



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

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat En Sciences Agronomique

Spécialité : Sciences du sol

Présentée Par :

Abdelouahab BELHADJ

THEME

**ETUDE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DES SOLS EN
CONTEXTE DU SEMIS DIRECT. EFFET DE LA STRUCTURE
DU SOL ET DE LA MATIERE ORGANIQUE SUR LES
PROPRIETES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU
SOL**

Soutenu Publiquement le 30 /01/2024

Devant le jury:

<i>Président du jury :</i>	MEFTI M.	Professeur	ENSA
<i>Directeur de thèse :</i>	TOUMI M.	Professeur	U- Alger 1
<i>Co-directeur de thèse :</i>	MEKCLICHE A.	Professeur	ENSA
<i>Examineurs :</i>	BAHA M.	Professeur	ENS-Kouba
	HADJ MILOUD S.	Maitre de conférences (A)	ENSA
	OUELD REBAI A.	Maitre de conférences (A)	CU-Tipaza
<i>Invité :</i>	ZITOUNI A.	Professeur	ENS-Kouba

Année universitaire : 2023-2024

DÉDICACES

A mes parents à qui, je dois tous.

A ma femme.

A mon fils Ibrahim.

A mes frères et sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A mes collègues de l'ENS- Kouba

A tous ceux qui m'ont aidé à élaborer ce travail.

Je dédie ce modeste travail.

ABDELOUAHAB

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu **Allah** le tout puissant de m'avoir accordé la force et le courage pour mener à terme ce travail.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à mes directeurs de thèses Pr. TOUMI Mohamed et Pr. MEKLIICHE Arezki pour leurs suivi et pour tous les efforts qu'ils ont déployé pour la concrétisation de cette thèse.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury :

Pr. MEFTI Mohamed qui a accepté de présider le jury,

Pr. BAHA Monia, Dr. HADJ MILOUD Samir et Dr. OULD REBAI Abdelkrim qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements au Pr. ZITOUNI Abdelghani, mon chef d'équipe de recherche (Laboratoire de Biologie des Systèmes Microbiens, l'ENS-Kouba) pour ses conseils.

Je remercie les responsables et les ingénieurs de l'ITGC (Sétif et Oued smar), l'INSID (laboratoire des analyses du sol), l'INRAA (laboratoire des analyses du sol), ENSA (Département de sciences du sol) et ENS- Kouba (laboratoire de pédologie) pour leurs collaborations dans la réalisation de ce travail.

Que tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude et reconnaissance.

ABSTRACT : This work concerns the study of the change in the morphological and analytical properties soil in the context no tillage. Three (3) sites were studied. At the first site, a one-factor random block experimental device was installed (03 years). At the first site, a one-factor random experimental device was installed (3 years). The second and the third relate to plots conducted in no tillage for six and nine years. The results obtained showed that after three years of adoption no tillage, an improvement, mainly, the structure (67 %), particulate organic matter (40 %), stability of aggregates (39 %) and the total organic matter (38 %) at soil surface. On the other hand, this adoption generates constraints at soil sub surface. The principal component analysis reduced the number of variables (18 soil properties) to 12 variables which contributed to the formation of three main axes retained. It appears that the microporosity, water retention a pF4.2, associated organic matter, C/N ratio, pH and electrical conductivity are no longer sensitive (stable) to changes in tillage system. On the other hand, particulate organic matter is more sensitive and can contribute directly and indirectly to changes in other soil properties. In conclusion, the adoption of no tillage for nine years has proven to be a very effective cropping system for improving and conserving fragile soils in Algeria. It deserves to be adopted in rainfed cereal growing.

Key Words: No-tillage, Soil structure, Particulate organic matter, Principal component analysis

ملخص :

تمت هذه الدراسة على ثلاث مواقع تجريبية. الموقع الأول عبارة عن نموذج تجريبي عشوائي لعامل واحد تم تركيبه مؤخرًا (3 سنوات). يتعلق الثاني والثالث بقطع الأرضية التي أجريت فيها البذر المباشر لمدة 6 و 9 سنوات.

أظهرت النتائج المتحصل عليها أنه بعد 3 سنوات من اعتماد البذر المباشر ، تحسن البناء (67٪) والجسيمات العضوية الحرة (40٪) ثباتية التربة (39٪) المادة العضوية الكلية (38٪) و هذا على سطح التربة. أما في عمق التربة فهذا التبنّي يولد قيودًا في التربة.

أدى تحليل المكون الرئيسي إلى تقليل عدد المتغيرات من 18 خاصة للتربة إلى 12 متغيرًا مما ساهم في تكوين 03 محاور رئيسية لمختلف المتغيرات . يبدو أن المسامية الدقيقة ، وكمية الماء عند pF4.2 ، والمواد العضوية المرتبطة ، ومعامل C / N ، ودرجة الحموضة والناقلية الكهربائية غير حساسة (مستقرة) للتغيرات في نظام الحرث. تعتبر الجسيمات العضوية الحرة أكثر حساسية ويمكن أن تساهم بشكل مباشر وغير مباشر في التغيرات في خصائص التربة الأخرى. في الختام ، أثبت اعتماد البذر المباشر لمدة 9 سنوات أنه نظام فعال للغاية لتحسين وحفظ التربة الهشة في الجزائر. فهو يستحق أن يعتمد في زراعة الحبوب البعلية.

كلمات مفتاحية : البذر المباشر ، بناء التربة ، المادة العضوية الحرة، التحليل المكون الرئيسي.

RESUME : Ce travail concerne l'étude du changement des propriétés morphologiques et analytiques du sol en contexte du semis direct. Trois sites ont été étudiés. Le premier site est un dispositif expérimental en blocs aléatoires complets (3 blocs) à un facteur étudié (3 ans). Le second et le troisième concernent des parcelles conduites en semis direct pendant 6 et 9 ans. Les résultats obtenus ont montrés que, l'adoption du semis direct durant 3 ans peut améliorer la structure (67 %), la matière organique particulaire (40 %), la stabilité des agrégats (39 %) et la matière organique totale (38 %) à la surface du sol. Par contre, dans l'horizon de subsurface, ce système engendre des contraintes dans les propriétés du sol. L'analyse en composantes principales a réduit le nombre de variables (18 propriétés du sol) à 12 variables qui ont contribués à la formation de 3 axes principaux retenus. Il ressort que, la microporosité, la rétention en eau au pF4.2, la matière organique liée, le rapport C/N, le pH et la conductivité électrique ne sont pas sensibles (stables) dans les différentes durées de systèmes de travail du sol. Par contre, la matière organique particulaire est plus sensible et peut contribuer directement et indirectement à la modification des propriétés morphologiques et analytiques du sol. En conclusion, l'adoption du semis direct pendant 9 ans s'est avéré un système cultural efficace pour améliorer et conserver les sols fragiles en Algérie. Il mérite d'être adopté dans la céréaliculture pluviale.

Mots clés : semis direct, structure visuelle, matière organique particulaire, analyse en composantes principales.

TABLE DES MATIÈRES

DEDICACE

REMERCIEMENTS

ABSTRACT

ملخص

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES ET PHOTO

LISTE DES ABRÉVIATIONS

LISTE DES ANNEXES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
I.1. SYSTÈMES DE TRAVAIL DU SOL.....	4
I.1.1. Système conventionnel de travail du sol	6
I.1.2. Systèmes sans travail du sol	6
I.1.3. Semis direct dans le monde	7
I.1.4. Semis direct en Algérie	8
I.2. CHANGEMENT DE LA QUALITÉ DU SOL EN CONTEXTE DU SEMIS DIRECT	9
I.2.1. Matière organique.....	9
I.2.2. Structure du sol.....	10
I.2.3. Stabilité des agrégats	12
I.2.4. Densité apparente et résistance à la pénétration	12
I.2.5. Distribution de la taille des pores	14
I.2.6. Rétention en eau	14
I.2.7. Perméabilité.....	15
I.2.8. Organismes du sol	16
I.2.9. pH du sol	17
I.2.10. Capacité d'échange cationique	17
I.3. CONCEPT ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DU SOL.....	17
I.3.1. Concept.....	17
I.3.2. Indicateurs de la qualité du sol	19

I.3.3. Sélection de jeu de données minimales	20
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES	21
II.1. MILIEU D'ÉTUDE.....	21
II.1.1. Situation géographique	21
II.1.2. Situation climatique	22
II.1.3. Situation géologique	23
II.1.4. Situation géomorphologique	24
II.1.5. Situation pédologique	26
II.1.6. Historique culturel des parcelles	26
II.2. MÉTHODES	28
II.2.1. Échantillonnage.....	28
II.2. 2. Structure morphologique.....	29
II.2.3. Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol	30
II.3. TRAITEMENT DES DONNÉES	32
CHAPITRE III : CARACTERISATION PHYSICOCHIMIQUE DE L'HORIZON TRAVAILLE 33	
III.1.SITE A	33
III.2. SITE B	35
III.3. SITE C	38
Discussion et conclusion.....	39
CHAPITRE IV : CHANGEMENT DE LA QUALITE STRUCTURALE ET DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE.....	41
IV.1. STRUCTURE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DU SOL.....	41
IV.1.1. Structure morphologique du sol	41
IV.1.1.1.Contexte général.....	42
IV.1.1.2.Contexte du semis direct	45
IV.1.2. Densité apparente	47
IV.1.2.1. Contexte général.....	47
IV.1.2.2.Contexte du semis direct	49
IV.1.3. Résistance à la pénétration racinaire	50
IV.1.1.3.1.Contexte général.....	50
IV.1.1.3.2.Contexte du semis direct	52
IV.1.4. Stabilité des agrégats	53
IV.1.4.1.Contexte général.....	53

IV.1.5.2.Contexte du semis direct	55
IV.1.5. Rétention en eau	56
IV.1.5.1.Contexte général	56
IV.1.5.2.Contexte du semis direct	58
IV.1.6. Distribution porale.....	60
IV.1.6.1.Contexte général	60
IV.1.6.2.Contexte du semis direct	62
Discussion	63
IV.2. DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE	64
IV.2.1. Composantes organiques	64
IV.2.1.1.Contexte général.....	65
IV.2.1.2.Contexte du semis direct	68
IV.2.2. Minéralisation de la matière organique	73
IV.2.2.1.Contexte général.....	73
IV.2.2.2.Contexte du semis direct	75
IV.2.3. Abondance des microorganismes et vers de terre	79
IV.2.3.1.Contexte général.....	79
IV.2.3.2.Contexte du semis direct	81
Discussion.....	84
Conclusion	85
CHAPITRE V : EFFET DE LA STRUCTURE DU SOL ET LA MATIERE ORGANIQUE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUE DU SOL.....	86
V.1. CORRELATION MULTIVARIABLE.....	86
V.2. CORRELATION BIVARIABLE	92
Discussion	94
DISCUSSION GÉNÉRALE	95
CONCLUSION	99
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	101
ANNEXES	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Quelques opérations de travail du sol (Labreuche <i>et al.</i> , 2007).....	5
Tableau I.2 : Changement de la densité apparente sous différents types de sol, climats, cultures et durée de l'adoption du semis direct	13
Tableau II.1 : Pluviométries et températures enregistrées pendant la campagne 2017/2018 et la période 2000/2016	23
Tableau III.1 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des propriétés physicochimiques de l'horizon travaillé dans le site A.....	34
Tableau III.2 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des propriétés physicochimiques de l'horizon travaillé dans le site B	36
Tableau III.3 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des propriétés physicochimiques de l'horizon travaillé dans le site C	39
Tableau IV.1 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la structure du sol (score) selon la profondeur dans le site A.....	43
Tableau IV.2 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la structure du sol (score) selon la profondeur dans les sites B et C	45
Tableau IV.3 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la densité apparente (g/cm^3) selon la profondeur dans le site A.....	48
Tableau IV.4 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la densité apparente (g/cm^3) selon la profondeur dans les sites B et C	48
Tableau IV.5 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la résistance à la pénétration racinaire (Mpa) selon la profondeur dans le site A.....	51
Tableau IV.6 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la résistance à la pénétration racinaire (Mpa) selon la profondeur dans les sites B et C	51
Tableau IV.7 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la stabilité des agrégats (mm) selon la profondeur dans le site A.....	54
Tableau IV.8 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la stabilité des agrégats (mm) selon la profondeur dans les sites B et C	54
Tableau IV.9 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la rétention en eau (%) aux pF _{2,7} et pF _{4,2} selon la profondeur dans le site A	57
Tableau IV.10 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la teneur en eau aux pF _{2,7} et pF _{4,2} selon la profondeur dans les sites B et C	58
Tableau IV.11 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la macroporosité (%) et microporosité (%) selon la profondeur dans le site A.....	61
Tableau IV.12 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la macroporosité (%) et microporosité (%) selon la profondeur dans les sites B et C	62
Tableau IV.13 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des composantes organiques selon la profondeur dans le site A.....	66

Tableau IV.14 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des composants organiques selon la profondeur dans les sites B et C	67
Tableau IV.15 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de l'azote total (%) et le rapport de minéralisation selon la profondeur dans le site A.....	74
Le tableau IV.16 résume le classement des moyennes de NT et C/N entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur de mesure dans les sites B et C.....	74
Tableau IV.16 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de l'azote total (%) et le rapport de minéralisation selon la profondeur dans les sites B et C	75
Tableau IV.17 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de l'abondance des microorganismes (mg/kg) et les vers de terre (individus/m ²) selon la profondeur dans le site A.....	79
Tableau IV.18 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de l'abondance des microorganismes (mg/kg) et les vers de terre (individus/m ²) selon la profondeur dans les sites B et C	81
Tableau V.1 : Meilleures composantes principales (Dim1, Dim2 et Dim3)	86
Tableau V.2 : Corrélations et contribution des propriétés du sol sur les composants principaux (Dim1, Dim2 et Dim3) à $p < 0,05$	87
Tableau V.3 : Coordonnée et contribution des individus du sol sur les composantes principales (Dim1, Dim2 et Dim3) à $p < 0,05$	89
Tableau V.4 : Corrélation entre les propriétés du sol et les classes des individus du sol.....	92
Tableau V.5 : Corrélations simple entre les propriétés morphologiques et analytiques.....	93
à $p < 0,05$	93

LISTE DES FIGURES ET PHOTO

Figure I.1 : Différentes formes de système sans travail du sol (Labreuche <i>et al.</i> , 2007)	7
Figure I.2 : Superficie de l'application du semis direct par pays (Kassam <i>et al.</i> 2015).....	8
Figure I.3 : Relation entre les fonctions et les propriétés du sol (Karlen <i>et al.</i> , 1997).....	18
Figure II.1 : Localisation du site A (extrait de l'image Google Earth 2023).....	21
Figure II.2 : Localisation des sites B et C (extrait de l'image Google Earth 2023)	22
Figure II.4 : Carte géologique et structurale de la région de Sétif (1/200 000) (Djenba, 2015).24	
Figure II.5 : Profil de dénivelée dans le site A	25
Figure II.6 : Profil de dénivelée dans le site B	25
Figure II.7 : Profil de dénivelée dans le site C	26
Figure II.8 : Dispositif expérimental dans le site A.....	27
Figure IV.1 : Evolution temporelle de la structure du sol (score) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct.....	46
Figure IV.2 : Evolution temporelle de la structure (score) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	47
Figure IV.3 : Evolution temporelle de la densité apparente (g/cm ³) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct.....	49
Figure IV.4 : Evolution temporelle de la densité apparente (g/cm ³) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	50
Figure IV.5 : Evolution temporelle de la résistance à la pénétration racinaire (Mpa) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct.....	52
Figure IV.6 : Evolution temporelle de la résistance à la pénétration racinaire (Mpa) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	53
Figure IV.7 : Evolution temporelle de la stabilité des agrégats (mm) dans la profondeur 0-10 cm dans le contexte du semis direct	55
Figure IV.8 : Evolution temporelle de la stabilité des agrégats (mm) dans la profondeur 10-20 cm dans le contexte du semis direct	56
Figure IV.9 : Evolution temporelle de la rétention en eau au pF _{2,7} (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct.....	59
Figure IV.10 : Evolution temporelle de la rétention en eau au pF _{2,7} (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	60
Figure IV.11 : Evolution temporelle de la macroporosité (%) à la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct.....	63
Figure IV.12 : Evolution temporelle de la matière organique totale (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct.....	68

Figure IV.13 :Evolution temporelle de la matière organique totale (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct	69
Figure IV.14 :Evolution temporelle de la matière organique particulaire (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct.....	70
Figure IV.15 : Evolution temporelle de la matière organique particulaire (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	71
Figure IV.16 : Evolution temporelle de la matière organique liée (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct.....	72
Figure IV.17 : Evolution temporelle de la matière organique liée (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	73
Figure IV.18 : Evolution temporelle de l'azote total (%) dans la profondeur 0-10 cm dans le contexte du semis direct.....	76
Figure IV.19 : Evolution temporelle de l'azote total (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	77
Figure IV.20 : Evolution temporelle du rapport C/N dans la profondeur 0-10 cm dans le contexte du semis direct.....	78
Figure IV.21 : Evolution temporelle du rapport C/N dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	78
Figure IV.22 : Evolution temporelle de l'abondance des microorganismes (mg/kg) dans la profondeur 0-10 cm dans le contexte du semis direct	82
Figure IV.23 : Evolution temporelle de l'abondance des microorganismes (mg/kg) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	82
Figure IV.24 : Evolution temporelle de l'abondance des vers de terre (individus/ m ²) dans la profondeur 0-10 cm dans le contexte du semis direct	83
Figure IV.25 : Evolution temporelle de l'abondance des vers de terre (individus/ m ²) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct.....	84
Figure V.1 : Représentation graphique de la corrélation des propriétés du sol sur les plans factoriels A : (Dim1, Dim2) et B : (Dim1, Dim3).....	88
Figure V.2 : Représentation graphique des individus du sol sur les plans factoriels A : (Dim1, Dim2) et B : (Dim1, Dim2)	90
Figure V.3 : Classification hiérarchiques des individus du sol	91
Photo IV.1 : Organisation structurale entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur dans le site A.....	42
Photo IV.2 : Organisation structurale entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur dans les sites B et C.....	44

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACP: analyse en composantes principales

SA : stabilité des agrégats

CE : conductivité électrique

CEC : capacité d'échange cationique

Da : densité apparente

H1: profondeur du sol de 0 à 10 cm

H2: profondeur du sol de 10 à 20 cm

ITGC: Institut Technique des Grandes Cultures

BM: biomasse microbienne

MOP: matière organique particulaire

MOT: matière organique totale

MOL : matière organique liée

MP : macroporosité

mP : microporosité

pF 2,7 : capacité de rétention.

pF 4,2 : point de flétrissement permanent.

SD3 : semis direct pendant 3 années

SD6 : semis direct pendant 6 années

SD9 : semis direct pendant 9 années

SS : structure du sol

TC : travail du sol conventionnel

TCJ : rotation entre travail du sol conventionnel et jachère

TM : travail du sol minimum

VT : vers de terre

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Résultats de la caractérisation physicochimique de l'horizon travaillé dans le site A (9 échantillons)	106
Annexe 2 : Résultats de la caractérisation physicochimique de l'horizon travaillé dans le site B (18 échantillons)	106
Annexe 3 : Résultats de la caractérisation physicochimique de l'horizon travaillé dans le site C, parcelle SD6, (9 échantillons).....	107
Annexe 4 : Résultats des analyses de la qualité structurale et la dynamique de la matière organique selon la profondeur du sol dans le site A (18 échantillons).....	107
Annexe 5 : Résultats des analyses de la qualité structurale et la dynamique de la matière organique selon la profondeur du sol dans le site B (12 échantillons)	108
Annexe 6 : Résultats d'analyses de la qualité structurale et la dynamique de la matière organique selon la profondeur du sol dans le site C (6 échantillons)	108

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La dégradation du sol par des systèmes culturaux entraîne, non seulement, une diminution de la productivité agricole du sol, mais également, une dégradation de la qualité de l'eau, de l'air ainsi que de la santé humaine (Bünemann *et al.*, 2018 ; Guo, 2021).

Le travail du sol conventionnel (TC) a pour objectif de créer un milieu favorable au développement des racines. Ce système consiste en un retournement total de l'horizon travaillé du sol. Il permet d'incorporer les résidus de récolte et les apports organiques, d'emmagasinier des eaux pluviales, de détruire les adventices. En conséquence, ce système de travail du sol provoque le tassement du sol, la minéralisation rapide de la matière organique, la diminution de la perméabilité et favorise, ainsi, l'érosion hydrique et éolienne des sols cultivés (Kribaa *et al.*, 2001 ; Labreuche *et al.*, 2007 ; FAO, 2018).

Le semis direct (SD) ou le système non-travail du sol est considéré comme un système alternatif au système TC. Il consiste en un semis sur des résidus de récoltes des cultures précédentes sans travail du sol. Ce système offre une augmentation du stockage de la matière organique dans le sol, une bonne activité biologique, une bonne organisation structurale et en conséquence, une meilleure préservation du sol contre le phénomène de l'érosion (FAO, 2018).

L'adoption du SD comme système alternatif au TC entraîne des changements progressifs dans les propriétés morphologiques et analytiques du sol avant d'atteindre un nouvel équilibre selon la texture du sol, la profondeur de mesure et la durée de l'adoption (Vian *et al.*, 2009 ; Boizard *et al.*, 2017). D'après Jemai *et al.* (2013) ; Plaza-Bonilla *et al.*, (2013) ; Belhadj (2014) ; Celik *et al.*, (2020), les premières années de l'adoption du SD, dans les sols à texture fine, le SD engendre un bon stockage de la matière organique dans l'horizon de surface et une mauvaise structure (compacte) dans l'horizon de subsurface.

L'étude du changement des propriétés du sol peut contribuer à l'évaluation de la qualité du sol et en conséquence, il pourrait soutenir la prise de décision concernant l'adoption de système du SD comme système cultural productif et durable (Bünemann *et al.*, 2018 ; Sokolowski *et al.*, 2020).

L'évaluation de la qualité des sols exige une sélection des propriétés analytiques et morphologiques pertinents (Bünemann *et al.*, 2018 ; Guo, 2021). Les propriétés du sol qui sont en relation avec les différentes fonctions du sol : la compaction, la séquestration de la matière organique, la stabilité structurale et la biodiversité, ont été sélectionnées comme des indicateurs de la qualité du sol.

La plupart des études de l'adoption du SD se concentrent, beaucoup plus, sur le changement de la structure du sol et la matière organique totale (Sokolowski *et al.*, 2020).

La structure du sol est une propriété, habituellement, mesurée indirectement par d'autres propriétés physiques du sol tels que la densité apparente, la stabilité structurale, la macroporosité, la résistance à la pénétration racinaire. Actuellement, cette propriété est considérée comme indicatrice très importante de l'évaluation de la qualité, en raison de sa simplicité de mesurer sur le terrain (description morphologique), sa fiabilité et son faible coût (Guimarães *et al.*, 2011 ; Boizard *et al.*, 2017 ; Celik *et al.*, 2020).

La matière organique totale a été évaluée dans les différentes études de l'adoption du SD, en raison de sa contribution dans la plupart des fonctions du sol. Ainsi, ses composantes organiques, notamment la composante particulaire et microbienne, sont généralement plus sensibles aux perturbations des sols du fait de leurs contributions à l'amélioration de la structuration du sol, la séquestration de la matière organique, la rétention en eau et la fourniture d'un habitat aux micro-organismes dans le sol (Guo, 2021 ; Bongiorno *et al.*, 2019).

La sélection d'un jeu minimal des données (propriétés) est très importante dans l'évaluation de la qualité du sol. Elle a pour objectif de minimiser la complexité des données et de réduire le coût de l'évaluation. Cette méthode est basée sur la réduction du nombre de propriétés du sol par des analyses multivariées, notamment, l'analyse en composant principal (ACP) (Bunemann *et al.* 2018). Elle peut contribuer, aussi, à la reconnaissance, la classification et la modélisation du changement spatio-temporelle de la qualité du sol (Sokolowski *et al.*, 2020).

En Algérie, après plusieurs années, 20 ans, de l'adoption du SD, la plupart des études se concentrent sur le rendement, la rétention en eau, la densité apparente, la stabilité structurale, la matière organique totale dans des dispositifs expérimentaux à court terme (3 ans). Alors que, très peu d'études traitant, non seulement, du changement des propriétés du sol à long terme (> 3 ans) et la morphologie structurale du sol sont entreprises.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer le changement des propriétés morphologiques et analytiques du sol, après 3, 6 et 9 ans de l'adoption du SD, ainsi que, la contribution de la structure et la matière organique au changement des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

Pour répondre à cet objectif, plusieurs parcelles situées dans 3 sites, ont été sélectionnées selon la durée de l'adoption du SD.

Le premier site est retenu comme référence dans lequel l'essai est conduit selon un dispositif expérimental en 3 blocs aléatoire à un facteur récemment installé (3 ans). Le second site est constitué par des parcelles conduites en SD pendant 9 ans. Le dernier site concerne une parcelle soumise au SD pendant 6 années.

Les résultats obtenus sur les deux derniers sites doivent permettre d'infirmier ou de confirmer les observations émises sur le premier site.

Ce document est présenté en cinq chapitres.

Le premier chapitre aborde une revue bibliographique permettant d'identifier les différents systèmes de travail du sol, le changement de la qualité du sol en contexte du semis direct et l'évaluation de la qualité du sol.

Le deuxième chapitre présente les caractéristiques du milieu d'étude, la méthodologie adoptée et les traitements des données.

Le troisième chapitre est une caractérisation spatiale de l'horizon travaillé du sol (< 20 cm) de différents sites étudiés.

Le quatrième chapitre porte sur le changement de la qualité structurale (morphologique et analytique) et la dynamique de la matière organique (matière organique, les composantes organiques et les organismes du sol) en contexte générale (entre les systèmes de travail du sol) et en contexte du SD (entre les durées de l'adoption).

Le cinquième chapitre consiste à évaluer l'effet de la structure morphologique du sol et la matière organique totale sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol en contexte du SD.

Ce document se termine par une conclusion dans laquelle les principaux résultats obtenus et les perspectives de cette étude sont présentés.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre traite trois points principaux :

- Le premier point est consacré à la présentation des systèmes de travail du sol, le système conventionnel et sans travail du sol ainsi que l'adoption de semis direct en agriculture dans le monde et en Algérie.

- Le second se concentre sur l'étude du changement des indicateurs de la qualité du sol induit par les différents systèmes de travail du sol.

- Le troisième point est une présentation le concept et les indicateurs de la qualité du sol.

I.1. SYSTÈMES DE TRAVAIL DU SOL

Le travail du sol est l'un des principales techniques culturales responsables du bon développement des cultures et garantissant, en grande partie, le meilleur rendement. Il permet de réorganiser la structure du sol pour accueillir une nouvelle culture dans les meilleures conditions agronomiques (FAO, 2018).

Dans une étude de terminologie relative à la définition du concept « technique de travail du sol », Labreuche et *al.* (2007) donnent deux définitions qui s'identifient à deux écoles, une école française et une autre américaine.

L'école française identifie la « technique de travail du sol » par ses opérations de travail du sol et par les itinéraires techniques. Selon les opérations de travail du sol, les principaux critères de différenciation entre les techniques de travail du sol sont la profondeur de travail, l'existence ou non d'un retournement de la surface et le degré de mélange des horizons (Tableau I.1).

Selon l'itinéraire de travail du sol, les techniques de travail du sol sont s'identifiées par l'opération de travail du sol la plus profonde et même par l'objectif de l'itinéraire technique. Contrairement à l'école française, l'école américaine définit globalement la « technique de travail du sol » en fonction du taux de couverture du sol par les résidus de cultures.

Tableau I.1 : Quelques opérations de travail du sol (Labreuche *et al.*, 2007)

Opérations	Outils	Profondeurs (cm)	Enfouissement des résidus de récolte	Couverture du sol
Labour profond	Charrues à versoirs	35 à 45	Retournement et mélange	Incorporation totale
Labour Superficiel	Charrues déchaumeuses à versoirs	15	Retournement et mélange	Incorporation totale
Pseudo labour	Charrues à disques, Chisels, Décompacteurs,	15 à 40	Mélange	Forte incorporation
Décompactage	Décompacteurs	15 à 40	/	Aucune incorporation
Travail Superficiel	/	0 à 15	Mélange	Incorporation faible à moyenne
Déchaumage	Déchaumeurs (disques, dents), Chisels	0-8 cm 8-15 cm	Mélange	Incorporation faible à moyenne
Reprise de labour	Pulvérisateurs à disques, Chisels,	0-8 cm 8-15 cm	Mélange	Incorporation faible à moyenne
Préparation du lit de semence	Pulvérisateurs à disques, Cultivateurs légers, Vibroculteurs, Outils animés	0-8 cm 8-15 cm	Mélange	Incorporation faible à moyenne

I.1.1. Système conventionnel de travail du sol

Il est appelé parfois «travail du sol classique». Cette technique est caractérisée par une opération du labour profond avec retournement du sol à l'aide d'une charrue à versoirs, suivi par les diverses opérations de la préparation du lit de semences (Labreuche *et al.*, 2007 ; FAO, 2018).

Le but de cette technique est l'incorporation des résidus et des apports minéraux ou organiques, l'emmagasinement des eaux pluviales, l'éclatement des mottes d'argile par l'action du gel-dégel, la destruction des adventices, l'augmentation du contact entre la semence et les éléments structuraux, la fragmentation et l'accroissement de la porosité qui favorisent un réchauffement plus rapide au printemps (Labreuche *et al.*, 2007 ; FAO, 2018).

Les inconvénients majeurs de cette technique sont la création d'une semelle de labour, la diminution des taux de matière organique, l'augmentation de la susceptibilité du sol au ruissellement et à l'érosion, des coûts d'opérations élevés et la dégradation de la structure du sol (FAO, 2018 et 2021).

Les Américains dénomment cette technique « No tillage » où le taux de couverture du sol est inférieur à 15 % et la quantité totale de résidus est inférieure à 0,5 t/ha (Labreuche *et al.*, 2007).

I.1.2. Systèmes sans travail du sol

Cette technique est caractérisée par un travail du sol mais sans retournement de la bande du sol. Les différents modes de préparation du sol inclus dans cette technique sont (Figure 1) ;

- le travail superficiel est un travail mécanique en dessous de la zone de semis mais sur une profondeur limitée selon les conditions du milieu (entre 5 et 10 cm).
- le semis direct est une technique qui ne fragmente pas le sol sauf sur la ligne de semis. Il n'y a donc aucune préparation du sol et l'ouvre-sillon se déplace dans un sol intact en coupant lui-même les résidus de culture et le sol. Le succès de cette approche dépend en bonne partie de la capacité du semoir à maintenir une profondeur de semis adéquate malgré les variations des conditions de sol et des quantités de résidus.
- le pseudo-labour travaille le sol sur les 20 premiers centimètres au maximum, c'est-à-dire sur les horizons superficiels et sur l'ensemble de la surface (fragmentation pratiquement égale au labour).
- le décompactage fissure le sol sans mélanger les couches.

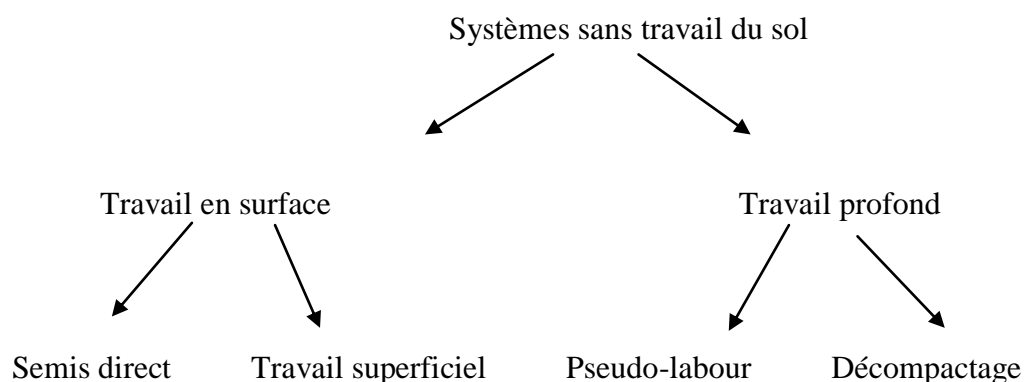


Figure I.1 : Différentes formes de système sans travail du sol (Labreuche *et al.*, 2007)

Les américains regroupent dans cette technique toutes les pratiques de travail du sol qui sont caractérisées, non seulement par le non retournement du sol, mais aussi, par une couverture du sol par les résidus sur, au moins, 30 % de la surface. Si la quantité de résidus du précédent cultural en surface est suffisante pour rester supérieure à 30 % de couverture du sol, le travail du sol superficiel (mulch tillage) peut aussi être inclus dans le travail du sol de conservation. (Labreuche *et al.*, 2007).

I.1.3. Semis direct dans le monde

Le semis direct est la pratique extrême du travail du sol de conservation ou de l'agriculture de conservation du sol. Il consiste à implanter une culture sans travail préalable du sol sur une ouverture dans le sol pour déposer la semence à la profondeur souhaitée. La couverture du sol peut être assurée par les résidus de récoltes précédentes ou par une couverture végétale vivante (cultures intercalaires ou dérobées) (FAO, 2018 et 2021).

Le semis direct est considéré comme une technique culturale pouvant soutenir la production agricole et répondre aux problèmes de qualité des sols et de l'environnement (Kassam *et al.*, 2015). L'adoption du semis direct a augmenté, d'abord lentement, puis de façon exponentielle depuis les années 1960 dans le monde (Kassam *et al.*, 2015).

La figure 2 résume la superficie estimée des terres consacrées à l'agriculture de conservation pour différents pays (Kassam *et al.*, 2015). L'agriculture de conservation comprend principalement les systèmes de semis direct ou sans travail du sol. À l'échelle mondiale, environ 125 millions d'hectares de terres cultivées sont sous gestion de semis direct. Les États-Unis ont la plus grande superficie de terres cultivées en semis direct, suivis de l'Argentine et du Brésil.

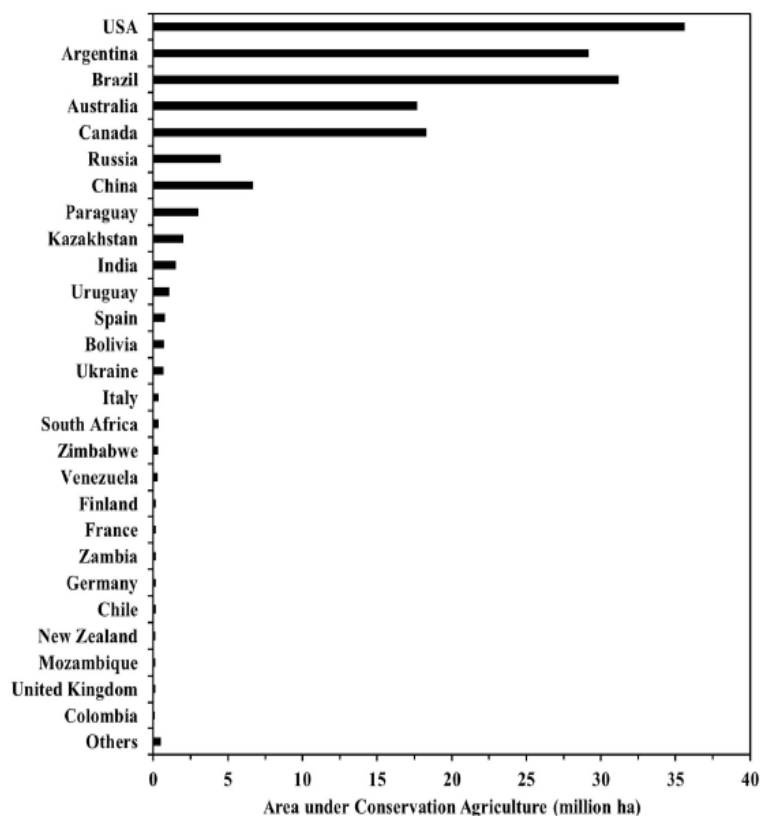


Figure I.2 : Superficie de l’application du semis direct par pays (Kassam *et al.* 2015)

Harvey (2005) montre que la réussite du système de semis direct est mise en évidence après au moins deux ans en sol sableux et cinq ans en sol argileux. La raison principale est l’aération du sol. En travail du sol conventionnel, l’aération se fait mécaniquement par l’action de retournement et fractionnement du sol. Or, en semis direct (sans travail du sol), l’aération se fait biologiquement par l’activité des vers de terre et les racines. Ainsi, le semis direct peut être réussi dans presque tous les types de texture du sol si l’équipement est adapté en conséquence et si les conditions d’humidité du sol sont bonnes. Mais, certains types de sol, en particulier les sols argileux, sont plus difficiles à gérer.

I.1.4. Semis direct en Algérie

Les premières expérimentations relatives à l’adoption du système de SD ont été installées à la fin des années 1990 dans la wilaya de Sétif dont l’objectif principal est d’améliorer le rendement du blé sous climat semi-aride (Fenni *et al.*, 2015 ; Rouabhi *et al.*, 2018).

Ainsi, le bon rendement et la bonne rétention en eau du sol qui ont été obtenus, surtout sous climat semi-aride, permettent de généraliser ce système en céréaliculture pluviale dans les différentes wilayas (Rouabhi *et al.*, 2018) . Cependant, seulement, environ 5 600 ha des terres sont conduits en SD (Kassam *et al.* 2018) et plusieurs céréaliculteurs adoptent ce système dans la mise en culture du blé avec l'accompagnement technique de l'ITGC et la subvention financière de l'état Algérien.

Par ailleurs, l'enquête technique et socio-économique, de Rouabhi *et al.*, (2018), dans les exploitations céréalières de la wilaya de Sétif, montre que, après plusieurs années (> 10 ans), le SD n'a pas encore prouvé son impact direct sur l'amélioration du rendement en céréaliculture. Ce système a été confronté à des contraintes techniques, en particulier, sa maîtrise. Malgré tous ces problèmes, le système du SD a été adopté comme système alternatif au système du TC et la surface conduite en SD enregistre une augmentation à cause de la réduction du temps de travail.

I.2. CHANGEMENT DE LA QUALITÉ DU SOL EN CONTEXTE DU SEMIS DIRECT

Dans le cas des études de l'adoption du système de semis direct, diverses propriétés du sol analytiques (physique, chimique et biologique) ou morphologique (structure du sol) ont été sélectionnées comme des indicatrices de qualité du sol, du point de vue de leurs sensibilités aux différentes menaces des fonctions du sol et de leurs facilités de mesure en laboratoire ou *in situ*.

I.2.1. Matière organique

La matière organique se compose des éléments organiques morts (tiges, feuilles et racines des plantes), d'organismes vivants (bactéries, champignons, faune du sol) et d'humus qui est le produit final stable de la décomposition des éléments organiques sous l'action des organismes du sol. Elle est donc soit libre (particulaire) soit associée aux agrégats du sol (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

La matière organique contrôle, en partie, les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Ainsi, elle joue un rôle très important dans le maintien de la stabilité structurale du sol, la rétention et l'infiltration de l'eau. Elle favorise la diffusion de l'air, elle réduit l'érosion dans le sol et elle limite sa compaction (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

D'autres fonctions environnementales sont attribuées à la matière organique du sol comme le fait de contribuer à la lutte contre l'effet de serre additionnel en permettant le stockage du carbone dans les sols (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

La teneur en matière organique diffère selon le système adopté, SD ou TC, et varie considérablement selon le climat, la texture du sol, la gestion des cultures, la durée de l'adoption et la profondeur de mesure (Blanco-Canqui *et al.*, 2018).

Les travaux de Jemai *et al.* (2013) et Abdellah *et al.* (2021) ont montré, également, que le stock de matière organique est plus élevé en SD. Ces auteurs rapportent que dans certaines situations, l'accumulation de la matière organique en surface s'accompagne de sa diminution en profondeur.

Les travaux Xiao *et al.* (2021) montrent que certaines études rapportent des stockages significativement plus élevés avec le SD qu'avec le TC sur 10 à 30 cm de profondeur. Pour des profondeurs supérieures à 40 cm, le SD ne produit qu'une faible augmentation ou une perte du stockage en matière organique. Ceci peut-être dû aux résidus de culture qui ne sont pas incorporés dans les couches plus profondes du sol en raison de l'absence de travail du sol.

Cai *et al.* (2022) ont conclu que la durée de l'adoption du SD affecte le stockage de la matière organique à la couche de surface et sub-surface. Au cours des premières années d'adoption, le SD augmente la matière organique en surface (0 à 10 cm) par rapport au TC, mais il la réduit dans les couches plus profondes, ce qui entraîne une diminution du stockage dans l'ensemble du profil du sol (0- 60 cm). Ces pertes ont diminué dans le temps et le changement net s'est approché de zéro à 14 ans.

Cependant, Simpson *et al.* (2022) ont critiqué les résultats de Cai *et al.* (2022) et soutiennent le contraire à partir des travaux Nicoloso et Rice, (2021) portant sur le même sujet.

L'évolution temporelle de la matière organique est liée à la stabilité du carbone organique dans le sol. La fraction stable à long terme est principalement constituée de matière organique directement associée aux particules minérales (< 53µm). La fraction instable ou labile ou libre (particulaire) est physiquement liée aux agrégats (>53µm).

I.2.2. Structure du sol

La structure du sol est définie comme l'organisation spatiale des particules et des pores du sol (Warkentin, 2008). Elle est une propriété complexe liée aux caractéristiques inhérentes au sol (la taille des particules élémentaires et la minéralogie) et l'influence anthropique associée à l'utilisation et la gestion du sol (Ball *et al.*, 2007). Cette organisation structurale commande, notamment,

l'aération, la circulation de l'eau, le développement des racines des végétaux (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

La structure du sol constitue l'habitat physique des organismes vivants et régule de nombreuses fonctions physiques, chimiques et biologiques du sol (Guimarães *et al.*, 2017b).

Dans un sol cultivé, la structure évolue en permanence sous l'effet du climat, des organismes, des racines et des actions anthropiques (techniques culturales, passage des engins agricoles, succession des cultures). Ces actions entraînent soit une dégradation de la structure (diminution de la porosité structurale) soit une régénération de la structure (accroissement de la porosité structurale) (Girard *et al.*, 2005).

Les actions conduisant à la dégradation de la structure du sol sont le tassement par les roues des engins agricoles ou la prise en masse sous l'effet du climat, dont la manifestation la plus visible est le phénomène de battance.

Les actions menant à un accroissement de la structure sont la fragmentation par les outils de travail du sol et l'action par le climat (alternances gel/dégel, humectation/dessiccation) ou par les organismes (Girard *et al.*, 2005 ; Roger-Estrade *et al.*, 2011).

La structure est une propriété habituellement mesurée indirectement par d'autres propriétés physiques du sol tel que, la densité apparente, la porosité, la stabilité des agrégats, la rétention en eau, la résistance à la pénétration racinaire et la conductivité hydraulique.

Mais, actuellement, les méthodes morphologique (visuelle ou profil cultural) sont de plus en plus préférées pour examiner directement la structure du sol en raison de sa simplicité, sa fiabilité et du faible coût de la procédure d'évaluation (Boizard *et al.*, 2017 ; Guimarães *et al.*, 2017 ; Celik *et al.*, 2020). Cette méthode d'évaluation fait l'objet de travaux de recherche de Kribaa, (2003), Roger-Estrade *et al.*, (2011), Belhadj (2014), Boizard *et al.*, (2017) et Celik *et al.*, (2020) dans l'adoption du système du SD.

Les travaux de l'adoption du SD par Roger-Estrade *et al.* (2011) et Boizard *et al.* (2017), à court terme, montrent que la répartition verticale de la structure du sol est extrêmement hétérogène dans le sol conduit en TC. Elle se compose de terres fines en surface, de mottes compactées de taille décimétriques et des résidus de cultures en subsurface. Cette répartition est issue de retournement, de fragmentation et le passage répétitif des machines agricoles. Par contre, la structure dans le sol non labouré est moins hétérogène à cause de l'absence de l'enfouissement des résidus de récolte, du déplacement et de la fragmentation du sol.

Çelik *et al.* (2019) ont évalué la structure selon la méthode visuelle et montrent que l'adoption de SD pendant 11 années dans un sol argileux provoque une structure en blocs et angulaire (score > 3). Ceci est dû à la texture lourde du sol. Par ailleurs, les travaux de Giarola *et al.* (2013) relatifs à l'effet de la texture du sol et les systèmes culturaux sur la qualité structurale montrent qu'il n'y a pas de différences significatives.

I.2.3. Stabilité des agrégats

La stabilité des agrégats du sol est une propriété physique du sol qui indique la force de liaison entre les particules élémentaires du sol (argile, limon et sable). Une bonne agrégation signifie que les particules du sol résistent aux forces destructrices tels que l'érosion hydrique ou éolienne et le travail du sol (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

Dans les sols cultivés, la matière organique est très importante pour la stabilité des agrégats. Dans les sols pauvres en matière organique, les agrégats sont plus susceptibles à fragmenter en petits fragments élémentaires du sol lors du mouillage qui provoque l'érosion du sol (Girard *et al.*, 2005).

Cependant, le système du SD augmente la matière organique et en conséquence peut améliorer l'organisation structurale du sol. En conséquence, une étude récente de méta-analyse a montré que la stabilité des agrégats en système SD est supérieure de 31 % à celle des systèmes TC (Blanco-Canqui *et al.*, 2018).

Ces améliorations sont importantes car elles conduisent à des taux plus élevés d'infiltration d'eau dans le sol, offrent une résistance à l'érosion éolienne et hydrique (en combinaison avec la rétention des résidus), améliorent la protection physique de la matière organique et fournissent une plus grande abondance d'habitats pour soutenir l'activité microbienne (Blanco-Moure *et al.*, 2013 ; Blanco-Canqui *et al.*, 2018).

I.2.4. Densité apparente et résistance à la pénétration

La densité apparente est une propriété physique du sol et un indicateur de compactage du sol qui a un effet sur la porosité, la pénétration racinaire et donc sur la production agricole.

Elle est principalement modifiée par la gestion du sol cultivé, l'alternance du cycle humectation/ dessiccation et l'activité biologique (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

Les études traitant la modification de la densité apparente après l'adoption du SD montrent qu'il y a une diversité de résultats obtenus ((Blanco-Canqui *et al.*, 2018).

Les facteurs explicatifs de ces diversités sont la durée de l'adoption de SD, la texture, la culture, la profondeur de mesure et le climat (tableau 2). Cependant, la plupart des changements ne se sont produits que dans la profondeur de 0 à 10 cm.

Le tableau 2 indique que le SD peut augmenter, diminuer ou n'avoir aucun effet sur la densité apparente, ce qui suggère que l'adoption du système du SD peut avoir un effet de compactage du sol quelle que soient la profondeur de mesure et la durée de son adoption.

Tableau I.2 : Changement de la densité apparente sous différents types de sol, climats, cultures et durée de l'adoption du semis direct

Localisation	Climat /culture	Durée (ans)	Texture	Profondeur	Signification (Ecart %)	Référence
Espagne	Semi-aride/ orge	16	Loam (limon)	0-30cm	5	Alvaro-Fuentes <i>et al.</i> , (2008)
Turquie	Semi- aride/ blé	13	Loam (limon)	0-10 cm	8	Gozubuyuk <i>et al.</i> , (2014)
USA	Humide/blé	23	Silty clay loam (limono-argileux)	0-15 cm	Non significatif	Alhameid <i>et al.</i> , (2017)
Espagne	Semi- aride/ blé	23	Loam (limon)	profondeurs 30cm	Non significatif	Pena-Sancho <i>et al.</i> , (2017)

Par exemple, sous une adoption de 2 ans, le SD a augmenté la densité apparente de 20 % à l'horizon de surface et de 17 % à la subsurface par rapport TC (Guan *et al.*, 2014).

En revanche, dans une étude de 23 ans, le SD a un effet similaire et non significatif sur la densité apparente par rapport au TC.

D'après Blanco-Canqui *et al.* (2018), les résultats concernant la résistance à la pénétration racinaire sont similaires à ceux de la densité apparente.

Cependant, lorsque la diminution de la densité apparente et la résistance à la pénétration sont observées, elles sont généralement associées à l'accumulation des résidus de récoltes et à l'augmentation des activités biologiques dans le sol, tandis que leurs augmentations sont généralement attribuées aux tassements du sol par les passages répétés des machines agricoles.

I.2.5. Distribution de la taille des pores

La distribution des pores est une mesure de la proportion de macro-pores, méso-pores et micropores dans le sol et qui indique la capacité du sol à transmettre l'eau et l'air (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

D'après différentes études bibliographiques, les travaux relatifs aux modifications du système porale par les systèmes de travail du sol aboutissent à des résultats contradictoires. Cette contradiction est due aux choix des classes de porosité (macro, méso, micropore) qui ne sont pas similaires d'une étude à l'autre (Blanco-Canqui *et al.*, 2018).

Par exemple, Kay et VandenBygaart (2002) et Bescansa *et al.* (2006) classent la porosité en macro-pores (diamètre supérieur à 30 μm), en méso-pores (diamètre compris entre 0,2 et 30 μm) et en micropores (diamètre inférieur à 0,2 μm). Par contre, Pagliai *et al.* (1995) classent la porosité en macroporosité (>50 μm) et microporosité (< 50 μm).

Cependant, Blanco-Canqui *et al.*, (2018) concluent que, la durée de l'adoption de SD affecte l'ampleur des changements dans la taille des pores. L'adoption du SD pendant une durée inférieure à 5 ans conduit à peu ou pas de changement sur la distribution de la taille des pores, mais une durée supérieure à 20 ans conduit à une augmentation de la macroporosité, suggérant que le SD peut améliorer la macroporosité à long terme.

I.2.6. Rétention en eau

La teneur en eau (θ) et le potentiel hydrique (pF) sont les deux variables qui caractérisent l'eau dans le sol. Ces variables varient simultanément, mais chaque couple de points (θ et pF) dépend du type de sol dans lequel il est mesuré. Cette relation exprime les variations d'intensité des forces de capillarité et d'adsorption en fonction de la teneur en eau (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

La rétention en eau du sol est très importante, en particulier dans les régions où l'eau est limitée. La disponibilité en eau pour les plantes est la différence de teneur en eau entre -33 et -1 500 kPa de potentiel matriciel ; cette disponibilité est importante pour la croissance des plantes et le transport des nutriments (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

Blanco-Canqui *et al.* (2018) montrent que le SD a augmenté la rétention en eau disponible pour les plantes d'environ 44 % par rapport au TC.

Le semis direct a augmenté l'eau disponible pour les plantes d'environ 44 % sur 30 cm de profondeur. L'augmentation de l'eau disponible pour les plantes est principalement attribuée à une

augmentation de la concentration de matière organique dans le sol (Blanco-Canqui *et al.*, 2018 ; Abdellah *et al.*, 2021). Ces derniers auteurs ont conclu que dans les sols à texture fine (argileuse), le semis direct n'a pas augmenté la capacité de rétention en eau malgré l'augmentation de la matière organique par rapport au système de travail conventionnel. Il semble que les sols à texture fine avec une concentration importante en matière organique ne répondent pas rapidement à l'effet du système de semis direct. Tandis que les sols à texture grossière à faible teneur en matière organique pourraient répondre plus rapidement et plus favorablement à l'adoption du semis direct.

Carof (2006) a montré que la disponibilité de l'eau dans le sol a été améliorée après trois ans d'adoption du semis direct. Ce dernier a mis en évidence le rôle des résidus de récoltes à la surface du sol en semis direct. Ces résidus réduisent le flux d'évaporation, limitent la remontée par capillarité de l'eau contenue en profondeur et limitent le dessèchement du sol. A l'inverse, le dessèchement est très marqué dans l'horizon travaillé en technique de travail du sol conventionnel.

I.2.7. Perméabilité

La perméabilité s'exprime par un coefficient caractérisant la vitesse à laquelle l'eau s'infiltré dans le sol selon son état hydrique. Elle dépend donc de la texture, de la structure du sol, de la forme et de la taille des pores. Plus ces derniers augmentent et plus la conductivité hydraulique est susceptible d'augmenter. Elle dépend également de la continuité, donc de la morphologie de l'espace poral (Kribaa *et al.* 2002 ; Calvet, 2003; Girard *et al.*, 2005).

Dans une méta analyse de plusieurs études dans le monde, Blanco-Canqui *et al.*, (2018) montrent que la plupart des études ont conclu que le semis direct peut augmenter la perméabilité dans le sol du 17 au 86 % par rapport au travail conventionnel. Cette augmentation peut être due à de multiples mécanismes. En premier lieu, la couverture par les résidus, en semis direct, qui protège la surface du sol de l'effet des gouttes de pluie et en conséquence contre l'érosion. En deuxième lieu, le semis direct augmente la taille et la continuité des pores en améliorant l'activité biologique, ce qui peut entraîner la formation de canaux racinaires abondants et de réseaux de macropores. Ces macro-pores peuvent augmenter le taux d'infiltration d'eau, ce qui est important, en particulier, dans les sols à texture fine. Troisièmement, le semis direct améliore la teneur en matière organique dans le sol qui affecte la macroporosité et en conséquence l'infiltration de l'eau.

Selon Morbidelli *et al.*, (2017), cette contradiction s'expliquerait par la méthode de mesure, si la mesure est *in situ* par l'infiltromètre à double anneaux ou, en laboratoire, sur des mottes centimétriques.

I.2.8. Organismes du sol

Le biote (organismes) du sol est l'un des indicateurs du sol, le plus cité dans le cas de l'évaluation de la qualité du sol après l'adoption du semis direct. Il comprend la faune et les microorganismes qui sont étroitement liés aux réseaux trophiques du sol. L'effet du travail du sol sur le biote est soit direct : mort, blessures et exposition à la prédation, soit indirect : perturbation de l'habitat et localisation des sources d'éléments nutritifs. Ce changement est plus ou moins important selon sa fréquence et son intensité (degré de fragmentation et profondeur de travail) (Calvet, 2003 ; Girard *et al.*, 2005).

Les microorganismes sont, principalement, formés de champignons et de bactéries. De nombreux travaux (Vian *et al.*, 2009 ; Srour *et al.*, 2020) montrent que dans les systèmes de semis direct et le travail du sol réduit, la quantité et l'activité des microorganismes du sol présentent une forte stratification verticale tandis qu'elles sont réparties de façon plus homogènes sur la profondeur dans la couche du sol labourée. Ceci est dû à l'enfouissement partiel des résidus de récolte qui limite la surface de contact entre les substances organiques et les particules minérales du sol ce qui réduit la vitesse de minéralisation de ces résidus (Balesdent *et al.*, 2000).

Le travail du sol peut également modifier les communautés de la faune du sol, que ce soit la microfaune (protozoaires, nématodes), la mésofaune (acariens, collemboles) ou encore la macrofaune (vers de terre).

Les nématodes peuvent également être considérés comme des indicateurs importants de la qualité du sol. Ils occupent une place centrale dans le réseau trophique du sol et sont en corrélation avec des processus écologiques tels que le cycle de l'azote et la croissance des plantes. Les nématodes phytophages, les nématodes omnivores et prédateurs sont plus importants en semis direct qu'en système conventionnel de travail du sol (Peigné *et al.*, 2011).

Les collemboles et les acariens sont les microarthropodes les plus abondants dans le sol. Les acariens se rencontrent majoritairement au sein des matières organiques du sol en décomposition. Ils peuvent être détritivores (se nourrissent de matière organique en décomposition présente de manière importante dans les litières), prédateurs (arthropodes, microorganismes) ou parasites des végétaux. Les collemboles sont stratifiés au sein du profil du sol et semblent plus importants dans les premiers centimètres du sol, notamment dans la rhizosphère (Peigné *et al.*, 2011).

Les vers de terre sont cruciaux pour la fragmentation initiale et le mélange des résidus organiques dans le sol et par conséquent, pour rendre la matière organique plus accessible aux

micro-organismes. De plus, les vers de terre améliorent l'écoulement de l'eau, l'infiltration et les échanges gazeux dans le sol en construisant un système de macro (bio) pores et en augmentant la stabilité des agrégats du sol (Labrousche *et al.*, 2007 ; Kostina *et al.*, 2011).

I.2.9. pH du sol

D'après Cárceles *et al.* (2022), le changement du pH dans le sol après l'adoption du SD est en relation, beaucoup plus, avec la composition chimique des résidus de récolte qu'avec leur quantité.

Les résidus de légumineuses sont riches en éléments alcalins (azote) et engendrent une augmentation du pH dans le sol, par rapport aux résidus du blé.

I.2.10. Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) est la capacité d'un sol à retenir et à libérer des cations en fonction de sa teneur en argile et en matière organique, et est considérée comme un indicateur de la qualité du sol. Les résultats du changement de la capacité d'échange cationique sont relatifs à la durée de l'adoption du système de semis direct (Cárceles *et al.*, 2022).

L'adoption du SD à long terme entraîne une augmentation de la teneur en matière organique et donc, provoque une augmentation de la capacité d'échange cationique.

Ben Moussa-Machraoui *et al.*, (2010) montrent qu'il existe une corrélation positive entre la teneur en matière organique et la capacité d'échange cationique.

Par contre, Fonteyne *et al.* (2021), n'ont pas observé de différence significative de la capacité d'échange cationique après 5 ans de l'adoption du SD.

I.3. CONCEPT ET ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DU SOL

I.3.1. Concept

La qualité d'un sol qui est définie simplement comme étant sa capacité à fonctionner, dépend de multiples facteurs extrinsèques (climat et topographie) et intrinsèques du sol (propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol). Elle présente une relation directe et/ou indirecte sur les différentes propriétés du sol et ses fonctions.

La figure 3 illustre la relation entre les propriétés du sol et les fonctions du sol (Karlen *et al.*, 1997):

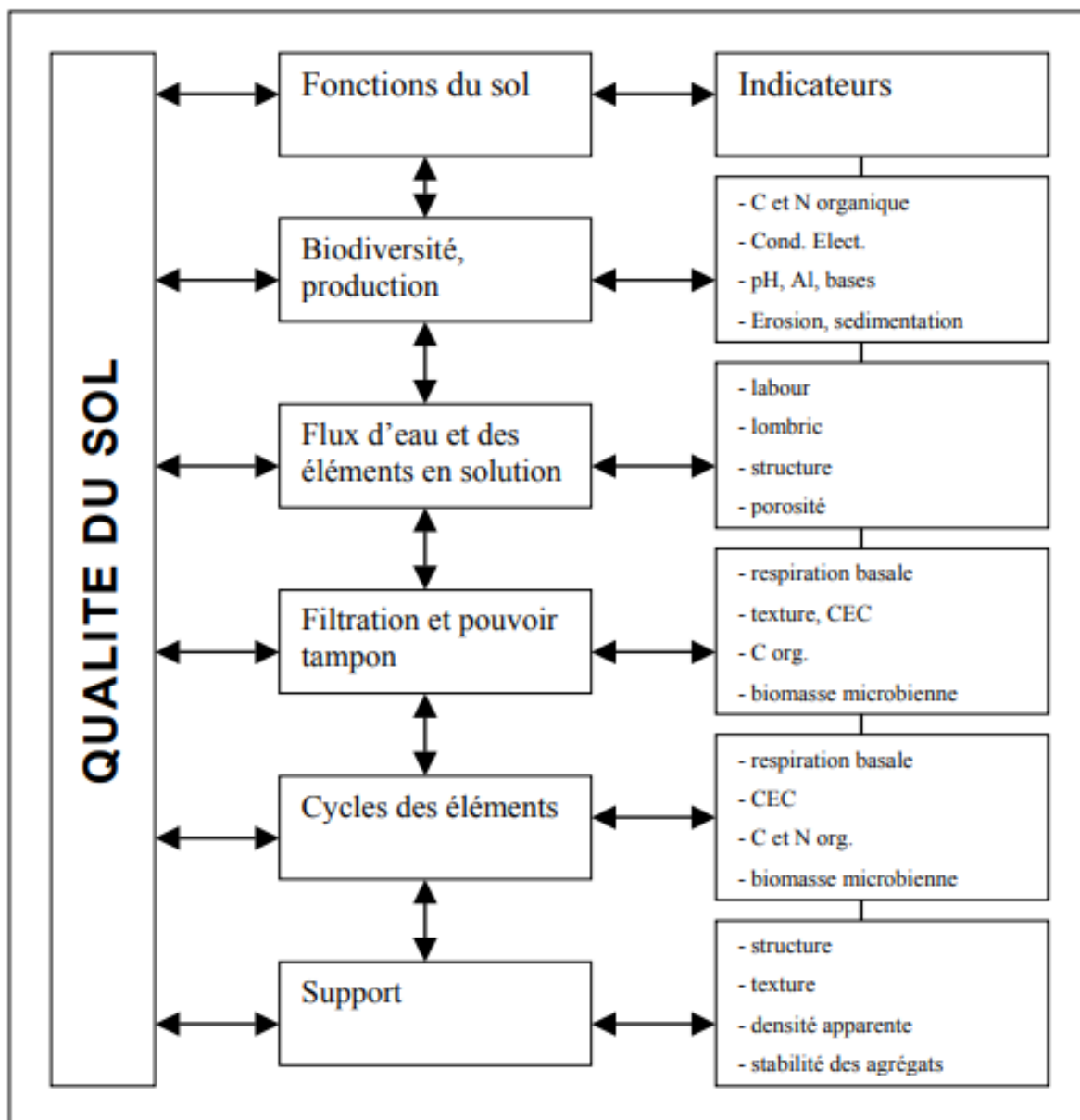


Figure I.3 : Relation entre les fonctions et les propriétés du sol (Karlen *et al.*, 1997)

- Soutenir une activité, une diversité et une productivité biologique,
- réguler et fractionner les flux d'énergies et d'eau,
- filtrer, réguler, dégrader, immobiliser et détoxiquer les éléments organiques et inorganiques produits par les dépôts atmosphériques, industriels et municipaux,
- approvisionner et permettre le cycle des nutriments et des autres éléments, et
- fournir un support aux structures socio-économiques et une protection pour les trésors archéologiques associés avec les habitations humaines.

I.3.2. Indicateurs de la qualité du sol

L'évaluation de la qualité des sols dans le changement des systèmes cultureux exige une évaluation des indicateurs analytiques et morphologiques pertinents (Bunemann *et al.*, 2018 ; Guo, 2021).

D'après Bunemann *et al.* (2018), plusieurs propriétés physiques (texture, densité apparente, stabilité des agrégats), chimiques (pH, matière organique totale, matière organique particulaire, azote total) et biologiques (activité et abondance des organismes) ont été sélectionnées comme des indicateurs de la qualité du sol et qui sont en relation avec les différentes fonctions du sol : la compaction, la séquestration de la matière organique, la stabilité structural et la biodiversité.

La structure du sol a été étudiée soit indirectement par des analyses physiques (densité apparente, stabilité structurale et résistance à la pénétration racinaires) soit directement par des méthodes morphologiques, à savoir, l'approche VSA (**V**isual **S**tructure **A**ssessment), VESS (**V**isual **E**valuation of **S**tructure **S**oil) et profil cultural.

Les méthodes VESS et VAS sont plus rapides à l'exécution que la méthode de profil cultural. Ces méthodes ont été développées aux Pays-Bas. Elles sont, récemment, améliorées par une charte (clé) de notations. Ces méthodes permettent d'évaluer la qualité structurale du sol à partir de sa forme, taille et porosité visuelle *in situ* sur un mini-profil de dimension (large* longueur * profondeur) en équivalent du volume de (20* 20 * 20) cm³ du sol (Guimarães *et al.*, 2011).

La méthode du profil cultural est très utilisée en France, elle est initiée par Henin 1969, modifiée par Manichon 1982, et détaillée par Gautronneau et Manichon 1987. Cette méthode a été conçue comme un outil de diagnostic sur le terrain pour identifier les effets du labour sur la structure du sol et sur le développement racinaire des cultures (Roger-Estrade *et al.*, 2011 ; Boizard *et al.*, 2017). Cette méthode a été développée pour l'adapter aux études relatives aux systèmes de travail du sol minimum et de semis direct dans les différents contextes pédo-climatiques du monde (Boizard *et al.*, 2017).

En Algérie, la plupart des études de l'adoption du SD se concentrent sur les propriétés physiques (densité apparente, rétention en eau, infiltration) et les propriétés chimiques (matière organique, azote total). Par ailleurs, Kribaa (2003) et Belhadj (2014) ont étudié les propriétés analytiques (physiques et chimiques) et morphologiques. Cependant, la structure du sol a été décrite morphologiquement selon la méthode du profil cultural.

I.3.3. Sélection de jeu de données minimales

La sélection d'un jeu de données minimales des indicateurs est très importante dans les études de l'évaluation de la qualité du sol. Elle a pour objectif de minimiser la complexité des données et de réduire le coût de l'évaluation, notamment, pour les analyses microbiologiques. Cette sélection de données est basée sur la réduction du nombre de propriétés du sol par des analyses statistiques multivariées (Bunemann *et al.* 2018),

L'analyse en composant principal (ACP) fait partie des méthodes multivariées les plus utilisées pour la reconnaissance, la classification et la modélisation du changement spatio-temporelle de la qualité du sol. Cette méthode statistique peut réduire le nombre des indicateurs du sol dans l'ensemble des données grâce à l'identification des composants principaux les plus importants et qui expliquent le contenu d'information maximal de la variabilité des données.

Dans une étude de l'évaluation du changement de la qualité physique du sol après l'adoption du système du semis direct à long terme, Castellini *et al.*, (2019) utilisent la méthode statistique ACP pour évaluer la qualité physique du sol. Les résultats ont mis en évidence le rôle de cette approche pour sélectionner les indicateurs sensibles et acquérir une compréhension complète des processus de changements des indicateurs du sol.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

Ce chapitre est consacré à la présentation des sites de l'étude, la méthodologie de travail et les traitements des données.

II.1. MILIEU D'ÉTUDE

Il concerne la situation géographique, climatique, pédologique et l'histoire culturelle des sites expérimentaux A, B et C.

II.1.1. Situation géographique

L'expérimentation a été effectuée sur trois sites A, B et C dans la wilaya de Sétif. La station de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) gère les essais.

II.1.1.1. Site A

Ce site est situé à Mezloug dont les coordonnées géographiques sont : $36^{\circ} 08'40.63''$ Nord ; $5^{\circ}20'25.75''$ Est (Figure II.1).



Figure II.1 : Localisation du site A (extrait de l'image Google Earth 2023)

II.1.1.2. Sites B et C

Le site B est situé dans la station expérimentale de l'ITGC de Sétif dont les coordonnées géographiques sont : $36^{\circ} 09'56.74''$ Nord ; $5^{\circ}21'45.41''$ Est (Figure II.2).

Le site C est localisé à l'ITMA de Sétif (Figure II.2). Les coordonnées géographiques sont : $36^{\circ} 09'59.07''$ Nord ; $5^{\circ}22'20.70''$ Est.

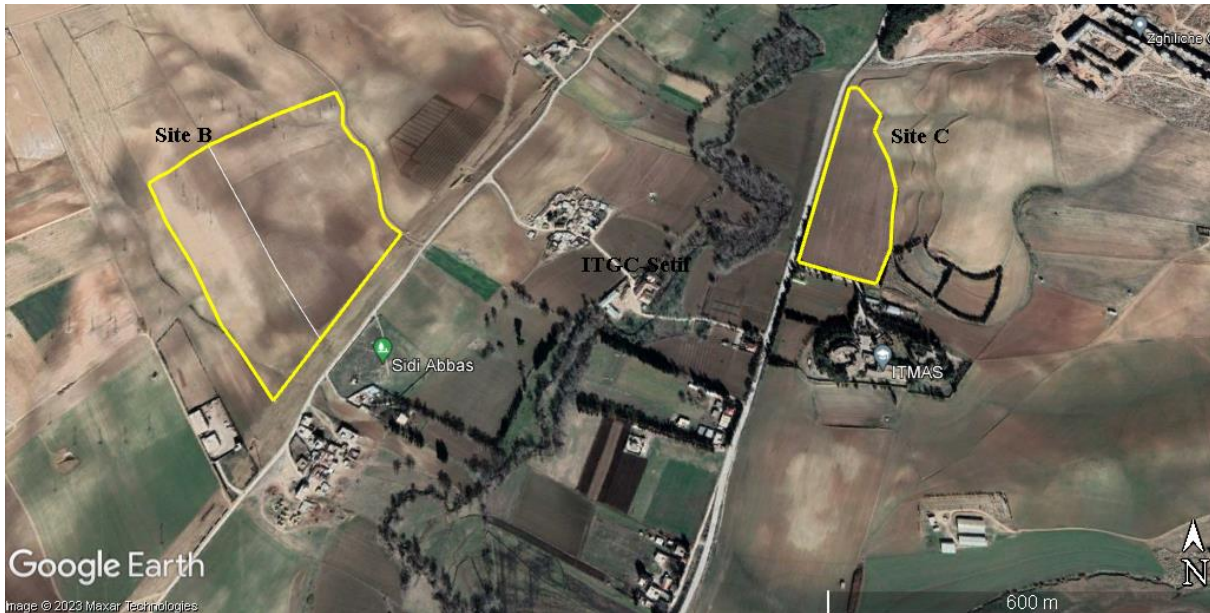


Figure II.2 : Localisation des sites B et C (extrait de l'image Google Earth 2023)

II.1.2. Situation climatique

Il s'agit d'un climat de type méditerranéen semi-aride (Lahmar *et al.*, 1992 ; Kribaa, 2003). Le climat se caractérise par une saison humide, allant du mois d'octobre au mois de mai (Figure II.3).

La moyenne des précipitations entre 2000 et 2016 est de 403 mm. Les précipitations les plus importantes sont enregistrées au mois de décembre avec 48,5 mm et au mois de mai avec 50,8 mm (Tableau II.1).

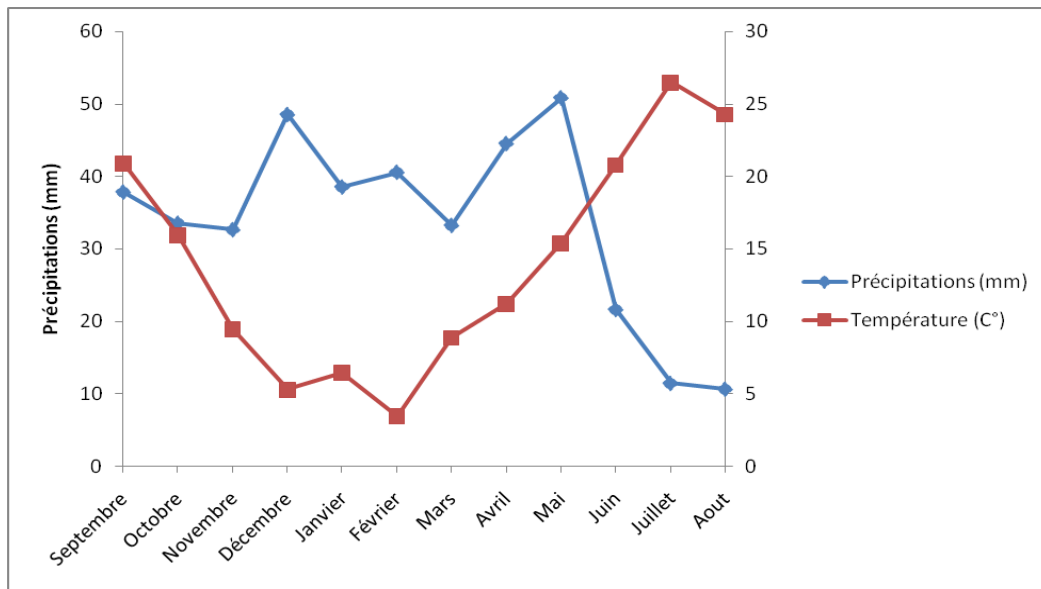


Figure II.3 : Diagramme ombrothermique

D’après le tableau II.1, la précipitation annuelle de la campagne agricole 2017- 2018 est de 435 mm. Durant les mois de printemps (mars, avril et mai), les précipitations ont été les plus importantes. Cette campagne agricole est humide, en comparaison avec les données de 2000 – 2016. La moyenne des températures annuelle est de 13,7°C.

Tableau II.1 : Pluviométries et températures enregistrées pendant la campagne 2017/2018 et la période 2000/2016

Mois	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Cumul
Pluviométrie (mm) 2000/2016	37.8	33.5	32.6	48.5	38.5	40.54	33.2	44.5	50.8	21.6	11.4	10.6	403.5
Pluviométrie (mm) 2017/2018	41	10.7	55.7	33.5	13.9	23.2	90.2	81.3	51.9	17.8	5.5	10.3	435
Température (°C) 2000/2016	20.9	15.95	09.45	5.28	6.43	3.43	8.86	11.21	15.4	20.78	26.5	24.3	
Température (°C) 2017/2018	20	15.4	11.2	6.4	6.2	6.4	7.8	10.6	16	21.5	25.4	25.8	

II.1.3. Situation géologique

La géologie de la région de Sétif est très complexe, toutes les unités structurales sont représentées à l’exception du socle et de la dorsale de Kabylie. (Figure II.4).

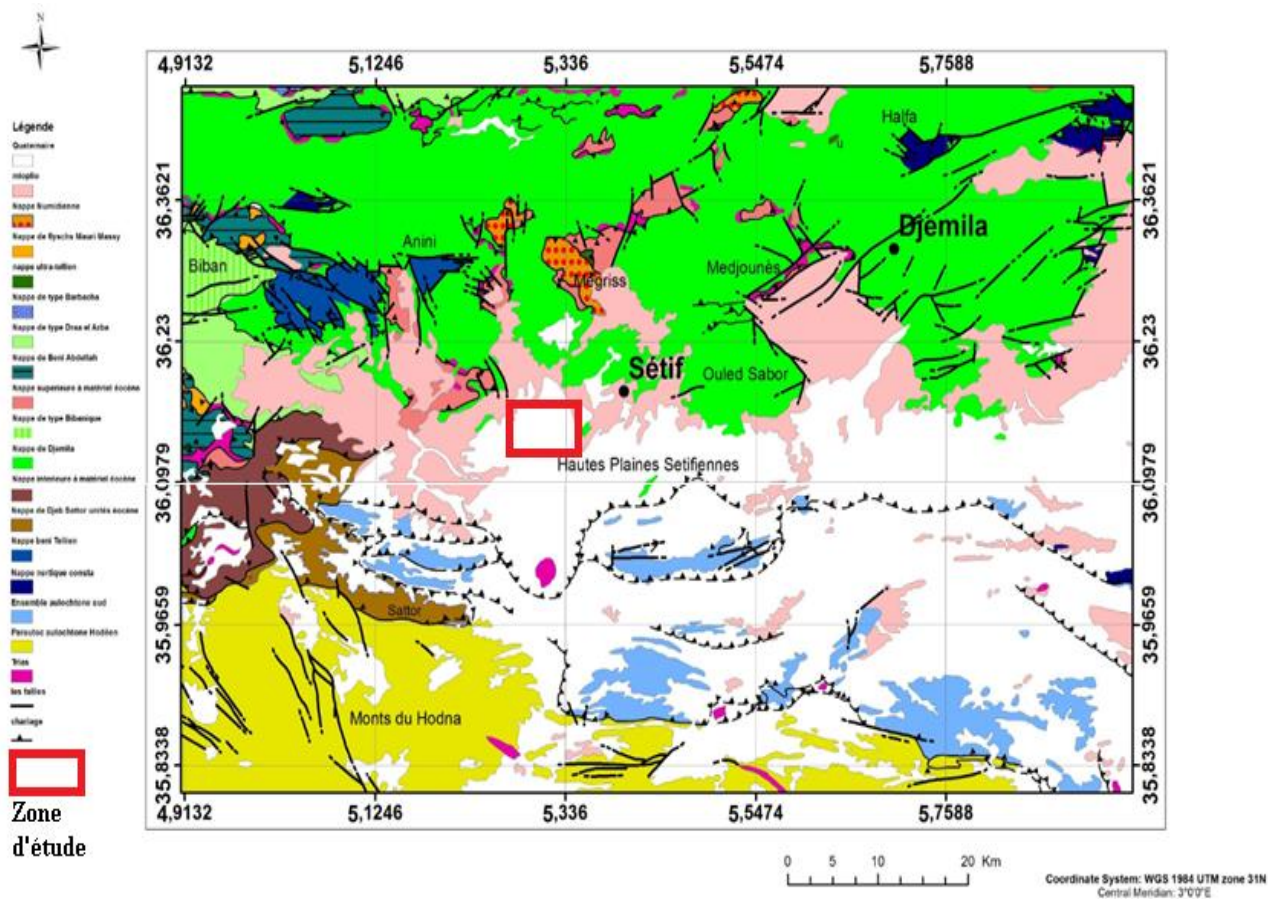


Figure II.4 : Carte géologique et structurale de la région de Sétif (1/200 000) (Djenba, 2015)

Le Nord de la région présente une complexité morpho structurale à tendance perméable et plastique reposant sur un substratum imperméable qui favorise beaucoup plus l'instabilité des terrains. Le milieu d'étude représente les domaines des hautes plaines. Il s'agit de sols marno-sableux, de grès rougeâtres, de croûtes calcaires d'âge quaternaire et des argiles rouges et conglomérats d'âge miocène (Kribaa, 2003 ; Djenba, 2015).

II.1.4. Situation géomorphologique

Le milieu physique de la région de Sétif se caractérise par un relief quasiment parallèle à sa répartition longitudinale.

Les sites de l'étude se situent dans les hautes plaines, entre la chaîne du tell au Nord et la lisière au Sud (les chotts). Cette unité géomorphologique est constituée de vastes étendues planes qui se composent de plusieurs compartiments de bassins individualisés (Kribaa, 2003 ; Djenba, 2015).

II.1.4.1. Site A

Le site A se trouve à 958 et 960 m d'altitude. La pente est très faible < 1% sur 160 m de distance dont la direction est Sud - Nord (Figure II.5).

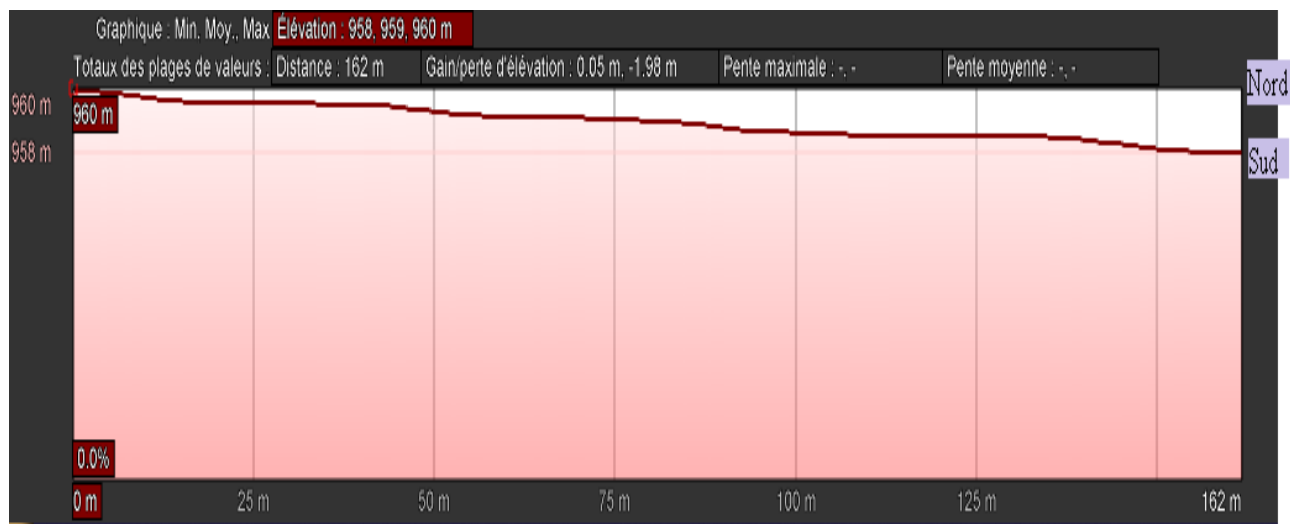


Figure II.5 : Profil de dénivelée dans le site A

II.1.4.2. Site B

Le site B est localisé à une altitude maximale de 1000 m et minimale de 976 m, La pente en moyenne est de 2,9 % sur 1km de distance dont la direction est Nord - Sud (Figure II.6).

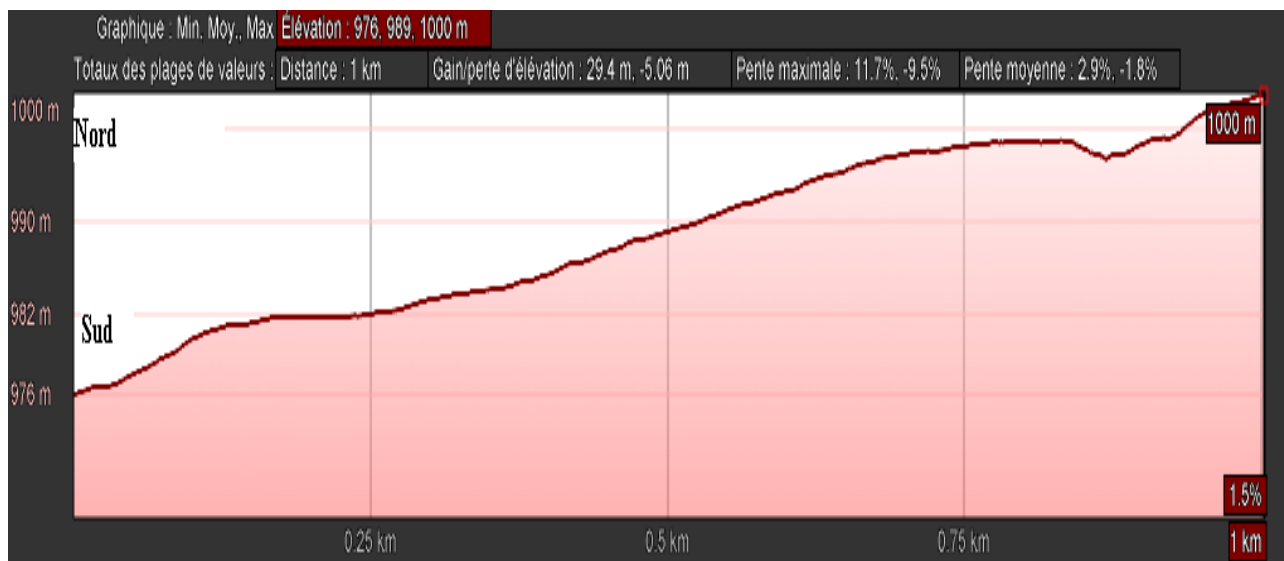


Figure II.6 : Profil de dénivelée dans le site B

II.1.4.3. Site C

Le site C est localisé à une altitude maximale de 980 m et minimale de 967 m.

La pente est de 6,3 % sur une distance de 269 m selon une direction Sud- Nord (Figure II.7).

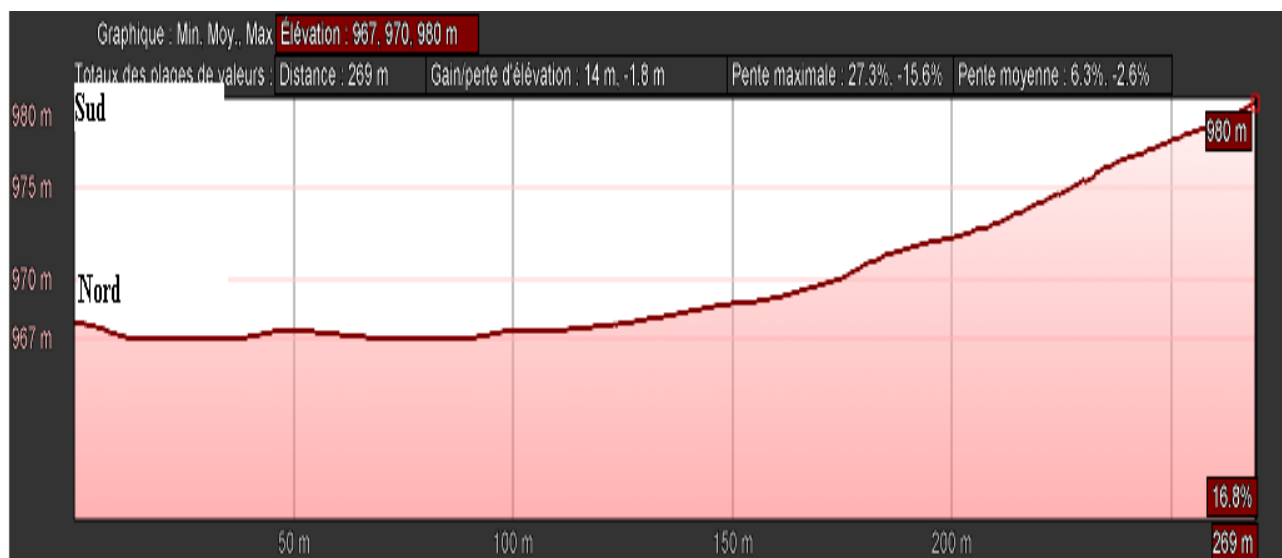


Figure II.7 : Profil de dénivelée dans le site C

II.1.5. Situation pédologique

Selon Lahmar *et al.* (1992) et Kribaa (2003), le sol du milieu d'étude appartient aux sols calcimagnésiques et aux sols peu évolués selon la classification française de 1967.

La première classe se développe sur des alluvions et des colluvions, peu profonds, de texture limono-argileuse à limon-sableuse, des accumulations calcaires dures proches de la surface se confondent avec l'horizon travaillé.

La seconde classe se développe sur Oued Boussalem. Ces sols sont profonds, moyennement calcaires et de texture argilo-limoneuse.

II.1.6. Historique cultural des parcelles

La Wilaya de Sétif est une région céréalière. Plusieurs parcelles sont consacrées aux essais de faisabilité de l'adoption de système de semis direct comme système alternatif au système conventionnel de travail du sol, à savoir, les parcelles des sites A, B et C.

II.1.6.1. Site A

L'expérimentation a été mise en place depuis 3 ans sur un dispositif en blocs aléatoires à trois répétitions qui sont disposés perpendiculairement à la pente.

Les parcelles élémentaires ont 50 m de long et 3 m de large (Figure II.7).

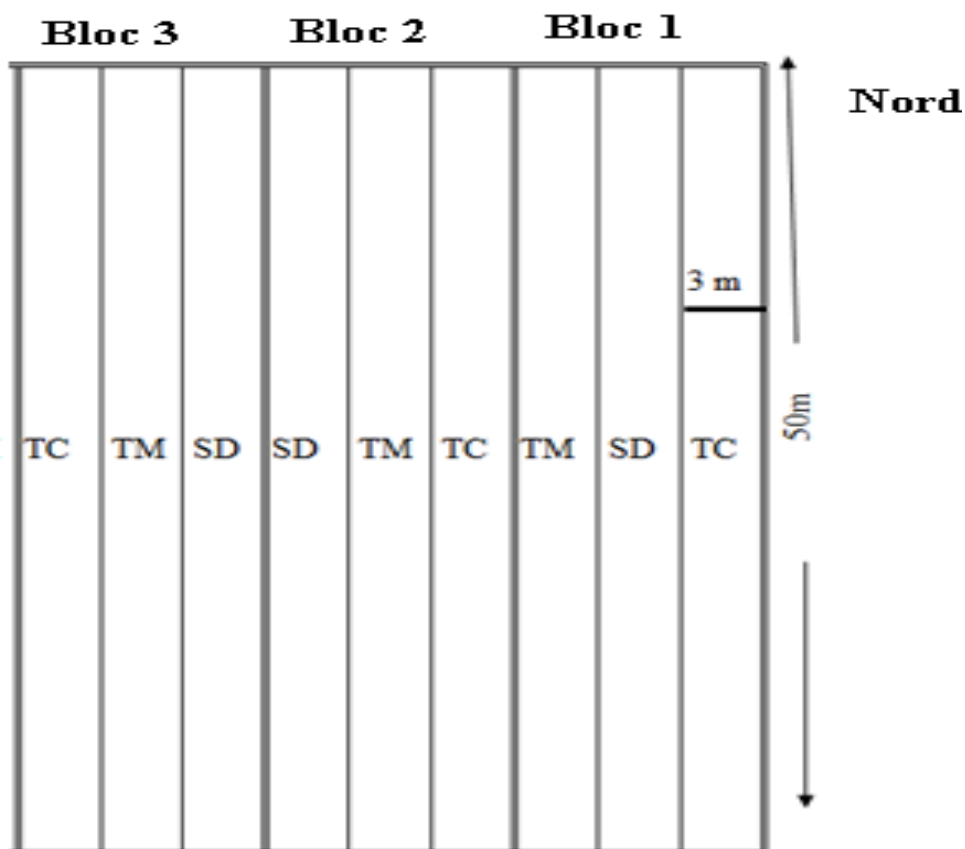


Figure II.8 : Dispositif expérimental dans le site A

Les traitements étudiés sont le travail conventionnel (TC) (charrue à disques + cover crop + herse), le travail minimum (TM) (chisel + cover crop + herse) et le semis direct (SD) (semoir Semeato).

❖ Travail du sol conventionnel TC

Ce système a commencé par une opération de labour profond, à 30 cm, avec un retournement de l'horizon travaillé, à l'aide d'une charrue à disques dès les premières pluies d'automne. Ce labour est suivi de plusieurs opérations de reprise avec un cover-crop (10-20 cm) et une herse rotative (5-7 cm de profondeur) puis d'un semis avec un semoir classique.

❖ **Travail du sol minimum TM**

Ce système est réalisée avec un outil à dents de type chisel à une profondeur de 20 cm. Elle est suivie par un passage de cover crop (10-15 cm) et de herse rotative (5-7 cm) et se termine par un semis avec semoir classique.

❖ **Semis direct SD**

Ce système est réalisé sur un mulch de la culture précédente (pois) par un semoir de semis direct de marque Semeato à 5 cm de profondeur.

II.1.6.2. Site B

L'expérimentation est conduite chez un agriculteur, sur deux parcelles de cinq hectares chacune. La première parcelle est menée en semis direct (semoir Semeato) pendant 9 ans avec une rotation blé sur blé, la deuxième parcelle est menée en conventionnel avec une rotation jachère travaillée / blé.

II.1.6.3. Site C

L'expérimentation est menée sur une parcelle de cinq hectares cultivée en blé /lentilles, en semis direct (semoir Semeato) depuis 6 ans.

Toutes les parcelles des différents sites (A, B et C) ont été fertilisées avec 150 kg/ha d'ammonium phosphate (12 % N, 52% P et 0 % K) au moment de semis et 100 kg/ha de l'urée (46% N) au début du tallage.

Seules les parcelles de SD ont été désherbées avant l'opération de semis avec du glyphosate (2,5 l/ha de produit commercial).

II.2. MÉTHODES

Il s'agit du mode d'échantillonnage du sol, la description morphologique de la structure du sol, les analyses physiques, chimiques et biologiques du sol.

II.2.1. Échantillonnage

Nous avons effectué 2 modes de prélèvement du sol.

Le premier a pour objectif d'étudier l'homogénéité du sol dans les sites A, B et C sur 54 échantillons (3 répétitions * 3 position de la pente * 6 parcelles). Il comprend la caractérisation

physicochimique de l'horizon travaillé (< 20cm de profondeur), tel que, la texture, le calcaire total, le pH, la conductivité électrique et la capacité d'échange cationique.

Le second a pour objectif d'étudier l'effet des systèmes de travail du sol (contexte général) et l'effet de la durée de l'adoption du semis direct (contexte du semis direct) sur la qualité morphologique et analytique du sol (propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol) dans 2 profondeurs de mesure 0-10 et 10-20 cm. Cependant 36 échantillons du sol ont été étudiés dans ce point (3 répétitions * 2 profondeurs de sol * 6 parcelles).

II.2. 2. Structure morphologique

L'objectif de cette description morphologique est d'évaluer visuellement l'organisation structurale du sol. Pour cela, des blocs du sol ont été prélevés dans des mini-profil selon la méthode proposée par Ball *et al.* (2007). Cette méthode se réalise en 2 étapes essentielles :

Extraction et examen du bloc : cette étape consiste à creuser un mini-profil de 20 cm de longueur, 20 cm de largeur et 20 cm de profondeur, l'ensemble du sol est placé sur le sol, la profondeur de chaque sous-horizon est délimitée et les échantillons sont individualisés.

Les blocs et les fragments sont manipulés délicatement pour révéler les sous-horizons ou groupes de fragments cohérents.

Les plus grosses mottes sont brisées et fragmentées jusqu'à obtenir une taille de 1,5 à 2 cm.

L'examen se fait sur la forme, la porosité visible à l'œil, les racines et la facilité de rupture des fragments. Les fragments non poreux et anguleux révèlent une structure de mauvaise qualité.

Classement des états structuraux : cette étape concerne l'attribution et la confirmation de la note (score) structurale. Les fragments du sol sont confrontés aux photos d'une charte, catégorie par catégorie, pour choisir la mieux adaptée selon la difficulté d'extraction du bloc, la taille, la forme, la porosité et les racines.

En suivant la charte Guimarães *et al.* (2011), les classes structurales sont notées selon 5 échelles du score (Sq) .

Sq1 : structure friable, les agrégats sont friables entre les doigts.

Sq2 : structure intacte, les agrégats se brisent facilement entre les doigts.

Sq3 : structure ferme, les agrégats se brisent entre les doigts.

Sq4 : structure compacte, les agrégats se brisent difficilement entre les doigts.

Sq5 : structure très compacte, les agrégats sont vraiment difficiles à briser.

Une note de 1 à 3 est généralement acceptable tandis qu'une note de 4 ou 5 requiert un changement de pratiques culturales.

II.2.3. Analyses physiques, chimiques et biologiques du sol

Les échantillons du sol mesurés sont remaniés et non remaniés.

Les échantillons remaniés ont servi à évaluer la granulométrie (texture du sol), le pH, le calcaire total, la conductivité électrique, la matière organique totale et ses composantes, l'azote total, la capacité d'échange cationique et la biomasse microbienne (Tableau II.2).

Tableau II.2 : Méthodes de mesures des propriétés du sol

Propriétés	Méthodes
Granulométrie	Pipette de Robinson
pH	Rapport sol/eau distillée = 1/2,5
Conductivité électrique	Rapport sol/eau distillée = 1/ 5
Calcaire total	Calcimètre de Bernard
Capacité d'échange cationique	Déplacement des cations par l'acétate sodium à pH 8 suivie par une saturation par acétate d'ammonium. Dosage du sodium par spectrophotométrie à absorption atomique.
Matière organique totale	Dosage du carbone organique (C) par la méthode Anne. Matière organique totale = C% * 1,72.
Fractionnement physique de la matière organique	Fractionnement de la matière organique particulaire (MOP) et la matière organique liée (MOL) par un tamis 50µm selon Cambardella et Elliott (1992). - MOP > 50µm - MOL < 50µm
Azote total	Kjeldahl
Biomasse microbienne	Extraction par fumigation au chloroforme. C-microbien = (C- échantillon fumigé– C- échantillon non fumigé) / K Avec K= 0,35

Les échantillons non remaniés sont utilisés pour déterminer les propriétés physiques suivantes :

-La densité apparente est déterminée à l'aide d'un cylindre de volume de 100 cm³.

-La rétention en eau du sol a été mesurée sur des mottes de taille de 1 à 2 cm, sur 2 points de succions matricielles avec la presse à membrane de Richards (1954).

Le premier point correspond au pF 2,7, en équivalent, de 0,5 bars ou 500 cm d'eau et qui concerne la capacité de rétention en eau du sol à texture limono argileuse (Calembert, 1985 ; Mathieu *et al.*, 2008).

Le second correspond au point de flétrissement permanent pF 4,2 en équivalent de 16 bars ou 16 000 cm d'eau.

-La macroporosité et microporosité sont déterminées par la loi de Jurin qui a établi une relation entre la rétention en eau (pF) et la taille des pores : $\Phi (\mu\text{m}) = 3060/H$.

Avec, Φ : diamètre des pores (μm). H : la hauteur de l'eau (cm).

Les pores dont le diamètre est supérieur à 6,12 μm correspondent à la macroporosité et les pores dont le diamètre est inférieur à 6,12 μm correspondent à la microporosité.

-La stabilité des agrégats du sol a été déterminée en suivant le protocole établi par Le Bissonais *et al.*, (1996).

- La résistance à la pénétration racinaire est réalisée sur terrain, à l'aide d'un pénétromètre, dont le mode opératoire consiste à enfoncer le cône du pénétromètre (1 à 2 cm²) dans le sol et de mesurer l'effort à appliquer en Newton /cm² (100 Newton/cm² = 1 MPa).

L'étude de l'abondance de vers de terre (individus/m²) a été réalisée avec un tri manuel sans utilisation des irritants (formole ou moutarde) lors de la description visuelle de la structure du sol.

II.3. TRAITEMENT DES DONNÉES

Les données de cette étude sont soumises aux différents traitements statistiques à $p < 0,05$ sur la plateforme statistique R 4.2 (Rcmdr).

- Comparaison entre les moyennes des propriétés morphologiques et analytiques du sol de différents systèmes de travail du sol. En cas d'effet significatif à $p < 0,05$, un test d'homogénéité de Tukey a été effectué.
- Régressions pour déterminer des modèles de l'évolution temporelle des propriétés du sol en contexte du semis direct.
- Traitement de corrélation simple (K-Pearson) et multifactorielle (Analyse en Composantes Principales). Elle a pour objectif de déterminer la relation entre les propriétés du sol, les durées de l'adoption du semis direct et la profondeur de mesure.

CHAPITRE III : CARACTERISATION PHYSICOCHIMIQUE DE L'HORIZON TRAVAILLE

Ce chapitre est consacré à la caractérisation spatiale de l'horizon travaillé du sol dans les différents sites étudiés A, B et C. Cet horizon correspond à la couche superficielle du sol dont les caractéristiques sont modifiées par les processus naturels (la pente) et anthropiques (travail du sol).

Cependant, la caractérisation de l'horizon travaillé a été effectuée, en premier lieu, sur 20 cm de profondeur en raison de l'action verticale des outils aratoires utilisés dans les divers sites étudiés. En second lieu, cette caractérisation est réalisée sur trois positions de la pente : basse (B), moyenne (M) et haute (H) dans les sites (B et C) et sur trois blocs expérimentaux dans le site A.

L'ensemble des échantillons du sol prélevé a été caractérisé par des mesures des propriétés physicochimiques, notamment, la texture du sol (fractionnement granulométrique : argile, limon et sable), le pH, la conductivité électrique CE, la capacité d'échange cationique CEC et le calcaire total CaCO_3 (Annexe 1, 2 et 3)

III.1.SITE A

Les blocs expérimentaux dans le site A sont disposés perpendiculairement à la pente.

Les résultats de l'analyse de variance des propriétés physicochimiques de l'horizon travaillé dans le site A sont présentés dans le tableau III.1.

III.1.1. pH

Les valeurs moyennes du pH des différents traitements (SD, TM et TC) enregistrent une variation statistiquement significative tandis que l'effet bloc n'est pas significatif.

L'horizon travaillé du TC enregistre la valeur moyenne la plus élevée avec 8,21 suivie par le couple TM-SD, avec respectivement 8,11 et 8,10.

Les valeurs moyennes de pH au niveau des blocs expérimentaux oscillent entre 8,12 et 8,13.

Tableau III.1 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des propriétés physicochimiques de l'horizon travaillé dans le site A

	pH	CE dS/m	CaCO₃ %	CEC Cmol/kg	Argile %	Limon %	Sable %
SD	8,10 a	0,153 a	25 a	17,10 b	37,6 a	41,6 a	18,8 a
TM	8,11 a	0,150 a	24 a	16,94 ab	38,4 a	42,1 a	19,1 a
TC	8,21 b	0,157 a	23,4 a	15,42 a	37,8 a	42,3 a	18,3 a
Bloc 1	8,12 a	0,151 a	24,2 a	16,57 a	37,5 a	42,7 a	18,5 a
Bloc 2	8,13 a	0,150 a	23,5 a	16,31 a	37,9 a	41,9 a	17,6 a
Bloc 3	8,12 a	0,152 a	24,7 a	16,47 a	38,1 a	42 a	18,2 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

III.1.2. CE

Les valeurs moyennes de la CE entre les traitements (SD, TM et TC) et entre les blocs expérimentaux (bloc 1, 2 et 3) présentent une distinction non significative.

Les moyennes de la CE varient de 0,150 à 0,157 dS/m pour les traitements et de 0,150 à 0,152 dS/m pour les blocs.

III.1.3. CaCO₃

Les valeurs moyennes du CaCO₃ présentent des différences non significatives entre les traitements (SD, TM et TC) et entre les blocs expérimentaux (blocs 1, 2 et 3).

Les valeurs du CaCO₃ varient de 23,4 à 25 % pour les traitements et de 23,5 à 24,7 % pour les blocs.

III.1.4. CEC

Les valeurs moyennes de la CEC présentent une différence significative entre les traitements (SD, TM et TC) et non significative entre les blocs expérimentaux (bloc 1, 2 et 3).

Cependant, le couple de traitements SD-TM présente de fortes valeurs, avec respectivement, 17,10 et 16,94 cmol/kg suivi par le traitement TC avec 15,42 cmol/kg.

Les valeurs de la CEC varient de 16,31 à 16,57 cmol/kg pour les blocs expérimentaux.

III.1.5. Texture

Les valeurs moyennes du fractionnement granulométrique (argile, limon et sable) enregistrent une variabilité non significative entre les traitements (SD, TM et TC) et entre les blocs expérimentaux (bloc 1, 2 et 3).

Les valeurs moyennes de la teneur en argile oscillent entre 37,6 et 38,4 % pour les traitements (SD, TM et TC) et entre 37,5 et 38,1 % pour les blocs.

Les valeurs de la teneur en limon sont comprises entre 41,6 et 42,1 % pour les traitements et entre 41,9 et 42,7% pour les blocs.

Les valeurs de la teneur en sable sont comprises entre 18,3 et 19,1 % pour les traitements et 17,6 et 18,2 % pour les blocs.

Le sol étudié dans le site A présente une texture limono-argileuse selon la classification (USDA).

Il ressort de la caractérisation de l'horizon travaillé dans le site A que, la variation spatiale des propriétés physicochimiques est importante seulement entre les systèmes de travail du sol et pour les deux propriétés pH et CEC.

Cependant, l'adoption du système SD pendant 3 ans peut améliorer les valeurs du pH et de la CEC, avec respectivement, 2 et 11 % par rapport au système TC.

L'adoption du SD entraîne une augmentation de la teneur en matière organique et donc, provoque une amélioration de la CEC et du pH. Ces résultats sont comparables aux travaux de Ben Moussa-Machraoui *et al.* (2010), Cárceles *et al.* (2022) et contradictoires à ceux de Fonteyne *et al.* (2021). Ces derniers auteurs ont conclu que, après 5 ans de l'adoption du SD, le pH et la CEC n'ont pas changé.

III.2. SITE B

Le tableau III.2 donne l'analyse de la variance des propriétés physicochimiques entre les systèmes de travail du sol, SD9 et TCJ et entre les positions de la pente, basse, moyenne et haute.

Ces résultats montrent que la position de la pente a un effet statistiquement significatif sur la variabilité de toutes les propriétés physicochimiques des sols étudiés. Par contre, les systèmes de travail du sol ont un effet significatif seulement sur le pH et la CEC.

Tableau III.2 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des propriétés physicochimiques de l'horizon travaillé dans le site B

	pH	CE dS/m	CaCO₃ %	CEC cmol/kg	Argile %	Limon %	Sable %
SD9	8,18 a	0,201 a	18,6 a	12,86 a	23,1 a	34,6 a	42,2 a
TCJ	8,28 b	0,217 b	18 b	12,07 b	23,4 a	34,1 a	42,4 a
Basse (B)	8,17 a	0,218 b	14,1 a	14,88 c	40 c	41,3 c	18,6 a
Moyenne (M)	8,29 b	0,216 b	18,9 ab	12,92 b	19,3 b	35,9 b	44,7 b
Haute (H)	8,34 c	0,193 a	22,1 b	07,41 a	10,4 a	25,8 a	63,7 c

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

III.2.1.1. pH

Les valeurs moyennes du pH enregistrent une hétérogénéité spatiale selon la position de la pente et les systèmes de travail du sol.

Selon la pente, la valeur la plus élevée a été observée à la position H avec 8,34 suivie par la position M avec 8,29 et enfin par la position B avec 8,17.

Selon les systèmes de travail du sol, la parcelle TCJ présente la valeur moyenne la plus élevée avec 8,28 suivie par la parcelle SD9 avec 8,20.

III.2.1.2. CE

La propriété de CE a été modifiée par la position de la pente et les systèmes de travail du sol.

Par la position de la pente, l'ensemble des pentes B-M présente les valeurs moyennes les plus fortes, avec respectivement, 0,218 et 0,216 dS/m suivi par la position H avec 0,193 dS/m.

Par les systèmes de travail du sol, cette propriété enregistre des valeurs plus fortes à la parcelle TCJ avec 0,217 dS/m par rapport à la parcelle SD9 avec 0,201 dS/m.

III.2.1.3. CaCO₃

Le taux moyen du CaCO₃ peut changer seulement en fonction de la position de la pente. Il apparaît très élevé dans la position H avec 22,1% suivi par la position M avec 18,9% et enfin avec 14,1 % dans la position B.

La teneur du CaCO₃ en fonction des modes de travail du sol, SD9 et TCJ, est comprise entre 18 et 18,6 %.

III.2.1.4. CEC

Les valeurs moyennes de la CEC présentent une variation significative en fonction de la diversité de la position de la pente et des systèmes de travail du sol.

En fonction de la pente, la position B enregistre la valeur la plus élevée avec 17,08 cmol/kg suivie par la position M avec 12,92 cmol/kg et enfin par la position H avec 7,41 cmol/kg.

En fonction des systèmes de travail du sol, la parcelle soumise en SD9 enregistre la forte valeur de CEC avec 12,86 cmol/kg par rapport à la parcelle TCJ avec 12,07 cmol/kg.

III.2.1.5. Texture

Les fractions granulométriques, argile, limon et sable, déterminantes de la texture du sol varient seulement en fonction de la position de la pente.

Pour la fraction d'argile, la valeur moyenne la plus élevée a été observée dans la position B avec 40 % suivie par la position M avec 19,3 % et enfin par la position H avec 10,4 %.

Pour les limons, la position B enregistre la valeur la plus élevée avec 41,3% suivie par la position M avec 35,9 % et enfin par la position H avec 25,8 %.

Pour la fraction Sable, la position H présente la plus forte valeur avec 63,7 % suivie par la position M avec 44,7 % et enfin par la position B avec 18,6 %.

Par ailleurs, les valeurs des différentes fractions granulométriques, argile, limon et sable d'une part et dans les parcelles SD9 et TCJ d'autre part oscillent, respectivement, entre 23,1 et 23,4 %, entre 34,6 et 34,1 % et entre 42,2 et 42,4 %.

L'ensemble des fractions granulométriques montre que le sol dans le site B à une texture limono-argileuse dans la basse-pente, limoneuse dans la mi-pente et sablo-limoneuse dans la haute-pente selon la classification USDA.

Il ressort de la caractérisation de l'horizon travaillé dans le site B que, l'effet de la pente est très important sur le changement de toutes les propriétés physicochimiques du sol. Alors que, l'effet des systèmes de travail du sol est important seulement sur le pH et la CEC.

L'argile, le limon, la CEC et la CE diminuent au fur et à mesure de l'augmentation de la pente, par rapport au sable, CaCO_3 et pH. Ce qui signifie que, le phénomène d'érosion du sol est très important entraînant un enrichissement de la zone basse, directement en argile, limon et sels solubles (CE) et indirectement en CEC.

Concernant les systèmes de travail du sol, l'adoption du SD pendant 9 ans permet d'améliorer, seulement, le pH, la CEC et la CE, avec respectivement 2, 7 et 8, % par rapport au TCJ. Ces résultats sont comparables aux travaux de Ben Moussa-Machraoui *et al.* (2010), Cárceles *et al.* (2022), Fonteyne *et al.* (2021).

III.3. SITE C

Le tableau III.3 montre que la position de la pente a un effet statistiquement significatif sur la variabilité de toutes les propriétés des sols étudiés.

III.3.1. pH

Les valeurs moyennes du pH présentent une variabilité selon la position de la pente.

La valeur la plus élevée a été observée à la position H avec 8,25 suivie par le couple de pente M et B, avec respectivement, 8,10 et 8.

Tableau III.3 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des propriétés physicochimiques de l'horizon travaillé dans le site C

	pH	CE dS/m	CaCO₃ %	CEC cmol/kg	Argile %	Limon %	Sable %
Basse (B)	8,06 a	0,287 b	14,2 a	16,85 b	39,3 b	42,4 a	17 a
Moyenne (M)	8,10 a	0,252 b	13,3 a	15,47 b	36,8 b	45,7 a	21,8 a
Haute (H)	8,25 b	0,141 a	20,5 b	07,20 a	10,4 a	50,7 b	41,4 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

III.3.2. CE

Les valeurs de la CE enregistrent une variabilité spatiale selon la position de la pente. En effet, les positions B et M enregistrent les valeurs moyennes les plus fortes avec 0,252 dS/m comparativement à la position H avec 0,141 dS/m.

III.3.3. CaCO₃

Les valeurs du CaCO₃ enregistrent une variabilité spatiale selon la position de la pente.

Les valeurs les plus fortes sont observées dans la position H avec 20,5 % suivie par les positions B et M, avec respectivement 14,2 et 13,3 %.

III.3.4. CEC

Les valeurs moyennes de la CEC présentent une variation en fonction la diversité de la position de la pente.

Le couple des positions de la pente B-M présente la valeur la plus forte, avec respectivement, 16,85 et 15,47 cmol/kg suivies par la position H avec 7,20 cmol/kg.

III.3.5. Texture

Les valeurs des fractions granulométriques, argile, limon et sable, changent selon la position de la pente.

Pour l'argile, la valeur moyenne la plus élevée a été enregistrée dans l'ensemble des pentes B-M, avec respectivement, 39,6 et 36,8 % suivies par la pente H avec 10,4 %.

Pour les limons, la pente H enregistre la valeur la plus élevée avec 50,7 suivie par l'ensemble des pentes M-B, avec respectivement, 45,7 et 42,4 %.

Pour le sable, la position H présente la forte valeur avec 41,4 % suivie par l'ensemble M-B, avec respectivement, 21,8 et 17 %.

L'ensemble des fractions granulométriques montre que le sol dans le site C à une texture limono-argileuse dans la basse-pente et la mi-pente, alors que dans la haute-pente la texture est sablo-limoneuse selon la classification USDA.

Discussion et conclusion

Il ressort de la caractérisation de l'horizon travaillé dans le site C que, l'effet de la pente est très important sur le changement de toutes les propriétés physicochimiques du sol. Cependant, l'argile, le limon, la CEC et la CE diminuent selon le gradient de la pente comparativement au sable, CaCO₃ et pH. Ceci est dû à l'érosion du sol qui entraîne un enrichissement de la zone basse, directement en argile, limon et les sels solubles CE et indirectement en CEC.

Cette étude de caractérisation physicochimique de l'horizon travaillé (horizon de surface) permet de tirer certaines informations concernant l'homogénéité du sol dans les différentes parcelles étudiées.

Le sol du site A qui correspond au dispositif expérimental est généralement spatialement homogène (effet non significatif des blocs expérimentaux).

Le processus géomorphologique (la pente) est suffisamment fort pour la variabilité spatiale du sol dans les parcelles des sites B et C.

L'effet des systèmes de travail du sol sur les propriétés physicochimiques est statistiquement significatif seulement pour le pH et la CEC.

CHAPITRE IV : CHANGEMENT DE LA QUALITE STRUCTURALE ET DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE

Ce chapitre est consacré à l'étude du changement de la structure morphologique et analytique du sol, ainsi que, la dynamique de la matière organique dans le contexte général (effet des systèmes de travail du sol) et dans le contexte du semis direct (effet de la durée de l'adoption du système de semis direct) dans deux profondeurs de mesure 0-10 cm et 10-20 cm.

Pour cela, cette étude a été réalisée sur des sols de même texture (limono-argileuse), c'est-à-dire que, sur le sol dans le site A et les sols de bas pente dans les sites B et C (Annexe 4, 5 et 6). Cependant, dans le contexte général, les résultats du site A permettent d'étudier le changement de la qualité du sol à court terme de l'adoption du semis direct (< 3 ans). Les résultats des autres sites B et C permettront de confirmer ou d'infirmer les tendances observées sur le site A.

Par ailleurs, dans le contexte du semis direct, nous présentons l'évolution temporelle de la qualité du sol et leurs prédictions par rapport au changement.

Deux points composent ce chapitre. Le premier est consacré aux changements de la structure morphologique et analytique du sol. Ces résultats sont ensuite discutés. Le second point est consacré à l'étude du changement de la dynamique de la matière organique. Ces résultats sont, aussi, discutés.

IV.1. STRUCTURE MORPHOLOGIQUE ET ANALYTIQUE DU SOL

IV.1.1. Structure morphologique du sol SS

La description morphologique de la structure du sol SS s'est faite au mois d'avril 2017.

Les 5 échelles de scores (Sq) attribuées à l'indicateur de la SS selon la description et la notation (score= Sq) de la charte Guimarães *et al.* (2011) sont données dans le chapitre II.2. 2. Structure morphologique.

IV.1.1.1.Contexte général

La photo IV.1 illustre l'organisation structurale entre les systèmes de travail du sol, SD3, TM et TC, selon la profondeur dans le site A.

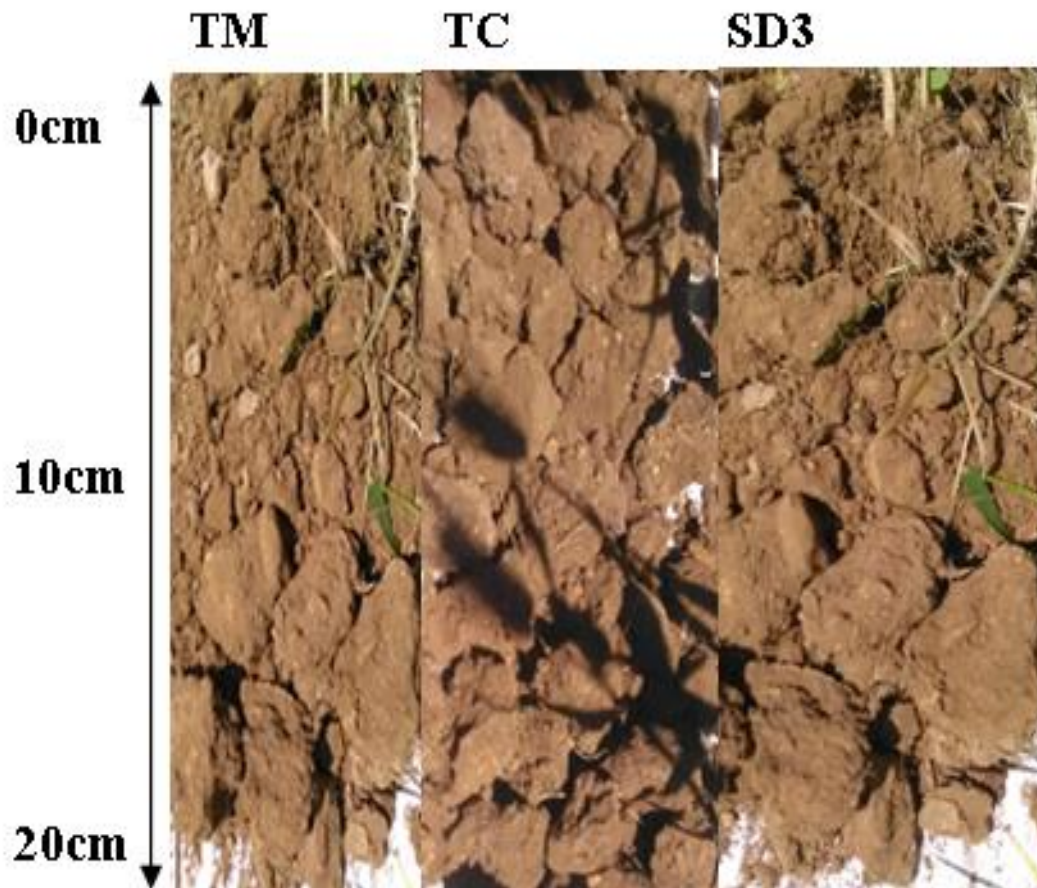


Photo IV.1 : Organisation structurale entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur dans le site A

Dans le SD3, la plupart des agrégats du sol sont de structure grumeleuse mélangé avec des résidus de récolte, de taille $< 1\text{cm}$, très poreux et entièrement colonisées par les racines à la profondeur 0-10cm. Par contre à la profondeur 10-20 cm, la structure du sol est très compacte. Le sol présente de gros agrégats 5-7 cm, très peu poreux et entourées par des racines.

Dans la parcelle soumise à TM, la structure du sol est subangulaire de taille 2-4 cm, poreux et entièrement colonisées par des racines dans les deux profondeurs du sol. Par conséquent, ce sol se caractérise par une structure friable et homogène dans les deux profondeurs.

Dans la parcelle soumise au TC, la structure du sol est angulaire, de taille 4- 6 cm, peu poreuse, à la profondeur 0-10 cm. A la profondeur de 10-20 cm, les agrégats sont subangulaires, de taille 6-8 cm colonisés et entourés par les racines.

Le tableau IV.1 résume le classement des moyennes de score entre ces différents systèmes culturaux selon les profondeurs de mesure dans le site A.

Tableau IV.1 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la structure du sol (score) selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
TC	3,3 b	2,3 a
TM	2,3 b	2 a
SD3	1,3 a	4,3 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

L'analyse de ce tableau met en évidence la modification de la SS par les systèmes de travail du sol. Il montre un effet statistiquement significatif de système de travail du sol pour les deux profondeurs.

A 0-10 cm de profondeur, la forte valeur du score de la structure du sol est observée dans le TC avec 3,3 (compacte) suivie par le TM avec 2,3 (intact) et le SD3 avec 1,3 (friable).

A 10- 20 cm de profondeur, le sol en SD3 présente la plus forte valeur du score avec 4,3 (compact) suivie par l'ensemble de systèmes de travail du sol TC-TM avec respectivement 2,3 et 2 (intact).

La photo IV.2 illustre l'organisation structurale entre les systèmes de travail du sol SD9, SD6 et TCJ selon la profondeur du sol.

Dans la parcelle SD9, les agrégats du sol sont de structure grumeleuse mélangé avec des résidus de récolte, de taille < 1 cm, très poreux et entièrement colonisés par les racines à la profondeur 0-10 cm. A la profondeur 10-20 cm, les agrégats sont de structure subangulaire, de taille 2-4 cm, poreux, entourés par les racines.

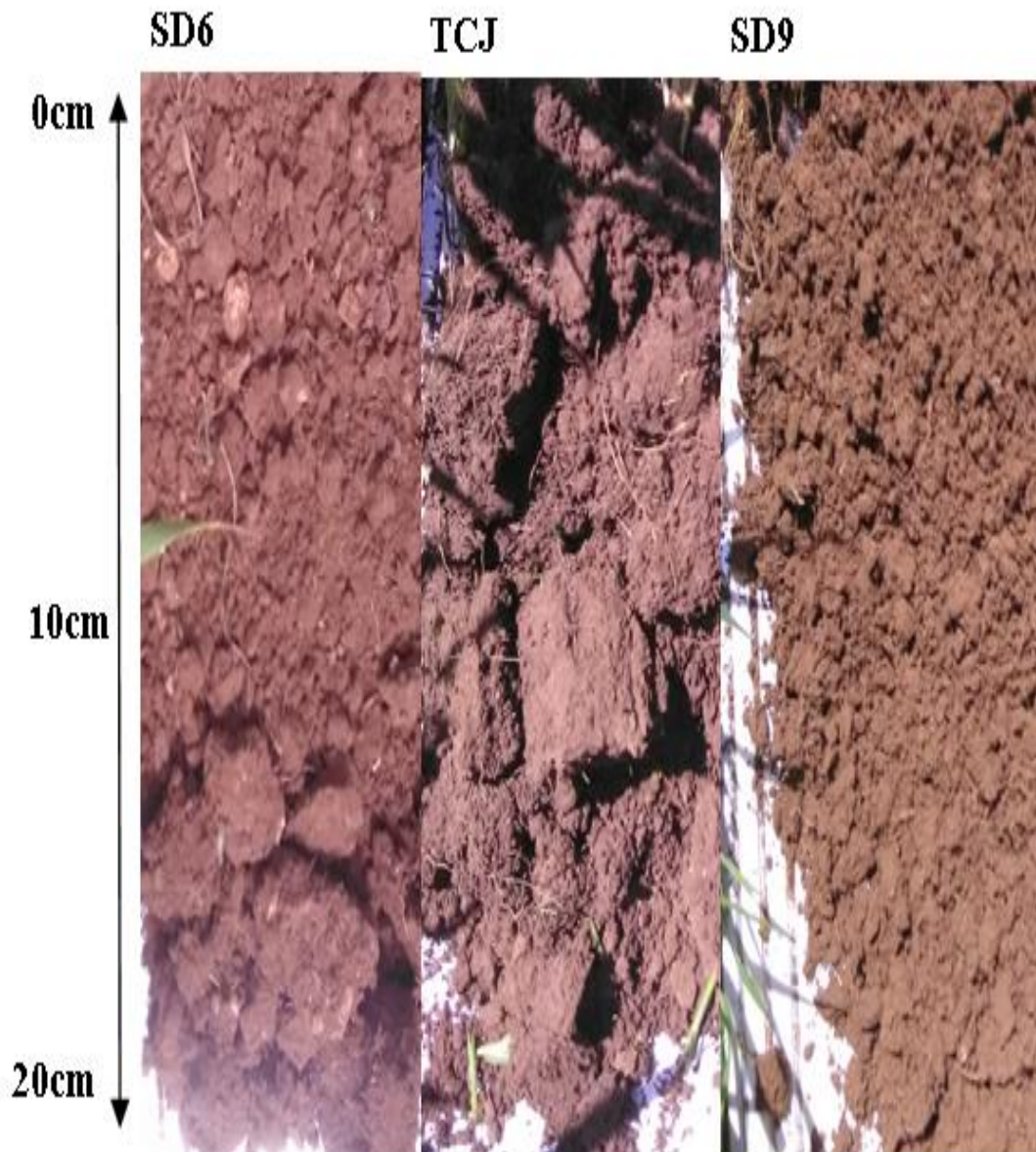


Photo IV.2 : Organisation structurale entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur dans les sites B et C

Dans la parcelle SD6, la structure du sol est subangulaire de taille 2- 4 cm, poreuse et entièrement colonisées par des racines à la profondeur 0-10cm. A la profondeur 10-20 cm, la structure du sol est subangulaire, de taille 4-6 cm, peu poreuse et entourée par les racines.

Dans la parcelle TCJ, les agrégats sont de taille 4 - 6 cm, peu poreux, subangulaires à la profondeur 0-10 cm. A la profondeur 10-20 cm, la structure du sol est subangulaire, de taille 8-10 cm, peu poreuse et entourée par les racines.

L'analyse de comparaison des moyennes du score de la structure morphologique entre ces systèmes de travail du sol selon les profondeurs de mesure est présentée dans le tableau IV.2. Ce tableau montre qu'il y a une différenciation statistiquement significative du score de la structure du sol entre les systèmes de travail du sol aux deux profondeurs du sol.

A 0-10 cm de profondeur, le sol soumis au TCJ enregistre la plus forte valeur du score avec 2,6 (intact) suivi par l'ensemble SD6-SD9, avec respectivement, 1,3 et 1 (friable).

A 10- 20 cm de profondeur, l'ensemble des systèmes de travail du sol TCJ-SD6 engendrent les valeurs les plus fortes avec un score de 3 (ferme) suivis par le système SD9 avec un score de 1,6 (friable).

Tableau IV.2 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la structure du sol (score) selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
TCJ	2,6 b	3 b
SD6	1,3 a	3 b
SD9	1 a	1,6 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

IV.1.1.2. Contexte du semis direct

Les figures IV.1 et IV.2 illustrent l'évolution temporelle de la SS dans le contexte du semis direct et aux profondeurs 0-10 cm et 10-20 cm.

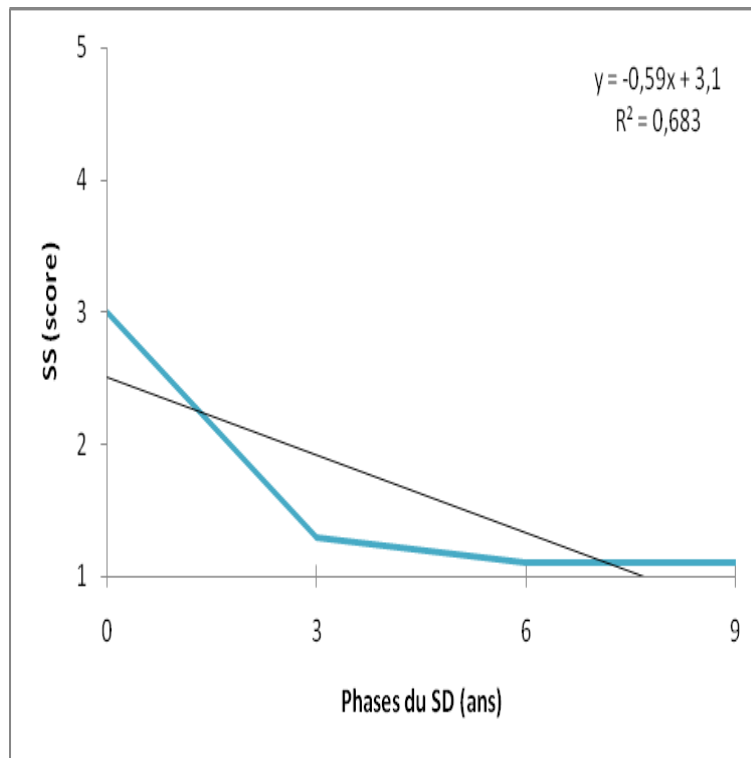


Figure IV.1 : Evolution temporelle de la structure du sol (score) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

A la profondeur 0-10 cm, la modification de SS est corrélée négativement aux durées de l'adoption du SD (t) avec $R^2 = 0,68$ et selon le modèle linéaire:

$$\text{SS (score)} = - 0,59 t + 3,1$$

Au bout de 3 ans d'adoption du SD, il y a une amélioration très importante de la SS équivalente à 67 %. Au-delà des 3 années, l'amélioration de SS est très faible et représente 5 %.

A la profondeur 10-20 cm, la modification de SS durant les différentes phases d'adoption du SD est non linéaire mais polynomiale.

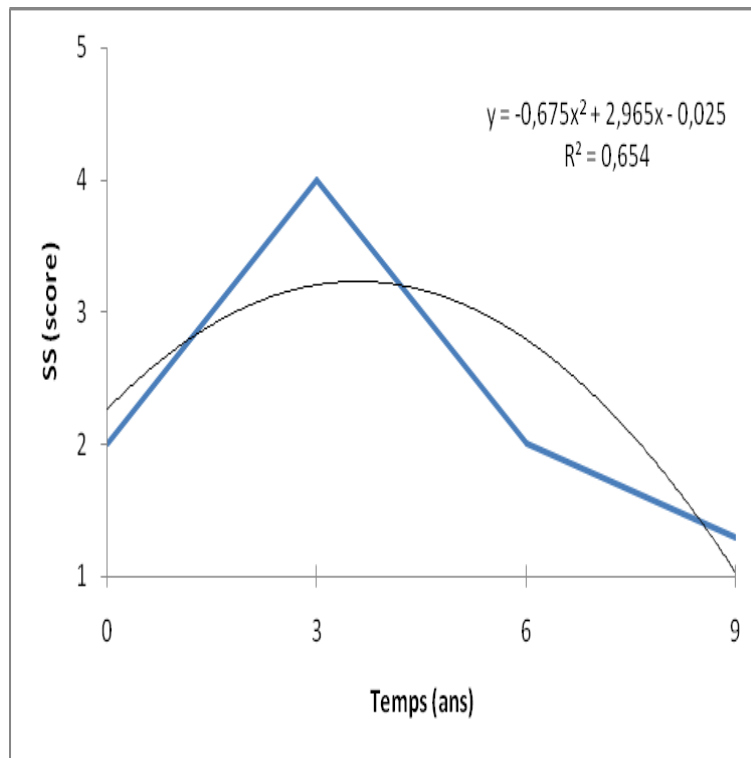


Figure IV.2 :. Evolution temporelle de la structure du sol (score) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

La SS est corrélée négativement à la durée d'adoption du SD avec $R^2 = 0,65$ et selon le modèle :

$$SS (\text{score}) = -0,675 t^2 + 2,965 t - 0,025$$

Comparativement à la phase initiale $t_0 = TC$, la durée t_3 d'adoption du SD permet de dégrader la SS avec une augmentation de leur score équivalente à 100 %. Après ce temps, le SD a amélioré progressivement la SS, atteignant 50 % au niveau de la durée t_9 .

IV.1.2. Densité apparente D_a

IV.1.2.1. Contexte général

Le tableau IV.3 résume le classement des moyennes de la D_a entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur dans le site A. il révèle une modification, statistiquement significative entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur de mesure.

Tableau IV.3 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la densité apparente (g/cm^3) selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
TC	1,56 b	1,53 a
TM	1,48 a	1,51 a
SD3	1,43 a	1,61 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

A la profondeur 0- 10 cm, le système de TC présente une $D_a = 1,56 \text{ g/cm}^3$, significativement supérieure à la D_a de l'ensemble des systèmes de travail du sol TM-SD3, avec respectivement, $1,48 \text{ g/cm}^3$ et $1,43 \text{ g/cm}^3$.

A la profondeur 10-20cm, le système SD présente la plus forte D_a avec $1,61 \text{ g/cm}^3$ suivi par le groupe homogène TC-TM, avec respectivement, $1,53 \text{ g/cm}^3$ et $1,51 \text{ g/cm}^3$.

Le tableau IV.4 présente le classement des moyennes de la D_a à $p < 0,05$ entre les systèmes de travail du sol dans les sites B et C selon la profondeur. L'analyse de ce tableau montre qu'il y a une différence statistiquement significative entre les valeurs moyennes de D_a dans les sites B et C selon la profondeur de mesure.

Tableau IV.4 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la densité apparente (g/cm^3) selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
TCJ	1,52 b	1,55 b
SD6	1,42 a	1,54 b
SD9	1,41 a	1,49 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

A la profondeur 0-10 cm, le système TCJ enregistre une valeur moyenne de $Da = 1,55\text{g/cm}^3$ nettement supérieure à celles des système de travail du sol SD6- SD9, avec respectivement, $1,42\text{g/cm}^3$ et $1,41\text{g/cm}^3$.

A la profondeur 10-20cm, l'ensemble du système TCJ- SD6 enregistre une forte valeur de Da , avec respectivement, $1,55$ et $1,54\text{g/cm}^3$ par rapport au système SD9 avec $1,49\text{g/cm}^3$.

IV.1.2.2.Contexte du semis direct

Les figures IV.3 et IV.4 illustrent l'évolution temporelle de la Da dans le contexte du SD dans les profondeurs 0-10 cm et 10-20cm.

A la profondeur 0-10 cm, le changement de la Da est corrélé négativement à la durée d'adoption du SD avec $R^2 = 0,68$. Ce changement suit le modèle linéaire simple :

$$Da (\text{g/cm}^3) = -0,058 t + 1,61$$

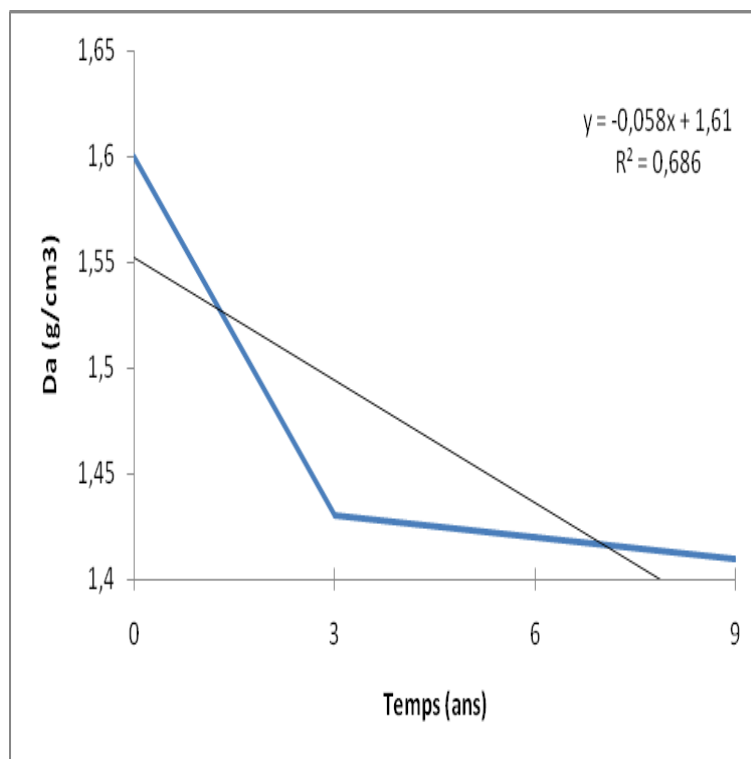


Figure IV.3 : Evolution temporelle de la densité apparente (g/cm₃) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

Le SD provoque l'amélioration de la Da selon la durée de son adoption. Cette amélioration est très importante et représente 10 %, dès les premières années (t_3). Puis, cette amélioration est presque stable de t_6 à t_9 . A la profondeur 10-20 cm, le changement de la Da dans les différentes

durées d'adoption du SD est non linéaire, non progressif. La relation est polynomiale avec $R^2 = 0,81$:

$$Da \text{ (g/cm}^3\text{)} = -0,042 t^2 + 0,181 t + 1,422$$

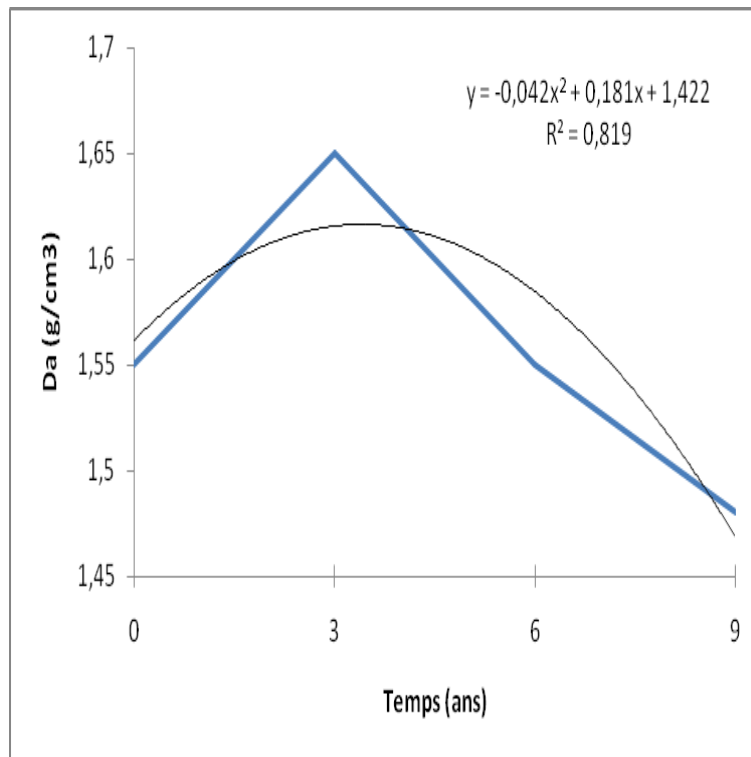


Figure IV.4 : Evolution temporelle de la densité apparente (g/cm³) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

Dans la profondeur 10 – 20cm, l'adoption du SD pendant 3 ans provoque une compaction du sol plus que le système TC, représentant 10 %. Puis, cette contrainte est améliorée pour les durées de 6 et 9 ans d'adoption du SD.

IV.1.3. Résistance à la pénétration racinaire RP

IV.1.1.3.1. Contexte général

Le tableau IV.5 présente le classement des moyennes de la RP selon la profondeur de mesure dans le site A. L'analyse de ce tableau montre que, les valeurs moyennes de RP entre les systèmes de travail du sol présentent une différence statistiquement significative à $p < 0,05$, selon la profondeur du sol.

Tableau IV.5 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la résistance à la pénétration racinaire (Mpa) selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
TC	1,90 c	1,80 a
TM	1,70 b	1,70 a
SD3	1,40 a	2,70 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

A la profondeur 0-10 cm, l'ensemble des systèmes de travail du sol, TC-TM, provoque l'augmentation de RP, avec respectivement 1,90 et 1,70 Mpa, par rapport au SD3 avec 1,40 Mpa.

Au contraire, à la profondeur 10-20cm, le SD3 a montré une augmentation de la RP avec 2,70 Mpa, par rapport au TC-TM, avec respectivement, 1,80 et 1,70 Mpa.

Le tableau IV.6 résume le classement des moyennes de la RP selon la profondeur de mesure dans les sites B et C.

Tableau IV.6 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la résistance à la pénétration racinaire (Mpa) selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
TCJ	1,80 b	1,90 a
SD6	1,30 a	1,90 a
SD9	1,20 a	1,80 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

D'après ce tableau, le changement de RP entre les systèmes de travail du sol dans les sites B et C est statistiquement significatif seulement à la profondeur 0-10cm.

A la profondeur 0-10cm, le TCJ enregistre les valeurs les plus élevées de RP avec 1,80 Mpa suivi par le groupe des systèmes de travail du sol, SD6-SD9, avec respectivement, 1,30 et 1,20 Mpa. A la profondeur 10-20cm, ce changement est très faible, il oscille entre 1,90 et 1,80 Mpa.

IV.1.1.3.2.Contexte du semis direct

Les figures IV.5 et IV.6 illustrent l'évolution temporelle de la RP dans le contexte du semis direct dans les profondeurs de mesure 0-10 cm et 10-20cm, A la profondeur 0-10cm, le changement de RP est corrélé négativement à la durée d'adoption du SD avec $R^2 = 0,77$ en suivant le modèle linéaire : $RP \text{ (Mpa)} = -0,186 t + 1,965$

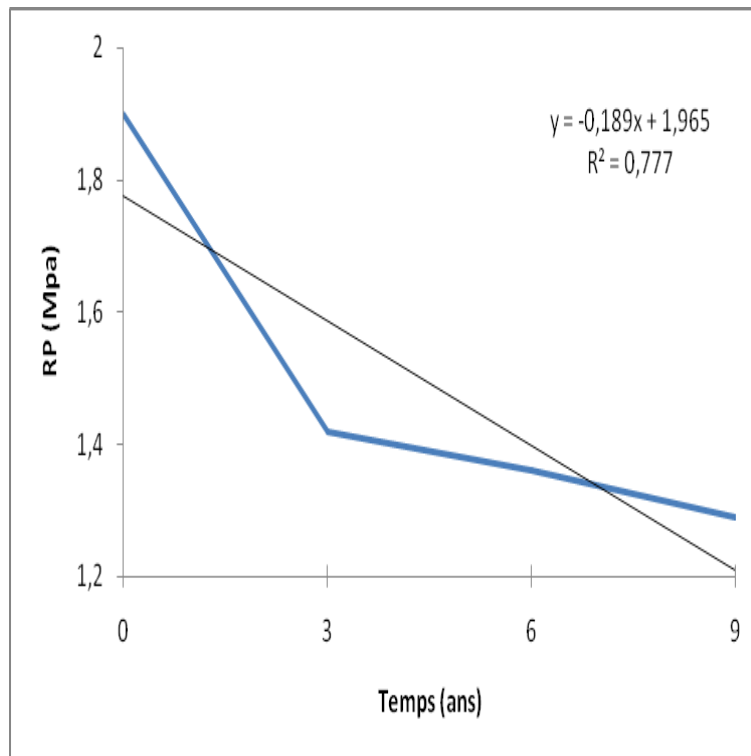


Figure IV.5 :Evolution temporelle de la résistance à la pénétration racinaire (Mpa) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

Dès les premières années d'adoption du SD, 3 ans, l'amélioration de RP est importante et équivalente à 30 % et elle peut atteindre 35 % pour la durée d'adoption de 9 ans. Par contre, à la profondeur 10-20cm, le changement de RP est non linéaire durant l'adoption du SD. Ce changement présente une relation polynomiale avec la durée d'adoption du SD avec $R^2 = 0,78$ comme suit: $RP \text{ (Mpa)} = -0,365 t^2 + 1,611 t + 0,655$

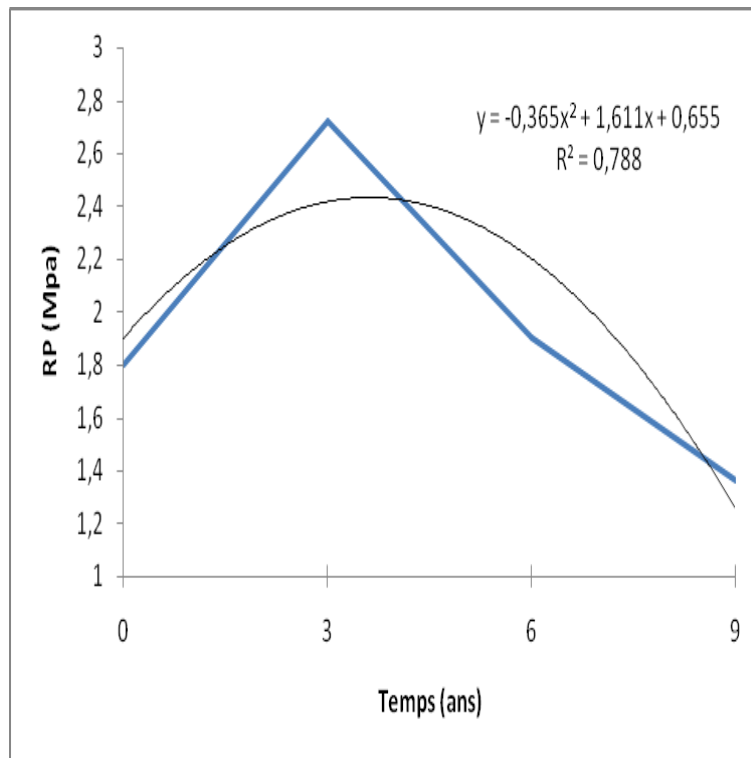


Figure IV.6 :Evolution temporelle de la résistance à la pénétration racinaire (Mpa) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

Les premières années d'adoption de SD (t3), le SD provoque une mauvaise pénétration racinaire à cette profondeur, représentant 30 % par rapport à la phase initiale TC = t0. Ainsi, cette limite est améliorée progressivement dans le temps jusqu'à atteindre, 15 % au niveau de t9.

IV.1.4. Stabilité des agrégats SA

IV.1.4.1.Contexte général

Le tableau IV.7 met en évidence le classement des moyennes de la SA entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur du sol dans le site A.

Tableau IV.7 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la stabilité des agrégats (mm) selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
TC	1,04 a	1,21 a
TM	1,27 b	1,18 a
SD3	1,51 c	0,94 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

L'analyse de ce tableau révèle une différence statistiquement significative de SA entre les traitements aux deux profondeurs.

A 0-10 cm de profondeur, le SD3 montre une forte SA avec 1,51mm, suivi par TM avec 1,27 mm et TC avec 1,04 mm.

A 10-20 cm de profondeur, la forte SA a été obtenu par l'ensemble de traitement TC- TM, avec respectivement 1,21 et 1,18 mm, suivi par SD3 avec 0,94 mm.

Les résultats de classement des moyennes de la SA dans les sites B et C sont présentés par le tableau IV.8.

Tableau IV.8 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la stabilité des agrégats (mm) selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
TCJ	1,12 a	1,18 a
SD6	1,66 b	1,45 b
SD9	1,86 c	1,55 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

D'après ce tableau, la différence des valeurs de SA entre les systèmes de travail du sol aux deux profondeurs du sol est statistiquement significative à $p < 0,05$.

Les traitements SD9 et SD6 obtiennent une forte SA par rapport au TCJ aux deux profondeurs du sol. A la profondeur 0-10cm, les valeurs de SA sont, respectivement, de 1,86 et 1,66 mm ; à la profondeur 10-20cm ces valeurs sont respectivement de 1,55 et 1,45.

IV.1.5.2.Contexte du semis direct

L'illustration de l'évolution temporelle de la SA dans le contexte du semis direct à la profondeur 0-10 cm et 10-20 cm est présentée dans les figures IV.7 et IV.8.

A la profondeur 0-10cm, l'évolution de SA est très étroitement liée aux durées d'adoption du SD. Cette relation est positive avec $R^2 = 0,93$ selon le modèle linéaire:

$$SA \text{ (mm)} = 0,261 t + 0,865$$

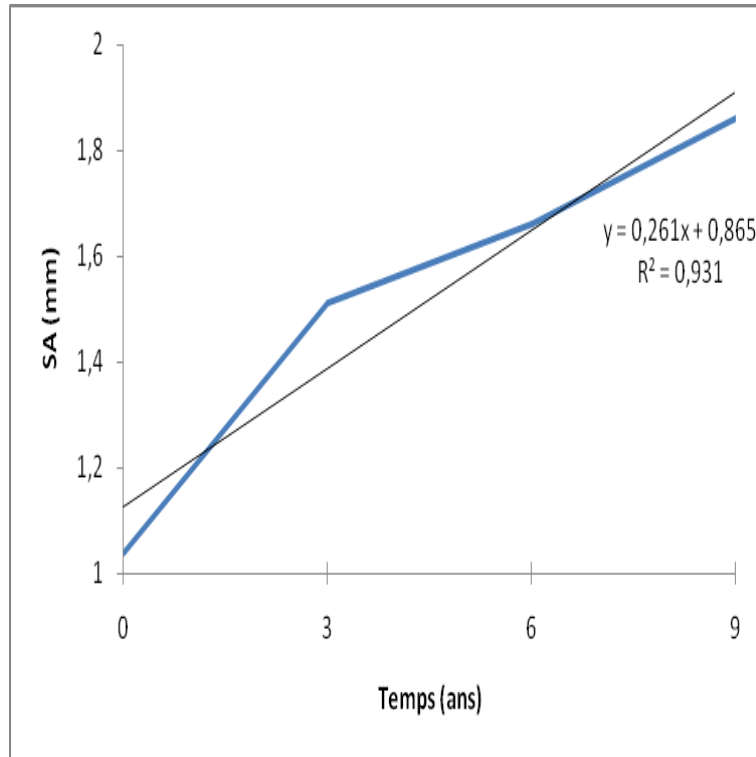


Figure IV.7 : Evolution temporelle de la stabilité des agrégats (mm) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

Dès les première années de l'adoption du SD (3 ans), la SA augmente progressivement et peut atteindre 40 % durant la dernière phase de son adoption (9ans), par rapport à la phase initiale $t_0 = TC$.

Par contre, à la profondeur 10-20 cm, cette relation est polynomiale positive avec $R^2 = 0,68$ selon le modèle : $SA \text{ (mm)} = 0,092 t^2 - 0,309 t + 1,367$

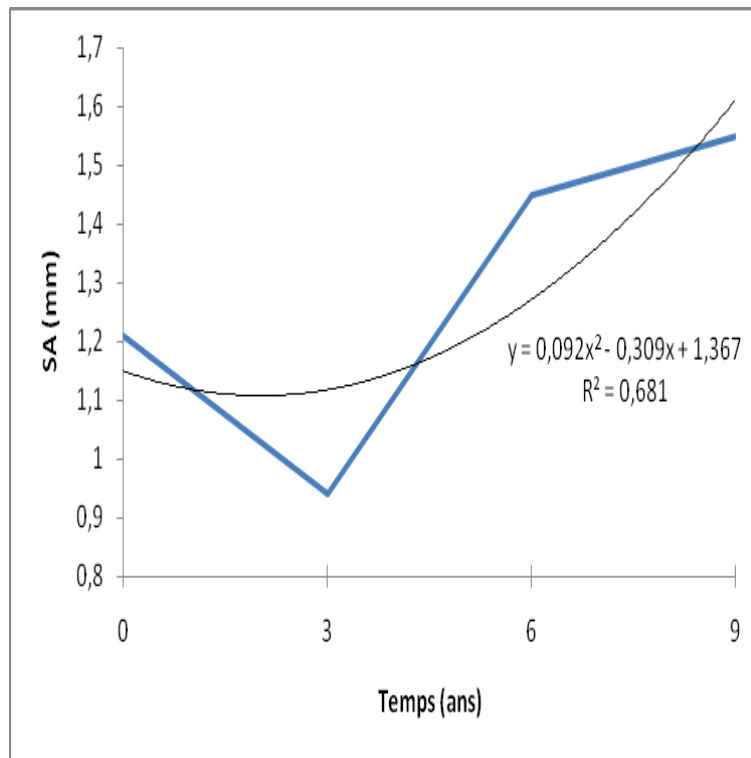


Figure IV.8 : Evolution temporelle de la stabilité des agrégats (mm) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

Durant les premières années du SD (3 ans), il y a une mauvaise stabilité des agrégats, équivalente à 20 %, alors que les dernières années du SD (9 ans) il y a une amélioration de cette propriété équivalente à 30 % par rapport à TC.

IV.1.5. Rétention en eau

IV.1.5.1. Contexte général

Le tableau IV.9 présente la comparaison statistique de la teneur en eau au pF2,7 (à capacité de rétention) et au pF4,2 (point de flétrissement permanent) entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur dans le site A.

Au pF2,7, le SD3 et le TM occasionnent une supériorité statistiquement significative de la teneur en eau à la profondeur 0-10cm, avec respectivement 37,4 % et 36,8 % par rapport au TC. A 10-20 cm de profondeur, la forte teneur en eau a été obtenue par SD3 avec 38,6% par rapport à l'ensemble du système TC-TM.

Tableau IV.9 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la rétention en eau (%) aux pF2,7 et pF4,2 selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
pF2,7		
TC	35,2 a	36,3 a
TM	36,8 ab	36,6 a
SD3	37,4 b	38,6 b
pF4,2		
TC	25,3 a	25,1 a
TM	25,5 a	25,2 a
SD3	25,5 a	24,8 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

Au pF 4,2, l'analyse de la variance met en évidence une similarité de cette teneur entre les trois systèmes de travail du sol dans les deux profondeurs de mesure. Cependant, cette rétention en eau oscille entre 25,3 et 25,5 % à la profondeur 0-10cm. Alors, qu'à la profondeur 10-20cm, cette teneur est comprise entre 24,8 et 25,2%.

Le tableau IV.10 présente le classement des moyennes de la teneur en eau au pF2,7 et pF4,2 entre les systèmes de travail du sol dans les sites B et C selon la profondeur.

L'analyse de ce tableau révèle une hétérogénéité statistiquement significative des teneurs en eau entre les systèmes SD9, SD6 et TCJ uniquement pour le pF2,7 et dans la profondeur 0-10cm. A cette profondeur, les systèmes SD9-SD6 engendre une augmentation importante de la teneur en eau à la capacité de rétention pF2,7, avec respectivement, 38,2 37,8 % par rapport au TCJ. Cette teneur en eau oscille entre 37,5 et 38,1% à la profondeur 10-20cm.

Tableau IV.10 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la teneur en eau aux pF 2,7 et pF4,2 selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
pF2,7		
TCJ	35,3 a	37,5 a
SD6	37,8 ab	37,8 a
SD9	38,2 b	38,1 a
pF4,2		
TCJ	25,2 a	25,8 a
SD6	25,8 a	25,1 a
SD9	26,1 a	25,3 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

Au pF4,2, la variation de la rétention en eau est statistiquement non significative. En effet, cette rétention oscille entre 25,1 et 25,8 %.

IV.1.5.2.Contexte du semis direct

Les figures IV.9 et IV.10 illustrent l'évolution temporelle de la rétention en eau au pF2,7 (capacité de rétention) dans le contexte du semis direct dans les profondeurs de mesure 0-10 cm et 10-20cm.

A la profondeur 0-10 cm, la rétention en eau au pF2,7 est corrélée positivement à la durée d'adoption du SD (t) avec une relation $R^2 = 0,76$ et selon le modèle linéaire:

$$\text{Rétention en eau au pF2,7 (\%)} = 1,237t + 34,83$$

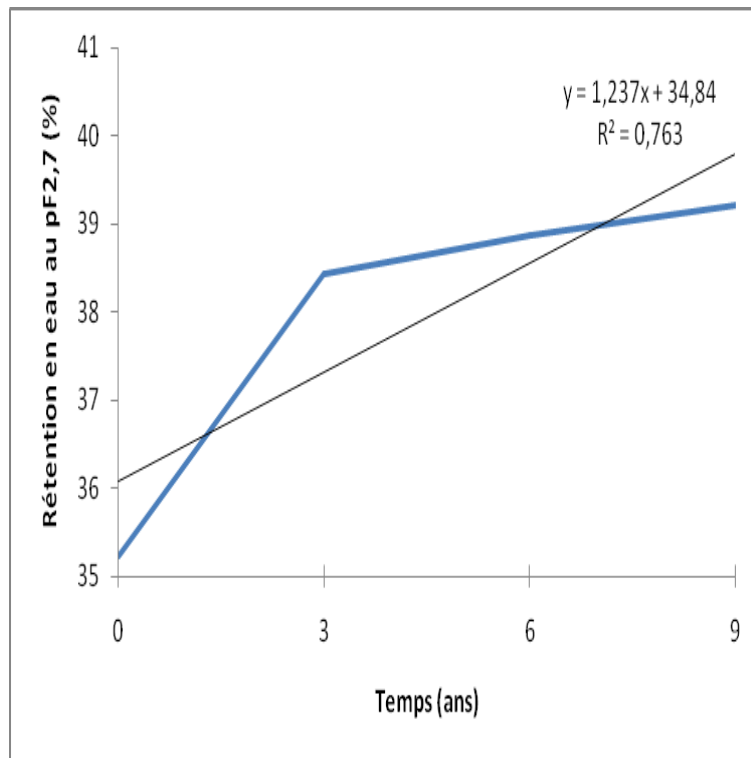


Figure IV.9 : Evolution temporelle de la rétention en eau au pF2,7 (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

La durée de 3 ans d'adoption du SD permet une forte amélioration de la de la teneur en eau à la capacité de rétention, équivalente à 10 %. Cette amélioration peut atteindre 15 % au bout de 9 ans de son adoption.

A la profondeur 10-20 cm, la relation entre la durée d'adoption du SD et la teneur en eau est positive et polynomiale avec $R^2 = 0,56$ selon le modèle :

$$\text{Rétention en eau au pF2,7 (\%)} = 0,495 t^2 - 1,761 t + 38,25$$

Comparativement à la phase initiale $t_0 = TC$, la durée t_3 , d'adoption du SD permet de diminuer la rétention en eau équivalente à 10 %. Au-delà de cette durée, le SD améliore cette rétention progressivement et passe à 15 % pour la durée t_9 de son adoption.

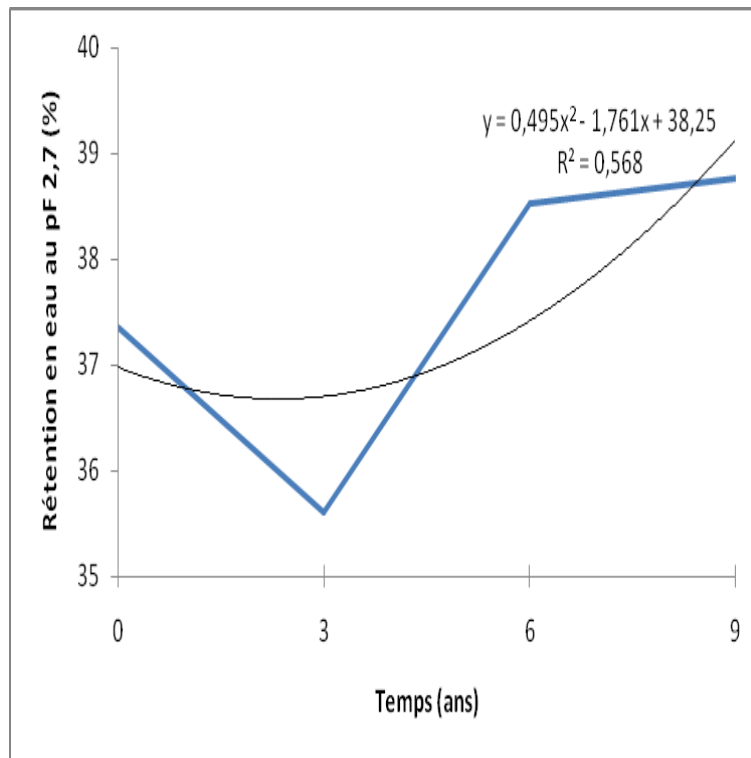


Figure IV.10 : Evolution temporelle de la rétention en eau au pF2,7 (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

IV.1.6. Distribution porale

IV.1.6.1. Contexte général

Le tableau IV.11 met en évidence les résultats d'analyse du classement des moyennes de la macroporosité MP et la microporosité mP entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur du sol dans le site A.

Pour la macroporosité MP, le SD3 présente une valeur statistiquement plus élevée avec 12,1 % comparativement au groupe du système TM-TC, avec respectivement, 9,8% et 8,5 à la profondeur de 0-10 cm.

Par contre à 10-20 cm de profondeur, la forte MP a été observée dans le groupe du système TC et TM, avec respectivement 9,13% et 8,8 % par rapport SD3 avec 6,7 %.

Pour la microporosité mP, la différenciation entre les systèmes de travail du sol est très faible et statistiquement non significatif. Elle oscille entre 37,3 et 37,8%.

Tableau IV.11 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la macroporosité (%) et microporosité (%) selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
Macroporosité (MP)		
TC	8,5 a	9,1 b
TM	9,8 a	8,8 b
SD3	12,1 b	6,7 a
Microporosité (mP)		
TC	37,7 a	37,2 a
TM	37,3 a	36,9 a
SD3	37,8 a	41,1 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

Dans les sites B et C, les résultats de la variance de MP et mP entre les systèmes de travail du sol SD9, SD6 et TCJ selon la profondeur de mesure sont résumés dans le tableau IV.12. L'analyse de ce tableau montre une variation statistiquement significative entre les systèmes de travail du sol observée uniquement pour MP à la profondeur 0-10cm. Cependant, le groupe des systèmes du travail du sol SD9-SD6 permet d'augmenter la MP, avec respectivement 13,3% et 12,9 % par rapport au TCJ. Par ailleurs, la valeur de MP oscille entre 9,5 et 10,2 % à la profondeur 10-20cm.

Pour la mP, l'ensemble des profondeurs du sol 0-20cm dans les sites B et C se caractérisent par un taux de porosité qui oscille entre 36,5 et 37,8 %.

Les résultats du changement de la distribution porale dans les différents sites A, B et C montrent, aussi que, la majorité de la porosité du sol, plus de 60 %, est présentée par les micropores (<6,12 μm).

Tableau IV.12 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de la macroporosité (%) et microporosité (%) selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
Macroporosité (MP)		
TCJ	8,9 a	10,2 a
SD6	12,9 b	9,5 a
SD9	13,3 b	9,8 a
Microporosité (mP)		
TCJ	36,9 a	37,8 a
SD6	37,6 a	36,5 a
SD9	37,8 a	36,7a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

IV.1.6.2.Contexte du semis direct

La figure IV.11 révèle une évolution progressive et positive de la MP en contexte du semis direct dans la profondeur de mesure 0-10 cm. Cependant, MP présente une relation étroite, $R^2 = 0,86$, avec les durées d'adoption du SD (t) et suivant le modèle linéaire:

$$\mathbf{MP\ (\%) = 0,667t + 35,39}$$

La durée d'adoption du SD de 3 ans permet d'augmenter la MP équivalente à 8 %. Cette amélioration peut atteindre 10 % au bout de 9 ans de son adoption.

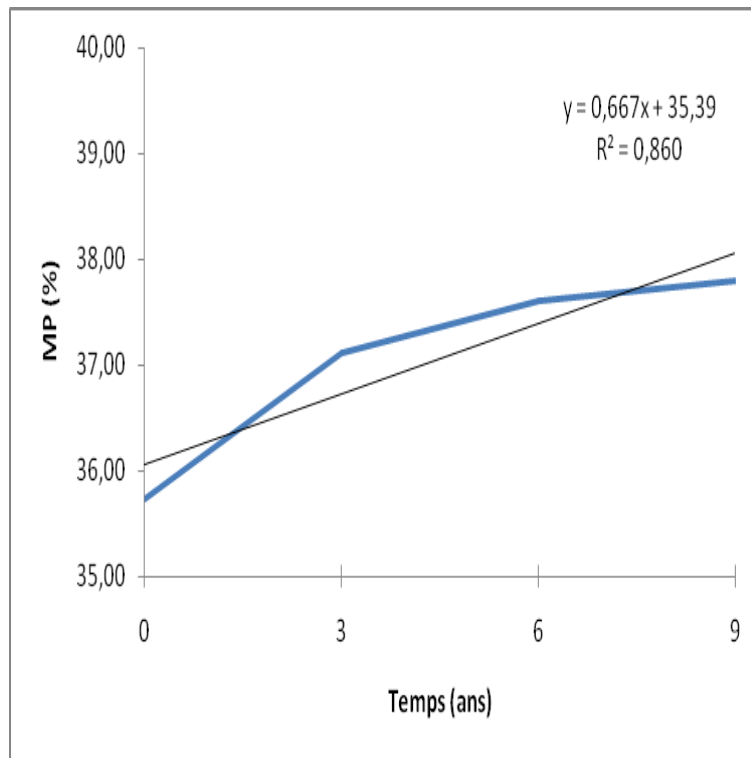


Figure IV.11 : Evolution temporelle de la macroporosité (%) à la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

Discussion

La structure du sol est le résultat, à un moment donné, de l'équilibre entre les phénomènes de tassement (par les passages d'engins agricoles notamment en conditions humides d'intervention), de fragmentation (par le travail du sol et/ou les organismes du sol) et de déplacement par le travail du sol (Roger-Estrade *et al.*, 2000). Cette propriété a été mise en évidence par la description morphologique et analytique à deux profondeurs de mesure : 0-10 cm et 10-20 cm.

La qualité structurale dans les systèmes de travail du sol TC et TCJ est presque identique dans les deux profondeurs de mesure.

A la profondeur 0-10cm, ces deux systèmes (TC et TCJ) favorisent la dégradation de la structure du sol par rapport aux systèmes de travail du sol. Ceci est dû au passage des engins et le fractionnement de la bande du labour avec le cover-crop et la herse rotative dans TC et par le cover-crop uniquement dans TCJ. Tandis qu'à la profondeur 10-20 cm, la qualité structurale dans TC est identique à celle de TM, TCJ et SD6. Ces états structuraux sont les meilleurs par rapport au SD3 et mauvaises par rapport au SD9. Ceci est dû au retournement de la bande de labour par la charrue.

Par rapport au TC, la qualité structurale dans le contexte du SD est étroitement liée à la durée de leur adoption et à la profondeur du sol.

A la profondeur 0-10 cm, dès les premières années de l'adoption du SD (3 ans), la qualité structurale a été améliorée (friable). Ceci est dû au non travail du sol qui provoque une accumulation importante de résidus de récolte, ces derniers favorisent l'activité biologique. C'est-à-dire que dans ce système, la création et l'évolution de la structure du sol est favorisée par le processus biologique. Cette amélioration est progressive (une relation linéaire) selon la durée de l'adoption du SD.

Par contre, à la profondeur 10-20 cm, l'évolution temporelle de la structure du sol dans le contexte du SD est non linéaire, elle est polynomiale quadratique. Il apparaît que, les premières années de l'adoption du SD engendrent une très mauvaise qualité structurale (compacte). Ceci est due à la courte durée de l'adoption, 03 ans, qui ne permet pas une amélioration de la structure du sol à texture fine (Jemai *et al.*, 2013 ; Plaza-Bonilla *et al.*, 2013 ; Belhadj, 2014 ; Celik *et al.*, 2020).

Ces observations morphologiques de la structure du sol sont confirmées par les mesures des propriétés physiques de la qualité du sol, en particulier, Da, RP, SA, pF2.7, pF4,2, MP et mP dans la deux profondeurs de mesure.

A la profondeur 0-10 cm, plusieurs travaux dans les différents contexte agropédoclimatiques, Jemai *et al.*, (2013) ; Plaza-Bonilla *et al.*, (2013) ; Belhadj, (2014) ; Celik *et al.* (2020), montrent que l'amélioration de la qualité physique du sol de l'horizon de surface est due à la présence de résidus organiques des cultures précédentes. Plus le stockage de la matière organique est important, plus la qualité physique est améliorée.

IV.2. DYNAMIQUE DE LA MATIERE ORGANIQUE

La dynamique de la matière organique concerne sa répartition en composantes libre (particulaire) et liée (stable), ainsi que leur décomposition (rapport C/N) par les organismes du sol (verts de terre et microorganismes).

IV.2.1. Composantes organiques

Elles concernent la matière organique totale MOT et ses composantes : matière organique particulaire MOP et liée MOL.

IV.2.1.1.Contexte général

Les résultats présentés dans le tableau IV.13 résument le classement des moyennes de la matière organique totale MOT et ses composantes, notamment, la matière organique particulaire MOP et liée MOL entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur de mesure dans le site A.

D'après ce tableau, la concentration de la MOT et sa composante MOP aux deux profondeurs sont les seules qui sont affectées significativement par les systèmes de travail du sol.

Dans ce site, la composante organique MOL présente une différenciation très faible et non significative entre les systèmes de travail du sol. Ces valeurs oscillent entre 1,54 et 1,71 %.

Par rapport aux TC et TM, les concentrations en MOT et MOP de la modalité SD3 sont stratifiées verticalement. Ces concentrations diminuent dans la profondeur 10-20 cm qui n'est plus travaillée où aucun résidu de culture n'est enfoui. Cependant, après 3 ans d'adoption du semis direct, ces concentrations se différencient de celles des modalités TC et TM selon la profondeur de mesure.

La concentration en MOT est observée avec 2,05 % par rapport aux valeurs de TM avec 1,95 % et de TC avec 1,75 %, à la profondeur 0-10cm. En revanche, à la profondeur 10-20 cm, l'augmentation de la MOT a été obtenue par le groupe du système de travail du sol TM-TC, avec respectivement, avec 2,8 et 1,9 %.

La concentration de MOP est très forte en SD3 avec 0,9 % par rapport aux traitements TM et TC, avec respectivement 0,48 et 0,33 %, à la profondeur 0-10 cm. Par contre, à la profondeur 10-20 cm, les traitements TC-TM enregistrent les fortes concentrations, avec respectivement 0,43 et 0,40 %.

Tableau IV.13 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des composantes organiques selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
Matière organique totale (%)		
TC	1,75 a	1,9 b
TM	1,95 b	2,05 b
SD3	2,8 c	1,6 a
Matière organique particulaire (%)		
TC	0,33 a	0,43 b
TM	0,48 b	0,40 b
SD3	0,9 c	0,24 a
Matière organique liée (%)		
TC	1,69 a	1,56 a
TM	1,70 a	1,58 a
SD3	1,71 a	1,54 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

Le tableau IV.14 résume le classement des moyennes de la matière organique totale et ses composantes entre les différents systèmes de travail du sol selon la profondeur de mesure dans les sites B et C.

Tableau IV.14 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ des composants organiques selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
Matière organique totale (%)		
TCJ	1,82 a	1,96 a
SD6	2,8 b	2 b
SD9	2,9 b	2,2 b
Matière organique particulaire (%)		
TCJ	0,5 a	0,4a
SD6	1,09 b	0,5 ab
SD9	1,16 c	0,58 b
Matière organique liée (%)		
TCJ	1,50 a	1,78 a
SD6	1,66 b	1,87 b
SD9	1,70 b	1,90 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

L'analyse de ce tableau révèle que, par rapport au TCJ, les concentrations des différentes composantes de la matière organique, MOT, MOP et MOL, sont statistiquement supérieures dans SD9 et SD6 aux deux profondeurs du sol. La concentration de MOT enregistrée chez SD9 et SD6 est de 2,9 et 2,8 % respectivement à la profondeur 0-10cm et de 2,2 et 2 % à la profondeur 10-20cm. Les traitements SD9 et SD6 montrent des valeurs de MOP de 1,16 et 1,09 % respectivement à la profondeur 0-10 cm. A la profondeur 10-20 cm, cette concentration passe à 0,58 et 0,5 % respectivement. La concentration de MOL a augmenté, jusqu'à atteindre 1,66 et 1,70 % à la profondeur 0-10 cm et 1,87 et 1,90 % à la profondeur 10-20 cm respectivement pour SD9 et SD6.

Les résultats du changement de la matière organique et ses composantes dans les différents sites A, B et C montrent aussi que, la majorité de cette matière organique, plus de 80 %, est liée avec la composante minérale (< 50µm).

IV.2.1.2.Contexte du semis direct

L'évolution temporelle de la matière organique totale MOT et ses composantes MOP et MOL dans les profondeurs de mesure dans le contexte du semis direct est illustrée par différentes figures.

La figure IV.12 montre que, la concentration de MOT dans la profondeur 0-10 cm est corrélée positivement avec la durée d'adoption du semis direct avec $R^2 = 0,71$ selon le modèle linéaire: **MOT (%) = 0,375 t +1,665**

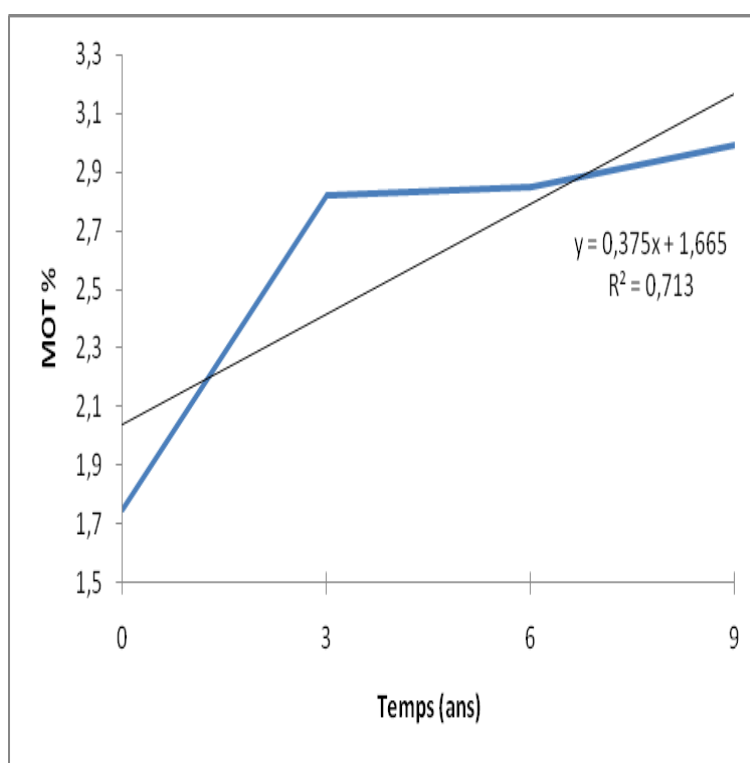


Figure IV.12 : Evolution temporelle de la matière organique totale (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

Par contre, la modification de MOT à la profondeur 10-20 cm est non linéaire (Figure IV.13). Elle présente une bonne relation avec les durées de l'adoption du SD avec $R^2 = 0,80$ et selon le modèle polynomial : **MOT (%) = 0,105 t² - 0,399 t +2,155**

Par conséquent, la concentration de la MOT évolue progressivement de façon positive et linéaire avec les durées de l'adoption du SD à 0-10 cm de profondeur et de façon polynomiale

quadratique à la profondeur de 10-20 cm. Cette concentration représente C'est-à-dire 50 % durant la première phase de l'adoption et 60 % durant la dernière phase par rapport à TC à la profondeur 0-10cm.

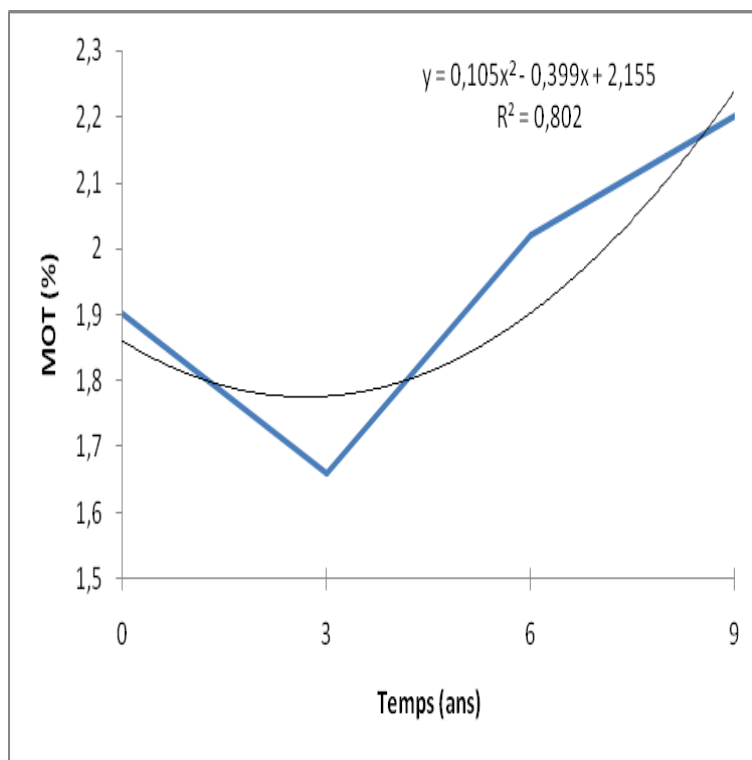


Figure IV.13 :Evolution temporelle de la matière organique totale (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

Cette tendance, au contraire, est différente à la profondeur 10-20 cm, les premières années de l'adoption du SD la concentration de la MOT diminue de 40 %, puis cette concentration augmente.

Pour la MOP, les figures IV.14 et IV.15 montrent que l'évolution de la MOP est étroitement liée de façon positive avec les durées d'adoption du SD aux deux profondeurs de mesure.

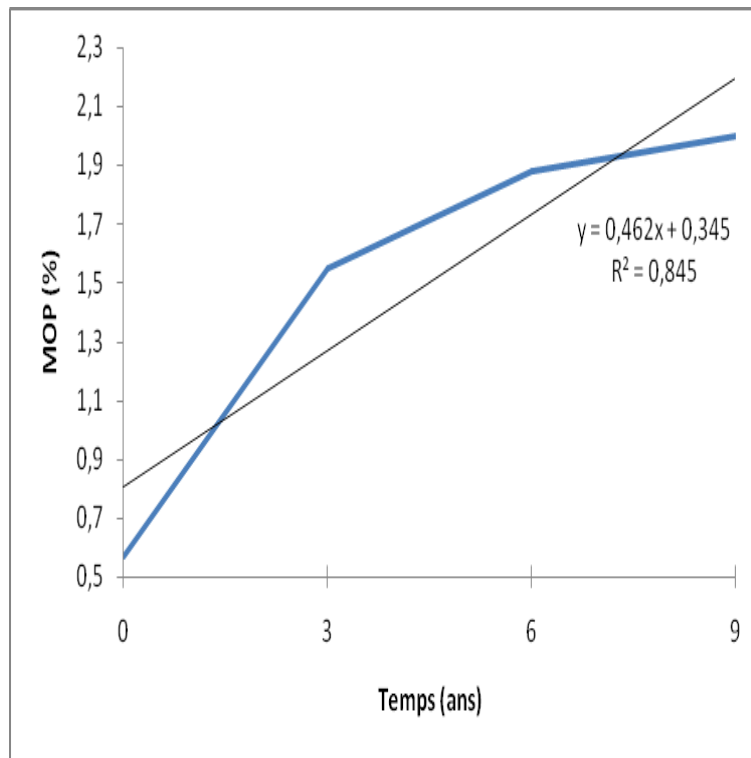


Figure IV.14 :Evolution temporelle de la matière organique particulaire (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

A la profondeur 0-10 cm, la MOP présente une relation linéaire avec la durée d'adoption du semis direct ($R^2 = 0,84$) : **MOP (%) = 0,462 t + 0,345**

Par contre à la profondeur 10-20 cm, la MOP présente une relation avec la durée d'adoption du semis direct ($R^2 = 0,66$) selon le modèle polynomial: **MOP (%) = 0,072 t² - 0,301 t + 0,917**

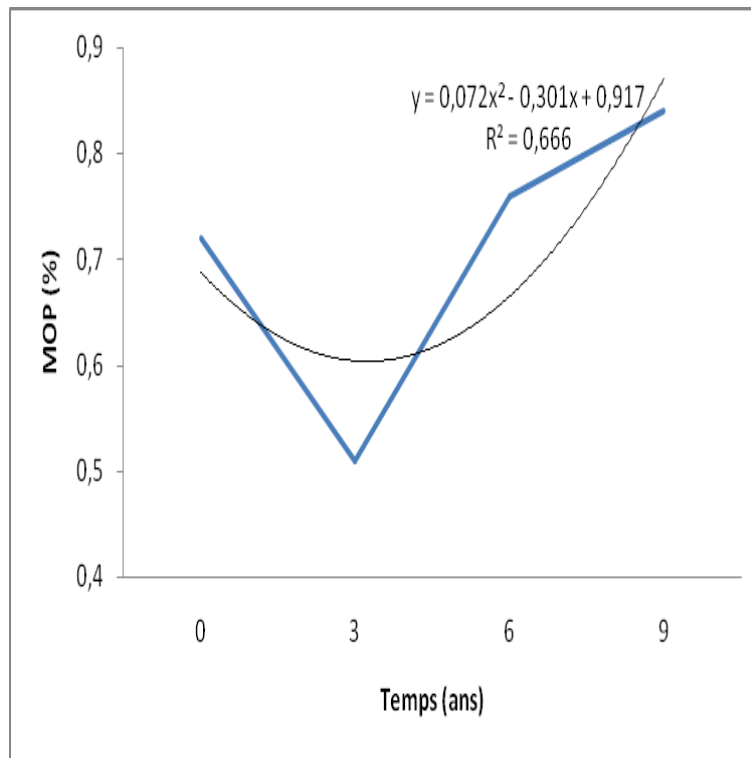


Figure IV.15 : Evolution temporelle de la matière organique particulaire (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

L'amélioration de la MOP est progressive dès les premières années de l'adoption du SD avec une augmentation de 150 % par rapport à TC.

Pour la MOL, les figures IV.16 et IV.17 montrent une relation avec l'adoption du SD positive et linéaire aux profondeurs 0-10 cm et 10-20 cm.

A la profondeur 0-10 cm, cette relation est positivement linéaire selon le modèle :

$$\mathbf{MOL(\%) = 0,037 t + 0,645}$$

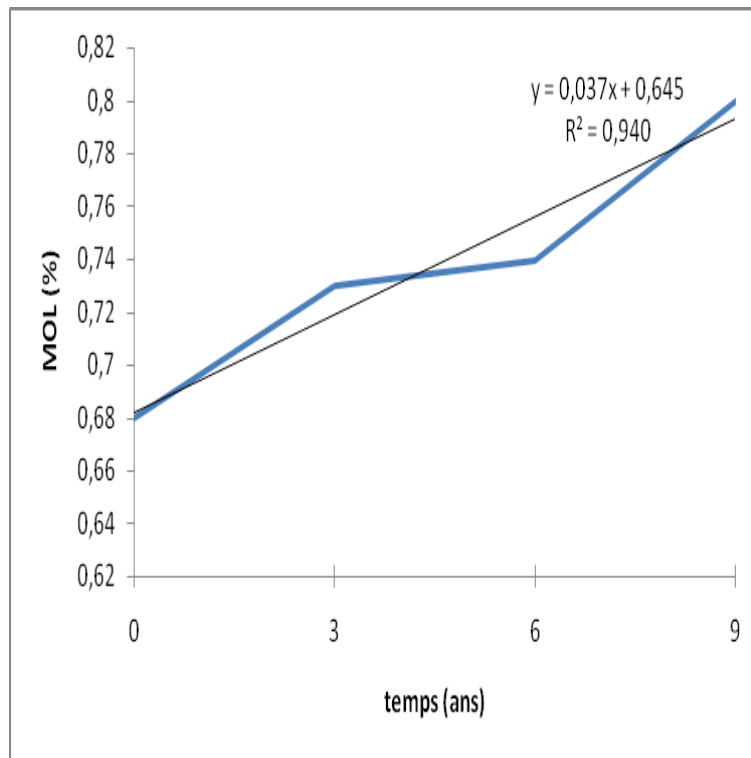


Figure IV.16 : Evolution temporelle de la matière organique liée (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

A la profondeur 10-20 cm, la MOL présente une bonne relation non linéaire, polynomiale, avec les durées de l'adoption du SD avec $R^2 = 0,80$ et en suivant le model :

$$\text{MOL (\%)} = 0,079 t + 0,6$$

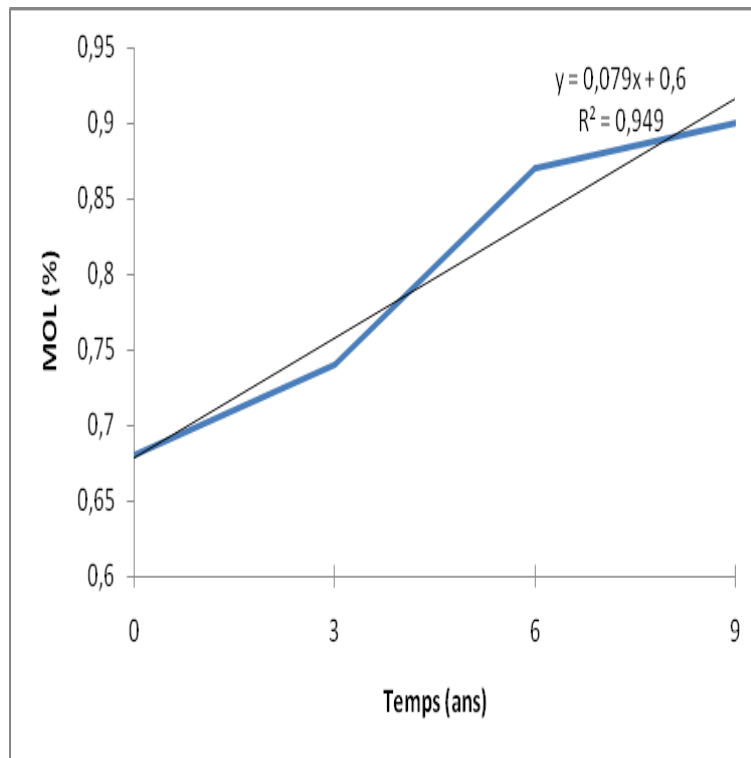


Figure IV.17 : Evolution temporelle de la matière organique liée (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

En effet, l'amélioration de la MOL est progressive dès les premières années de l'adoption du SD et qui est équivalente à 10 %.

IV.2.2. Minéralisation de la matière organique

IV.2.2.1. Contexte général

Le tableau IV.15 résume le classement des moyennes de la teneur en azote total NT et le taux de minéralisation de la matière organique C/N entre les systèmes de travail du sol dans le site A.

La concentration du NT présente une différenciation, statistiquement significative, entre les systèmes de travail du sol dans le site A selon la profondeur de mesure.

Cependant, le SD3 offre la plus forte teneur avec 0,13 % par rapport au groupe TM- TC, avec respectivement 0,09 et 0,08%, à la profondeur de 0-10 cm, Par contre, à 10- 20 cm de profondeur, c'est le groupe TM-TC qui offre plus la forte teneur, avec respectivement 0,10 et 0,09 % par rapport au SD3 avec 0,07 %.

Tableau IV.15 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de l'azote total (%) et le rapport de minéralisation selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
N total (%)		
TC	0,08 a	0,09 b
TM	0,09 a	0,10b
SD3	0,13 b	0,07 a
C/N		
TC	12,4 a	12,2 b
TM	11,6 a	10,8 a
SD3	12,4 a	13,8 b

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0,05$

Le rapport C/N, à la différence de la concentration de NT, ne présente pas de différenciation significative entre les systèmes de travail du sol à la profondeur de mesure 0-10 cm.

Les valeurs moyennes du C/N oscillent entre 11,6 et 12,4 à la profondeur 0-10 cm.

A la profondeur 10-20 cm, le SD permet d'augmenter significativement le C/N avec 13,8 comparativement au groupe de systèmes de travail du sol TC-TM, avec respectivement, 12,2 et 10,8.

Le tableau IV.16 résume le classement des moyennes de NT et C/N entre les systèmes de travail du sol selon la profondeur de mesure dans les sites B et C.

Tableau IV.16 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de l'azote total (%) et le rapport de minéralisation selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
N total (%)		
TCJ	0,09 a	0,09 a
SD6	0,13 b	0,09 a
SD9	0,13 b	0,10 a
C/N		
TCJ	10,3 a	12 a
SD6	12,7 b	12 a
SD9	13,4 b	12,7 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

L'analyse de ce tableau montre que, le changement de NT et C/N engendré par les systèmes de travail du sol est statistiquement significatif uniquement à la profondeur 0-10 cm.

Par conséquent, à la profondeur 0-10 cm, l'ensemble de traitements SD9-SD6 augmente la teneur NT avec 0,13 % pour chacun, et le rapport C/ N avec 13,4 et 12,7 respectivement.

A la profondeur 10-20 cm, la concentration de NT oscille entre 0,09 et 0,10 % et le rapport C/N comprise entre 12 et 12.7.

IV.2.2.2.Contexte du semis direct

Les figures IV.18 et IV.19 illustrent l'évolution temporelle de NT dans le contexte du SD aux profondeurs de 0-10 cm et de 10-20 cm.

A la profondeur 0-10 cm, les teneurs NT présentent une forte relation positive avec les durées de l'adoption du SD ($R^2 = 0,60$) selon le modèle linéaire :

$$\text{NT (\%)} = 0,015 t + 0,08$$

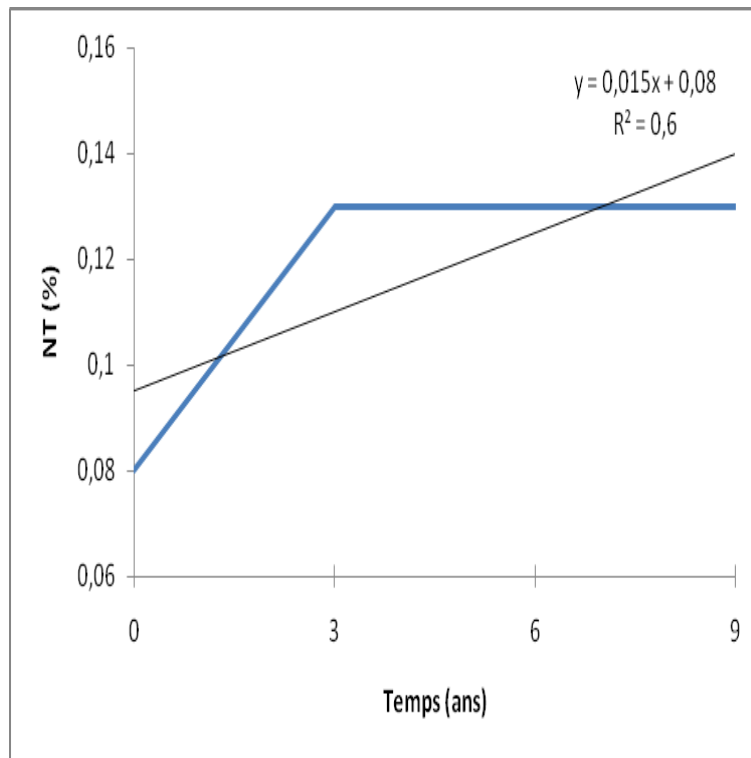


Figure IV.18 : Evolution temporelle de l'azote total (%) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

En effet, l'amélioration du NT est progressivement dès les premières années de l'adoption du SD et peut atteindre, un taux de 30 % durant 09 ans de son adoption.

A la profondeur 10-20 cm, les valeurs NT enregistrent une forte relation avec les durées de l'adoption du SD avec $R^2 = 0,73$ selon le modèle polynomial :

$$\text{NT (\%)} = 0,007 t^2 - 0,032 t + 0,112$$

En effet, l'adoption du SD pendant 3 ans provoque une diminution importante de la teneur NT, équivalente à 30 %. Par ailleurs, l'amélioration de NT est progressive après 6 ans d'adoption du SD.

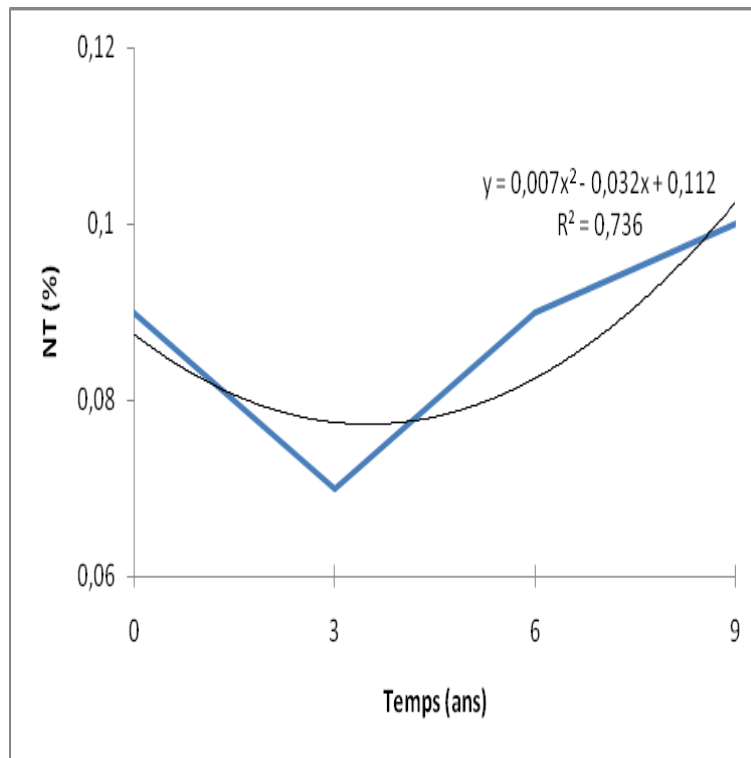


Figure IV.19 : Evolution temporelle de l'azote total (%) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

Les figures IV.20 et IV.21 illustrent l'évolution temporelle du rapport C/N en contexte du SD aux profondeurs de 0-10 cm et de 10-20 cm.

A la profondeur 0-10 cm, le changement du rapport C/N dans le contexte du semis direct est progressif et positif avec $R^2 = 0,61$ et selon le modèle linéaire suivant : $C/N = 0,209 t + 12,33$

Cependant, pour la durée inférieure à 6 ans de l'adoption du semis direct, ce changement est très faible. Au-delà de 6 ans, l'adoption du semis direct peut améliorer la minéralisation de la matière organique, équivalente à 35 % après 9 ans de son adoption.

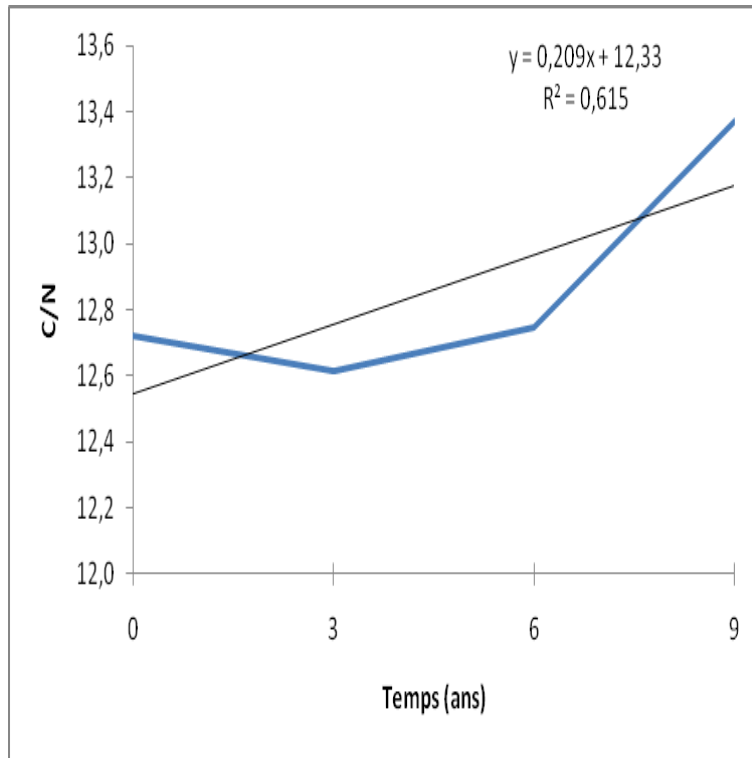


Figure IV.20 : Evolution temporelle du rapport C/N dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

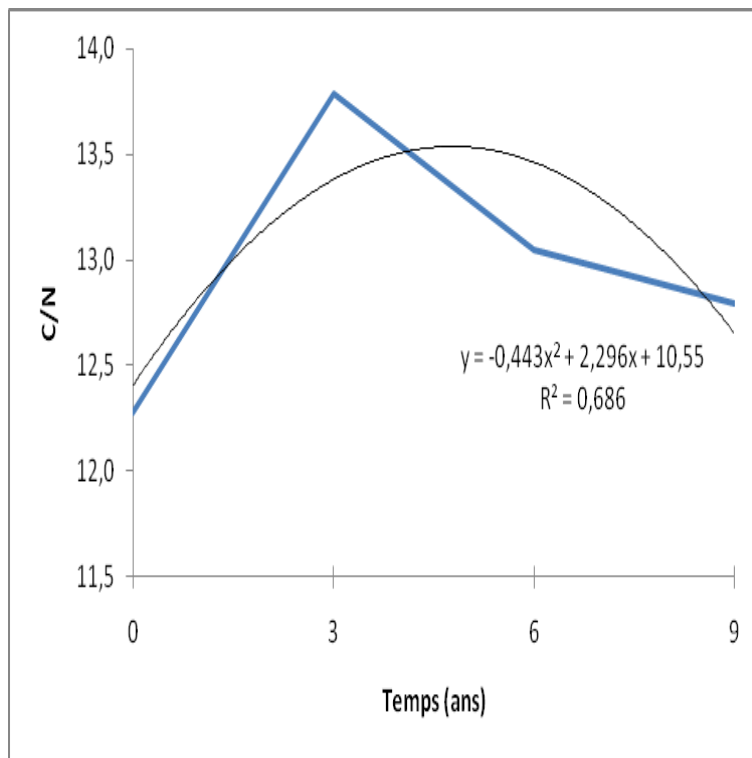


Figure IV.21 : Evolution temporelle du rapport C/N dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

A la profondeur 10-20 cm, le changement du rapport C/N dans le contexte du semis direct est non linéaire, polynomiale, avec $R^2 = 0,68$ et selon le modèle linéaire suivant : $C/N = -0,443 t^2 + 2,296 t + 10,55$

Cependant, l'adoption du semis direct pendant 3 ans provoque une augmentation très importante du rapport C/N, équivalente à 40 %. Après cette durée, le rapport C/N a été amélioré progressivement.

IV.2.3. Abondance des microorganismes et vers de terre

IV.2.3.1. Contexte général

Le tableau IV.17 présente le classement des moyennes de la biomasse microbienne BM et les vers de terre VT dans le site A selon la profondeur du sol.

L'analyse de ce tableau met en évidence une différence statistiquement significative entre les systèmes de travail du sol selon le changement des microorganismes BM et les vers de terre VT dans le site A.

Tableau IV.17 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de l'abondance des microorganismes (mg/kg) et les vers de terre (individus/m²) selon la profondeur dans le site A

Profondeur (cm)	0-10	10-20
BM (mg/kg)		
TC	99 a	130 b
TM	156 b	173 c
SD3	219 c	89 a
VT (individus/m²)		
TC	15 a	16 b
TM	18 b	17 b
SD3	19 b	14 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

Pour BM, le SD3 présente la plus forte concentration avec 219 mg/ kg suivi de TM avec 156 mg/ kg et enfin de TC avec 99 mg/ kg, à la profondeur de 0-10 cm. Par contre, à la profondeur de 10-20 cm, l'ensemble des traitements TM-TC a enregistré la plus forte concentration de microorganismes, avec respectivement 173 mg/ kg et 130 mg/ kg par rapport au SD3 avec 89 mg/ kg.

Pour VT, le groupe de traitements SD3-TM enregistre le nombre de vers de terre le plus élevé, avec respectivement 198 et 168 individus/ m² par rapport au TC avec 15 individus/m², à la profondeur de 0-10 cm. A la profondeur de 10-20 cm, le groupe de traitements TM-TC a présenté le nombre le plus élevé, avec respectivement 17 et 16 individus / m², par rapport au SD3 avec 15 individus /m².

Le tableau IV.18 résume le classement des moyennes de la biomasse microbienne BM et les vers de terre VT dans les sites B et C selon la profondeur du sol.

D'après ce tableau, l'adoption du semis direct pendant 6 et 9 ans montre, une abondance statistiquement significative de microorganismes et vers de terre dans les deux profondeurs de mesure par rapport au TCJ. Cet ensemble de modalité, SD9-SD6, peut augmenter BM, avec respectivement, 161 et 135 mg/ kg à la profondeur de 0-10 cm, avec respectivement 173 et 130 mg/ kg à la profondeur 10-20 cm.

Ainsi, l'augmentation de VT au niveau de SD9 et SD6 est, respectivement, de 21 et 20 individus / m² à la profondeur de 0-10 cm et de 19 et 18 individus /m² à la profondeur de 10-20 cm.

Tableau IV.18 : Classement des moyennes à $p < 0,05$ de l'abondance des microorganismes (mg/kg) et les vers de terre (individus/m²) selon la profondeur dans les sites B et C

Profondeur (cm)	0-10	10-20
BM (mg/kg)		
TCJ	111 a	120 a
SD6	239 b	135 b
SD9	309 c	161 c
VT (individus/m²)		
TCJ	16 a	17 a
SD6	20 b	18 a
SD9	21 b	19 a

Les groupes homogènes a, b et c à $p < 0.05$

IV.2.3.2. Contexte du semis direct

Les figures IV.22 et IV.23 illustrent l'évolution temporelle de l'abondance des microorganismes dans le contexte du SD aux profondeurs de 0-10 cm et de 10-20 cm.

A la profondeur 0-10 cm, la concentration des microorganismes évolue de façon positive selon la durée de l'adoption du semis direct avec $R^2 = 0,92$ et selon le modèle linéaire suivant :

$$\mathbf{BM \text{ (mg/kg)} = 65 t + 54}$$

A cette profondeur, l'adoption du semis direct provoque l'enrichissement du sol en microorganisme dès les premières années, atteignant 100 % et même 300 % durant les dernières années.

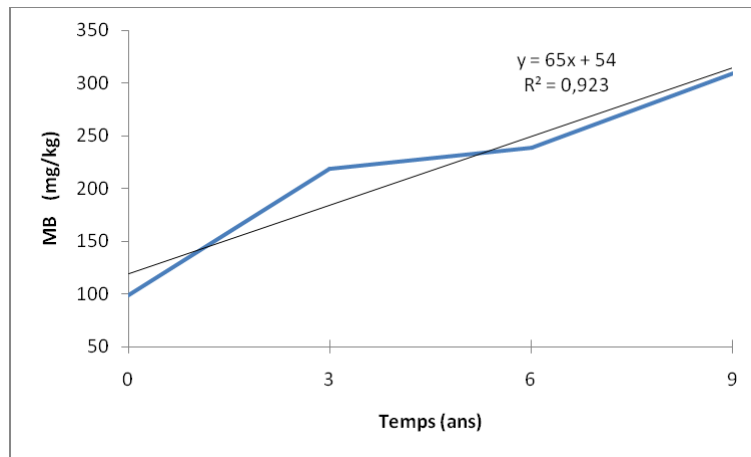


Figure IV.22 : Evolution temporelle de l'abondance des microorganismes (mg/kg) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

A la profondeur 10-20cm, la concentration des microorganismes présente une évolution non linéaire selon la durée de l'adoption du semis direct. Cette évolution est de type polynomial avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,78$ et selon le modèle suivant :

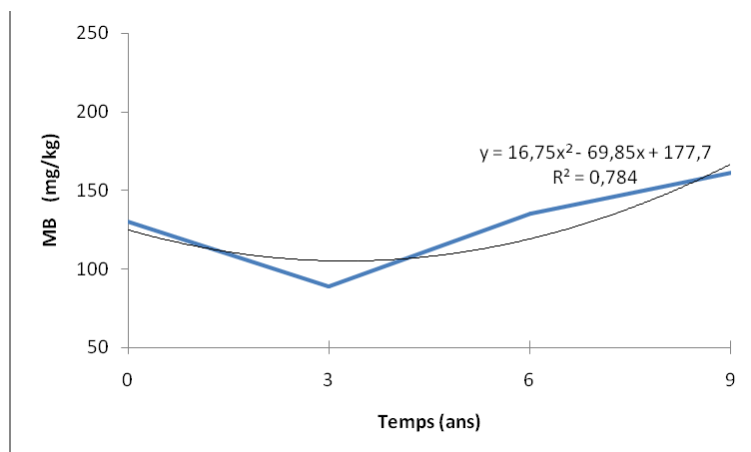


Figure IV.23 : Evolution temporelle de l'abondance des microorganismes (mg/kg) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

$$BM \text{ (mg/kg)} = 16,75 t^2 - 69,85 t + 177,7$$

Par rapport à la phase initiale TC, l'adoption du SD à court terme, 3 ans, engendre une diminution importante des microorganismes à cette profondeur équivalent à 50 %. Après cette

durée, l'abondance des microorganismes a augmenté progressivement jusqu'à son maximum pour la durée de 9 ans de l'adoption du SD.

Les figures IV.24 et IV.25 illustrent l'évolution temporelle de l'abondance des vers de terre dans le contexte du SD aux profondeurs de 0-10 cm et de 10-20 cm.

L'analyse de ces figures montre que la modification de l'abondance des vers de terre est progressive et positive dans les deux profondeurs du sol. Cette modification de vers de terre est en relation avec la durée de l'adoption du semis direct selon le modèle linéaire. :

A la profondeur 0-10 cm, le coefficient de détermination $R^2 = 0,86$. Le modèle linéaire est le suivant :

$$VT \text{ (individus/m}^2\text{)} = 1,9 t + 14$$

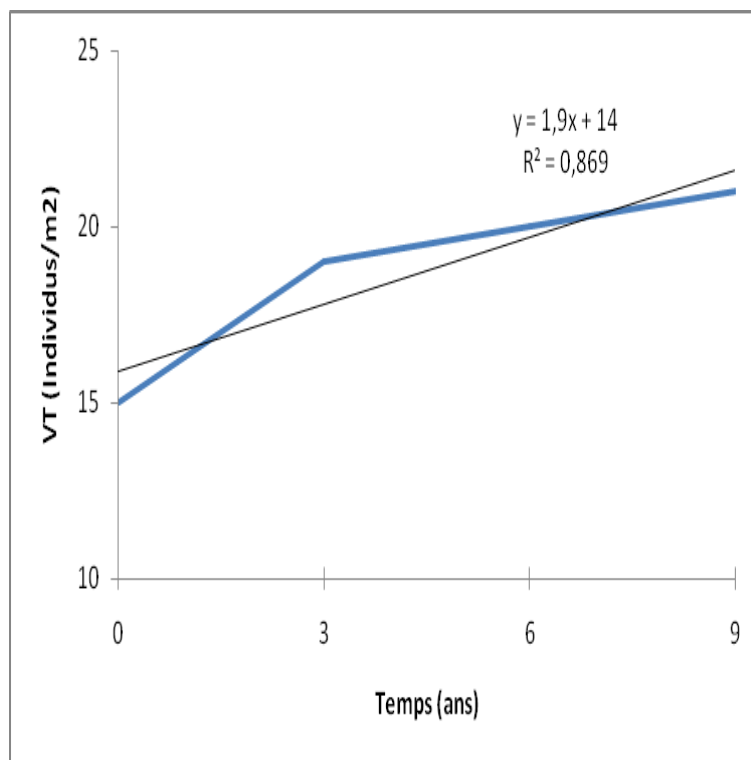


Figure IV.24 : Evolution temporelle de l'abondance des vers de terre (individus/ m²) dans la profondeur 0-10 cm en contexte du semis direct

A la profondeur 10-20 cm : le modèle linéaire avec $R^2 = 0,72$ est le suivant :

$$VT \text{ (individus/m}^2\text{)} = 1,2 t + 14$$

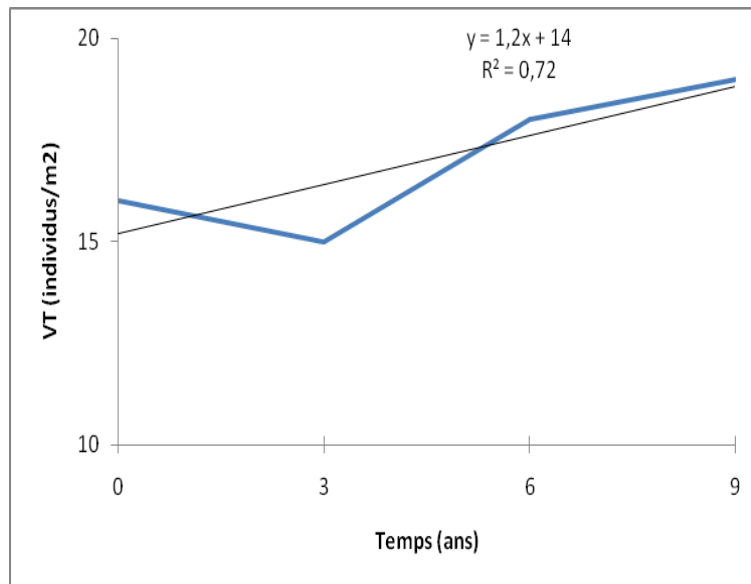


Figure IV.25 : Evolution temporelle de l'abondance des vers de terre (individus/ m²) dans la profondeur 10-20 cm en contexte du semis direct

Discussion

Les concentrations de MOT et NT augmentent significativement à la surface du sol dès les premières années de l'adoption du SD, 3 ans. Par rapport au TC, on observe une stratification verticale des teneurs MOT et NT qui s'accumulent à la surface du sol et diminuent en profondeur où aucun résidu de culture n'est enfoui tandis que ces résidus se répartissent de façon homogène en la profondeur au niveau de TM. Cette observation a été confirmée par une évolution progressive de MOT et NT à la surface du sol pour les durées de 6 et 9 ans d'adoption du SD. D'après Jakab *et al.* (2023), cette amélioration est due aux résidus des racines.

La MOP a été modifiée de la même manière que pour MOT. Par contre, la composante organique MOL a été stable entre les systèmes SD3, TC et TM et modifiable entre SD9, SD6 et TCJ dans les deux profondeurs de mesure. Ce que signifie que, la durée de 3ans de l'adoption du SD ne permet pas une amélioration de la matière organique liée. Par contre, cette composante a été améliorée en profondeur pour la durée de 9 ans d'adoption du SD et à la profondeur 10-20cm pour la durée de 6 ans de l'adoption. Ces résultats sont similaires à ceux de Aduhene *et al.* (2022).

Le rapport C/N reflète la vitesse de minéralisation de la matière organique dans le sol. Les systèmes de travail du sol TC, TCJ et TM entraînent une minéralisation de la matière organique dans le profil du sol, 0 à 20 cm. Par contre, le système SD peut réduire cette minéralisation selon la durée de son adoption. Cette distinction entre les systèmes est due aux résidus de récoltes et ses localisations en profondeur. D'après Balesdent *et al.*, (2000), la présence des résidus de récolte

limite la surface de contact entre les substances organiques et les particules minérales du sol ce qui réduit la vitesse de minéralisation de ces résidus.

Ces résultats sont similaires aux travaux de Jemai *et al.* (2013) ; Abdellahi *et al.* (2021) ; Cai *et al.* (2022) et contradictoire aux résultats de Xiao *et al.* (2021).

Les microorganismes ont été affectés par les systèmes de travail du sol. Les systèmes TC, TCJ et TM entraînent une forte teneur en matière organique, qui est considérée comme source d'énergie pour les microorganismes, à la profondeur de 10-20 cm qu'à la profondeur de 0-10 cm. Par contre, le système SD, avec l'accumulation des résidus de récoltes en surface, entraîne une augmentation de microorganisme à la profondeur 0-10cm qu'à la profondeur de 10-20cm.

Cette stratification entre les systèmes de travail du sol est comparable aux résultats de Vian *et al.* (2009) et Srour *et al.* (2020). Pour les durées de 6 et 9 de l'adoption du SD, l'abondance du sol en microorganismes est progressivement améliorée dans les deux profondeurs du sol.

L'abondance de vers de terre a évolué selon la même tendance que celles des microorganismes. D'après Mcinga *et al.* (2020), le travail du sol et la gestion des résidus modifient la diversité et la densité de vers de terre. Le semis direct favorise l'abondance des vers de terre au cours des trois premières années. L'abondance des vers de terre est corrélée avec la matière organique et l'humidité du sol, ce qui suggère que ces facteurs sont les facteurs explicatifs de leur croissance et du développement.

Conclusion

L'amélioration de la qualité structurale semble être atteinte après 9 ans de l'adoption du système du semis direct dans l'ensemble de la profondeur de mesure 0-20cm. Les premières années de l'adoption du semis direct, 3 ans, occasionne une dégradation de la structure du sol à la profondeur sous jacent (10-20 cm) qui a tendance à se compacter. Cette dégradation de la structure du sol peut occasionner des problèmes d'enracinement des cultures, de stabilité structurale, de capacité de rétention en eau et de macroporosité.

De la même manière que la structure du sol, les teneurs en matière organique et l'azote total évoluent progressivement à la surface du sol après 3 ans de l'adoption du semis direct. Par contre, ces teneurs évoluent progressivement à partir de 6 années de l'adoption du semis direct. De plus, les mesures des composantes organiques, matière organique particulaire et liée et le rapport de minéralisation ainsi que l'abondance des microorganismes et de la faune permettent d'apporter plus de précisions à la dynamique de la matière organique dans le contexte du semis direct.

CHAPITRE V : EFFET DE LA STRUCTURE DU SOL ET LA MATIERE ORGANIQUE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUE DU SOL

Il s'agit ici, de déterminer la contribution de la structure et de la matière organique dans le changement de la qualité du sol après 3, 6 et 9 ans de l'adoption du SD dans 2 profondeurs de mesure.

Pour ce faire, nous étudierons 2 types de corrélation, à savoir, la corrélation multi-variable (entre les propriétés du sol et la durée de l'adoption de semis direct) et bi-variable (entre les propriétés du sol).

V.1. CORRELATION MULTIVARIABLE

Pour une meilleure illustration graphique de cette corrélation par l'analyse en composantes principales (ACP), nous présenterons les variables qualitatives (durée de l'adoption du semis direct SD par profondeur de mesure H) à l'aide d'une seule variable, par exemple : H1SD3.

Les résultats des meilleurs composants principaux sont mentionnés dans le tableau V.1.

Tableau V.1 : Meilleures composantes principales (Dim1, Dim2 et Dim3)

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
Valeur propre	11	2,7	2
Variance %	61,5	15,3	11,4
Cumul de variance %	61,5	76,8	88,2

Selon le tableau V.1, plus de 88 % de la variabilité totale des données est exprimée par 3 dimensions ou composantes principales, Dim1, Dim2 et Dim3 où la valeur propre est supérieure à 1. Ces composantes sont donc suffisantes pour réduire l'ensemble des variables quantitatives (18 indicateurs) et qualitatives (2 individu) aux 3 composantes principales Dim1, Dim2 et Dim3. Il est utile de remarquée que, l'essentiel de la variabilité des données sont représentées par la

composante Dim1 avec 61 % et secondairement par Dim2 et Dim3, avec respectivement 15 % et 11 %.

Le tableau V.2 présente la corrélation et la contribution de chaque variable quantitative (propriétés du sol) sur les composantes principales (Dim1, Dim2 et Dim3).

Tableau V.2 : Corrélations et contribution des propriétés du sol sur les composants principaux (Dim1, Dim2 et Dim3) à $p < 0,05$

	Dim1		Dim2		Dim,3	
	Contribution	Corrélation	Contribution	Corrélation	Contribution	Corrélation
SS	7,73	-0,92	4,79	0,36	0,01	0,01
Da	8,63	-0,97	0,94	0,16	0,32	0,08
RP	5,69	-0,79	8,20	0,47	1,76	-0,19
AS	7,60	0,91	0,26	0,08	0,17	0,06
pF2,7	7,63	0,91	2,37	-0,25	0,27	-0,07
pF4,2	0,56	0,25	16,13	0,66	17,48	0,60
MP	7,63	0,91	0,43	-0,11	0,81	0,12
mp	0,63	0,26	17,54	0,69	18,25	-0,61
pH	1,07	-0,40	4,05	-0,33	12,37	0,50
CE	1,95	0,46	8,37	0,48	22,55	0,68
CEC	5,05	0,74	0,20	0,07	15,65	-0,57
MOT	8,68	0,98	0,09	-0,05	0,27	-0,06
MOP	8,76	0,98	0,55	0,12	0,22	-0,06
MOL	3	-0,57	8,38	-0,48	5,26	-0,32
NT	7,59	0,91	0,39	0,10	1,59	0,18
C/N	0,31	-0,18	24	0,81	2,81	-0,24
VT	8	0,94	1,27	-0,18	0,02	-0,02
MBC	8,39	0,96	1,90	0,22	0,07	-0,03

La figure V.1 illustre la présentation graphique de ces corrélations sur les plans factoriels A : (Dim1, Dim2) et B : (Dim1, Dim2).

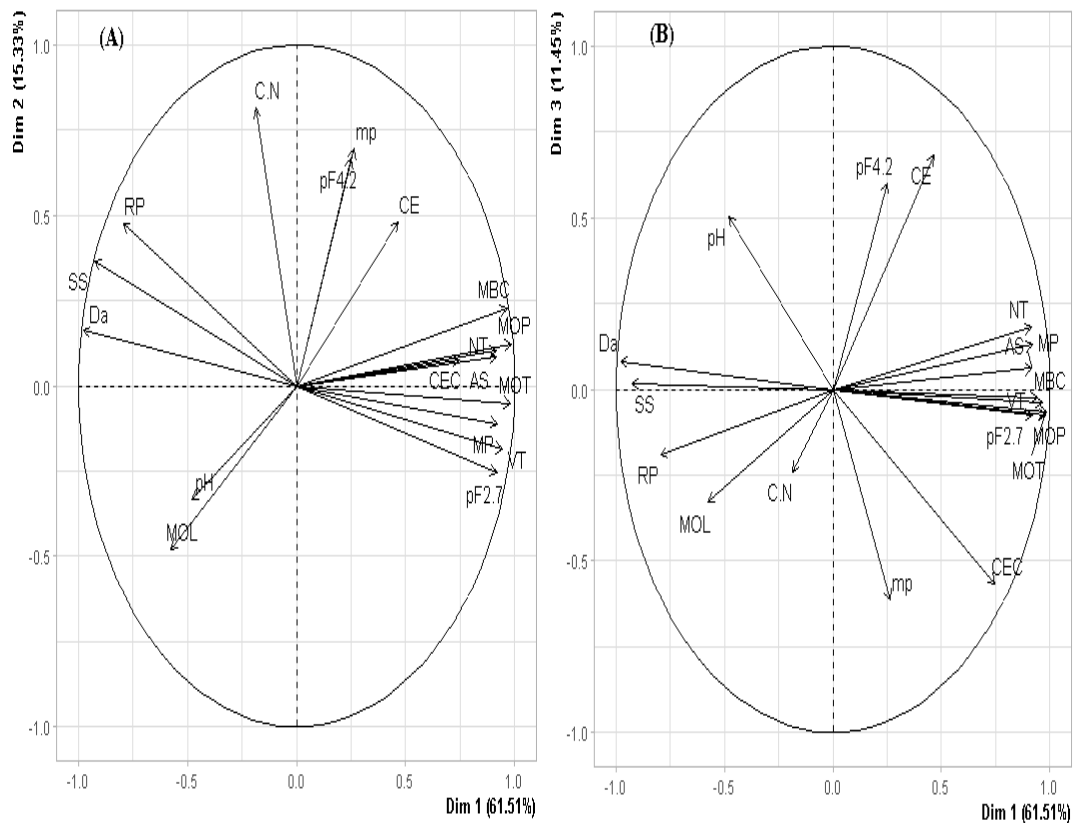


Figure V.1 : Représentation graphique de la corrélation des propriétés du sol sur les plans factoriels A : (Dim1, Dim2) et B : (Dim1, Dim3)

Sur l'axe factoriel Dim1, la plupart des indicateurs du sol présentent une forte corrélation ($p < 0,05$) et contribution.

Les variables MOP, MOT, MBC, VT, pF2,7, AS, NT et CEC enregistrent une corrélation positive (entre 0,74 et 0,98) et peuvent contribuer à la variabilité totale des données avec 5 % à 8,7 %.

Les variables Da, SS, RP et MOL présentent une corrélation négative (entre -0,97 et -0,57) et offrent une contribution de 3 % à 8,63 % de la variabilité totale des données.

Par contre, mp, pF4,2, pH, CE et C/N enregistrent une très faible de corrélation ($< 0,50$) et de contribution dans la différenciation des données (< 5 %).

Sur l'axe Dim2, les fortes corrélations et contributions ont été observées par les propriétés C/N, mp et pF4,2.

Sur l'axe factoriel Dim3, les propriétés CE, pH, mp et pF4,2 présentent les meilleures corrélations et contributions.

Le tableau V.3 et la figure V.2 présentent la contribution et la corrélation des variables qualitatives (individus) sur la variabilité totale dans Dim1, Dim2 et Dim3.

Tableau V.3 : Coordonnée et contribution des individus du sol sur les composantes principales (Dim1, Dim2 et Dim3) à $p < 0,05$

	Dim1		Dim2		Dim,3	
	Contribution	Coordonnée	Contribution	Coordonnée	Contribution	Coordonnée
H1TC	12,6	-3,3	0,9	0,4	45,5	2,7
H1SD3	5,4	2,1	4,2	-0,9	25,4	-2
H1SD6	16,4	3,8	0,4	0,3	0,1	-0,1
H1SD9	30,7	5,2	25,2	2,3	5,7	0,9
H2TC	3,2	-1,6	12,8	-1,6	0,0	0,1
H2SD3	29,7	-5,1	31,3	2,6	22,3	-1,9
H2SD6	1,7	-1,2	4,4	-0,9	0,7	0,3
H2SD9	0,0	0,1	20,4	-2,1	0,0	0,0

Sur l'axe factoriel Dim1, les individus H1SD9, H2SD3, H1TC et H2SD6 enregistrent les meilleures contributions à la variabilité des données, avec respectivement, 30,7 %, 29,7 %, 16,4 % et 12,6 % et ils présentent, aussi, une forte dispersion, avec respectivement, 5,2 ; -5,1 ; 3,8 et 3,3.

Sur l'axe Dim 2, les individus H2SD3, H1SD9, H2SD9 et H2TC présentent une forte contribution, avec respectivement, 31,3 %, 25,2 %, 20,4 % et 12,8 % et ils enregistrent un éloignement, avec respectivement, 2,6, 2,3, -2,1 et -1,6

Sur l'axe Dim 3, H1TC, H1SD3 et H2SD3 sont les individus qui ont le plus contribué à la variabilité des données, avec respectivement, 45,5 %, 25,4 % et 22,3 % et qui sont les plus dispersés, avec respectivement, 2,7, -2, -1,9.

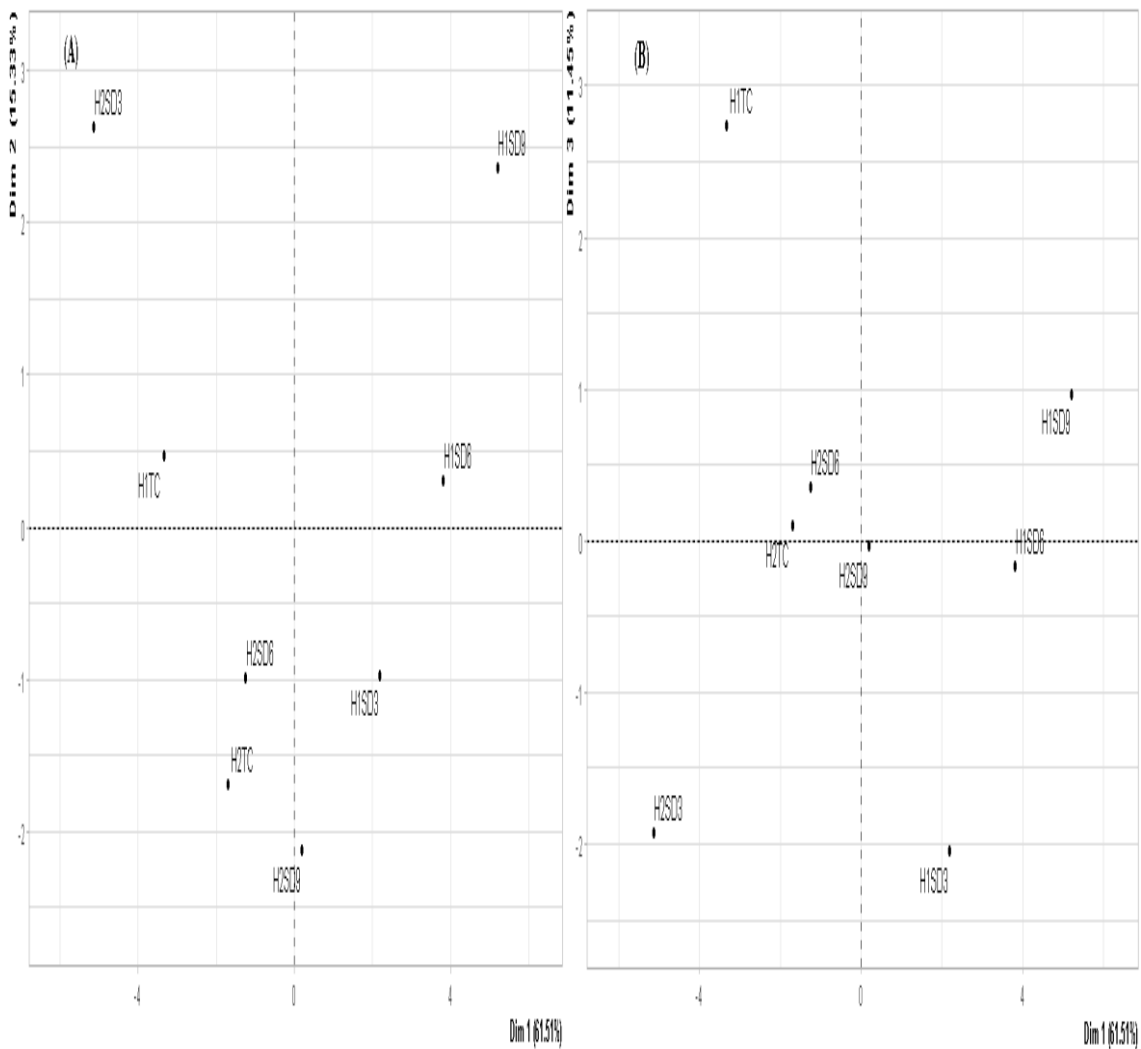


Figure V.2 : Représentation graphique des individus du sol sur les plans factoriels A : (Dim1, Dim2) et B : (Dim1, Dim2)

La concordance entre les figures V.1 et V.2 met en évidence une association très étroite entre les indicateurs du sol et la durée d'adoption du semis direct sur les plans factoriels A et B. Cette association peut s'expliquer par le degré de similitude entre les propriétés du sol et la durée d'adoption du semis direct dans les profondeurs de mesure et qui permet de regrouper la durée du SD en 5 classes homogènes dans l'ordre suivant (Figure V.3) :

$$(H1SD9-H1SD6) > (H1SD3) > (H2NT9-H2SD6- H2TC) > (H1TC) > (H2SD3).$$

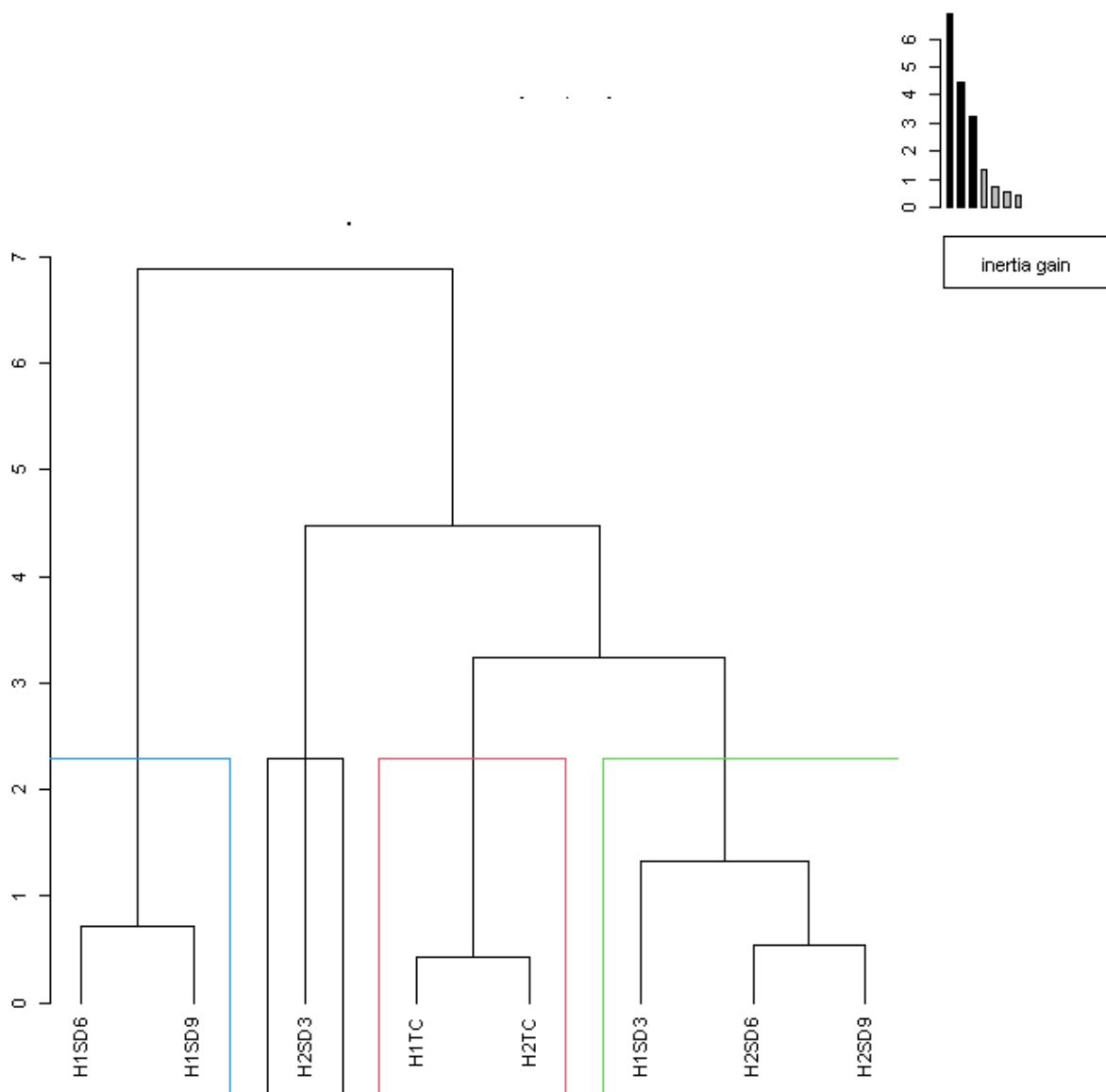


Figure V.3 : Classification hiérarchique des individus du sol

Le tableau V.4 présente la corrélation, à $p < 0,05$, entre les propriétés du sol et les classes homogènes.

L'analyse de ce tableau révèle la sensibilité des propriétés du sol sur la différenciation entre les durées d'adoption du semis direct par profondeur de mesure. Cependant, sur l'ensemble des indicateurs du sol étudiés (18 indicateurs), seulement, 12 indicateurs qui sont statistiquement essentiels pour la distinction entre les 5 classes d'individus, dont, la MOP qui est l'indicateur le plus sensible au changement du système de travail du sol suivi par la MOT et la Da.

Tableau V.4 : Corrélation entre les propriétés du sol et les classes des individus du sol

	Corrélation	p-value
MOP	0,98	< 0,00001
MOT	0,97	<0,0001
BM	0,96	0,0002
VT	0,95	0,0004
MP	0,91	0,0012
pF2,7	0,91	0,0012
SA	0,91	0,0013
NT	0,91	0,0013
CEC	0,74	0,032
RP	-0,79	0,018
SS	-0,92	0,0011
Da	-0,97	<0.0001

V.2. CORRELATION BIVARIABLE

Elle consiste à déterminer les relations statistiques ($p < 0,05$) entre les propriétés du sol qui sont sensibles à l'adoption du SD.

Le tableau V.5 résume les différentes corrélations entre les propriétés du sol. Il révèle des corrélations très hautement significatives ($r > 0,95$) entre les couples MOP – MOT, MOP-BM, MOP-VT, MOT-Da, et Da-SS.

Tableau V.5 : Corrélations simple entre les propriétés morphologiques et analytiques à $p < 0,05$

Couples (X, Y)	Equation de régression linéaire	Ddl	r^2	r	Signification
MOP, MOT	MOT= 0,61 MOP -0,70	22	0,95	0,97	***
MOP, Da	Da = - 3,72MOP+6,27	22	0,94	-0,96	***
MOP, BM	BM = 215,1 MOP + 29,4	22	0,95	0,97	***
MOP, VT	VT= 67,5MOP+136,8	22	0,80	0,95	***
MOP, SS	SS= - 0,27MOP +1,19	22	0,75	0,86	*
MOP, MP	MP= 0,19MOP-1,15	22	0,77	0,87	*
MOP, pF2,7	pF2,7= 0,19MOP-6,51	22	0,77	0,87	*
MOP, AS	AS= 1,04MOP -0,82	22	0,74	0,86	*
MOP, NT	NT=14,4MOP-0,75	22	0,81	0,90	*
MOP, CEC	CEC= 0,26MOP- 4,02	22	0,58	0,76	*
MOP, RP	RP= - 0,46MOP+1,42	22	0,48	- 0,69	*
MOT , Da	Da = - 6,12 MOT +11,4	22	0,96	- 0,97	***
MOT, B M	BM=130,2 MOT- 118,7	22	0,88	0,93	**
MOT, VT	VT= 43,9 MOT +83,4	22	0,86	0,92	**
MOT , SS	SS = - 0,47 MOT + 3,13	22	0,87	- 0,93	**
MOT, MP	MP = 0,30 MOT - 0,70	22	0,80	0,89	*
MOT, pF2,7	pF2,7= 0,31MOT- 0,53	22	0,82	0,90	*
MOT , SA	SA = 1,63 MOT -0,09	22	0,75	0,86	*
MOT, NT	NT= 21,3 MOT+ 0,14	22	0,69	0,83	*
MOT, CEC	CEC= 0,39 MOT-4,73	22	0,51	0,71	*
MOT , RP	RP = - 0,82 MOT +3,59	22	0,61	- 0,78	*
Da, BM	MBC= -779Da +1348	22	0,81	-0,90	*
Da, VT	VT= - 281,9Da+607	22	0,92	- 0,95	**
Da, SS	SS= 11,9Da -16,13	22	0,94	0,96	***
Da, MP	MP= - 16,4Da+34,3	22	0,81	-0,90	*
Da, pF2,7	pF2,7= -16,4Da+62,2	22	0,84	-0,91	*
Da, SA	SA= -2,91Da+5,8	22	0,79	-0,88	*
Da, NT	NT= -3,48Da+1,85	22	0,72	-0,84	*
Da, RP	RP= 0,14Da +1,26	22	0,74	-0,86	*
Da, CEC	CEC= - 0,06Da+ 2,65	22	0,54	-0,73	*

*, **, *** Significatif à $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,00$, respectivement.

Cependant, la MOP peut déterminer le changement de la MOT, de la MBC et de VT avec $r^2 > 0,95$, d'une manière positive et proportionnelle selon les équations de régression linéaire simple :

$$\text{MOT} = 0,61 \text{ MOP} - 0,70$$

$$\text{BM} = 215,1 \text{ MOP} + 29,4$$

$$\text{VT} = 67,5 \text{ MOP} + 136,8$$

La MOP peut déterminer de façon négative et proportionnelle la Da avec $r^2 = 0,96$ selon l'équation :

$$\text{Da} = - 3,72 \text{ MOP} + 6,27$$

La MOT peut diminuer la Da ($r^2 = 0,97$) d'une manière proportionnelle selon l'équation :

$$\text{Da} = - 6,12 \text{ MOT} + 11,4$$

La Da augmente la SS avec $r^2 = 0,94$ selon l'équation :

$$\text{SS} = 11,9 \text{ Da} - 16,13$$

Discussion et conclusion

L'étude des corrélations multivariées et bivariées permet de dire que, La méthode statistique ACP peut réduire les composantes de la variabilité des données (propriétés du sol, durées du SD et profondeurs de mesure) à 3 composantes principales et cela sans réduction de l'information (cumul de la variabilité à 88 %).

Dans le contexte de semis direct, la composante organique MOP est la propriété la plus sensible et la plus déterminante pour les autres propriétés du sol suivi par les propriétés MOT, Da, BM et VT.

Par contre, les propriétés mp, pF4,2, pH, CE et C/N présentent un faible changement, statistiquement non significatifs.

Le degré de similitude entre les propriétés du sol présente une classification des durées de l'adoption du SD par profondeur de mesure comme suit :

$$(\text{H1SD9-H1SD6}) > (\text{H1SD3}) > (\text{H2SD9-H2SD6-H2TC}) > (\text{H1TC}) > (\text{H2SD3}).$$

DISCUSSION GÉNÉRALE

Nous essayons, ici, de synthétiser et d'expliquer les principaux résultats du changement des propriétés morphologiques et analytiques de la qualité du sol, dans le contexte global : TC, TM, TCJ et SD et dans le contexte du semis direct : 3, 6 et 9 ans dans 2 profondeurs de mesure : 0-10 cm et 10-20 cm. Ainsi que, l'effet de l'organisation structurale et la matière organique dans le changement des propriétés physiques, chimiques et biologiques dans un sol à texture limono-argileuse.

Dans le contexte général, le système conventionnel est habituellement utilisé dans la région d'étude, soit en continu TC soit en assolement binaire avec la jachère TCJ. Ce système commence, par l'opération du labour profond à 25 cm avec la charrue dès les premières pluies de d'automne suivie par les opérations de reprise de labour avec le cover-crop et la herse rotative avant le semis. L'opération du labour occasionne un retournement de l'ancienne bande du labour qui est compacte à la surface du sol et l'enfouissement des résidus de récolte à la subsurface. Ainsi, les opérations de la reprise de labour engendrent une fragmentation de la bande du labour dans la surface du sol. Par conséquent, cette succession des opérations de travail du sol offre une organisation structurale de type ferme dans les 2 profondeurs du sol et un enrichissement en matière organique totale dans la profondeur de 10-20cm par rapport à la profondeur de 0-10 cm.

Le système minimum de travail du sol TM a commencé par un passage du chisel à 18 cm puis plusieurs passages de cultivateur et la herse rotative avant le semis. Le chisel provoque un retournement partiel de l'horizon travaillé et par conséquent, un enfouissement des résidus de récolte partiel dans le sol. Le cultivateur provoque une fragmentation du sol à la couche de surface. En effet, cette succession des outils engendre une stratification dans l'organisation structurale du sol et qui est de type intact à la surface du sol et ferme à la subsurface. Elle engendre, en plus, une homogénéité de la teneur en matière organique aux 2 profondeurs de mesure.

Le système du semis direct consiste à semer le blé à 5 cm de profondeur sans travail du sol. L'adoption de ce système pendant 3 ans, entraîne une accumulation des résidus de récolte en surface qu'en subsurface. Par conséquent, il entraîne une stratification remarquable pour la structure du sol et la matière organique. L'adoption du SD pendant 3 ans, comme système alternatif au TC, entraîne une bonne organisation structurale et stockage en matière organique à la surface du sol. Par contre, ce système engendre une dégradation de la structure du sol (compact) et une baisse en matière organique totale dans la subsurface du sol.

D'après Jemai *et al.* (2013), Plaza-Bonilla *et al.* (2013), Belhadj (2014), et Celik *et al.* (2020), pour la mauvaise structure (compacte) qui a été observée durant 3 ans de l'adoption du semis est due à texture fine du sol. Cette durée ne permet pas d'offrir une bonne activité biologique du sol qui est un processus alternatif à l'action mécanique pour la réorganisation de la structure du sol. En revanche, Vian (2009), et Roger-Estrade *et al.* (2011) montrent que, dès les premières années de l'adoption du semis direct, < 5 ans et dans les sols à texture grossière (sableuse), la structure du sol, la matière organique et l'activité biologique sont influencées essentiellement par la profondeur de travail du sol et le mode d'enfouissement. En effet, la quantité de la matière organique est suffisante pour l'amélioration de la structure du sol et l'activité biologique dans la subsurface du sol. En plus, les travaux de Giarola *et al.* (2013) relative au changement de la qualité structurale dans différentes texture du sol et les systèmes culturaux, notamment entre SD et TC, montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre ces systèmes et les classes texturales du sol.

Pour la matière organique, nos résultats sont similaires à ceux de Jemai *et al.* (2013), Abdallah *et al.* (2021), Xiao *et al.* (2021) et Simpson *et al.* (2022) et contradictoires à ceux de Cai *et al.* (2022). Cette différence en matière organique est due à la durée d'adoption du SD et la profondeur de mesure (Blanco-Moure *et al.*, 2013 ; Blanco-Canqui *et al.*, 2018 ; Xiao *et al.*, 2021 ; Cai *et al.*, 2022). Cependant, si la profondeur de mesure concerne l'ensemble de l'horizon travaillé (< 30 cm), la différence en matière organique est très faible. Alors, si la profondeur de mesure concerne les profondeurs, 0-10 cm, 10-20 cm et 20-30 cm, la différence en matière organique est remarquable entre le système TC et SD.

Dans le contexte du semis direct, l'amélioration de l'organisation structurale et de la matière organique totale est linéaire par rapport à la durée de l'adoption du SD à la surface du sol. Par contre, à la subsurface, ces améliorations sont non linéaires. Elles suivent le modèle statistique polynomial où le changement progressif de la structure du sol et la matière organique totale commence à partir la durée SD6. Le système du semis direct SD6 engendre une même structure et teneur en matière organique totale que SD3 à la surface du sol. Par contre à la subsurface du sol, ce système entraîne une meilleure amélioration de la structure du sol et un meilleur stockage de la matière organique par rapport à SD3. Ces résultats sont similaires à ceux de Jemaia *et al.* (2013).

Le système du semis direct SD9 entraîne une amélioration de l'organisation structurale et de la matière organique totale par rapport à SD6 à la surface et la subsurface du sol. De plus, ce système peut améliorer, aussi, les contraintes observées au niveau de SD3. D'après plusieurs travaux, Debska *et al.* (2020) ; Abdallah *et al.* (2021), l'adoption du semis direct, pendant plusieurs

années, provoque une augmentation de la quantité des résidus organique en surface par les feuilles et les tiges des cultures précédentes et en profondeur par les résidus des racines. Ces résidus permettent d'améliorer la structure du sol et le stockage de la matière organique. Cependant, l'amélioration de la qualité du sol augmente en profondeur avec la durée de SD.

Nos résultats montrent, aussi, que les propriétés physiques, en particuliers, Da, RP, SA, MP et pF2,7 changent temporellement et verticalement, avec la même tendance que l'organisation structurale. De plus, la MOP, le NT et l'abondance des organismes du sol BM et VT changent avec la même tendance que pour la MOT. D'après plusieurs travaux, notamment ceux de Vian *et al.* (2009), Roger-Estrade *et al.* (2011), Blanco-Canqui *et al.* (2018), Kool *et al.* (2019) comparant le système de travail TC et le SD dans les divers contextes agropédologique, mettent en évidence la contribution de l'organisation structurale du sol et des résidus organiques sur le changement de la qualité du sol dans le contexte du semis direct. C'est-à-dire que, le non retournement du sol en SD peut en premier lieu changer l'organisation structurale du sol et la localisation des résidus organiques dans le profil du sol puis, ces changements peuvent contribuer directement ou indirectement au changement des propriétés physique, chimique et biologique du sol selon la durée de l'adoption du SD.

Dans cette étude, l'utilisation de l'analyse statistique multivariable, ACP, révèle une sélection des propriétés de la qualité du sol qui sont sensibles à la transition du TC au SD selon leurs corrélations et leurs contributions à la variabilité totale des données. Cependant, la MOP présente une forte corrélation et contribution avec la variabilité du sol en contexte du semis direct. Ce qui signifie que, cette propriété est très sensible au passage du système TC au SD et la plus déterminante à la variabilité de la qualité du sol, suivi par les propriétés MOT, Da, BM, VT et enfin par les propriétés SS, MP, pF2.7, AS, NT, RP et CEC.

Blanco-Moure *et al.* (2013) concluent que la matière organique particulaire est très sensible au passage du TC au SD par rapport à la matière organique totale et la matière organique liée dans une étude de comparaison à long terme, > 09 ans, en céréaliculture sous climat méditerranéen.

L'analyse des corrélations simples entre les différentes propriétés morphologique et analytique sensibles aux changements dans le contexte du SD met en évidence les fortes corrélations entre MOP et les autres propriétés de la qualité du sol.

Nos résultats montrent, aussi que, la structure morphologique du sol SS a été améliorée indirectement par l'amélioration de la MOP, MOT, DA, VT et BM. Ces résultats sont similaires aux résultats de Celik *et al.* (2020) sur une texture du sol fine. Ce qui signifie que, l'amélioration de la

structure compacte, qui a été observée dès les premières années d'adoption du SD, à la subsurface du sol, est effectuée par le processus biologique VT et BM. C'est-à-dire que, la structure du sol évolue et atteint progressivement une bonne qualité lorsque la matière organique particulaire et totale augmente (source d'énergie pour les organismes) et lorsque la densité apparente diminue (augmentation du volume vide). .

Par ailleurs, dans cette évaluation de la qualité du sol dans le contexte du SD, les propriétés : microporosité, rétention en eau au point de flétrissement permanent, matière organique liée, rapport C/N, pH et conductivité électrique restent stables (non sensibles) dans le sol.

D'après Jemaia *et al.* (2013), Celik *et al.* (2020), la stabilité des propriétés physiques du sol est liée à la texture du sol.

Cárceles *et al.* (2022) concluent que la stabilité dans le changement du pH et le rapport C/N est due, probablement, à la composition chimique des résidus organique.

Ainsi, l'analyse en composantes principales met en évidence, l'évolution verticale et temporelle de la qualité du sol en contexte du semis direct selon le degré de similitude des propriétés morphologiques et analytiques du sol étudié dans l'ordre suivant :

(H1SD9-H1SD6) > (H1SD3) > (H2SD9-H2SD6-H2TC) > (H1TC) > (H2SD3).

CONCLUSION

L'objectif de cette recherche était d'évaluer le changement des propriétés morphologiques et analytiques du sol, après 3, 6 et 9 ans de l'adoption du SD, ainsi que, la contribution de la structure et la matière organique dans le changement des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

Au terme de cette étude, les principaux résultats obtenus se résument comme suit :

L'évolution progressive de la qualité du sol selon la profondeur de mesure :

$(H1SD9-H1SD6) > (H1SD3) > (H2SD9-H2SD6-H2TC) > (H1TC) > (H2SD3)$.

Les premières années (3 ans) de l'adoption du SD, comme système alternatif au travail conventionnel TC, permettent d'améliorer les propriétés morphologiques et analytiques du sol (propriétés physiques, chimiques et biologiques) dans la surface du sol 0-10 cm.

Par contre à la profondeur 10-20 cm, ce système provoque des contraintes sévères pour la structure morphologique (100 %), la densité apparente (10 %), la stabilité des agrégats (22 %), la résistance racinaire (27 %), la macroporosité (20 %), la matière organique totale (13 %), la matière organique particulaire (35 %), la capacité d'échange cationique (12 %) et la biomasse microbienne (23 %).

Après 6 et 9 ans, le SD engendre une amélioration progressive des propriétés du sol dans les 2 profondeurs de mesure, notamment, les contraintes observées en premières années du SD. Cette amélioration peut atteindre 150 % pour la structure morphologique, 11 % pour la densité apparente, 65 % pour la stabilité des agrégats, 40 % pour la résistance racinaire, 22 % pour la macroporosité, 25 % pour la matière organique totale, 45 % pour la matière organique particulaire, 13 % pour la capacité d'échange cationique, 27 % pour la biomasse microbienne.

Cette étude a montré, aussi, la sensibilité de la matière organique particulaire, de la matière organique totale, de la densité apparente et de les organismes du sol par rapport aux autres propriétés du sol, dans la transition du système TC au SD.

Ces propriétés peuvent contribuer à l'amélioration de l'organisation structurale du sol et de la macroporosité de la capacité de rétention en eau, de la stabilité des agrégats, de l'azote total, de la capacité d'échange cationique et de la résistance à la pénétration racinaire.

Les autres propriétés étudiées: la microporosité, la rétention en eau au pF4,2, matière organique liée, rapport C/N, pH et conductivité électrique sont stables (non sensibles) à la transition du TC au SD.

Les résultats de ce travail ne sont qu'une première contribution incomplète à l'évaluation du changement temporel des propriétés morphologiques et analytiques (physiques, chimiques et biologiques) de la qualité du sol dans le contexte du semis direct en Algérie. Plusieurs propriétés n'ont été pas figurées dans ce travail à cause de contraintes financières (analyses microbiologiques) et techniques (conductivité hydraulique à saturation, azote assimilable, phosphore assimilable, potassium assimilable, bases échangeables et mésofaune).

En perspective, cette recherche mérite d'être approfondie par des analyses la structure de la communauté microbienne (ADN du sol) et la micromorphologie du sol pour évaluer le changement de la qualité du sol à l'échelle des particules élémentaires (microscopique) en contexte du semis direct.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdallah A. M., Jat H. S., Choudhary M., Abdelaty E. F., Sharma P. C. et Jat, M. L. 2021.** Conservation agriculture effects on soil water holding capacity and water-saving varied with management practices and agroecological conditions: A review. *Agronomy*, 11(9), 1681.
- Aduhene-Chinbuah J., Sugihara S., Komatsuzaki M., Nishizawa T. et Tanaka, H. 2022.** No tillage increases SOM in labile fraction but not stable fraction of andosols from a long-term experiment in Japan. *Agronomy*, 12(2), 479.
- Alhameid A., Ibrahim M., Kumar S., Sexton P. et Schumacher T.E., 2017.** Soil organic carbon changes impacted by crop rotational diversity under no-till farming in South Dakota, USA. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81, 868–877.
- 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.
- Ball, B. C., Batey, T., et Munkholm, L. J. 2007.** Field assessment of soil structural quality—a development of the Peerlkamp test. *Soil use and Management*, 23(4), 329-337.
- Belhadj A., 2014.** Propriétés d'un sol argileux cultivé en blé soumis à différentes techniques de travail du sol. Thèse de magister : ENSA – El Harrach, 104 p.
- Ben Moussa-Machraoui S. B., Errouissi F., Ben-Hammouda M. et Nouira S., 2010.** Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 247-253.
- Bescansa P., Imaz M. J., Virto I., Enrique A. et Hoogmoed W. B., 2006.** Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain. *Soil and Tillage Research*, 87, 19-27.
- Blanco-Canqui H. et Ruis S. J. (2018).** No-tillage and soil physical environment. *Geoderma*. 326164-200.
- Blanco-Moure N., Gracia R., Bielsa A. C. et López M. V., 2013.** Long-term no-tillage effects on particulate and mineral-associated soil organic matter under rainfed Mediterranean conditions. *Soil Use and Management*, 29(2), 250-259.
- Boizard H., Peigné J., Sasal M. C., De Fátima Guimarães M., Piron D., Tomis V., Vian J.-F., Cadoux S., Ralisch R. et Tavares Filho J., 2017.** Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till. *Soil and Tillage Research*. 17392-103.
- Bongiorno, G., Bünemann, E. K., Oguejiofor, C. U., Meier, J., Gort, G., Comans, R., ...et de Goede, R. 2019.** Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. *Ecological Indicators*, 99, 38-50.

Bünemann E. K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R. E., De Deyn G., De Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T. W. et Mäder P., 2018. Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*. 120105-125.

Cai A., Han T., Ren T., Sanderman J., Rui Y., Wang B., ... et Xu M., 2022. Declines in soil carbon storage under no tillage can be alleviated in the long run. *Geoderma*, 425, 116028.

Calembert J., 1985. Cours de physique du sol. Fac. Sc. Agro. Gembloux, 57p

Cambardella C. A. et Elliott E., 1992. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*. 56(3): 777-783.

Calvet, R. 2003. Le sol: propriétés et fonctions. Constitution, structure, phénomènes aux interfaces (Vol. 1). France Agricole Editions.

Carof M., 2006. Fonctionnement de peuplement en semis direct associant blé tendre d'hiver à différentes plantes de couverture en climat tempéré. Thèse de doctorat : Institut National Agronomique Paris-Grignon, 115 p.

Cárceles Rodríguez B., Durán-Zuazo V. H., Soriano Rodríguez M., García-Tejero I. F., Gálvez Ruiz B., et Cuadros Távira S., 2022. Conservation Agriculture as a Sustainable System for Soil Health: A Review. *Soil Systems*, 6(4), 87.

Castellini, M., Fornaro, F., Garofalo, P., Giglio, L., Rinaldi, M., Ventrella, D., ... et Vonella, A. V. 2019. Effects of no-tillage and conventional tillage on physical and hydraulic properties of fine textured soils under winter wheat. *Water*, 11(3), 484.

Çelik, İ., Günal, H., Acar, M., Acir, N., Barut, Z. B., et Budak, M. 2019. Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate. *Soil and Tillage Research*, 185, 17-28.

Celik I., Günal H., Acar M., Acir N., Bereket Barut Z. et Budak M., 2020. Evaluating the long-term effects of tillage systems on soil structural quality using visual assessment and classical methods. *Soil Use and Management*. 36(2): 223-239.

Derpsch R. et Friedrich T., 2009. Development and Current Status of No-till Adoption in the World. 18th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organization (ISTRO), Izmir, Turkey.

Djenba, S., 2015. Influence des paramètres géologique, géomorphologique et hydrogéologique sur le comportement mécanique des sols de la wilaya de Sétif. Algérie (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).

FAO., 2018. Conservation Agriculture [Online]. Available: <http://www.fao.org/ag/ca/1a.html>

FAO., 2021. Available: <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/en/>.

Fenni M., Nadjem K., et Mekhlouf A., 2015. Carbon sequestration by direct seeding of wheat in Setif high plains (North East of Algeria). *Progress in Clean Energy*, Volume 1: Analysis and Modeling, 615-621.

- Fonteyne S., Burgueño J., Albarran Contreras B. A., Andrio Enriquez E., Castillo Villasenor L., Enyanche Velazquez F., ... et Verhulst N., 2021.** Effects of conservation agriculture on physicochemical soil health in 20 maize-based trials in different agro-ecological regions across Mexico. *Land Degradation & Development*, 32(6), 2242-2256.
- Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J. et Morel J.L., 2005.** *Sols et Environnement*, Dunod Editions, Paris, 804 p.
- Giarola N. F. B., da Silva Á. P., Tormena C. A., Guimarães R. M. L. et Ball, B. C., 2013.** On the visual evaluation of soil structure: The Brazilian experience in Oxisols under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 127, 60-64.
- Gozubuyuk Z., Sahin U., Ozturk I., Celik A. et Adiguzel M. C., 2014.** Tillage effects on certain physical and hydraulic properties of a loamy soil under a crop rotation in a semi-arid region with a cool climate. *Catena*, 118, 195-205.
- Guan, D., Al-Kaisi, M. M., Zhang, Y., Duan, L., Tan, W., Zhang, M., et Li, Z., 2014.** Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. *Field Crops Research*, 157, 89-97.
- Guimarães R. M. L., Ball B. C. et Tormena C. A., 2011.** Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, 27(3), 395-403.
- Guimarães, R. M., Lamandé, M., Munkholm, L. J., Ball, B. C., et Keller, T. 2017.** Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research. *Soil and Tillage Research*, 173, 104-113.
- Guo M., 2021.** Soil Health Assessment and Management: Recent Development in Science and Practices. *Soil Systems*. 5(4): 61.
- Harvey J.M., 2005.** Le semis en semis direct, l'unique opération de travail du sol. Colloque en Agroenvironnement. Conseil des productions végétales du Québec.
- Jakab G., Madarász B., Masoudi M., Karlik M., Király C., Zacháry D., ... et Szalai Z., 2023.** Soil organic matter gain by reduced tillage intensity: Storage, pools, and chemical composition. *Soil and Tillage Research*, 226, 105584.
- Jemai I., Aissa N. B., Guirat S. B., Ben-Hammouda M. et Gallali T., 2013.** Impact of three and seven years of no-tillage on the soil water storage, in the plant root zone, under a dry subhumid Tunisian climate. *Soil and Tillage Research*. 12626-33.
- Kay B.D. et Vanden Bygaart A.J., 2002.** Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 66, 107-118.
- Kassam A., Friedrich T., Derpsch R. et Kienzle J., 2015.** Overview of the worldwide spread of conservation agriculture. *Field Actions Science Reports. The Journal of Field Actions*, 8.
- Kassam, A., Friedrich, T., et Derpsch, R., 2019.** Global spread of conservation agriculture. *International Journal of Environmental Studies*, 76(1), 29-51.

- Karlen D. L., Mausbach M. J., Doran J. W., Cline R. G., Harris R. F. et Schuman G. E., 1997.** Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Kool D., Tong B., Tian Z., Heitman J., Sauer T. et Horton R., 2019.** Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. *Soil and Tillage Research*. 19395-100.
- Kostina N. V., Bogdanova T. V. et Umarov M. M., 2011.** Biological activity of the coprolites of earthworms. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 66, 18-23.
- Kribaa M., Hallaire V., Curmi P. et Lahmar R., 2001.** Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil and Tillage Research*. 60(1-2): 43-53.
- 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. Thèse de Doctorat d'état en Sciences Agronomiques, INA El -Harrach, Alger, 121p.
- Kribaa, M., 2003.** Effet de la jachère sur les sols en céréaliculture pluviale dans les zones semi-arides méditerranéennes. 2003. Thèse de doctorat. INA.
- Labreuche J., Viloingt T., Caboulet D., Daouze J. P., Duval R., Ganteil A. et Roger-Estrade J., 2007.** La pratique des techniques culturales sans labour en France. *Rapport projet ADEME. Impacts environnementaux des TCSL*.
- Le Bissonnais Y. L., 1996.** Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of soil science*. 47(4): 425-437.
- Mathieu C., Pieltain F, Asseiline J. et Chossat CH., 2008.** Analyse physique des sols. Méthodes choisies. Ed Paris, 275 p.
- Morbidelli R., Saltalippi C., Flammini A., Cifrodelli M., Picciafuoco T., Corradini C. et Govindaraju R. S., 2017.** In situ measurements of soil saturated hydraulic conductivity: Assessment of reliability through rainfall-runoff experiments. *Hydrological Processes*, 31(17), 3084-3094.
- Nicoloso, R. S., et Rice, C. W., 2021.** Intensification of no-till agricultural systems: An opportunity for carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 85(5), 1395-1409.
- Simpson Z. P., Jordahl J., Leptin A., Miguez F. E., Niemi J., Schulte L. A., ... et McDaniel M. D., 2022.** No-tillage does not on average reduce soil carbon storage compared to conventional tillage. Comment on “Declines in soil carbon storage under no tillage can be alleviated in the long run” by Cai et al. *Geoderma*, 116307.
- Srour A. Y., Ammar H. A., Subedi A., Pimentel M., Cook R. L., Bond J. et Fakhoury A. M., 2020.** Microbial communities associated with long-term tillage and fertility treatments in a corn-soybean cropping system. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1363.

- Sokolowski A. C., McCormick B. P., De Grazia J., Wolski J. E., Rodríguez H. A., Rodríguez-Frers E. P., ... et Barrios M. B., 2020.** Tillage and no-tillage effects on physical and chemical properties of an Argiaquoll soil under long-term crop rotation in Buenos Aires, Argentina. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(2), 185-194.
- Pagliai M., Raglione M., Panini T., Maletta M. et La Marca M., 1995.** The structure of two alluvial soils in Italy after 10 years of conventional and minimum tillage. *Soil and Tillage Research*, 34(4), 209-223.
- Peigné J. et Cannavaciolo M., 2009.** Evaluation de différents niveaux de perturbation du sol en Agriculture Biologique à l'aide d'indicateurs biologiques. Rapport de recherche ADEME, sous la direction de A. Bispo, 50 p.
- Peña-Sancho C., López M. V., Gracia R. et Moret-Fernández D., 2016.** Effects of tillage on the soil water retention curve during a fallow period of a semiarid dryland. *Soil Research*, 55(2), 114-123.
- Plaza-Bonilla D., Cantero-Martínez C., Viñas P. et Álvaro-Fuentes J., 2013.** Soil aggregation and organic carbon protection in a no-tillage chronosequence under Mediterranean conditions. *Geoderma*. 19376-82.
- Roger-Estrade J., Labreuche J. et Richard G., 2011.** Effets de l'adoption des techniques culturales sans labour (TCSL) sur l'état physique des sols: conséquences sur la protection contre l'érosion hydrique en milieu tempéré. *Cahiers Agricultures*. 20(3): 186-193 (1).
- Rouabhi A., Laouar A., Mekhlouf A. et Dhehibi B., 2018.** What Are The Factors Affecting No-Till Adoption In The Farming System Of Sétif Province In Algeria?. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 6(6), 636-641.
- Vian J.-F., Peigné J., Chaussod R. et Roger-Estrade J., 2009.** Effects of four tillage systems on soil structure and soil microbial biomass in organic farming. *Soil Use and Management*. 25(1): 1-10.
- Warkentin, B. P., 2008.** Soil structure: A history from tilth to habitat. *Advances in Agronomy*, 97, 239-272.
- Xiao L., Kuhn N. J., Zhao R. et Cao L., 2021.** Net effects of conservation agriculture principles on sustainable land use: A synthesis. *Global Change Biology*, 27(24), 6321-6330.

ANNEXES

Annexe 1 : Résultats de la caractérisation physicochimique de l'horizon travaillé dans le site A (9 échantillons)

Blocs	Parcelles	CE dS/m	pH	CEC Cmol/kg	CaCO3 %	Argile %	Limon %	Sable %
Bloc 1	TC	0,15	8,22	16,33	24,5	37,9	43,5	18,6
	TM	0,151	8,1	16,94	25,3	38,6	43,2	18,2
	SD3	0,153	8,11	17,28	23,8	38,4	42	18,6
Bloc 2	TC	0,152	8,21	15,2	25	39,8	42,8	17,4
	TM	0,152	8,1	16,42	24,6	39	42,5	18,5
	SD3	0,151	8,12	16,97	24,3	38,6	43,4	18
Bloc 3	TC	0,15	8,22	15,11	24,8	39,4	41,2	19,4
	TM	0,15	8,11	16,78	24,7	38,3	42,3	19,4
	SD3	0,152	8,12	17,19	24,3	39	41,6	19,4

Annexe 2 : Résultats de la caractérisation physicochimique de l'horizon travaillé dans le site B (18 échantillons)

Parcelles	Position de la pente	CE dS/m	pH	CEC cmol/kg	CaCO3 %	Argile %	Limon %	Sable %
TCJ	Basse	0,212	8,3	16,95	17,2	40,3	40,3	19,4
		0,218	8,27	16,1	18,5	41,2	40,5	18,3
		0,203	8,29	16,1	18,5	39,5	40,4	20,1
	Moyenne	0,264	8,11	14,22	23,5	33,4	42	24,6
		0,264	8,2	14,82	22,2	30,5	47,1	22,4
		0,251	8,15	15,63	24,6	35,6	40,8	23,6
	Haute	0,137	8,25	6,52	28,6	10,1	40,7	49,2
		0,144	8,22	6,58	27	10,8	40,6	48,6
		0,148	8,2	7,46	26,4	9,6	43	47,4
SD9	Basse	0,207	8,15	17,96	20	40,5	40,5	19
		0,211	8,2	17,74	19,3	39	43	18
		0,202	8,25	17,83	18,5	41,2	40,6	18,2
	Moyenne	0,264	8,05	16,74	23,5	34,2	42,8	23
		0,268	8,08	16,2	22	33,4	42,5	24,1
		0,266	8,1	15,86	24	32,1	45,1	22,8
	Haute	0,139	8,15	9,33	27,6	9,8	43,2	47
		0,145	8,17	9,58	28,5	9	42,4	48,6
		0,148	8,15	9,12	28	8,7	42,3	49

Annexe 3 : Résultats de la caractérisation physicochimique de l'horizon travaillé dans le site C, parcelle SD6, (9 échantillons)

Position de la pente	CE dS/m	pH	CEC cmol/kg	CaCO3 %	Argile %	Limon %	Sable %
Basse	0,275	8,1	17,83	20,4	39,8	41,6	18,6
	0,280	8,05	17,92	19,8	40,6	43,1	16,3
	0,289	8,08	17,85	19,5	40,8	41,4	17,8
Moyenne	0,252	8,12	14,66	15,6	35,4	42,3	22,3
	0,257	8,08	15,98	12,3	36	43,2	20,8
	0,255	8,09	15,88	12,8	36,1	42,9	21
Haute	0,143	8,31	7,83	22,1	9,6	48,4	42
	0,139	8,22	8,11	18,6	10,3	47,9	41,8
	0,148	8,2	7,16	18	9,1	50,3	40,6

Annexe 4 : Résultats des analyses de la qualité structurale et la dynamique de la matière organique selon la profondeur du sol dans le site A (18 échantillons)

Parcelles	Profondeurs (cm)	SS (score)	DA (g/cm3)	RP (Mpa)	SA (mm)	Humidité au pF2,7 (%)	Humidité au pF4,2 (%)	MP (%)	Mp (%)	MOT (%)	MOP (%)	MOL (%)	N (%)	C/N	BM (mg/kg)	VT (ind/m2)
TC	0-10	3	1,52	1,8	1,1	37,5	23,2	10,2	37,9	1,72	0,27	1,66	0,08	12,5	100	20
		3	1,55	1,8	1,05	32,3	27,8	7,3	37,7	1,8	0,35	1,72	0,08	13,1	98	11
		4	1,58	2,1	1,02	35,6	24,6	8,2	37,4	1,7	0,28	1,68	0,08	12,4	99	16
TM	0-10	3	1,51	2	1,25	39,5	24,2	8,4	37	2,03	0,51	1,7	0,1	11,8	160	22
		3	1,45	1,6	1,22	33	25,8	11,6	37,6	1,9	0,44	1,68	0,08	13,8	152	14
		2	1,49	1,8	1,31	38,2	26,6	8,8	37,2	1,92	0,47	1,7	0,08	1,4	155	16
SD3	0-10	1	1,4	1,3	1,58	40,2	22,5	14,1	38,2	3,03	0,82	1,72	0,15	11,7	211	25
		1	1,4	1,3	1,52	35,5	26,8	12	37,4	2,81	1,03	1,7	0,1	14,9	224	12
		2	1,45	1,6	1,42	36,2	26,8	10,8	37,8	2,8	1	1,68	0,11	14,8	221	20
TC	10-20	3	1,55	2,1	1,18	35,5	25,5	8,1	36,8	2,03	0,44	1,55	0,1	11,8	137	16
		2	1,52	1,5	1,3	38,4	23,7	10,2	37,4	1,88	0,5	1,57	0,1	10,9	135	18
		3	1,52	1,8	1,18	34,9	26,1	8,9	37,2	1,92	0,4	1,56	0,09	12,4	122	17
TM	10-20	2	1,55	1,8	1,22	36,1	25,9	10,9	36,5	2,1	0,35	1,61	0,12	10,2	166	11
		2	1,52	1,6	1,15	38,1	22,5	7,7	37,3	1,98	0,44	1,55	0,08	14,4	177	18
		2	1,5	1,6	1,18	36	27,2	7,4	36,7	2,05	0,37	1,55	0,1	11,9	172	20
SD3	10-20	4	1,58	2,5	1,06	40,9	25	7,5	39,4	1,62	0,24	1,5	0,05	15,7	85	10
		4	1,6	2,5	0,9	37,6	26,4	7,1	41,7	1,75	0,22	1,6	0,08	12,7	103	13
		5	1,63	3,1	0,9	36,8	22,8	4,5	41,4	1,55	0,29	1,55	0,05	12,9	80	17

Annexe 5 : Résultats des analyses de la qualité structurale et la dynamique de la matière organique selon la profondeur du sol dans le site B (12 échantillons)

Parcelles	Profondeurs (cm)	SS (score)	DA (g/cm ³)	RP (Mpa)	SA (mm)	Humidité au pF2,7 (%)	Humidité au pF4,2 (%)	MP (%)	Mp (%)	MOT (%)	MOP (%)	MOL (%)	N (%)	C/N	BM (mg/kg)	VT (ind/m ²)
TCJ	0-10	3	1,58	1,9	1,08	38,1	24,4	9,5	37,9	1,83	0,62	1,44	0,09	11,8	118	19
		2	1,5	2	1,15	33,1	26,2	8,8	36,1	1,78	0,6	1,54	0,1	10,3	109	10
		3	1,5	1,7	1,1	35,1	25,2	7,8	36,7	1,81	0,55	1,55	0,09	11,7	115	17
SD9	0-10	1	1,43	1	1,95	41,1	26	14	37	3,4	1,22	1,62	0,14	14,1	315	25
		1	1,4	1,5	1,8	37,5	27,8	13,8	36,5	2,4	1,13	1,72	0,12	11,6	300	20
		1	1,4	1	1,82	36,3	25,2	13	37,8	3	1,18	1,75	0,13	13,4	294	20
TCJ	10-20	3	1,6	2,2	1,22	39,6	26,1	11,6	38,1	2	0,48	1,61	0,1	11,6	126	19
		3	1,51	1,8	1,11	39,6	25,3	8,5	37	1,88	0,43	1,58	0,09	12,1	114	17
		3	1,55	1,8	1,18	36,8	25,7	10,3	37,5	1,98	0,58	1,52	0,09	12,8	122	17
SD9	10-20	3	1,52	1,8	1,47	37,5	25,6	10,5	36,8	2,8	0,6	1,95	0,08	20,3	175	20
		3	1,48	2,1	1,59	38,3	24,8	9,1	35,6	2,1	0,45	1,84	0,09	13,6	155	17
		3	1,5	1,5	1,59	39,5	25,2	9,5	37,5	1,96	0,4	1,99	0,1	11,4	163	18

Annexe 6 : Résultats d'analyses de la qualité structurale et la dynamique de la matière organique selon la profondeur du sol dans le site C (6 échantillons)

Parcelles	Profondeurs (cm)	SS (score)	DA (g/cm ³)	RP (Mpa)	SA (mm)	Humidité au pF2,7 (%)	Humidité au pF4,2 (%)	MP (%)	Mp (%)	MOT (%)	MOP (%)	MOL (%)	N (%)	C/N	BM (mg/kg)	VT (ind/m ²)
SD6	0-10	1	1,45	1,2	1,7	40,5	26,8	13,8	37,5	3,1	1,1	1,7	0,13	13,9	246	21
		2	1,4	1,5	1,64	36,6	24,3	12,7	37,1	2,2	1,01	1,66	0,1	12,8	232	19
		1	1,42	1,4	1,62	36,2	25,7	12,1	37,1	3,1	0,93	1,61	0,14	12,9	236	20
	10-20	2	1,58	1,8	1,38	40,4	25,2	10,9	35,6	2,15	0,65	1,98	0,09	13,9	130	19
		1	1,55	2,2	1,5	35,1	25,7	9,1	36,4	1,99	0,44	1,8	0,08	14,5	147	19
		1	1,52	1,5	1,62	38,2	25	9	37,3	1,95	0,52	1,8	0,09	12,6	133	20