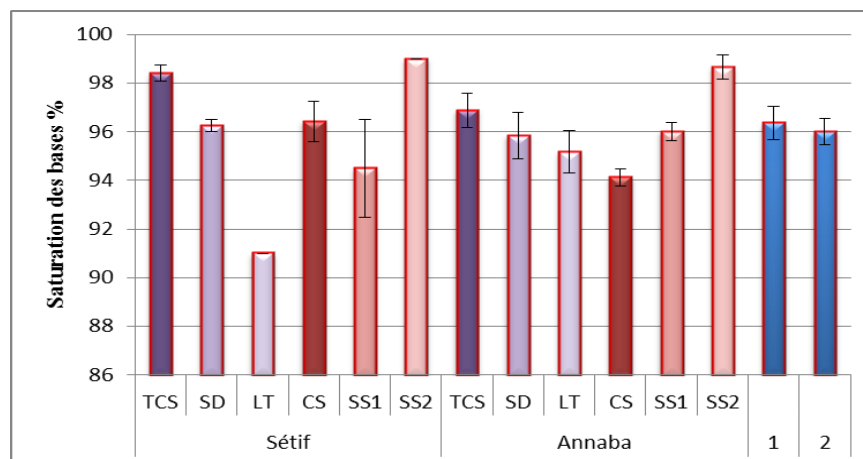


Figure 27: Le taux de saturation des bases échangeables pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne

Tableau 15: Résultats de l'ANOVA pour le taux de saturation des bases échangeables. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

saturation des bases %	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,52	0,00	0,00	/	/

En revanche, à Annaba nous avons enregistré des valeurs très élevées des cations majoritaires (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , H^+), les plus faibles valeurs ont été trouvées en surface et ont augmenté à la profondeur des horizons pour tous les procédés. La capacité d'échange cationique a varié d'un horizon à un autre, elle a diminué à la profondeur du profil, les plus hautes valeurs se sont trouvées en profondeurs où la texture est riche en argile. Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ exprime que notre sol est calcique en surface et calci-magnésique vers la profondeur et particulièrement dans les TCS et le LT. Le taux de saturation des bases échangeables de nos sols a été très élevé. Nous pouvons considérer que notre sol est saturé, parce qu'il atteint la valeur 100% en TCS et SD.

2.5. Phosphore assimilable

Les résultats d'analyses pour le phosphore assimilable à Sétif, ont montré que dans les TCS les teneurs en P_{ass} ont été élevées à très élevées, ces résultats ont été enregistrés principalement dans la deuxième campagne d'échantillonnage. Ceci pourrait être dû à l'utilisation des engrais phosphatés avant la période de prélèvement. Ces moyennes ont été élevées en surface et diminuent à la profondeur. En fait, nous avons remarqué que les teneurs de P_{ass} en LT ont été faibles en surface à très faibles vers la profondeur. Dans le SD les teneurs enregistrés en P_{ass} ont été faibles.

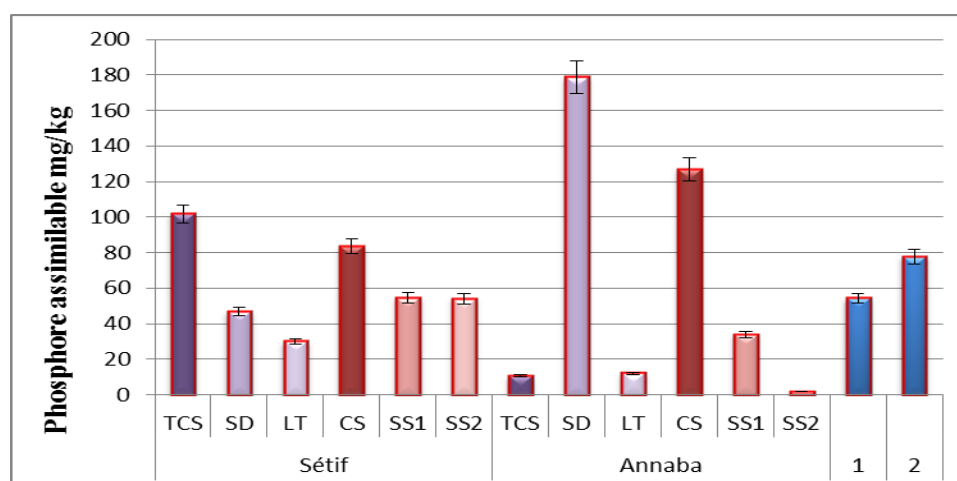


Figure 28: Le phosphore assimilable pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 16: Résultats de l'ANOVA pour le phosphore assimilable. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

Phosphore assimilable	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,02	0,82	0,13	0,17	/	/

A Annaba, le phosphore assimilable a présenté des teneurs très élevées dans le SD, surtout dans les couches superficielles pour les deux campagnes d'échantillonnages dans la CS (voir l'annexe 6). Ces teneurs ont diminué dans le SS1 mais sont restées toujours élevées par rapport aux autres types de travail du sol qui sont extrêmement faibles, avec une fluctuation dans les profondeurs qui peuvent aboutir à 1.1 mg/kg.

Généralement les moyennes du phosphore assimilable n'ont pas montré des différences significatives pour tous les facteurs étudiés.

2.6. Le calcaire total et le calcaire « Actif »

À Sétif, les teneurs en calcaire ont été élevées pour les TCS principalement dans la crête en couche superficielle pour les deux campagnes d'échantillonnages. De ce fait, cette dernière a été considérée comme hyper-calcaire dans la deuxième campagne d'échantillonnage avec un taux compris entre 70%-83%, le taux du calcaire total des différentes couches a mis en évidence un gradient de carbonatation, c'est-à-dire une décroissance des valeurs avec la profondeur du profil dans les TCS dans la crête et dans le bas-fond. Le SD a suivi le même gradient avec des taux hyper-calcaires comme le TCS, puis très fortement à fortement calcaires. Par contre dans le LT le taux du calcaire a été modérément calcaire avec une fluctuation d'un gradient de décarbonatation, ces résultats n'ont pas montré des différences significatives avec tous les facteurs.

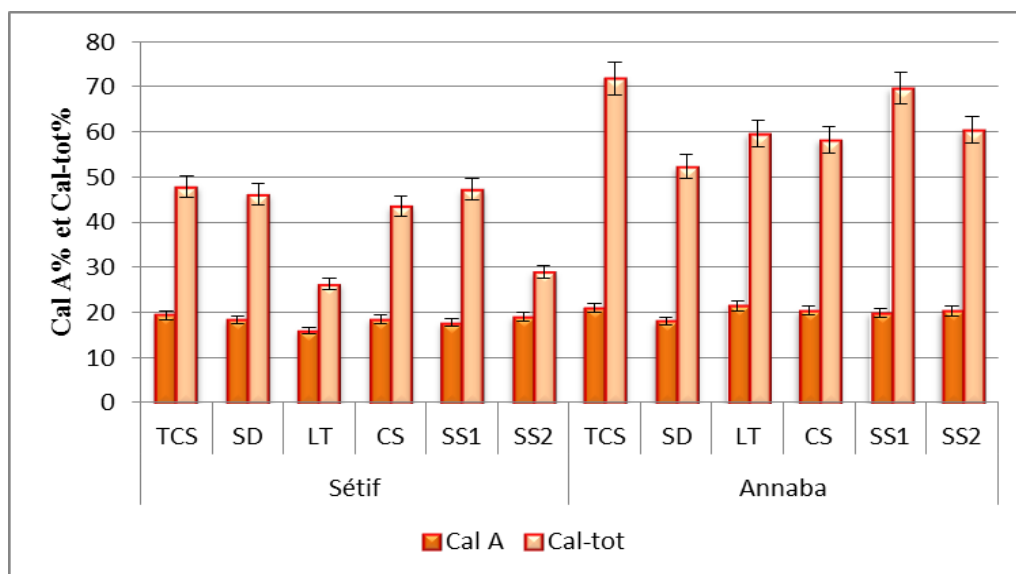


Figure 29: Le taux en calcaire total (Cal-tot) et calcaire actif (cal-A) pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage, et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 17 : Résultats de l'ANOVA pour Cal A et Cal-tot. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
Calcaire AC %	0,00	0,06	0,23	0,85	/	/
Calcaire T %	0,00	0,01	0,15	0,40	/	/

À Annaba, le taux de calcaire total pour les TCS a mis en évidence un gradient de décarbonatation et nous avons qualifié notre sol comme hyper-calcaire pour la CS, SS1 et SS2. Par contre dans le SD, le taux de calcaire total a suivi le gradient de carbonatation mais avec un hypo-calcaire dans la première campagne d'échantillonnage et hyper-calcaire dans la deuxième. Le LT a suivi la même évolution que le SD mais avec un taux très fortement calcaire en profondeur et un taux excessivement calcaire en surface.

La variation des moyennes du Cal-tot ne diffère pas significativement avec tous les facteurs, sauf avec la région. Elle a montré clairement que les plus hautes teneurs du Cal Ac et Cal-tot de la région d'Annaba ont été plus élevées (hyper-calcaires) que dans la région de Sétif. Pour cette dernière, elles se sont concentrées successivement dans les TCS, SD et LT. En ce qui concerne la région d'Annaba nous avons trouvé que les plus hautes teneurs ont été situées respectivement dans les TCS, LT et SD. Ces concentrations ont suivi le gradient de diminution suivant (SS1, CS et SS2).

○ Discussion

Les propriétés chimiques du sol qui sont habituellement affectées par les systèmes de travail du sol sont le pH, la CEC, les cations échangeables, l'azote total et le carbone total du sol, ainsi que d'autres. Irfan et al. (2013) et Martinez et al. (2016) ont montré que les propriétés chimiques généralement affectées par les systèmes de travail du sol sont le pH, la CEC et les nutriments. Par contre, Rasmussen (1999) a signalé que les techniques de travail du sol n'ont aucun effet sur le pH du sol, bien que d'autres chercheurs tels que Rahman Okubo, Sugiyama et Mayland, 2008, López-Fando et Pardo (2009) ont rapporté un pH plus faible dans la couche supérieure du SD que dans le LT après 5 ans, en raison des processus acidifiants pendant la minéralisation de la matière organique, la nitrification des engrais azotés et l'exsudation des racines. Rhoton (2000) a également attribué un pH plus faible à l'accumulation de matière organique dans les quelques centimètres supérieurs du sol, provoquant des augmentations de

la concentration d'électrolytes et une réduction du pH (Rahman et al., 2008). Inversement, Cookson et al. (2008) ont constaté que le pH du sol en surface diminue avec l'augmentation des perturbations du labour. En outre, Lal (1997) a rapporté un pH du sol significativement plus élevé dans les parcelles SD que dans les parcelles labourées. Une des raisons de cette contradiction est peut-être expliquée par le fait que les effets du labour sur le pH dépendent aussi d'autres facteurs tels que les conditions climatiques, les types du sol et les facteurs de gestion du sol comme la fertilisation. Par conséquent, le travail du sol n'affecte pas directement le pH du sol, mais ses effets sur le pH dépend des conditions climatiques, du type du sol et des facteurs de gestion.

Parmi les propriétés les plus affectées par le travail du sol est la teneur en COS (Doran, 1980). Dans notre travail expérimental, nous n'avons pas pu détecter des effets significativement clairs entre les différents types de travail du sol sur COS à cause d'une forte variabilité des données. De plus, la CEC a été plus fortement corrélée avec la teneur en argile qu'avec le COS (Fig: 17). Par conséquent aucun effet significatif n'a été détecté avec les procédés. De même, Rasmussen (1999), Horsten et Stefan (2002) ont observé qu'avec le semis direct possède un taux des résidus végétaux à la surface du sol qui fait augmenter la matière organique dans la couche arable. De plus, Blevins et Frye (1994) et Lal (1997b) ont rapporté un COS significativement plus élevé pour les pratiques de conservation du sol que dans le sol labouré. Notre étude a cependant révélé que les techniques simplifiées TCS entraînent un pH et un COS significativement plus élevé que dans le LT à Annaba. Nous pouvons suggérer alors que moins le sol est perturbé plus il est bénéfique pour l'amélioration de la qualité chimique du sol.

Par ailleurs, la teneur en C total et N total, des différentes techniques de travail du sol des deux zones se différencient (fig: 12). Nous observons une concentration en couche superficielle des teneurs en C-tot et N-tot pour les trois types TCS, SD et LT, qui baissent dans les couches où il n'y a pas un enfouissement des résidus de culture, avec d'autres mots dans les sous-sols. Ces concentrations sont homogènes sur la profondeur d'échantillonnage pour le LT (à cause de mélange et retournement des horizons). A Sétif, les teneurs sont plus élevées en surface pour les TCS par rapport à LT, mais ces teneurs sont faibles à Annaba pour tous les procédés. Ces résultats mettent en évidence une stratification progressive de C-tot et N-tot lorsque la profondeur de travail des outils est relevée ou lorsque le travail du sol s'opère uniquement sur la CS ce qui confirme les observations de Mc Carthy *et al.* (1998).

L'augmentation des teneurs en C-tot et N-tot ne vient pas donc à priori d'une différence de matière sèche enfouie, mais plus d'une différence de vitesse de dégradation des résidus de cultures. Le labour traditionnel (LT) fait enfouir de façon plus ou moins homogène les résidus de cultures (selon la qualité de réglage de l'outil) et améliore ainsi le contact sol-MO accélérant la dégradation microbienne des résidus de culture et de la MOS stabilisée située à proximité (Balesdent *et al.*, 2000). En revanche, les teneurs en C et N totaux observés sont donc certainement dues à une diminution de la vitesse de dégradation des MOS en raison du mode de travail du sol principalement en LT et de la profondeur d'enfouissement des résidus de cultures. Toutefois, pour les TCS, la teneur importante de C-tot et N-tot est également due à l'enfouissement des résidus de culture intermédiaire non présente pour les deux autres procédés et au développement important des adventices pour ce procédé. Cependant, si ces teneurs progressent pour les trois procédés, ils ne permettent pas de les différencier clairement. Les teneurs en C-tot et N-tot diminuent dans les horizons qui ne sont plus fragmentés et où aucun résidu de culture n'est enfoui.

Les différences entre ces traitements peuvent avoir plusieurs origines : (i) une différence de profondeur d'enfouissement des résidus de cultures, (ii) une différence de quantité de matière sèche enfouie ; et (iii) une différence de taux de minéralisation des MOS. La première raison évoquée, émane de la dilution des résidus de culture sur 0-20 cm, ce qui explique l'accumulation plus importante des MOS sur les premiers centimètres (entre 10-20 cm) pour les TCS, les premiers centimètres pour SD et sur (35 cm) pour LT. Concernant la deuxième origine, l'enherbement du procédé TCS est supérieur à celui de LT et pourrait contribuer à l'augmentation de la part de MOS 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.

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). Si le rapport C/N du sol est faible, le développement et le fonctionnement des micro-organismes sont limités par le carbone (Stockfisch *et al.*, 1999). En revanche, si le C/N du sol est élevé, l'azote devient limitant pour les micro-organismes. Ces derniers entrent alors en compétition avec la plante pour l'azote (Jones et Darrah, 1992).

Ismail et al. (1994) et Rahman et al. (2008) ont rapporté que Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ échangeables ont été significativement plus élevés en surface du sol sous SD par rapport au sol labouré, ce qui convient avec nos résultats et particulièrement à Sétif. Selon Ali, Ayuba et Ojeniyi (2006), les valeurs les plus basses du sol en MOS, Na^+ , P, K^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été enregistrées dans des parcelles de LT et cela pourrait être dû à l'inversion du sol supérieur pendant le labour qui déplace le sous-sol moins fertile à la surface en plus de la minéralisation possible.

3. L'influence sur les propriétés microbiologiques

En général, les paramètres microbiologiques ont montré une variabilité considérable dans les différents traitements et, avec le petit nombre d'échantillons, cela a rendu la détection d'effets de traitement statistiquement significatifs difficile. La variabilité a probablement été causée par les deux effets du site (hétérogénéité des sols dans la conception expérimentale dans les deux régions) et les effets de gestion (hétérogénéité des mesures du travail du sol : au sujet du différence de mélange dans la profondeur pour les différents traitements dans les deux régions).

3.1. La biomasse SIR

La biomasse microbienne est une mesure générale exprimant l'état de vitalité et d'activité du sol. Sa grandeur dépend de divers facteurs environnementaux (climat, propriétés pédologiques, utilisation et exploitation du sol). Il s'agit d'un paramètre pédologique important, puisque ses organismes jouent non seulement un rôle décisif dans la décomposition et la transformation de la matière organique, mais représentent aussi une réserve de nutriments rapidement assimilables (BSA.,2009).

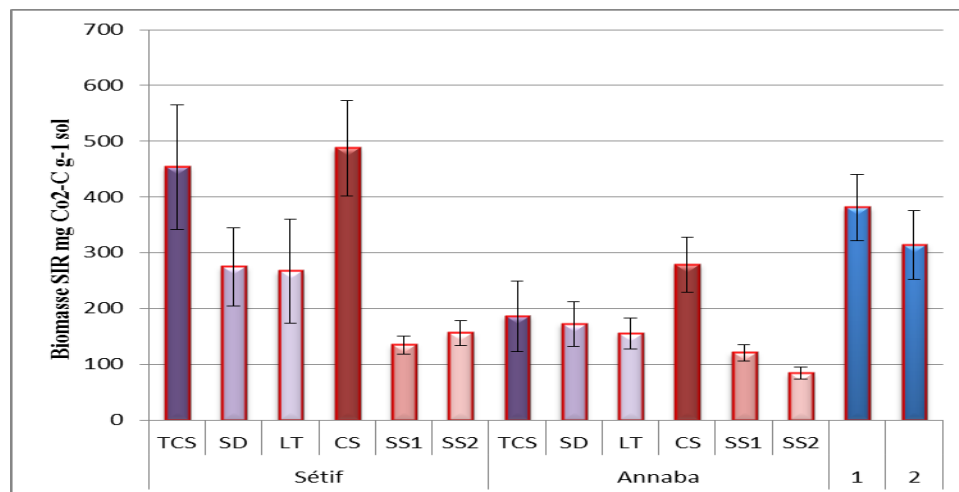


Figure 30: Les moyennes de la biomasse SIR pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 18: Résultats de l'ANOVA pour la BM-SIR. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
BM-SIR	0,00	0,95	0,03	0,00	0,05	0,10

A Sétif les résultats de la biomasse pour les TCS ont présenté des valeurs égales et varient entre [716.9 et 133.2 mg.kg⁻¹ MS] dans tout le profil pour les deux campagnes d'échantillonnage, à l'exception des échantillons de la crête dont l'échantillon superficiel a montré un résultat très élevé environ 1171.9 (mg.kg⁻¹ MS) (aussi pour la BM-FE). Par contre le résultat de la couche 0-35 cm est très faible, et surtout dans la partie travaillée du sol (La partie travaillée c'est la couche 0-8 cm du TCS). Les résultats ont été en général dans les normes avec l'exception d'un échantillon de la crête en surface considéré comme élevé. Le SD a montré des valeurs faibles [175.8 et 164.7 mg.kg⁻¹ MS] dans la deuxième campagne d'échantillonnage vis-à-vis de la première [466.9 et 291.2 mg.kg⁻¹ MS] (presque la moitié). Nos valeurs ont été dans l'intervalle des normes. La valeur de la biomasse SIR pour LT de la couche 0-15 cm, du premier échantillonnage est très faible [292.6 mg.kg⁻¹ MS]. Ces valeurs ont diminué en fonction de la profondeur dans les deux campagnes d'échantillonnage. Les résultats trouvés ont été dans les normes.

En ce qui concerne la région d'Annaba, dans les TCS les résultats trouvés ont été faibles (à l'exception de la couche superficielle du deuxième échantillonnage, la BM est de [650.3 mg.kg⁻¹ MS] et qui diminue en fonction de la profondeur avec des valeurs faibles à très faibles. Par comparaison avec les normes, nous avons trouvé que nos résultats ont été dans les normes en surface, faibles à extrêmement faibles en profondeur du profil dans les deux campagnes d'échantillonnage.

Pour le SD nous avons trouvé des valeurs comparables aux autres types de travail du sol dans les horizons superficiels et qui diminuent en fonction de la profondeur dans les deux campagnes d'échantillonnage. Avec la comparaison les valeurs de référence, nos résultats ont montré des valeurs normales dans la première campagne d'échantillonnages, mais dans la deuxième nous avons trouvé une valeur normale en surface mais diminue à la profondeur du profil avec des valeurs extrêmement faibles.

La valeur de la biomasse SIR dans LT de la couche 0-15cm du premier échantillonnage est très faible de [233.8 et 236.1 mg.kg⁻¹ MS]. Les valeurs diminuent en fonction de la profondeur dans les deux campagnes d'échantillonnage. La comparaison avec les valeurs normes ont montré que nos résultats ont été normaux en surface et diminuent à la profondeur du profil. Les résultats de la BM SIR d'Annaba ont été en général plus faibles que ceux de Sétif.

3.2. Biomasse microbienne FE-C

Nous avons remarqué que les résultats de la biomasse microbienne à Sétif dans les TCS ont été significativement plus élevés dans la deuxième campagne d'échantillonnage [1339.3 et 621.76 mg.kg⁻¹ MS] du sol, par rapport à la première, elle a présenté également des valeurs élevées dans les horizons de surface [443.64 mg.kg⁻¹ MS], surtout dans la partie travaillée du sol, c'est-à-dire (la couche superficielle) avec un résultat exceptionnel dans la couche superficielle de la crête) [530.63 mg.kg⁻¹ MS], (Voir les graphes : annexe 5) ces valeurs ont été proches des valeurs de référence, en conséquence, nous pouvons affirmer qu'elles sont dans les normes.

Dans la première campagne d'échantillonnage pour le SD, les résultats ont montré une très forte valeur de la BM-C pour le premier horizon puis diminue dans le deuxième horizon. Quant à la deuxième campagne d'échantillonnage, les valeurs de la biomasse ont été presque proches dans les deux derniers horizons variant entre [476.43-164.97 mg.kg⁻¹ MS]. En comparant nos résultats avec les valeurs de référence, nous avons trouvé que les moyennes ont été normales dans la première campagne d'échantillonnage et faibles dans la deuxième.

Les résultats de la BM-C dans le labour traditionnel (LT) ont indiqué clairement des valeurs élevées d'abord en couche superficielle [465.70 et 350.10 mg.kg⁻¹ MS], puis avec des valeurs moyennement faibles dans les couches en profondeur (SS1 et SS2). Les résultats les plus élevés ont été enregistrés dans la première campagne d'échantillonnage. Nos résultats par rapport aux normes sont faibles dans la première campagne d'échantillonnage et très faible dans la deuxième.

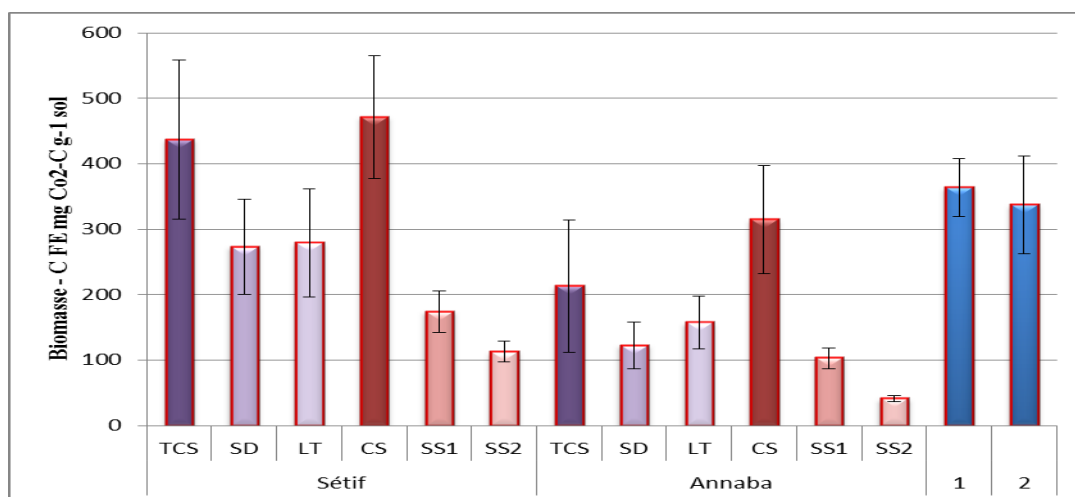


Figure 31: Les moyennes de BM-C FE pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 19: Résultats de l'ANOVA pour la BM-C FE. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

BM-C FE	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,86	0,06	0,00	0,37	0,51

Néanmoins, les TCS à Annaba, ont eu des valeurs égales dans les deux campagnes d'échantillonnage à l'exception d'une valeur élevée [$891.44 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$] dans l'échantillon en surface (0-8 cm) de la deuxième campagne d'échantillonnage et qui diminue avec des valeurs extrêmement faibles à partir de la profondeur de 100 cm [58.08 et $37.89 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$]. Comparés aux normes, une seule valeur était hors normes, celle de l'échantillon de surface (0-8 cm la partie travaillée du TCS), mais les autres valeurs étaient faibles et diminuaient avec des valeurs faibles dans les profondeurs.

Les résultats de SD, montraient une forte concentration de la BM-C dans les premiers horizons avec des moyennes basculant entre [238.2 et $206.31 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$], et diminuaient fortement à partir de 70 cm de profondeur avec des valeurs de [71.09 jusqu'à $35.77 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$] dans les deux campagnes d'échantillonnage. La comparaison avec les valeurs normes montrait que nos résultats étaient faibles en surface et diminuaient avec des valeurs extrêmement faibles en profondeur du profil.

Les valeurs de la BM-C pour LT étaient proches dans le premier horizon pour les deux campagnes d'échantillonnages, mais décroissaient rapidement pour les autres horizons [80.76 et $25.14 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$] par rapport au premier horizon [$230.82 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$] de la première campagne d'échantillonnage. A propos de la deuxième campagne d'échantillonnage, les valeurs de BM-C dans les deux derniers horizons étaient proches et élevées [292.11 et $192.77 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$] (ceci pourrait être expliqué par le retournement des horizons avec le LT, car c'était la période de travail du sol). En comparant nos valeurs avec les normes, on les a trouvés normaux en surface et diminuaient avec des valeurs extrêmement faibles en profondeur dans les deux campagnes d'échantillonnage.

3.3. La biomasse microbienne FE -N

A Sétif, la valeur de BM-N dans les TCS pour la deuxième campagne d'échantillonnage en surface a été de [$140 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$], soit environ le double [$70.89 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$] par rapport à la première campagne d'échantillonnage ceci est due à l'effet d'ameublissement du sol dans la deuxième campagne d'échantillonnage. Par contre dans tous les autres horizons elle reste faible. Les valeurs de la BM-N ont été faibles à extrêmement faibles en profondeur du profil

dans les deux campagnes d'échantillonnages vis-à-vis des valeurs normes, à l'exception d'une valeur élevée dans la première campagne d'échantillonnage dans la crête [140.00 mg kg⁻¹ MS du sol].

Les valeurs de la BM-N de SD pour la deuxième campagne d'échantillonnage ont été extrêmement faibles [8.43 et 6.85 mg.kg⁻¹ MS] par rapport à la première campagne d'échantillonnage [68.06 mg.kg⁻¹ MS]. En comparant nos valeurs aux normes, nous les avons trouvés dans les normes pour la première campagne, et extrêmement faibles dans la deuxième campagne d'échantillonnage.

Les résultats de LT ont montré des valeurs très faibles dans la première campagne d'échantillonnage dans la couche de 15-60 cm, à extrêmement faibles [3.52 mg.kg⁻¹ MS]. Nos résultats sont excessivement faibles dans les deux campagnes d'échantillonnages vis-à-vis des valeurs normes.

En fait, à Annaba les TCS, dans les deux campagnes, les valeurs de BM-N ont été très faibles variant entre [93.03-0.9 mg.kg⁻¹ MS]. Vu l'absence quasi-totale de la BM-N, les analyses ont donné des résultats négligeables et proches de la limite « zéro ». En comparant les résultats avec les valeurs normes, nous avons trouvé qu'ils ont été faibles à extrêmement faibles dans les deux campagnes d'échantillonnage.

Les résultats SD ont été généralement très faibles dans tout le profil, pour les deux campagnes d'échantillonnages entre [16.88-0.71 mg.kg⁻¹ MS], ils ont été extrêmement faibles par rapport aux valeurs normes.

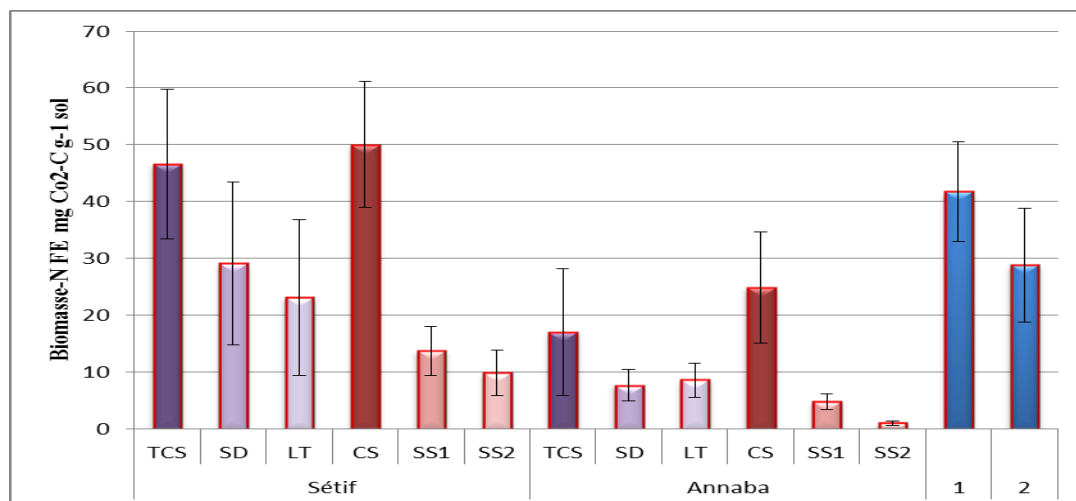


Figure 32: Les moyennes de la BM-N FE pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 20: Résultats de l'ANOVA pour la BM-N FE. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

BM-N FE	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,03	0,68	0,07	0,00	0,41	0,37

En générale dans LT, les résultats ont été presque les mêmes dans les deux campagnes d'échantillonnage, et présentent des valeurs très faibles dans tout le profil. La comparaison avec les valeurs normes a montré que nos résultats ont été trop faibles.

Il convient de dire que la BM-C et la BM-N ont suivi la même évolution, sauf que la BM-C a toujours des valeurs plus élevée par rapport à la BM-N. Par ailleurs, nous avons trouvé que les plus fortes moyennes ont été toujours enregistrées respectivement dans les TCS, LT et SD, d'où les plus fortes sont signalées à Sétif. En outre, La BM-C a été plus élevée dans la deuxième campagne d'échantillonnage par rapport à la première. Cependant, pour la BM-N nous avons trouvé que les résultats de la première campagne d'échantillonnage ont été plus élevés par rapport à celle de la deuxième campagne. Ces moyennes n'ont pas montré des différences significatives avec tous les facteurs.

Il s'agit de dire, qu'en raison des fortes corrélations entre la biomasse microbienne estimée par la méthode SIR et par la méthode d'extraction de la fumigation (FE), nous avons tendance à interpréter statistiquement et uniquement les résultats de la biomasse SIR.

Les moyennes de la BM-SIR pour la couche superficielle (0-20 cm) dans la région d'Annaba ont été plus hautes dans les TCS, succédées par les moyennes du SD et le LT. À Sétif, les résultats de la TCS et le LT ont été plus élevés par rapport à ceux d'Annaba dont les moyennes variant respectivement entre [657 et 405mg.kg⁻¹MS]. La BM-SIR pour la première campagne d'échantillonnage a été légèrement inférieure par rapport aux moyennes de la deuxième campagne. Les moyennes de BM-SIR n'ont pas indiqué de différences significatives, ce qui nous a conduits à exécuter un ANOVA supplémentaire sans TCS. Par conséquent, nous avons trouvé quelques différences significatives entre les régions et les interactions (procédé × région) et (procédé × région d'échantillonnage) et l'interaction de ces trois facteurs.

Dans la profondeur du profil, la BM-SIR a montré une différence significative avec les procédés, (Région × procédé), (Région × Couche) et très hautement significative avec les couches. À Sétif la BM-SIR a diminué respectivement selon l'ordre des procédés suivants

(TCS, SD, LT), mais elle a été répartie en fonction des couches (CS, SS2 et SS1). Dans la région d'Annaba, les moyennes les plus élevées ont été dans les TCS, puis ont diminué dans SD et LT. La BM-SIR s'est concentrée avec des moyennes élevées dans les CS puis s'est réduite dans le SS1 et SS2.

Les effets du travail du sol sur BMC-SIR ont été généralement plus élevés dans TCS que dans LT et SD (fig: 30). Cela a été particulièrement évident (et statistiquement significatif) à Sétif, dans les deux campagnes d'échantillonnage. Les TCS ont présenté des valeurs plus élevées, mais avec une variabilité considérable, et plus élevée dans la CS par rapport SS1 et SS2.

À Annaba, les TCS ont montré une nette tendance avec des valeurs plus élevées, bien que cet effet ne soit exprimé que dans la deuxième campagne d'échantillonnage, après un peu de temps de travail du sol, les moyennes des couches ont suivi la même évolution qu'à Sétif. Dans les deux régions, les valeurs de BMC-SIR ont été généralement plus élevées après la période de travail du sol (dans la deuxième campagne d'échantillonnage) que pendant la période de croissance. A Sétif, les valeurs de BMC-SIR ont été généralement plus élevées qu'à Annaba qui dépendent de la teneur en argile élevée, ceci représente une source d'énergie pour les microorganismes.

La BM-N a montré des moyennes très hautement significatives avec les couches et ne diffère pas significativement avec les autres facteurs. Ces moyennes ont été élevées dans les TCS et diminuent successivement dans le SD et LT, très élevées dans les CS et décroissantes en fonction de la profondeur SS1 et SS2. Les mêmes moyennes ont été obtenues dans la région d'Annaba mais avec des moyennes faibles, ceci est toujours dépendant du pourcentage d'argile dans le sol.

3.4. La respiration de base 'basale' du sol ou la respiration spécifique

Le CO₂ produit lors de la décomposition de la matière organique reflète l'activité respiratoire aérobie de l'ensemble des organismes du sol. En l'absence de perturbation, il s'instaure un équilibre écologique dans le sol entre les organismes et leur activité de décomposition. La respiration dans cet état est qualifiée de respiration basale. Quand cet équilibre est rompu, la respiration change, suite à une modification de la biomasse microbienne et de son activité de minéralisation (BSA.,2009).

Il est à noter que dans les TCS à Sétif, les résultats ont été faibles dans les deux campagnes d'échantillonnage, qui diminuent à la profondeur du profil. La valeur la plus élevée a été retenue dans la couche superficielle (crête et bas fond) dans la deuxième campagne

d'échantillonnage, elle a été de $[1.50 \text{ et } 1.17 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}]$. Nos valeurs ont été conformes aux normes. Les résultats de la respiration dans le SD ont manifesté des valeurs faibles dans les deux campagnes d'échantillonnages variant entre $[0.40\text{-}0.50 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}]$ et qui diminuent en fonction de la profondeur, nos valeurs restent sous le toit de la norme. Aussi, pour le LT les valeurs de la respiration ont marqué une faiblesse dans les deux campagnes d'échantillonnage à raison de $[0.38\text{-}0.51 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}]$. Également comme pour les deux autres types de travail du sol nos valeurs sont conformes aux normes.

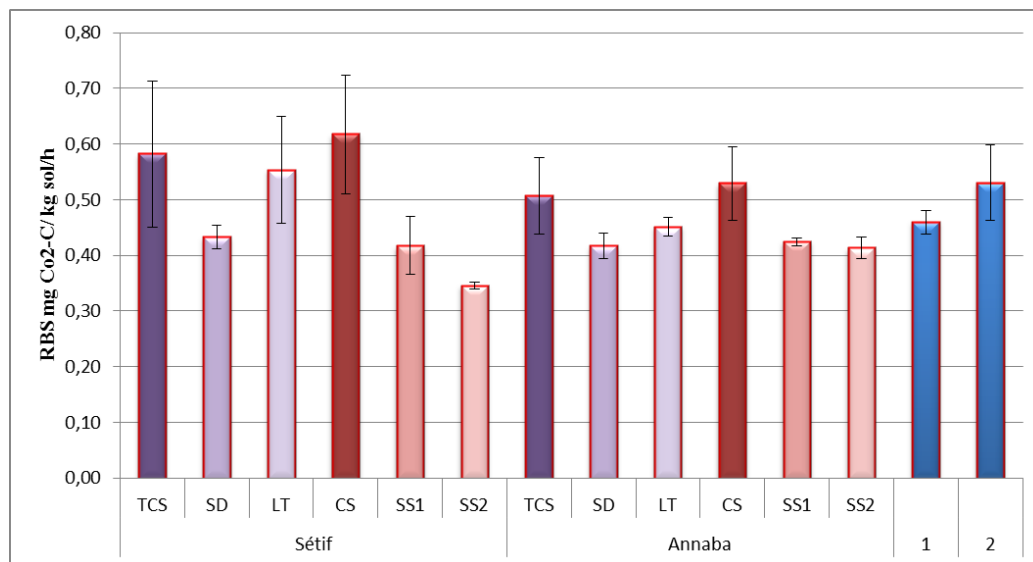


Figure 33: Les moyennes de la RBS pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 21: Résultats de l'ANOVA pour la RBS. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

Réspiration	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,58	0,19	0,05	0,50	0,46

Les résultats de la respiration du sol à Annaba pour TCS ont présenté des valeurs généralement faibles ; pour la première campagne d'échantillonnage et s'affaiblissent encore en fonction de la profondeur. Par contre dans la deuxième campagne les valeurs ont signalé une augmentation progressive en fonction de la profondeur, excepté une seule valeur très faible enregistrée dans la couche superficielle $0.98 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$, ceci dit que l'ameublissement du sol affecte la RBS. Nos résultats répondent aux normes à la surface mais pas autant qu'en profondeur du profil.

Les valeurs du SD se réduisent dans les deux campagnes d'échantillonnage et plus encore en fonction de la profondeur. Nos résultats atteignent la limite des normes. Pour le LT, les valeurs ont présenté également des valeurs faibles dans tous les échantillons.

En général, nous avons trouvé que la respiration a eu des moyennes faibles à très faibles dans tous les échantillons, et plus ou moins égales dans les deux sites. Dans les deux régions, la respiration la plus élevée a été enregistrée dans les TCS, et la plus faible moyenne a été enregistrée dans le SD dans la couche 0-20 cm. La respiration en LT et au SD ont été presque égales à Annaba, alors qu'à Sétif les moyennes sont approximativement égales dans TCS et le SD. En somme, la respiration a été plus haute dans la deuxième campagne d'échantillonnage par rapport à la première.

Les différences entre tous les traitements n'ont pas été significatives. Cependant, si on exclue les TCS (parce qu'elles contiennent des faibles valeurs), les différences d'ANOVA ont été fortement significatives entre les traitements, l'échantillonnage et leurs interactions. La respiration ne diffère pas significativement avec tous les facteurs étudiés à l'exception des couches $p < 0.05$. Les moyennes les plus élevées ont été trouvées respectivement dans les TCS, LT et SD avec une concentration qui régresse respectivement dans les CS, SS1 et SS2.

Comme la BM-SIR, Les valeurs les plus élevées pour RBS dans les deux régions ont été trouvées dans les TCS, ensuite dans LT et SD. Cet effet n'a pas été statistiquement significatif mais son apparition est évidente après peu de temps de travail du sol, dans la deuxième campagne d'échantillonnage. La BM-SIR a été accompagnée d'une variabilité exceptionnellement élevée dans les valeurs de la RBS en TCS.

3.5. Quotient métabolique qCO_2

C'est un paramètre sensible pour tester quantitativement l'activité métabolique de la biomasse microbienne (Wardle et Ghani 1995; Grego et al.,1998), certains auteurs (Insam et Domsch,1988 ; Grego et al.,1996) considèrent que le qCO_2 est un paramètre approprié pour évaluer les changement d'état des communautés microbiennes dans les écosystèmes jeunes et matures. Le quotient métabolique exprime l'efficacité énergétique d'une communauté de microorganismes et correspond au rapport entre la respiration basale et la biomasse microbienne (SIR ou FE-C). Il caractérise l'état physiologique des microorganismes. Plus il est élevé, plus la quantité de substrat rejetée sous forme de CO_2 est grande et plus la proportion du substrat incorporée dans la biomasse microbienne est faible (BSA.,2009).

A Sétif, le qCO_2 dans les TCS ont présenté des moyennes faibles dans la couche superficielle (dans le bas fond et dans la crête) dans la première et la deuxième campagne d'échantillonnage ; et a augmenté à la profondeur avec des valeurs jusqu'à $2.63 CO_2-C g^{-1}$ dépassant le maximum de la norme $2.14 CO_2-C g^{-1}$. Pour le SD nous avons remarqué des moyennes égales du qCO_2 pour les différentes couches respectant toutes les normes. Ces valeurs ont été doublées dans la deuxième campagne, dépassant ainsi les normes. Le qCO_2 a augmenté à la profondeur dans LT pour les deux campagnes. La moyenne la plus élevée a été enregistrée dans la deuxième campagne pour le dernier horizon qui a dépassé énormément le maximum de la norme avec une valeur de $5.13 CO_2-C g^{-1}$.

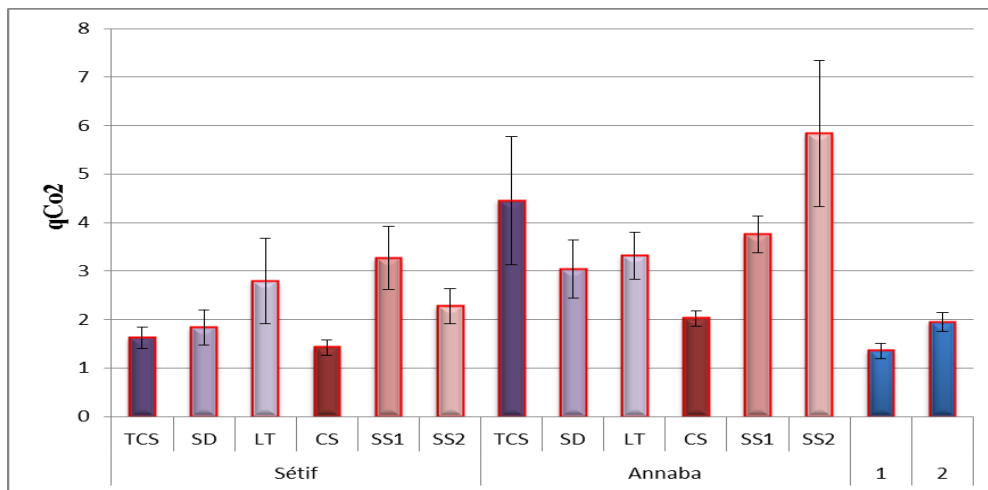


Figure 34: Les moyennes de le qCO_2 pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 22: Résultats de l'ANOVA pour le qCO_2 . Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

qCO_2	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,08	0,83	0,00	0,24	0,25

A propos d'Annaba, les moyennes du qCO_2 en TCS ont montré des valeurs faibles en surface qui accroissent en fonction de la profondeur dans les deux campagnes d'échantillonnage. Un effet très remarquable celle de la valeur extrêmement élevée de $13.5 CO_2-C g^{-1}$ en profondeur, débordant énormément la norme. Par contre les autres valeurs qui dépassent le seuil de la norme avec des valeurs de $4.5 CO_2-C g^{-1}$ sont enregistrées dans la première campagne d'échantillonnage. Les moyennes du qCO_2 dans SD se sont réduites à la profondeur dans la première campagne, atteignant un niveau inférieur à la norme avec une valeur de $5.15 CO_2-C g^{-1}$, et se sont progressées à la profondeur dans la deuxième campagne d'échantillonnage. Les moyennes de LT ont montré presque les mêmes variations du qCO_2 par rapport aux autres

types de travail du sol. Le qCO_2 a diminué à la profondeur, ses valeurs plus élevées dans la première campagne que dans la deuxième surpassant le maximum de la norme, la plus haute valeur trouvée a été de $4.71 CO_2-C g^{-1}$.

Les valeurs de qCO_2 ont montré des différents effets dans les trois types de travail avec les régions. A Annaba, le qCO_2 a été statistiquement presque significatif, les valeurs les plus élevées ont été trouvées dans le LT et les plus faibles dans le SD. Mais, nous avons repéré des teneurs respectivement élevées dans les SS1, SS2 et CS. Cependant, à Sétif, une forte tendance avec des valeurs élevées de qCO_2 pour le SD et des valeurs plus basses ont été détectées pour le TCS, nous avons constaté un accroissement du qCO_2 aux profondeurs. Les valeurs de qCO_2 à Annaba ont été légèrement supérieures à celles de Sétif. Peu de temps après le travail du sol, les valeurs de qCO_2 ont été généralement plus élevées pendant la saison de croissance de végétation.

Définitivement, la campagne d'échantillonnage a été l'effet le plus confirmé avec tous les paramètres microbiologiques: leurs valeurs ont été toujours plus élevées dans la deuxième campagne d'échantillonnage « après le travail du sol » par rapport à la première « pendant la saison de croissance ». L'effet de travail du sol a été nettement remarquable, avec des valeurs généralement élevées pour les paramètres microbiens en TCS, avec des teneurs élevées dans les SS1, SS2 et CS, par rapport à LT et SD. La BMC-SIR et le RBS se sont évoluées de manière presque semblable dans les traitements LT et SD, mais les effets de travail du sol sur le qCO_2 ont été très distinctifs pour les régions: à Annaba, les valeurs les plus élevées de qCO_2 ont été trouvées pour le LT, les plus faibles pour le SD, les plus basses dans les TCS; ces valeurs ont augmenté tous à la profondeur du profil. Pour les paramètres BMC-SIR et BSR, les valeurs mesurées ont été plus hautes à Sétif qu'à Annaba, l'inverse a été le cas avec qCO_2 .

3.6. Minéralisation de l'Azote

Dans le but de cette analyse nous n'avons sélectionné que les échantillons de la couche superficielle et le sous-sol 1. À Sétif, les résultats TCS ont indiqué des moyennes faibles et presque égales dans tout le profil pour les deux campagnes d'échantillonnage. Les valeurs trouvées ont été conformes aux normes. Pour le SD, les moyennes ont été presque égales, et dans les normes, mais réduites en profondeur dans la deuxième campagne d'échantillonnage. Les moyennes de LT pour la minéralisation de l'Azote ont été faibles dans la première campagne mais plus élevées par rapport à celles de la deuxième respectant toujours les normes.

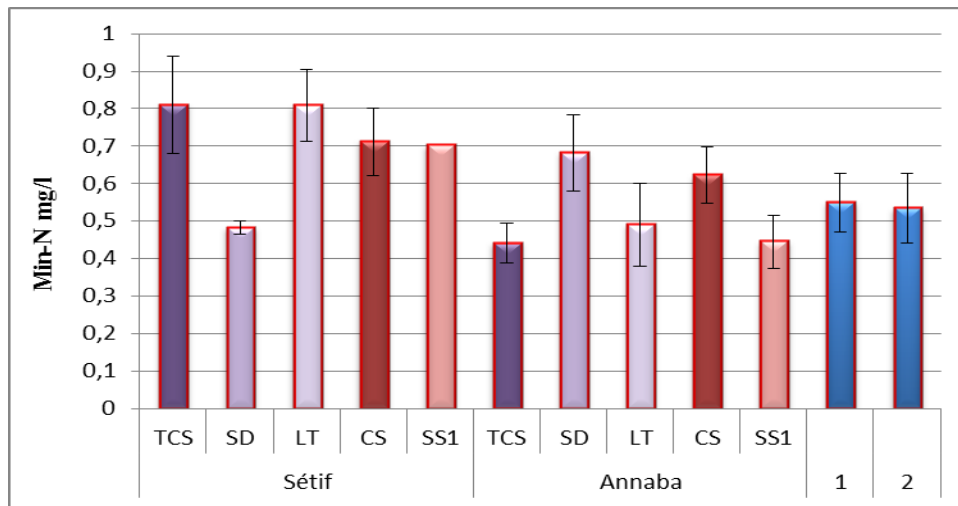


Figure 35 : Les moyennes de N-Min pour les trois procédés (LT, TCS, et SD), des deux sites expérimentaux, les deux campagnes d'échantillonnage (1,2), et les profondeurs (CS1, SS1 et SS2). Les barres d'erreur représentent $\pm$ l'erreur standard de la moyenne.

Tableau 23: Résultats de l'ANOVA pour la N-Min. Les niveaux de signification « P » pour les facteurs analysés Régions, Procédé, Couche et leur interaction.

N-Min	Intercept	Région	procédé	Couche	R*P	R*C
	0,00	0,39	0,83	0,21	0,02	0,82

Quant à la région d'Annaba, les résultats du TCS, nous avons remarqué des moyennes proches à celles trouvées dans la première campagne d'échantillonnage, mais qui ont diminué en profondeur. Par contre dans la deuxième campagne, nous avons observé une augmentation en fonction de la profondeur avec des valeurs respectant les normes. Dans les deux campagnes d'échantillonnage les moyennes de la Min-N pour le SD ont manifesté des valeurs normales qui s'affaiblissent en profondeur. Nous rappelons que pour le LT, nous n'avons pas pu analyser l'échantillon de la deuxième campagne d'échantillonnage, mais les résultats obtenus dans la première campagne présentent une diminution de Min-N en fonction de la profondeur prélevés par rapport aux normes.

○ Discussion

La comparaison de nos résultats avec celles d'autres études montrent des effets de labour généralement similaires sur BMC et RBS dans la couche arable 0-20 cm (Ahl et al., 1999; Andrade et al., 2003; Vian et al., 2009). Une méta-analyse de Zuber et Villamil (2016) a montré une activité microbienne plus élevée dans les systèmes de conservation (TCS et SD) que dans le labour traditionnel (LT) (p. Ex. Moraru et Rusu, 2012), alors que dans notre étude, nous n'avons pas trouvé des effets clairs pour la TCS dans les deux régions.

Ces différentes conséquences des systèmes de labour sur les paramètres microbiens peuvent s'expliquer par des effets spécifiques du travail sur la profondeur et l'intensité de l'incorporation des résidus de cultures et par des effets de gestion générale concernant le stock en matière organique, par exemple la rotation des cultures et les fertilisations organiques.

D'une part Anderson et Domsch (1993) et Cookson et al. (2008) ont observé une augmentation de BMC avec un mélange intensif de résidus de cultures dans le sol par le travail du sol en tant que source d'énergie pour la croissance et l'activité des microorganismes. D'autre part, Bending et al., 2004; Doran et Parkin, 1994 ont déclaré que l'activité microbienne mesurée en tant que libération de CO_2 (RBS) peut être stimulée non seulement par une contribution de la matière organique, mais aussi par l'ameublissement mécanique de la structure du sol et le mélange des matériaux du sol, améliorant ainsi l'aération de la biomasse microbienne du sol : aussi vivante que dynamique composant la matière organique du sol, peut indiquer un potentiel pour l'activité biologique du sol.

A ce là s'ajoute que le sol géré de manière conventionnelle contient une plus petite quantité de BMC (environ 20%), et que le sol géré de manière de conservation (TCS et SD) possède une quantité plus haute en surface. D'autres auteurs ont également indiqué des résultats plus élevés dans la concentration de la biomasse microbienne du sol sous labour réduit (TCS), en comparant avec le système traditionnel de labour (LT) (Acosta-Martinez et al., 2008; Bulluck et al. 2002; Doran et al., 1998; Fießbach et al. 2007; Gajda et al., 2001; Liebig et Doran, 1999; Marinari et al., 2006).

L'influence du système de travail du sol sur la teneur BM-N dans les sols étudiés a également été observée, dans le LT, les estimations de la biomasse microbienne N ont été toujours élevées en TCS par rapport au SD, LT respectivement pour les deux régions. Dans la couche de surface les estimations de la biomasse microbienne N ont été supérieures que dans les sous-sols (figure 4). D'autres études ont montré des tendances similaires à celles obtenues avec nos résultats présentés par Acosta-Martinez et al. (2008), Cookson et al. (2008), Doran et Parkin (1996), Gajda et Martyniuk (2005), Mäder et al. (1995), Panhurst et al. (1998).

Dans les deux régions examinées dans la présente étude, BMC-SIR et RBS ont été statistiquement très significatives, avec une forte corrélation positive, ce qui inspire une activité respiratoire plus élevée avec l'augmentation de la biomasse microbienne. La relation entre BMC-SIR et qCO_2a a été aussi généralement significative, mais avec un coefficient négatif, indiquant que l'influence au stress physiologique augmente avec l'augmentation de la

biomasse microbienne. En revanche, RBS et qCO_2 n'ont pas montré une corrélation claire. À Annaba les paramètres microbiens ont montré l'existence d'une corrélation hautement significative avec tous les paramètres sauf avec le quotient métabolique (qCO_2). La minéralisation de l'Azote corrèle significativement avec tous les paramètres. Concernant les mêmes échantillons la respiration corrèle seulement avec la biomasse.

Le quotient métabolique (qCO_2), se définit comme le rapport de la respiration basale sur la biomasse microbienne, il a été proposé au cours des dernières décennies comme un indicateur de la perturbation de l'écosystème et de développement (Anderson et Domsch, 1989; Dilly, 2006). D'après Flieâbach et Mäder (2000), l'efficacité métabolique d'une communauté microbienne est supposée être reflétée par son taux de respiration spécifique. Les différences dans qCO_2 sont souvent discutées comme une réaction au stress ou une différente structure de la communauté microbienne. Dans notre étude, les valeurs accrues du qCO_2 sont des indicateurs sensibles du stress qu'un écosystème du sol éprouve, ce qui peut être causé par des facteurs tels que les perturbations physiques (Anderson et Domsch, 1990). Les faibles valeurs pour le qCO_2 , comme dans nos traitements de conservation du sol (SD, TCS), indiquent une réduction du stress sur les communautés microbiennes du sol, alors que les valeurs élevées de qCO_2 , comme dans notre traitement LT, indiquent un stress plus élevé (Islam et Weil, 2000). Des augmentations similaires de la respiration microbienne après incorporation de résidus par le travail du sol ont été rapportées par Teixeira et al. (2013).

L'ammonification est une mesure de la minéralisation nette de N, comme une immobilisation de NH_4^+ par les microorganismes du sol dans une nouvelle biomasse qui se produit simultanément avec le processus de la minéralisation (Winding et al., 2005). La détermination des quantités des microorganismes actifs du sol contribue dans la décomposition de N organiques en favorisant la possibilité d'estimer la force d'ammonification du sol.

La variation de la minéralisation de l'azote dans les deux régions sur tous les types de travail du sol pourrait probablement être causée par la différence pédoclimatique. Celle-ci est confirmée par le faible taux de minéralisation dans les SD à Sétif et qui s'avère élevé à Annaba. Par ailleurs, le taux est élevé pour les TCS et LT à Sétif, mais il est faible à Annaba. Germon et al., (1994) ont démontré que le labour peut permettre une grande minéralisation de N à raison de la température généralement plus élevée au printemps. Toutefois, pour les deux campagnes d'échantillonnage, (Germon et al., 1994) ont prouvé que le taux de minéralisation

est plus élevée pendant la saison de croissance des cultures, ce qui est comparable à nos résultats.

Nos résultats sont similaires à ceux obtenus dans les 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 N sont supérieurs en surface dans les systèmes les moins perturbés (TCS et SD) par rapport aux sols labourés, mais ce rapport s'inverse progressivement en profondeur. Ainsi, le LT présente une BM et des niveaux de Min-N supérieurs en profondeur par rapport aux modalités TCS et SD. 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.

Discussion générale

Discussion générale

Cette partie résume les principaux résultats obtenus dans le troisième chapitre avec des réponses aux questions des objectifs de la thèse. Ainsi qu'une discussion comparative entre les différentes pratiques culturales étudiées dans les deux régions et en citant les travaux d'autres auteurs.

Dans l'installation expérimentale donnée, les effets clairs du labour sur COS% n'ont pas pu être détectés. De plus, comme la CEC a été plus fortement corrélée avec la teneur en argile qu'avec le COS%, aucun effet distinct du travail du sol sur les paramètres chimiques étudiés n'a pu être repéré. En revanche, les teneurs en C-tot et N-tot dans la couche de surface (CS) permettent de différencier les traitements. Les TCS ont une teneur significativement plus élevée en C-tot et N-tot que dans les autres procédées tandis que le LT présente des teneurs plus faibles. Ces observations confirment l'effet du mode de travail du sol et de la profondeur d'enfouissement des résidus de culture sur la vitesse de dégradation des MOS% et montrent que les teneurs de C-tot et N-tot réagissent lentement aux changements de pratiques culturales et permettent de différencier les modes de travail du sol avec une différenciation des traitements dans les deux régions.

Les effets du travail du sol sur les paramètres microbiens ont été les plus élevés en TCS, le BMC et le RBS étant les plus élevés après peu de temps du travail du sol dans la deuxième campagne d'échantillonnage et généralement plus élevés à Sétif. La valeur de qCO_2 , utilisée ici comme indicateur du stress physiologique de la communauté microbienne, a généralement augmenté avec la teneur en argile et a diminué avec le COS%. Parmi les traitements du sol testés, le LT a fait augmenter de plus en plus ce paramètre, ayant des valeurs plus élevées observées peu de temps après le travail du sol.

En ce qui concerne les paramètres de qualité des sols étudiés, les traitements du sol ont leurs forces et leurs faiblesses. Aucun des traitements du sol n'a fortement limité les fonctions du sol grâce à ses effets sur les propriétés du sol; seulement le SD a atteint des valeurs seuils dans la porosité (PT et MP) et la densité du sol (DA). En revanche, le relâchement mécanique intensif fourni par le LT n'a pas été nécessaire pour remédier aux limitations induites dans la structure du sol. Compte tenu des effets intermédiaires que la TCS agit sur les propriétés physiques du sol et de ses effets positifs sur les paramètres microbiens, un régime de labour réduit (TCS) semble combiner des effets optimaux sur la qualité du sol dans le site et les conditions de gestion des deux régions algériennes étudiées. D'un point de vue agronomique,

la TCS a des avantages supplémentaires car elle offre des possibilités de gestion mécanique des mauvaises herbes et des ravageurs, ce qui peut être intéressant compte tenu des discussions sur le comportement et l'écotoxicité des pesticides et de leurs métabolites et les exigences de l'agriculture biologique.

Dans les deux régions étudiées, il n'existe pas de claires corrélations (statistiquement significatives) entre les paramètres chimiques et microbiens, à l'exception de la RBS et de la teneur en argile, qui a été nettement négativement corrélée, en particulier à Annaba. Cela peut être considéré comme une indication d'une plus grande protection de la matière organique à partir de la décomposition microbienne avec l'augmentation du contenu en argile. De même, la relation entre BMC-SIR et le contenu en argile a été négatif, mais statistiquement non significatif. Le qCO_2 a montré une tendance générale à une relation avec plusieurs constituants du sol, la corrélation a été négative avec le COS%, alors qu'elle a été positive avec le contenu en argile. Cela pourrait signifier que la disponibilité croissante de la matière organique en général réduit le stress physiologique pour les microorganismes du sol, tout en augmentant la teneur en argile; le stress se lèverait éventuellement en réduisant la disponibilité de la matière organique présente dans le sol.

L'activité microbienne, mesurée en RBS, a montré une corrélation positive avec la porosité et, par conséquent, une corrélation négative avec la DA. Elle a été statistiquement très claire pour MP (MP_{30} et MP_{60}). Une corrélation généralement positive a également été identifiée entre la RBS et PA, mais elle n'a été que faible. Des corrélations qualitativement similaires avec les propriétés physiques du sol ont été trouvées pour BMC-SIR, mais elles ont été quantitativement beaucoup plus faibles que pour RBS, ce qui concorde avec les résultats de (Andreas et al., 2015). Les relations entre qCO_2 et les propriétés structurelles ont été diffuses et n'ont pas permis de tirer des conclusions claires.

Sur la base de nos expériences à la ferme dans les deux régions en Algérie, les effets du travail du sol sur les facteurs expérimentaux et sur la structure du sol, selon la saison d'échantillonnage et la région, ont été les suivants:

- Parmi les trois pratiques culturales étudiées, le travail profond « labour traditionnel LT » a entraîné un ameublissement plus intense du sol et une plus grande déstabilisation de la structure du sol dans les deux régions expérimentales. L'intensité de ces effets varie considérablement, ce qui signifie que de nombreuses interactions entre le travail du sol, la saison d'échantillonnage et les effets des régions ont été détectées. Les effets sur la porosité

ont été très distincts à Sétif lors de la deuxième saison d'échantillonnage (après le travail du sol), tandis que la déstabilisation de la structure du sol a été particulièrement évidente à Annaba, en particulier après le travail du sol. Fait intéressant, l'ameublissement a été plus intensif sur la structure du sol dans LT et n'a pas entraîné une augmentation correspondante à la capacité de transport du système de pores remplis d'air. En fait, la perméabilité à l'air de la structure labourée a été relativement faible, bien qu'en termes absolus, la perméabilité à l'air dans LT a été élevée et jamais limitante, même dans la première campagne d'échantillonnage (pendant la saison de croissance).

- Les techniques simplifiées ou « le travail réduit TCS » ont conduit à un desserrage moins intensif du sol, ce qui a donné lieu à des porosités plus élevées et généralement à une structure du sol plus stable que dans le LT. Cet effet a été clairement visible à Annaba lors de la deuxième campagne d'échantillonnage (après le travail du sol), alors qu'à Sétif, la résistance du sol après le travail du sol a été réduite en TCS. Comme dans LT, la porosité accrue dans les TCS ne reflète pas la capacité de transport des macropores remplis d'air, bien qu'en termes absolus, aucune limitation ne puisse être attendue en fonction des valeurs PA mesurées.

- Le Semis direct ou le non labour (traitement SD) a conduit à une structure du sol plus dense avec une porosité réduite et généralement une stabilité accrue. Les effets ont considérablement influé sur la situation (campagne d'échantillonnage et région): les effets les plus clairs sur la porosité ont été trouvés à Sétif (comme dans le LT) dans la deuxième campagne d'échantillonnage (après le travail du sol), tandis que la stabilité du sol dans le SD a été relativement élevée à Annaba. Une constatation très spécifique de la capacité de transport de la porosité remplie d'air dans le SD, la perméabilité à l'air étant en général comparable à celle du LT et de la TCS. Cela signifie que la structure du sol dans le SD a eu une grande capacité de transport dans les gros macropores avec une capacité de transport accédant à de plus petits volumes du sol avec un système de macropores plus fin, plus ramifié et interconnecté que dans la TCS et surtout dans le LT.

Dans la bibliographie, des résultats contradictoires concernant les effets du travail du sol sur les paramètres microbiologiques pourraient être trouvés (Wardle et Ghani, 1995). Des résultats contradictoires ont également été observés dans une étude antérieure qui avait étudié les effets du compactage du sol sur les paramètres microbiologiques (Beylich et al., 2010), ces résultats seraient probablement souvent causés par des facteurs de site et de gestion non quantifiés ou explicitement considérés dans le concept expérimental, mais qui pourraient

varier selon d'autres études. Le travail du sol et le compactage du sol ont d'abord un effet principal sur les paramètres physiques décrivant les propriétés de la structure du sol; les paramètres microbiologiques qui sont influencés, en raison des effets de structure du sol sur les conditions de vie des organismes du sol. Cependant, cette modification des conditions de vie des microbes dans l'habitat du sol dépend également des effets climatiques.

Dans l'ensemble de notre étude, il existe de nombreux résultats contradictoires concernant les effets du travail du sol sur les paramètres biologiques, probablement causés par des facteurs différents et souvent non estimés ou connus qui ne varient que légèrement entre ces études. Une situation similaire pourrait être observée lors de notre étude des effets du compactage du sol sur les paramètres biologiques. Dans le travail du sol ainsi que dans le compactage du sol, les premiers paramètres physiques sont affectés et les paramètres biologiques sont influencés par les changements de conditions de vie dans le sol dus, aux propriétés physiques en combinaison avec les effets climatiques.

Conclusion et perspectives

○ Conclusion

Dans les deux régions et avec les conditions de gestion de sites différentes, les effets des systèmes de travail du sol sur la qualité du sol sont évalués dans cette étude dans deux fermes, en mesurant plusieurs paramètres chimiques, physiques et biologiques du sol. En raison des conditions expérimentales particulières (champs agricoles commerciaux), il a été difficile de montrer des effets clairs des facteurs expérimentaux de travail du sol, la région, la période d'échantillonnage et même pour la terre arable, sur les paramètres étudiés, ou des interactions entre les paramètres. L'approche de la recherche sur ferme a rendu difficile la création d'un modèle expérimental entièrement équilibré et factorisé basé sur l'homogénéité des conditions du site (texture du sol et profondeur du sol), la comparabilité des facteurs de gestion (synchronisation de la rotation des cultures, etc.), la conception adéquate d'échantillonnage (par exemple, forte variabilité de certains paramètres).

L'effet de l'ameublissement mécanique du LT et de TCS augmente la porosité du sol sur les sites expérimentaux, mais réduit sa stabilité. Ce relâchement mécanique de la structure du sol est absent dans le SD, mais les processus de formation de structure physico-chimiques et biophysiques typiques du SD ne peuvent pas le compenser complètement. Cependant, l'approche du SD de la formation de structure sans descellement mécanique conduit à des avantages spécifiques concernant l'efficacité de transport du système macropore. Bien que la porosité et la capacité de transport dans le sol SD soient souvent plus faibles que dans les sols TCS et LT, les valeurs absolues du SD sont rarement supérieures aux seuils critiques pour la qualité de la structure dans les deux régions étudiées. En raison du desserrage mécanique plus intense du LT, la stabilité structurale de ce sol est généralement la plus faible, ce qui le rend plus sensible au compactage du sol.

BMC-SIR et spécifiquement BSR montrent des corrélations négatives claires à la DA et des corrélations positives avec la PT et spécifiquement à MP (à la fois MP₃₀ et MP₆₀). Les corrélations de qCO₂ avec d'autres paramètres sont les plus fortes avec les propriétés basiques du sol (telles que la teneur en argile et le COS), mais ne montrent pas de relation claire avec la structure du sol.

Les systèmes de travail du sol ont des effets différents sur les paramètres du sol, avec des conséquences potentiellement positives ou négatives sur la qualité du sol, ce qui rend difficile l'identification du traitement adéquat et avantageux pour travailler le sol. Cependant, un traitement de travail du sol optimal, mieux adapté au site et aux conditions de gestion, que

nous avons pu trouver sur la base des informations délimitées obtenues dans cette étude, il nous semble que les TCS sont les mieux adoptées.

○ **Perspectives**

Les résultats de ce travail de thèse ne sont qu'une première contribution incomplète à l'évaluation des effets du travail du sol sur la qualité du sol dans deux régions agricoles d'Algérie. Néanmoins, les résultats obtenus sont encourageants et devraient être confirmés par d'autres études avec des ressources plus avantageuses. À l'issu de ces résultats, les perspectives peuvent s'envisager à travers des axes fondamentaux avec des bases d'expérimentation bien définies à la comparaison entre les pratiques culturales. Cependant, cette étude devrait être complétée et approfondie pour qualifier clairement la pratique favorable dans des conditions contrôlées et bien factorisées.

Pour ce faire nous devons élargir ce travail en détaillant:

- Les caractéristiques physiques et mécaniques des sols en caractérisant les paramètres de structure et la stabilité structurale pour les trois techniques. En s'intéressant aux caractéristiques des macropores et micropores du point de vue de leur continuité ou tortuosité. La réponse à ces questions permettrait de préciser la part due aux phénomènes de protection physique des sols agricoles.
- Les caractéristiques la vie dans le sol, et il serait très important d'approfondir l'étude avec la caractérisation du comportement des macro et microorganismes du sol pour les différents procédés, et sa relations avec la stabilité physique du sol : en étudiant la relation entre (la porosité, la perméabilité à l'air et la diffusion).
- La protection des plantes, il serait nécessaire de développer des outils simples visant à décrire les différents leviers de lutte agronomique en fonction du contexte agronomique.

À la lumière des résultats obtenus, et comme une recommandation concernant le travail du sol :

- Il serait très avantageux l'adoption des techniques culturales simplifiées, comme une méthode alternative au labour dans le contexte de protection des sols.
- De développer des outils d'analyse simplifiée pour réduire les impacts environnementaux du travail du sol, et de travailler avec des outils qui ont une largeur de travail identique afin de limiter l'incidence des passages d'engins.

- Enfin, si les TCS étaient largement adoptées par les agriculteurs pour des raisons économiques, ou préconisées en raison de leurs effets positifs sur les consommations énergétiques, il serait intéressant de prolonger la réflexion que nous avons menée sur des études pour améliorer la conduite de ces systèmes afin de minimiser leurs impacts environnementaux.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdellaoui Z., et D. Houassine. 2006. Quelles perspectives pour l'agriculture de conservation dans les zones céréalières en conditions algériennes. *Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69*. pp 183-187.
- Abdellaoui Z., S. Fettih et O. Zaghoulane. 2006. Etude comparative de l'effet du semis direct et du labour conventionnel sur le comportement d'une culture de blé dur. *Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69*. pp115-120.
- Abdellaoui Z., Tissekrat, H., Belhadj, A. & Zaghoulane, O. 2010. Etude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement d'une culture de blé dur dans la zone sub-humide. Les actes des 4e Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct. Sétif Algérie 3,4,5 mai2010. N° spécial revue *Recherche agronomique*. Pp : 68-82.
- Aeschlimann U. 2003. Effects of elevated atmospheric pCO₂ on net ecosystem CO₂ exchange in managed grassland. PhD Thesis ETH Zurich.
- 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.
- Alaoui, A., Lipiec, J., Gerke, H.H. 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: a hydrodynamic perspective. *Soil & Tillage Research*. 115-116: 1-15.
- Alexandrou, A. et Earl, R. 1998. The relationship among the pre-compaction stress, volumetric water content and initial dry bulk density of soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 71 : 75-80.
- AL-Kaisi M. et Licht M.A. 2004. Effect of strip tillage on corn nitrogen uptake and residual soil nitrate accumulation compared with no-tillage and chisel plow. *Agronomy Journal*, 96, 1164-1171.
- Ali, A., Ayuba, S.A., & Ojeniyi, S.O. (2006). Effect of tillage and fertilizer on soil chemical properties, leaf nutrient content and yield of soya bean in the Guinea savanna zone of Nigeria. *Nigerian Journal of Soil Science*, 16, 126-130.
- 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.

- Alvarez, R., Steinbach, H. S. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crop yield in the Argentine Pampas. *Soil & Tillage Research*.104:1 16.
- Ammann H., Anken T., Irla E., Heusser J., Mader P., Nievergelt J., Richner W., Schmid O., Stamp P., Walter U. et Weisskopf P. 2003. Influence du travail du sol sur la lixiviation des nitrates. *Rapport FAT*,598, 1-8.
- Ampoorter, E., De Schrijver, A., De Frenne, P., Hermy, M., Verheyen, K. 2011. Experimental assessment of ecological restoration options for compacted forest soils. *Ecological Engineering*. 37: 1734-1746.
- Anderson, J.P.E., Domsch, K.H. 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. *Soil Biol. Biochem.* 10, 215–221.
- Anderson, T.H., Domsch, K.H. 1990. Application of eco-physiological quotients (qCO_2 and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. *Soil Biology and Biochemistry* 22, 251–255.
- Anderson, T.-H., Domsch, K.H., 1993. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology & Biochemistry* 25, 393e395.
- Andrade, D.S., Colozzi-Filho, A. & 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. 2001. (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.
- Archambeaud, M, et Thomas, F. (2011). La rotation , 3ème pilier de l’agriculture de conservation. (WWW.agriculture-de –conservation.com) .
- Assouline,S., Tavares-Filho, J. and Tessier,D., 1997. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties experimental results and modeling.*Soil science society of America Journal*, 61: 390-398.

- Badalikova, B. 2010. Influence of soil tillage on soil compaction. In A.P. Dedousis and T. Bartzanas (eds.), *Soil Engineering, Soil Biology* 20, DOI 10.1007/978-3-642-03681-1_2, # Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- 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.
- Baggs E.M., Stevenson M., Pihlatie M., Regar A., Cook H. et Cadisch G. 2003. Nitrous oxide emissions following application of residues and fertiliser under zero and conventional tillage. *Plant and Soil*, 254, 361-370.
- 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.
- Barber S.A. 1995. Soil Nutrient bioavailability. A mechanistic approach. John Wiley and sons, 414p
- Barriuso, E., Calvet, R., Cure, B. (1991). Simplification du travail du sol et pollution par les pesticides, *Perspectives Agricoles*, n°(162), p 31-39.
- Belabed A. I, Aouissi. H A, Zediri. H, Djemadi. I, Driss. K, Houhamdi M, , ERAUD. C & Bouslama Z. The effect of urbanization on the phenotype of the Collared Dove (*Streptopelia decaocto*) in northeastern Algeria. *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie*, 2013, n° 35, 155-164.
- Bellemou, A., 2012. Etude des résultats d'essais de différentes techniques de semis du blé dur (CHEN'S). Thèse de Magister. I.N.A. El Harrach, 152 p.
- Benmansour, M., Duchemin, M., Nouira, A, et Gallichand, J. (2006). Emploi combiné des radioéléments, de la modélisation et des mesures aux champs pour étudier l'érosion hydrique des sols en milieu agricole (MAROC-CANADA) : Rapport 2006. Agence Universitaire de la Francophonie et Réseau Érosion & GCES, Actions en réseau, Convention P2-2092RR621.IRDA, CNESTEN, décembre 2006, p25.
- Benvenuti S, 2007. Weed seed movement and dispersal strategies in the agricultural environment, *Weed Biology and Management* 7, 141-157.
- Benites J. R., Ashburner J.E. 2001. FAO's role in promoting conservation agriculture. In : 1st world congress on conservation agriculture, Madrid, 1-5 October. T.
- Berama, R. (2004). Contribution à l'étude de la technique du semis direct (cas de la luzerne). Mémoire d'ingénieur INA El Harrach, Alger, 94 p.

- Beylich, A., Oberholzer, H.R., Schrader, S., Höper, H. & Wilke B.M. 2010. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. *Soil and Tillage Research* 109, 133-143.
- Bessam, F., et Mrabet, R. 2001. Time influence of no tillage on organic matter and its quality of a vertic Calcixeroll in a semiarid area of morocco. In: *Proceedings of international congress on conservation agriculture*, 1-5 October 2001, Madrid (Spain), vol. 2, pp. 281-286.
- Bénites, J. 2002. Retenir le désert avec l'agriculture de conservation. *Revue Terre et vie*, n° (61-62).
- Biologie du sol – application (BSA). , 2009. Groupe de travail, Claudia Maurer-Troxler, Gaby von Rohr, Hans-Rudolf Oberholzer, Nicolas Rossier, Paul Mäder, Roland von Arx, Françoise Okopnik. Guide à l'utilisation et à l'interprétation des paramètres biologiques du sol. Frick.
- 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., 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.
- Bouguendouz, A. 2012. Effet de trois itinéraires techniques sur l'élaboration du rendement de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) sous conditions semi-arides des hautes plaines Sétifiennes. *Options Méditerranéennes* 96, 83-89.
- Bouguendouz Abdelghani., Meratla Laïd., Chabane Issam. 2012. COMPTE RENDU de la 6ème Journée Nationale sur L'Agriculture de Conservation Sétif, 23 mai 2012., Organisée sous le thème :Le sol est un bien précieux, préservons-le pour les générations futures.
- Bouzzara S., et O. Ferroukh H., 2010. Influence du semis direct et des techniques culturales simplifiées sur les propriétés d'un sol de ferme pilote Sersour (Sétif). *Les actes des 4e Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct*. Sétif Algérie 3,4,5 mai 2010. N° spécial revue Recherche agronomique. Pp : 83-89.
- Bouzerzour H., S. Mahnane, M. Makhoulouf, 2006. Une association pour une agriculture de conservation sur les hautes plaines orientales semi-arides d'Algérie. *Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69*. pp 107-111.

- Borken W., Muhs A., Beese F. 2002. Application of compost in spruce forests: effects on soil respiration, basal respiration and microbial biomass. *For. Ecol. Manage.* 159, p. 49-58.
- Brady NC., Weil RR. 2002. *The Nature and Properties of Soils*. 13th edition. Pearson Education, Inc. New Jersey, USA. 960 p.
- Bronick, C.J., Lal, R., 2004. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, souspresse.
- Bronick, C. J. & Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124, 3-22.
- Campbell C.A. et Zentner R.P. 1993. Soil Organic Matter as influenced by crop rotations and fertilizer. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57 : 1034-1040.
- Campbell C.A., McConkey B.G., Zentner R. P., Selles F. et Curtin D. 1996. Long-term effects of tillage and crop rotations on soil organic matter and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 76: 395-401.
- Canarache, A., Horn, R. et Colibas, I. 2000. Compressibility of soils in a long term field experiment with intensive deep ripping in Romania. *Soil & Tillage Research*. 56 : 185-196.
- Catt J.A., Howsek R., Christian D.G., Lane P.W., Harris G.L. et Goss M.J. 2000. Assessment of tillage strategies to decrease nitrates leaching in the Brimstone Farm Experiment, Oxfordshire, UK. *Soil and Tillage Research*, 53, 185-200.
- Casella E., Soussana JF. 1997. Long-term effect of CO₂ enrichment and temperature increase on the carbon balance of a temperate grassland. *Journal of Experimental Botany* 48, 1309-1321.
- Carter M.R. et Renne D.A. 1987. Effects of tillage on deposition and utilization of 15 N residual fertilizer. *Soil and tillage research* (9), 33-43.
- Chaussod, R. 1996. La qualité biologique des sols. Evaluation et implications. *Etude et gestion des sols* 3:261-277.
- Chaussod R. 2002. La qualité biologique des sols : des concepts aux applications. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 88 (2), pp 61-68.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000, Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 64, 1479-1486.

- Chervet, A., Guble, L., Hofer, P., Maurer-Troxler, C., Müller, M., Ramseier, L., Streit, Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000, Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 64, 1479-1486
- Chevrier, A., Barbier, S. 2002. Performances économiques et environnementales des techniques agricoles de conservation des sols création d'un référentiel et premiers résultats. Mémoire de fin d'études. Institut National de la Recherche Agronomique de Versailles Grignon Association pour la Promotion d'une Agriculture Durable. p.96.
- 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 WR., Abaye DA., Marschner P., Murphy DV., Stockdale EA., Goulding KWT. 2005. The contribution of soil organic matter fractions to carbon and nitrogen mineralization and microbial community size and structure. *Soil Biol. Biochem.* 37, p. 1726-1737.
- Cookson, D.V. Murphy, M.M. Roper. 2008. Characterizing the 567 relationships between soil organic matter components and microbial function and composition 568 along a tillage disturbance gradient *Soil Biology and Biochemistry*, 40 (2008), pp. 763–777
- Corbeels, M., de Graaff, J., Ndah, T.H., Penot, E., Baudron, F., Naudin, K., Andrieu, N., Chirat, G., Schuler, J., Nyagumbo, I., Rusinamhodzi, L., Traore, K., Mzoba, H.D., Adolwa, I.S., 2013. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: a multi-scale analysis. *Agric. Syst. Environ.* 187, 155–170.
- Coufoulier, N. 2008. Un manteau d'hiver régénérant. *Reussir céréales grandes cultures* n°(2 /4).
- Coufourier N., Lecomte V., Le Goff A. (CA 76), Pivain Y. (CA 27), Ouvry J.F., Lheriteau M. (AREAS), 2008. Brochure technique, AREAS .
- Davet P. 1996. Vie microbienne du sol et production végétale. INERA, Paris, France. 383 p.
- Denis baize.; 2000, guide des analyses en pédologie ; 2ème édition revue et augmentée. 33 p.
- Degens BP, Harris JA. 1997. Development of a physiological approach to measuring the catabolic diversity of soil microbial communities. *Soil Biology & Biochemistry*, 29: 1309-1320.

- Derpsch, R. 2001. Conservation tillage, no-tillage and related technologies, Keynotecontributions "First wolrd Congress on Conservation Agriculture; 1-5 octobre 2001",Madrid (SP), ECAF-FAO, p161-170, 394 pp.
- Derpsch, R. 2005. The extent of conservation agriculture worldwide Implications and impact In: Proceedings of the 3rd World Congress on Conservation Agriculture, Nairobi,
- Derpsch, R, and Friedrich, T. 2009.Global overview of conservation agriculture adoption. Proceedings, Lead Paper, 4th World Congress on Conservation Agriculture, 4-7February 2009, New Delhi (India), pp. 429-438.
- Dexter, A. R. 1988. Advances in characterization of soil structure. Soil & Tillage Research 11, 199-238.
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality.Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 120, 210-214.
- D'Haene K., Vandenbruwane J., De Neve S., Gabriels D., Salomez J. et Hofman G. 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.
- Dirgo J. Cosntino 2006, Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme, page 88.
- Drury C.F., Mckenney D.J., Findlay W.I. et Gaynor J.D. 1993. Influence of tillage on nitrate loss in surface runoff and tile drainage. Soil Sci. Soc. Am. J., 57, 797-802.
- Durand J.H., 1954Les sols d'Algérie. Service des études scientifiques. Pédologie, N°2. Nouvelle édition, 140p.
- Dutartre, P., Bartoli, F., Andreux, F., Portal, J.M., Ange, A., 1993, Influence of content andnature of organic matter on the structure of some sandy soils from West Africa.Geoderma, 56, 459-478

- Edwards J.H., Wood C.W., Thurlow D.L. et Ruf M.E. 1992. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludult soil. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1577-1582.
- Etienne Gaujour, 2010. Evaluation des sources d'espèces et des déterminants de la diversité végétale des parcelles agricoles. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010
- Éric Thibault, agr. Club Techno-Champ 2000. Pleine Terres enc.
- FAO. 1983. Garder la terre en vie : l'érosion des sols, ses causes et ses remèdes. *Bulletin pédologique* 50 : 62 p.
- FAO. 1990. Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-aride. *Bulletin pédologique* 57; 182 p.
- FAO 2001. Conservation agriculture: case studies in Latin America and Africa. *FAO Soils Bulletin* 78, 69p.
- FAO., 2007. AG : Agriculture de conservation (<http://www.fao.org/ag/ca/fr/1a.htm>), 42 p.
- FAO. 2008. la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des sols. FAO, département du développement durable. Référence internet www.fao.org/DOCREP/005/Y20779F/y2779fo4.html, 63 pages.
- FAL, FAW and FAC, 1996. Reference methods of the Swiss Federal Agricultural Research Stations. Swiss Federal Research Stations Agroscope, volume 1 to 4.
- Follett R.F. et Peterson G.A. 1988. Surface soil nutrient distribution as affected by wheat-fallow tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 141-147.
- Fortas, B., Mekhlouf, A., Hamsi, K., Boudiar, R., Laouar, A.M. & Djaidja, Z. 2013. Impacts des techniques culturales sur le comportement physique du sol et la culture du blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous les conditions semi-aride de la région de Sétif. *Revue 583 Agriculture*. 06 (2013) 12 – 20
- Franco I., Contin M., Bragato G., De Nobili M. 2004. Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil. *Geoderma* 121, p. 17-30.
- Franzluebbers A.J., Hons F.M. et Zuberer D.A. 1995. Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 59, 1618-1624.

- Franzluebbers, A.J., Arshad, M.A. 1996. Soil organic matter pools with conventional and zero tillage in a cold, semiarid climate. *Soil Till. Res.* 39, 1–11.
- 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.
- Frey, B., Kremer, J., Rüdte, A., Sciacca, S., Matthies, D., Lüscher, P. 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*. 45: 312-320.
- Garcia-Gil JC., Plaza C., Soler-Rovira P., Polo A. 2000. Long-term effects of municipal solid waste composts application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biol. Biochem.* 32, p. 1907-1913.
- Garland JL, Mills AL. 1991. Classification and characterization of heterotrophic microbial communities on the basis of patterns of community-level sole-carbon-source utilization. *Applied and Environmental Microbiology*, 57: 2351-2359.
- Gautronneau, Y., et H. Manichon. 1987. Guide méthodique du profil cultural, Paris/Lyon.
- Gál A., Vyn T.J., Michéli E., Kladvko E.J. et McFee W.W. 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.
- Geoffroy Séré, 2007 Fonctionnement et évolution pédogénétiques de Technosols issus d'un procédé de construction de sol. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL , dans le cadre de RP2E - Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources, Procédés, Produits, Environnement , en partenariat avec Laboratoire sols et environnement (laboratoire) .
- 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.
- Goulet F. 2008. « Des tensions épistémiques et professionnelles en agriculture. Dynamiques autour des techniques sans labour et de leur évaluation environnementale », *Revue d'Anthropologie des Connaissances*, vol. 2, n° 4, p. 291-310.

- Goulet, F. 2011. Accompagner et vendre. Les firmes de l'agrofourriture dans l'innovation et le conseil en agriculture. Cahiers Agricultures, 20, 382-386.
- Gollany, H.T., Schumacher, T.E., Evenson, P.D., Lindstrom, M.J., Lemme, G.D., 1991. Aggregate stability of an eroded and desurfaced Typic Argiustoll. Soil Sci. Soc. Am. J., 55, 811-816
- Goss J.M., Howse K.R., Lane P.W., Christian D.G. et Harris G.L., 1993. Losses of nitrates-nitrogen in water draining from under autumn-sown crops established by direct drilling or mouldboard ploughing. Journal of Soil Science, 44, 35-48.
- Girardin, P. 1993. Agriculture intégrée : au-delà des mythes... un défi, Cahiers Agricultures; vol 2 n° (2), pp141-145.
- Granval, P., Aliaga, R., Soto, P. 1993. Effets des pratiques agricoles sur les lombriciens (Lumbricidae), les bécassines des marais (Gallinago Gallinago) et dans la valeur pastorale du marais de la Dives (Calvados), Gibier Faune Sauvage, vol.10. p59-73.
- Groenevelt, P.H., Kay, B.D. & Grant, C.D. 1984. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. Geoderma 34, 101-114.
- Groffman PM., McDowell WH., Myers JC., Merriam JL. 2001. Soil Microbial biomass and activity in tropical riparian forest. Soil Biol. Biochem. 33, p. 1339-1348.
- Guerif, J. 1991. Simplification du travail du sol et évolution du milieu physique et chimique, Perspectives Agricoles, n° (161), septembre, p 39-46
- Gupta S., Munyankusi E., Moncrief J., Zvomuya F. et Hanewall M. 2004. Tillage and manure application effects on mineral nitrogen leaching from seasonally frozen soils. J. Environ. Qual., 33, 1238-1246.
- Hadas A, Kautsky L, Goek M, Kara EE. (2004) Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. Soil Biology & Biochemistry, 36: 255-266.
- Halvorson A.D., Wienhold B.J. et Black A.L. 2001. Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system. Agronomy Journal, 93, 836-841.

- Hajabbasi, M.A., Hemmat, A. 2000. Tillage impacts on aggregate stability and crop productivity in a clay-loam soil in central Iran. *Soil Till. Res.* 56, 205–212.
- Hansen E.M. etDjurhuus J. 1997. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. *Soil and tillage research*, 41, 203-219.
- 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.
- Håkansson, I., Lipiec, J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*. 53: 71-85.
- Heinemeyer, O., Insam, H., Kaiser, E.A. & Walenzik, G. 1989. Soil microbial biomass and respiration measurements: an automated technique based on infra-red gas analysis. *Plant Soil* 116, 191–195.
- Horn, R., Fleige, H., Richter, F., CzyŜ, E. A., Dexter, A. R. et al., 2005. SIDASS project, Part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil & Tillage Research*. 82 : 47-56.
- 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.
- Imhoff, S., da Silva, A. P. et Fallow, D. 2004. Susceptibility to Compaction, Load Support Capacity, and Soil Compressibility of Hapludox. *Soil Science Society of America Journal*. 68: 17-24.
- Irfan, A., Mahmood, T. & Islam, K.R. 2013. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil & Tillage Research* 131, 28–35
- Islam, K.R., Weil, R.R. 2000. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. *Journal of Soil and Water Conservation* 55, 69–78.
- ITGC. 1980. Synthèse et bilan des opérations intégrées de recherche et développement de l'Institut de Développement des Grandes Cultures 1971-1979, CCCE-SEDES-ITGC, Alger, 364 p.
- Iversen, B.V., Moldrup, P., Schjønning, P., Loll, P., 2001. Air and water permeability in differently textures soils at two measurements scales. *Soil Sci.* 166, 643–659.

- 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.
- Jamagne, M., 1967. Bases et techniques d'une cartographie des sols. *Ann. Agron.*, n° hors série 18, 142 p.
- Jay D. Jabro, William M. Iversen, William B. Stevens, Robert G. Evans, Maysoon M. Mikha, Brett L. Allen, 2016. Physical and hydraulic properties of a sandy loam soil under zero, shallow and deep tillage practices. *Soil & Tillage Research* 159 (2016) 67–72.
- Jenkinson, D. S. (1966) studies on the decomposition of plant material in soil. If. Partial sterilization of soil and the soil biomass. *J. Soil Sci.*, 17:280-302.
- Ji, B., Zhao, Y., Mu, X., Liu, K. & Li, C. 2013. Effects of tillage on soil physical properties and root growth of maize in loam and clay in central China. *Plant Soil Environ.* 59, 295–302.
- Joergensen RG. 1995. The fumigation-extraction method for microbial biomass nitrogen. In Alef K. and Nannipieri P. (Eds.). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. Academic Press Limited. London, UK. p. 388-390.
- Joergensen RG, Mueller T (1996) The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: calibration of the k_{EN} value. *Soil Biol Biochem* 28:33–37
- Kahlon, M.S., Lal, R., Varughese, M.A., 2013. Twenty years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil and Tillage Research* 126, 151–158.
- Kaiser, E.A., Müller, T., Jörgensen, R.G., Insam, H. & Heinemeyer, O. 1992. Evaluation of methods to estimate the soil microbial biomass and the relationship with soil texture and organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 24, 675–683.
- 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.
- Kanwar R.S., Stoltenberg D.E., Pfeiffer R., Karlen D., Colvin T.S. et Simpkins W.W., 1993. Transport of nitrates and pesticides to shallow ground water system as affected by tillage and crop rotation practices. Proc. Conference: Agricultural research to protect water quality, Minneapolis, Minnesota, Feb.1993, 270- 273.
- Karlen, D. L. M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, and G. E. 1997. Schuman. Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial). Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10.
- Kassam, A-H., 1981. Climate, soil and land resources in North Africa and West Asia. *Plant and soil*, Vol. 58, n. 1, p. 1-29.
- Kassam, A.H., Friedrich, T., Shaxson, T.F. & Pretty, J.N. 2009. The spread of conservation agriculture: Justification, sustainability and uptake. *International Journal of Agriculture Sustainability* 7: 292-320.
- Kay, B. D. 1990. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science* 12, 1-52.
- Kay, B.D., Vanden Bygaart. A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research* 66:107-118.
- 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.
- Kenya. Dexter, A. R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research* 11, 199-238.
- Koch H.J. et Stockfisch N. 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.
- Kourougli, S., Aït Ouali, A. 2010. Etude de l'effet des trois systèmes de culture et du précédent cultural sur le comportement du sol et de la culture de blé tendre (*Triticum aestivum*, L). Mémoire d'ingénieur d'état. UFAS Sétif, Département des Sciences Agronomiques. Pp : 79.

- Köller, K. 2003. Techniques of Soil Tillage, p. 1-25, In A. El Titi, ed. Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Kribaa M. 2003. Effet de la jachère sur les sols en céréaliculture pluviale dans les zones semi-arides méditerranéennes. Cas des hautes plaines sétifiennes en Algérie. Impact des différentes techniques de travail de la jachère sur les caractéristiques structurales et hydrodynamiques du sol. Thèse de doctorat. p121. INA ElHarrach Alger.
- Kushwaha, C.P., Tripathi, S.K., Singh, K.P., 2001, Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in a tropical dryland agroecosystem. Appl. Soil Ecol., 16, 229-241
- 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.
- Lahmar, R. 2007. Opportunités et limites de l'agriculture de conservation en Méditerranée. Les 631 enseignements du projet KASSA. CIRAD, UMR G-EAU, Montpellier, F-34000 France. 632 Options Méditerranéennes, Série A, Numéro 69.
- Lahmar, R., Bouzerzour, H. 2010. Du mulch terreux au mulch organique. Revisite le dry 634 farming pour assurer une transition vers l'agriculture durable dans les hautes plaines 635 sétifiennes. Actes des quatrième rencontres méditerranéennes du semis direct. Revue INRAA 636 No. Spécial
- Lal, R. 1997. Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical Alfisol in western Nigeria. II. Soil chemical properties. Soil and Tillage Research 42, 161–174.
- 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.
- Lampurlanes, J., Cantero-Martinez, C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. Agron. J., 95, 526-536.

- Langlet B. et Remy J.C. 1976. Incidence de la simplification du travail du sol sur la dynamique de l'azote. P 189-204. In simplification de travail du sol en production céréalière, ITCF (Ed), Pris. 1334.
- Larson, W. E. et Gupta, S. C. 1980. Estimating critical stress in unsaturated soils from changes in pore water pressure during confined compression. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 1127-1132.
- Le Bissonnais, Y., 1988. Analyse des mécanismes de désagrégation et de la mobilisation des particules des terres sous l'action des pluies. Thèse de doctorat Thesis, Université d'Orléans, Orléans.
- Le Bissonnais, Y., 1990, Experimental study and modelling of soil surface crusting processes. In Catenasupplement 17, Soil Erosion experiments and model. Ed R.B. Bryan, 13-28
- Le Bissonnais, Y., Singer, M.J., 1993. Seal formation runoff and in terrill erosion from seventeen California soils. Soil Sci. Soc. Amer. J., 57, 224-229
- Le Bissonnais, Y., Le Souder, C., 1995a, Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Etudes et Gestion des Sols, 2, 43-56
- Le Bissonnais, Y., Renaux, B., Delouche, H., 1995b. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interill erosion from tilled loess soils. Catena, 25, 33-46
- Le Bissonnais, Y., 1996a, Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. Eur. J. Soil Sci., 47, 425-437
- Le Bissonnais, Y., 1996b, Soil Characteristics and Aggregate Stability. In Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation. Ed M. Agassi, Ch. 3, 41-60
- Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 1997, Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : II. Application to humic loamy soils with various organic carbon contents. Eur. J. Soil Sci., 48, 39-48
- Le Bissonnais Y., Cros-Cayot, S., Gascuel-Oudou, C., 2002, Topographic dependence of aggregate stability, overland flow and sediment transport. Agronomie, 22, 489-501.

- Lebert, M. et Horn, R. 1991. A methode to predict the mechanical strength of agricultural soils. *Soil & Tillage Research*.19 : 275-286.
- Little J.L., Bennett D.R. et Miller J.J. 2005. Nutrient and sediment losses under simulated rainfall following manure incorporation by different methods. *Journal of Environmental Quality* 34: 1883-1895
- McIsaac G.F., Hirschi M.C., Mitchell J.K., 1991. Nitrogen and phosphorus in eroded sediment from corn and soybean tillage systems. *Journal of Environmental Quality* 20: 663-670.
- Liu X.J., Mosier A.R., Halvorson A.D. et Zhang F.S. 2006. The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from a clay loam soil. *Plant and Soil*, 280, 177-188.
- Logsdon, S.D., Kasper, T.C. & Camberdella. C.A. 1999. Depth incremental soil properties under no-till or chisel management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:197-200.
- López-Fando C., Pardo M.T. 2009. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment. *Soil and Tillage Research*, 104: 278–284.
- Mahboubi, A.A., Lal, R., Faussey, N.R., 1993. Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 506–512.
- Mahdi, M. (2004). Contribution à l'étude de la technique du semis direct sous pivot. Mémoire d'ingénieur INA EL-Harrach.
- 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.
- Marschner P, Kandeler E & Marschner B (2003) Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment. *Soil Biol Biochem* 35: 453–461.
- Martens, D.A., Frankenberger W.T.Jr., 1992a. Decomposition of bacterial polymers in soil and their influence on soil structure. *Biol. Fert. Soils*, 13, 65-73

- Martens, D.A., Frankenberger, W.T.Jr., 1992b, Modification of infiltration rates in an organicamended irrigated soil. *Agron. J.*, 84, 707-717
- Martens, D. A., 2000a, Management and crop residue influence soil aggregate stability. *J. Env. Qual.*, 29 (3), 723-727
- Martens, D.A., 2000b, Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. *Soil Biol. Biochem.*, 32, 361-369.
- Martens, D.A., 2002. Relationship between plant phenolic acids released during soil mineralization and aggregate stabilization. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 66, 1857-1867.
- Martens, D.A., Loeffelmann, K.L., 2002, Improved accounting of carbohydrate carbon from plants and soils. *Soil Biol. Biochem.* 34, 1393-1399.
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W.G., Etana, A., Stettler, M., Forkman, J. & Keller, T. 2016. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile *Soil & Tillage Research* 163, 141–151
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W.G., Rek, J. & Keller, T. 2016. Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part II. Soil porosity and gas transport parameters. *Soil & Tillage Research* 163, 130–140.
- 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.
- McConkey B.G., Curtin D., Campbell C.A., Brandt S.A. et Selles F. 2002. Crop and soil nitrogen status of tilled and no-tillage systems in semiarid regions of Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science*, 82, 489- 498.
- McVay, K.A., Budde, J.A., Fabrizzi, K., Mikha, M.M., Rice, C.W., Schlegel, A.J., Peterson, D.E., Sweeney, D.W. & Thompson C. 2006. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Sci Soc Am J* 70: 434-438.

- Mekhlouf, A., Makhlouf, M., Bounechada, M., Kerougli S. & Aït Ouali, A. 2011. Impact des différents systèmes de cultures sur la culture de blé tendre (*Triticum aestivum*, L), var. HD 1220 en conditions semi-aride. *Agronomie* numéro 1 – 2011.
- 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.
- Moacir Tuzzin De Moraes; Henrique Debiassi ; Reimar Carlesso ; Felipe Luz., 2016. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil, 663 in *Soil and Tillage Research* 155(January):351–362 • January 2016 with 292 Reads DOI: 664 10.1016/j.still.2015.07.015.
- Monnier, et al., 1991.eds. Simplification du travail du sol, INRA (Les Colloques n°65) ed, Paris, 16 mai 1991.
- Monnier, G. 1994a. Introduction à la simplification du travail du sol, p. 5-9, In G.
- Monnier, G. 1994b. Assemblage et organisation physique des particules. In M. Bonneau & B. Souchier, eds *Pédologie*. 2. Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, France, p. 5-6.
- Moraes, M.T., Debiassi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., Rodrigues da Silva, V. & Bonini da Luz, F. 2016. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil & Tillage Research* 155 (2016) 351–362.
- Moraru, P.L., Rusu, T. 2012. Effect of tillage systems on soil moisture, soil temperature, soil respiration and production of wheat, maize and soybean crops. *J. Food Agric. Environ.* 10, 445-448.
- Mrabet R. 1993. Revue bibliographique sur les systèmes de labour de conservation de l'eau et leurs effets sur le système sol-plante. *Al Awamia* 80:3-38.
- Mrabet R. 1997. Crop residue management and tillage systems for water conservation in a semiarid area of Morocco. PhD dissertation. Colorado State Univ. Fort Collins, CO. USA. 220 p.

- Mrabet R. et Bouzza A. 2000. Influence of tillage, residue management and cropping systems on wheat production in a turbulent semiarid area of Morocco. International Crop Science Conference, 17-22 Août 2000. Hamburg, Germany.
- Mrabet R. 2000a. Long-term No-tillage influence on soil quality and wheat production in semiarid Morocco. In. Proceedings of 15th ISTRO Conference “ Tillage at the Threshold of the 21st Century: Looking Ahead. Morison, J.E. (ed), Fort Worth, Texas USA July 2-7, 2000.
- Mrabet R. 2000b. Differential response of wheat to tillage management systems in a semiarid area of Morocco. *Field Crops Research*. 66 : 165-174.
- Mrabet R. 2001a. No-tillage Farming: Renewing Harmony Between Soils and Crops in Semiarid Morocco. Third International Conference on Land Degradation (ICLD3) and Meeting of the IUSS Subcommittee C – Soil and Water Conservation. Rio de Janeiro, Brazil, September 17-21, 2001. <http://www.cnps.embrapa.br/icld3>.
- Mrabet R. 2001b. Le Semis Direct: Une technologie avancée pour une Agriculture durable au Maroc. Bulletin de Transfert de Technologie en Agriculture MADREF-DERD. N° 76, 4p. <http://agriculture.ovh.org>.
- Mrabet R. 2001c. No-Tillage System: Research Findings, Needed Developments and Future Challenges for Moroccan Dryland Agriculture. In proceedings of International Congress on Conservation Agriculture. Garcia-Torres et al. (eds). Madrid, Spain. October 1-5, 2001. p:737-741.
- Mrabet, R. 2001e. Le semis direct : Potentiel et limites pour une agriculture durable en Afrique du Nord. Centre de développement sous-régional pour l'Afrique du Nord (CDSR), Nations Unies, Commission Économique pour l'Afrique (CEA/TNG/CDSR/AGR), 32 p.
- Mrabet, R., Saber, N., El-Brahli, A., Lahlou, S., Bessam, F. 2001d. Total Particulate Organic Matter and Structural Stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Soil & Tillage Res.* 57: 225-235.
- Mrabet, R. 2002. Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil & Tillage Res.* 66:119-128.

- Munkholm, L.J., Schjonning, P., Rasmussen, K.J., et K. Tander up. 2003. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. *Soil and Tillage Research* 71:163-173.
- Munkholm, L.J., Heck, R.J., Deen, B., 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil Till. Res.* 127, 85–91.
- Nannipieri P., Grego S., Ceccenti B. 1990. Ecological significance of the biological activity in soil. In Bollag J.M., Stotzky G. (Eds.). *Soil Biochemistry*, Vol 6. Marcel Dekker, New York, USA. p. 293-355.
- Nannipieri P., Ascher J., Ceccherini M.T., Landi L., Pietramellara G., Renella G. 2003. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 54: 655-670.
- Noémie GOUTAL 2012. Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation ; page 24
- Nouira, A., Duchemin, M., Benmansour, M., gallichand, J., Bouksirate, H. 2007. Efficacité du semis direct à contrer l'érosion hydrique en milieu agricole : mise en évidence à l'aide des techniques de radioéléments, de modélisation et de mesures aux champs (Maroc et Canada).
- Needelman B.A., Wander M.M., Bollero G.A., Boast C.W., Sims G.K. et Bullock D.G. 1999. Interaction of tillage and soil texture: Biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Science Society of America Journal* 63:1326.
- Obalum, S.E., Obi, M.E. 2010. Physical properties of a sandy loam Ultisol as affected by tillage-mulch management practices and cropping systems. *Soil and Tillage Research* 108: 678 30-36.
- Parkin, T.B., Doran, J.W. & Franco-Vizcaino, E. 1996. Field and laboratory tests of soil respiration. P. 231-246. In: J.W. Doran and A.J. Jones (eds.) *Methods for assessing soil quality*. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI.
- 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.

- Pereira, J. O., Défossez, P. et Richard, G. 2007. Soil susceptibility to compaction by wheeling as a function of some properties of a silty soil as affected by the tillage system. *European Journal of Soil Science*. 58 : 34-44.
- Pérez-de-Mora A., Burgos P., Madejón E., Cabrera F., Jaekel P., Schlöter M. 2006. Microbial community structure and function in a soil contaminated by heavy metals: effects of growth and different amendments, *Soil Biol. Biochem.* 38, p. 327-341.
- Prosser J.I., 1997. Microbial processes within the soil. In: Dirk van Elsas J., Trevors J.T. & Wellington E.M.H., eds. *Modern soil microbiology*. New York, USA: Marcel Dekker, 183-213.
- Power J.F. & Peterson G.A. 1998. Nitrogen transformations, utilization, and conservation as affected by fallow tillage method. *Soil & Tillage Research*, 49, 37-47
- Quiroga, A. R., Buschiazza, D. E. et Peinemann, N. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil Tillage Res.* 52 : 21-28.
- Randall G.W. et Iragavarapu T.K., 1995. Impact of long term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage. *Environ. Qual.*, 24, 360-366.
- Ranger Jacques., Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation. P37
- Rasmussen, K.J. 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. *Soil & Tillage Research* 53:3-14.
- Raunet, M., 2002. Projet de recherche-développement sur le semis direct avec couverture végétale en Tunisie, pp. 21.
- Remy, J. C. et Mathieu, C. 1972. Sur la technique du sous-solage en sol de limon. *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Sol.* 3 : 145-156.
- Rhoton, F. E. 2000. Influence of Time on Soil Response to No-Till Practices. *Soil Science Society of America*. 10.2136/sssaj2000.642700x.

- Richard, G., Cousin, I., Sillon, J.F., Bruand, A. and Guerif, J., 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal Of Soil Science*.
- Roger-Estrade, J., 1995. Modélisation de l'évolution à long terme de l'état structural des parcelles labourées. Contribution à l'analyse des effets des systèmes de culture, Thèse de l'INA P-G, 185 pages.
- 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., Defossez, 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., Defossez, 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.
- Rücknagel, J., Hofmann, B., Paul, R., Christen, O. et Hülsbergen, K. J. 2007. Estimating precompression stress of structured soils on the basis of aggregate density and dry bulk density. *Soil & Tillage Research*. 92 : 213-220.
- Ryle GJ., Powell CE., Tewson V. 1992. Effect of elevated CO₂ on photosynthesis, respiration and growth of perennial ryegrass. *Journal of Experimental Botany* 43, 811-818.
- Samuel Abiven, . 2004. Relations entre caractéristiques des matières organiques apportées, dynamique de leur décomposition et évolution de la stabilité structurale du sol.
- Schjønning, P., Thomsen, I.K., 2013. Shallow tillage effects on soil properties for Heinemeyer temperate-region hard-setting soils. *Soil Tillage Res.* 132, 12–20.
- Sharpley A. N. et Smith S.J. 1994. Wheat tillage and water quality in the Southern Plains. *Soil & Tillage Research*, 30, 33-48.
- Sharpley A.N. 2003. Soil mixing to decrease surface stratification of phosphorus in manured soils. *Journal of Environmental Quality* 32: 1375-1384.

- Shibu ME, Leffelaar PA, Van Keulen H, Aggarwal PK. (2006) Quantitative description of soil organic matter dynamics – A review of approaches with reference to rice-based cropping systems. *Geoderma*, 137: 1-18.
- Six J., Feller C., Denef K., Ogle S.M., Sa J.C.M. et Albrecht A. 2002. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. *Agronomie*, 22, 755-775.
- Souici S. 2010. Effets des différents traitements culturaux sur les propriétés physiques d'un sol limono-argileux cultivé en blé dur, Thèse de Magister, INA El-Harrach, 12p.
- Schapendonk AHCM., Dijkstra P., Groenwold J., Pot CS., Van de Geijn SC. 1997. Carbon balance and water use efficiency of frequently cut *Lolium perenne* swards at elevated carbon dioxide. *Global Change Biology* 3, 207–216.
- Scheiner J.D. 2005. Spéciation du carbone, de l'azote et du phosphore de différents boues de stations d'épuration au cours de leurs incubations contrôlées dans deux types de sol, Thèse de doctorat, 20-24p.
- Schlöter M., Dilly O., Munch JC. 2003. Indicators for evaluating soil quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* 98, p. 255-262.
- Schoenholtz, S.H., Van M, H. Burger, J.A. 2000- A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. - *Forest Ecology and Management*, 2000, 138, 335-356.
- Shi W., Huaiying Y., Bowman D. 2006. Soil microbial biomass, activity and nitrogen transformations in a turfgrass chronosequence. *Soil Biol. Biochem.* 38, p. 311-319.
- Smith, C. W., Johnston, M. A. et Lorentz, S. 1997. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. *Soil & Tillage Research*. 43 : 335-354.
- Smith LJ., Paul EA. 1990. The significance of soil biomass estimations. In Bollag J.M., Stotzky G. (Eds.). *Soil Biochemistry*. Vol. 6. Marcel Dekker, New York, p. 357-396.
- Soane, B. D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil & Tillage Research*. 16 : 179-201.

- Soltner,D.,2000. Les bases de la production végétale. Tome – le sol et son amélioration. Science et Techniques Agricoles, 472p.
- 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.
- Spiess E., Walter Richner., Agroscope FAL Reckenholzstr. 2005. CH-8046 Zurich les cahier de la FAL (57)
- Stoddard C.S., Grove J.H, Coyne M.S. et Thom W.O. 2005. Fertilizer, tillage, and dairy manure contributions to nitrate and herbicide leaching. *Environ. Qual.*, 34, 1354-1362.
- Sturny Weisskopf., B, W.G., Zihlmann, P. 2007. Semis direct de l'essai à la pratique Expériences acquises dans un système de semis direct en continu .p4.
- Tangyuan, N., Bin H., Nianyuan, J., Shenzhong, T., Zengjia, L. 2009. Effects of conservation tillage on soil porosity in maize-wheat cropping system *Plant Soil Environ.* 55 (8):327–333.
- 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.
- Teixeira Danie, De Bortoli, Elton da Silva Bicalho, Alan Rodrigo Panosso, Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Gener Tadeu Pereira, Newton La Scala Júnior.; 2013. Spatial variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area characterized by secondary information. *Scientia Agricola*.
- Tobias, S. Schulin, R. Schaub, D. Weisskopf, P. Buchter, B. Zimmermann, S. Borer, F. Vökt, U., 1999, PROTECTION DES SOLS CONTRE LES ATTEINTES PHYSIQUES stratégie pour la mise en œuvre des nouvelles prescriptions formulées dans la Loi sur la protection de l'environnement (LPE) et l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol).
- Vance, ED; PC Brookes & DS Jenkinson. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass. *Soil Biol Biochem.* 19: 703-707.
- Vian, J.F., Peigné, J., Chaussod R. & Roger-Estrade, J. 2009. Effets du mode de travail du sol sur les microorganismes à l'échelle du profil cultural. *Étude et Gestion des Sols* 16, 3/4, 355-364.

- Vian, J.F, 2010, 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. page 28.
- Viaux. Ph 1999: Une 3e voie en grande culture: environnement, qualité, rentabilité.
- Vogeler, I., Horn, R., Wetzal, H., et J. Krümmelbein. 2006. Tillage effects on soil strength and solute transport. *Soil and Tillage Research* 88:193-204.
- Wardle, D.A., Ghani, A. 1995. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO_2) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. *Soil Biology & Biochemistry* 27, 1601–1610.
- Wang WJ., Dalal RC., Moody PW., Smith CJ. 2003. Relationships of respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content. *Soil Biol. Biochem.* 35, p. 273 284.
- Weisskopf, P., Reiser, R., Rek, J. & Oberholzer, H.-R. 2010. Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. *Soil & Tillage Research* 111, 65–74.
- Weisskopf, P., Oberholzer, H.-R., Rek, J & Keller, K. 2013. Evolution of Structural Properties of an Arable Soil After Compaction Under Different Regeneration Pathways. CATENA VERLAG, 35447 Reiskirchen, Germany.
- 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.
- Yang, X., Drury, C., Reynolds, W. & Tan, C. 2008. Impacts of long-term and recently imposed tillage practices on the vertical distribution of soil organic carbon. *Soil Tillage Res.* 712 100: 120124.

- Yang, Y. H., Fang, J. Y., Tang, Y. H., Ji, C. J., Zheng, C. Y., He, J. S., and Zhu, B.: Storage, 30 patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands, *Glob. Change Biol.*, 14, 1592–1599, 2008.
- Zainin G., Otto S., Riello L., Borin M.1997. Ecological interpretation off weed flora dynamics under different tillage systems, *Agriculture, ecosystems & environment* 66, 177-188.
- Zaghouane, O., Abdellaoui, Z., Houassine, D. 2006. Quelles perspectives pour l'agriculture de conservation dans les zones céréalières en conditions algériennes. *Options Méditerranéennes : Série A. n. 69* p. 183-187.
- Zenati, N., Messadi, D., 2010 System of assessment of the superficial water quality- application to the basin pouring coasting Constantinois East.
- Zhu Y., Fox R.H. & Toth J.D. 2003. Tillage effects on nitrate leaching measured by Pan and Wick Lysimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 1517-1523.
- Zihlmann U., Chervet A., Müller M., Schafflützel R., Sturny W.G. et Weisskopf P., 2001. Semis direct en grandes cultures. Effets sur la matière organique et les nutriments dans le sol. *Revue suisse Agric.* 33 (1), 21-25.
- Zuber S.M., Villamil M.B. 2016. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities. *Soil Biology & Biochemistry* 97, 176-187.