

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET PUBLIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR – ANNABA

جامعة باجي مختار – عنابة



FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

LABORATOIRE DES SOLS ET DEVELOPPEMENT DURABLE

Thèse en vue de l'obtention d'un Diplôme de Doctorat

Domaine : Science de la nature et de la vie

Filière : Ecologie et environnement

Spécialité : Ecologie des sols

Intitulé

Impact de l'utilisation des herbicides appliqués à une culture de colza sur les propriétés physico-chimiques des sols

Présentée par : MEROUANI Ines

Directrice de thèse : Dr. KETIF Amel

Devant un jury composé de :

BENSLAMA Mohamed	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Président
KETIF Amel	MCA	Université Badji Mokhtar -Annaba	Rapporteur
SAMAI Ibtissem	Prof.	Université Badji Mokhtar -Annaba	Examineur
GRARA Nedjoud	Prof.	Université 8 Mai 1945 Guelma	Examineur
DRAIAIA Radia	Prof.	Université Med – Cherif Messaadia de Souk ahras	Examineur

Année universitaire : 2025/2026

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce travail de recherche.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur BENSLAMA Mohamed, professeur à l'Université d'Annaba, pour m'avoir accueillie au sein de son équipe de recherche, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de soutenance de cette thèse ainsi que pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail.

Je tiens à remercier très respectueusement les membres du jury Madame SAMAI Ibtissem Professeur à l'université d'Annaba, Madame GRARA Nedjoud Professeur à l'université 8 Mai 1945 Guelma et Madame DRAIAIA Radia Professeur à l'université Med – Cherif Messaadia de Souk ahras pour avoir accepté d'examiner ce travail ainsi que pour leurs remarques et appréciations constructives.

Mes remerciements les plus respectueux s'adressent à ma directrice de thèse, Madame KETIF Amel, maître de conférences A, à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba, pour la qualité de son encadrement scientifique, sa rigueur, sa disponibilité et ses conseils éclairés tout au long de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma sincère reconnaissance aux enseignants-chercheurs et responsables scientifiques qui m'ont accueillie et encadrée lors de mes stages académiques : à l'Université d'Amman (Jordanie), à l'Université de Tunis (Tunisie) et à l'Università degli Studi di Torino (Italie), pour leur disponibilité, leur encadrement, le partage de leurs connaissances et les conditions de travail favorables qu'ils m'ont offertes. Ces expériences ont grandement contribué à l'enrichissement scientifique et humain de ce travail.

À toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse, j'adresse mes plus sincères remerciements.

Dédicace

Je dédie ce travail, né de longues années d'efforts, de patience et de persévérance,

À mes chers parents,

Dont l'amour inconditionnel, les sacrifices et les prières silencieuses ont éclairé chaque étape de mon parcours.

Sans eux, rien n'aurait été possible.

À mon mari,

Compagnon de vie et soutien de chaque instant, pour sa patience, sa compréhension et sa présence rassurante dans les moments les plus exigeants de ce chemin scientifique.

À mon fils de cinq ans,

Mon plus beau cadeau et ma plus grande source de motivation, dont le sourire, l'innocence et l'amour ont transformé les difficultés en force et l'effort en espoir.

À mes frères et à ma sœur,

Pour leur affection sincère, leurs encouragements constants et leur confiance.

" تأثير استخدام مبيدات الأعشاب في زراعة السلجم الزيتي على الخصائص الفيزيائية-الكيميائية للتربة "

الملخص:

أنجزت هذه الأطروحة في المحطة التجريبية للمعهد التقني للمحاصيل الكبرى بقالة خلال موسمين زراعيين متتاليين بهدف تقييم تأثير المعاملات بالمبيدات النباتية على محصول السلجم الزيتي. ولم تقتصر الدراسة على تقييم الفعالية الزراعية بل اعتمدت مقارنة متكاملة لنظام التربة-النبات، من خلال تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة، والوظائف الفيزيولوجية للنبات، وأداء الإنتاج، وتطور بقايا المبيدات في التربة.

أظهرت النتائج أن هذه المعاملات تؤثر تدريجياً في جودة التربة، خاصة من خلال التغيرات في الكربون العضوي والفسفور المتاح، ودرجة الحموضة، وبعض المؤشرات البنيوية، مما أدى في عدة حالات إلى تحسن الخصوبة الوظيفية للتربة. وقد ترافق ذلك مع تنشيط العمليات البرولين والسكريات الذاتية. وتعكس هذه الاستجابات تحسناً في الفيزيولوجية في نباتات، تجلى في ارتفاع محتوى الكلوروفيل البروتينات النشاط الضوئي، وتعزيزاً في أيض النيتروجين، وقدرة أفضل على التكيف مع ضغوط الوسط البيئي، وهو ما انعكس إيجاباً على النمو وتكوين الأعضاء التكاثرية والمردود. ومع ذلك، أبرزت الدراسة وجود تباين واضح بين الأصناف، يرتبط ذلك باختلاف خصائص التربة والأنماط الوراثية والظروف المناخية. كما أظهر تتبع بقايا المبيدات في التربة حدوث تراكم أولي يعقبه تناقص تدريجي، إلى جانب بقاء بعض المركبات بين المواسم، خاصة تلك ذات العمر النصف الطويل، مما يثير تساؤلات حول أثارها البيئية على المدى الطويل.

بوجه عام، توضح هذه الأطروحة أن المعاملات بالمبيدات يمكن أن تحسن إنتاجية السلجم الزيتي، شريطة استخدامها في إطار إدارة رشيدة تراعي خصائص التربة، والأصناف المزروعة، ومصير المواد الكيميائية في البيئة.

كلمات مفتاحية: المبيدات؛ بقايا المبيدات؛ التربة؛ الخصائص الفيزيائية والكيميائية؛ السلجم

الزيتي

« Impact de l'utilisation des herbicides appliqués à une culture de colza sur les propriétés physico-chimiques des sols »

Résumé :

Cette thèse a été conduite à la station expérimentale de l'ITGC de Guelma sur deux campagnes agricoles successives afin d'évaluer l'effet de traitements phytosanitaires combinant Callisto, Colzor Trio et Toprex sur la culture du colza (*Brassica napus* L.). L'étude ne s'est pas limitée à l'efficacité agronomique des produits, mais a adopté une approche intégrée du système sol-plante, en examinant à la fois les propriétés physico-chimiques du sol, le fonctionnement physiologique des plantes, les performances de production et l'évolution des résidus de pesticides.

Les résultats montrent que les traitements influencent progressivement la qualité des sols, notamment à travers des modifications du carbone organique, du phosphore disponible, du pH et de certains paramètres structuraux, contribuant dans plusieurs cas à une amélioration de la fertilité fonctionnelle. Ces changements s'accompagnent d'une stimulation des processus physiologiques chez le colza, mise en évidence par une hausse des teneurs en chlorophylle, en protéines, en proline et en sucres solubles. Ces réponses traduisent une activité photosynthétique plus efficace, un métabolisme azoté renforcé et une meilleure capacité d'adaptation aux contraintes du milieu, ce qui se répercute positivement sur la croissance, la formation des organes reproducteurs et le rendement. L'étude met toutefois en évidence une forte variabilité des réponses selon les parcelles et les variétés, liée aux différences de conditions édaphiques, de géotypes et de contexte climatique. Par ailleurs, le suivi des résidus de pesticides dans le sol révèle une accumulation initiale suivie d'une diminution progressive, mais aussi une persistance entre campagnes pour certaines molécules, notamment celles à longue demi-vie comme Toprex, soulevant des interrogations sur leur impact à long terme.

Dans l'ensemble, cette thèse montre que les traitements phytosanitaires peuvent améliorer la productivité du colza, à condition d'être utilisés dans une logique raisonnée intégrant les caractéristiques du sol, les variétés cultivées et le devenir environnemental des substances appliquées.

Mot clés : Colza (*Brassica napus*), pesticides, résidus phytosanitaires, sol, propriétés physico-chimiques.

« Impact of the use of herbicides applied to a rapeseed crop on the physicochemical properties of soils »

Abstract:

This thesis was conducted at the experimental station of the ITGC in Guelma over two consecutive growing seasons to evaluate the effect of phytosanitary treatments combining Callisto, Colzor Trio, and Toprex on rapeseed (*Brassica napus* L.). The study was not limited to assessing the agronomic efficiency of these products, but adopted an integrated soil–plant approach by examining soil physicochemical properties, plant physiological functioning, crop performance, and the dynamics of pesticide residues. The results show that the treatments progressively influence soil quality, particularly through changes in organic carbon, available phosphorus, pH, and certain structural parameters, which in several cases led to an improvement in functional soil fertility. These changes were accompanied by stimulation of physiological processes in rapeseed, reflected by increased levels of chlorophyll, proteins, proline, and soluble sugars. These responses indicate enhanced photosynthetic activity, improved nitrogen metabolism, and greater capacity to adapt to environmental constraints, resulting in better growth, reproductive development, and yield. However, the study also highlights strong variability among plots and varieties, related to differences in soil conditions, genotypes, and climatic context. In addition, monitoring of pesticide residues in the soil revealed an initial accumulation followed by gradual dissipation, as well as persistence between seasons for some molecules, particularly those with long half-lives such as Toprex, raising concerns about their long-term environmental impact.

Overall, this thesis demonstrates that phytosanitary treatments can improve rapeseed productivity, provided that they are applied within a rational management framework that takes into account soil characteristics, cultivated varieties, and the environmental fate of the applied substances.

Keywords : Rapeseed (*Brassica napus*), pesticides, pesticide residues, soil, physicochemical properties.

Liste des tableaux

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
1	Températures moyennes mensuelles la région de Guelma (1990 - 2015).	29
2	Distribution mensuelle moyenne des précipitations enregistrées à Guelma (1990–2015)	30
3	Caractéristiques des variétés de colza utilisées : origine, nom commercial, fournisseur et poids de mille grains (PMG).	34
4	Composition granulométrique du sol du terrain d'étude.	46

Liste des tableaux des résultats d'analyse du sol première et seconde campagne

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
5	Test t de student (pHeau avant semi)	47
6	Test t de student (pH KCl avant semi)	49
7	Test t de student (Carbone organique avant semi)	50
8	Test t de student (Calcaire total avant semi)	51
9	Test t de student (Calcaire actif avant semi)	53
10	Test t de student (Phosphore assimilable avant semi)	54
11	Test t de student (humidité hygroskopique avant semi)	55
12	Test t de student (Porosité avant semi)	56
13	Test t de Student (pH eau avant stade rosette)	58
14	Test t de student (pH KCl durant stade rosette)	59
15	Test t de student (Carbone organique durant stade rosette)	60
16	Test t de student (Calcaire total durant stade rosette)	61
17	Test t de student (Calcaire actif durant stade rosette)	62
18	Test t de student (Phosphore assimilable durant stade rosette)	64
19	Test t de student (Humidité hygroscoPIques durant stade rosette)	65
20	Test t de student (Porosité du sol durant stade rosette)	66
21	Test t de student (pHeau du sol durant stade floraison)	67
22	Test t de student (pH KCl du sol durant stade floraison)	69
23	Test t de student (Carbone organique du sol durant stade floraison)	70
24	Test t de student (Calcaire total durant stade floraison)	71
25	Test t de student (Calcaire actif durant stade floraison)	73
26	Test t de student (Phosphore assimilable durant stade floraison)	74
27	Test t de student (d'humidité hygroskopique durant stade floraison)	75
28	Test t de student (Porosité de sol durant stade floraison)	77
29	Test t de student (pH eau du sol après récolte)	79
30	Test t de student (pH KCl après récolte)	80
31	Test t de student (Carbone organique après récolte)	81
32	Test t de student (Calcaire total après récolte)	83
33	Test t de student (Calcaire actif après récolte)	84
34	Test t de student (phosphore assimilable après récolte)	85
35	Test t de student (humidité hygroskopique après récolte)	87
36	Test t de student (porosité après récolte)	88

37	Test t de student (pH eau avant semi 2 éme campagne)	89
38	Test t de student (pH KCl avant semi 2 éme campagne)	93
39	Test t de student (Carbone organique avant semi 2 éme campagne)	94
40	Test t de student (Calcaire total avant semi 2 éme campagne)	95
41	Test t de student (Calcaire actif avant semi 2 éme campagne)	97
42	Test t de student (phosphore assimilable avant semi 2 éme campagne)	98
43	Test t de student (Humidité hygroskopique avant semi 2 éme campagne)	99
44	Test t de student (Porosité avant semi 2 éme campagne)	101
45	Test t de student (pH eau stade rosette 2 éme campagne)	102
46	Test t de student (pH KCl stade rosette 2 éme campagne)	104
47	Test t de student (Carbone organique stade rosette 2 éme campagne)	105
48	Test t de student (Calcaire total stade rosette 2 éme campagne)	106
49	Test t de student (Calcaire actif stade rosette 2 éme campagne)	107
50	Test t de Student (phosphore assimilable stade rosette 2 éme campagne)	109
51	Test t de student (humidité hygroskopique stade rosette 2 éme campagne)	110
52	Test t de student (Porosité stade rosette 2 éme campagne)	110
53	Test t de student (pH eau stade floraison 2 éme campagne)	112
54	Test t de student (pH KCl stade floraison 2 éme campagne)	114
55	Test t de student (Carbone organique stade floraison 2 éme campagne)	115
56	Test t de student (Calcaire total stade floraison 2 éme campagne)	116
57	Test t de student (Calcaire actif stade floraison 2 éme campagne)	118
58	Test t de student (Phosphore assimilable stade floraison 2 éme campagne)	119
59	Test t de student (humidité hygroskopique stade floraison 2 éme campagne)	120
60	Test t de student (porosité stade floraison 2 éme campagne)	121
61	Test t de student (pH eau après récolte 2 éme campagne)	123
62	Test t de student (pH KCl après récolte 2 éme campagne)	124
63	Test t de student (Carbone organique du sol après récolte 2 éme campagne)	125
64	Test t de student (Calcaire total du sol après récolte 2 éme campagne)	126
65	Test t de student (Calcaire actif du sol après récolte 2 éme campagne)	128
66	Test t de student (Phosphore assimilable du sol après récolte 2 éme campagne)	129
67	Test t de student (humidité hygroskopique après récolte 2 éme campagne)	130
68	Test t de student (Porosité après récolte 2 éme campagne)	132

Liste des tableaux des résultats de résidus de pesticides

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
69	Synthèse des analyses statistiques : Friedman et Kruskal-Wallis (première campagne)	167
70	Synthèse des analyses statistiques : Friedman et Kruskal-Wallis (seconde campagne)	169

Liste des figures

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
1	Évolution de la formation du sol à partir de la roche mère jusqu'au sol mature : stades de développement pédogénétique	9
2	Représentation des structures moléculaires de pesticides organochlorés typiques, tels que le DDT et la chlordécone	22
3	Répartition des étages bioclimatiques dans le nord de l'Algérie	29
4	Situation géographique de la station expérimentale ITGC de Guelma	31
5	Structure chimique des trois substances actives composant l'herbicide Colzor Trio – clomazone, diméthachlore et napropamide	32
6	Représentation chimique de la matière active mésotrione, principe actif de l'herbicide Callisto	33
7	Structures moléculaires et formules brutes des substances actives du Toprex : paclobutrazol et difénoconazole.	34
8	Schéma du protocole expérimental et répartition des variétés de colza testées	35
9	échantillons du sol collectés	37
10	Parcelles expérimentales au stade floraison	38
11	Préparation des échantillons de sol par broyage et tamisage	39
12	Préparation des extraits foliaires au laboratoire	41

Liste des figures : Résultats des paramètres physico-chimiques du sol

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
13	Variation de pH eau du sol avant Semi	47
14	Variation de pH KCl du sol avant Semi	48
15	Variation de taux de carbone organique du sol avant Semi	49
16	Variation de taux de Calcaire total du sol avant Semi	50
17	Variation de taux de Calcaire actif du sol avant Semi	52
18	Variation du taux de phosphore assimilable du sol avant Semi	53
19	Variation du taux d'humidité hygroscopique du sol avant Semi	54
20	Variation de taux de porosité avant Semi	56
21	Variation du taux de pH eau durant stade rosette	57
22	Variation du taux de pH de KCl durant le stade rosette	58
23	Variation du taux de carbone organique durant stade rosette	59
24	Variation du taux de calcaire total durant stade rosette	61
25	Variation de taux de calcaire actif durant stade rosette	62
26	Variation du taux de phosphore assimilable durant stade rosette	63
27	Variation du taux d'humidité hygroscopique du sol durant stade rosette	64
28	Variation du taux de porosité du sol durant stade rosette	65
29	Variation du taux de pH eau du sol durant stade floraison	67
30	Variation du taux de pH KCl durant stade floraison	68
31	Variation du taux de carbone organique du sol durant stade floraison	69
32	Variation du taux de calcaire total durant stade floraison.	71
33	Variation du taux de calcaire actif durant stade floraison	72
34	Variation du taux de Phosphore assimilable durant stade floraison	74
35	Variation du taux d'humidité hygroscopique du sol durant stade floraison.	75

36	Variation du taux de porosité du sol durant stade floraison.	76
37	Variation du taux de pH de l'eau du sol après récolte	78
38	Variation du taux de pH KCl du sol après récolte	79
39	Variation du taux de carbone organique du sol après récolte	81
40	Variation du taux de calcaire total du sol après récolte	82
41	Variation du taux de calcaire actif du sol après récolte	83
42	Variation du phosphore assimilable du sol après récolte	85
43	Variation du taux d'humidité du sol après récolte	86
44	Variation du taux de porosité du sol après récolte	87
45	Variation du taux de pH eau du sol avant semi (2 ^{ème} campagne)	90
46	Variation du taux de pH KCl du sol avant semi (2 ^{ème} campagne)	92
47	Variation du taux de carbone organique du sol avant semi (2 ^{ème} campagne)	93
48	Variation du taux de Calcaire total du sol avant semi (2 ^{ème} campagne)	94
49	Variation du taux de Calcaire total du sol avant semi (2 ^{ème} campagne)	96
50	Variation du Phosphore assimilable du sol avant semi (2 ^{ème} campagne)	97
51	Variation du taux d'humidité du sol avant semi (2 ^{ème} campagne)	98
52	Variation du taux de porosité du sol avant semi (2 ^{ème} campagne)	100
53	Variation du taux de pH eau du sol stade rosette (2 ^{ème} campagne)	101
54	Variation du taux de pH KCl du sol stade rosette (2 ^{ème} campagne)	102
55	Variation du taux de carbone du sol stade rosette (2 ^{ème} campagne)	104
56	Variation du taux de calcaire total du sol stade rosette (2 ^{ème} campagne)	105
57	Variation du taux de calcaire actif du sol stade rosette (2 ^{ème} campagne)	107
58	Variation du taux de phosphore assimilable du sol stade rosette (2 ^{ème} campagne)	108
59	Variation du taux d'humidité du sol stade rosette (2 ^{ème} campagne)	109
60	Variation du taux de porosité du sol stade rosette (2 ^{ème} campagne)	110
61	Variation du taux de pH eau du sol stade floraison (2 ^{ème} campagne)	112
62	Variation du taux de pH KCl du sol stade floraison (2 ^{ème} campagne)	113
63	Variation du taux de Carbone du sol stade floraison (2 ^{ème} campagne)	114
64	Variation du taux de Calcaire total du sol stade floraison (2 ^{ème} campagne)	116
65	Variation du taux de Calcaire actif du sol stade floraison (2 ^{ème} campagne)	117
66	Variation du taux de phosphore assimilable du sol stade floraison (2 ^{ème} campagne)	118
67	Variation du taux d'humidité hygroscopique du sol stade floraison (2 ^{ème} campagne)	120
68	Variation du taux de porosité du sol stade floraison (2 ^{ème} campagne)	121
69	Variation du taux de pH eau du sol après récolte (2 ^{ème} campagne)	122
70	Variation du taux de pH KCl du sol après récolte (2 ^{ème} campagne)	123
71	Variation du taux de carbone organique du sol après récolte (2 ^{ème} campagne)	125
72	Variation du taux de calcaire total du sol après récolte (2 ^{ème} campagne)	126
73	Variation du taux de calcaire actif du sol après récolte (2 ^{ème} campagne)	127
74	Variation du taux de phosphore assimilable du sol après récolte (2 ^{ème} campagne)	128
75	Variation du taux d'humidité hygroscopique du sol après récolte (2 ^{ème} campagne)	130
76	Variation du taux de porosité du sol après récolte (2 ^{ème} campagne)	131

Liste des figures : Résultats des paramètres physio-biochimiques

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
77	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a) ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les parcelles des échantillons témoins et traités (Stade rosette)	135

78	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (b) ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les parcelles des échantillons témoins et traités (Stade de rosette)	136
79	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a+b) ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette)	137
80	Analyse comparative de la teneur totale en protéines ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette)	138
81	Analyse comparative de la teneur en proline ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette)	139
82	Analyse comparative de la teneur en sucres solubles ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les parcelles des échantillons témoins et traités (Stade rosette)	140
83	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a) ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)	141
84	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (b) ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)	142
85	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a+b) ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)	143
86	Analyse comparative de la teneur en protéines totales ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)	144
87	Analyse comparative de la teneur en proline ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)	145
88	Analyse comparative de la teneur en sucres solubles ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)	146
89	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a) ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)	147
90	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (b) ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)	148
91	Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a+b) ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)	148
92	Analyse comparative de la teneur en protéines totales ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)	149
93	Analyse comparative de la teneur en proline ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)	150
94	Analyse comparative de la teneur en sucres solubles ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)	150
95	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a) au cours du stade floraison (2e campagne)	151
96	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b) au cours du stade floraison (2e campagne)	152
97	Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a+b) au cours du stade floraison (2e campagne)	153
98	Effet du traitement sur la teneur en protéines totales au cours du stade floraison (2e campagne)	154
99	Effet du traitement sur la teneur en proline au cours du stade floraison (2e campagne)	155
100	Effet du traitement sur la teneur en sucre solubles au cours du stade floraison (2e campagne)	156

Liste des figures : Résultats des paramètres agronomiques

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
101	effet du traitement sur le nombre moyen de plantes/m ² durant la première et la seconde campagne d'étude	158
102	effet du traitement sur le nombre de branches fructifiées durant la première et la seconde campagne d'étude	159
103	effet du traitement sur le nombre de branches non fructifiées durant la première et la seconde campagne d'étude	160
104	effet du traitement sur le taux d'avortement durant la première et la seconde campagne d'étude	161
105	effet du traitement sur le nombre de graines par silique durant la première et la seconde campagne d'étude	162
106	effet du traitement sur le poids de 1000 graines par silique durant la première et la seconde campagne d'étude	163
107	effet du traitement sur le rendement réel durant la première et la seconde campagne d'étude	164

Liste des figures : Dosage des résidus de pesticides

<i>N°</i>	<i>Titres</i>	<i>Pages</i>
108	Effet du traitement sur la quantité de pesticides durant stade rosette, stade floraison et après récolte (première campagne)	167
109	Effet du traitement sur la quantité de pesticides avant semi, stade rosette, stade floraison et après récolte (seconde campagne)	168

الملخص

Résumé

Abstract

Liste des tableaux

Liste des figures

SOMMAIRE

Introduction.....1

Chapitre I : Le sol : propriétés et modes de fonctionnement

I. Le sol.....	4
1. De quoi s'agit-il ?	4
2. Définition générale du sol.....	4
3. Fonction pédologique : milieu d'altération colonisé par le vivant.....	5
4. Fonction écologique.....	6
5. Mécanismes de formation et d'évolution des sols.....	6
6. Phase initiale de la pédogenèse.....	7
6.1. Enrichissement du sol par l'introduction de matière organique.....	8
6.2. Différenciation des horizons pédologiques via la migration verticale.....	8
7. Caractéristiques physico-chimiques du sol.....	10
7.1. Propriétés physiques du sol.....	10
7.1.1. Structure.....	10
7.1.2. Texture.....	11
7.1.2.1. Méthodes de détermination.....	11
7.1.2.2. Composition texturale.....	11
7.1.3. La porosité du sol.....	12
7.1.4. Profondeur d'enracinement maximale (PEM).....	13
7.1.5. Humidité du sol.....	14
7.1.6. Température du sol.....	14
7.2. Propriétés chimiques du sol.....	14
7.2.1. Le pH du sol.....	14
7.2.2. Pouvoir tampon du sol.....	15
7.2.3. Capacité d'échange cationique.....	15
7.2.4. La salinité.....	15
7.2.5. Matière organique.....	16
7.2.6. Calcaire.....	16
7.2.7. Azote total.....	16

Chapitre II : Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences.....17

1. Fertilité et qualité des sols en contexte agricole.....	17
2. Dégradation des sols.....	17
2.1. Types de dégradation des sols.....	17
2.1.1. Dégradation physique.....	17
2.1.1.1. Encroûtement superficiel.....	18
2.1.1.2. Compaction du sol.....	18
2.1.1.3. Érosion des sols.....	18
2.1.1.4. Érosion éolienne.....	18
2.1.1.5. Érosion hydrique.....	18
2.1.2. Dégradation biologique.....	19
2.1.3. Dégradation chimique.....	19
2.1.3.1. Salinisation.....	19
2.1.3.2. Alcalinisation.....	19
2.1.3.3. Acidification.....	19
2.1.3.4. Appauvrissement en nutriments et matière organique.....	20
2.2. Causes anthropiques de la dégradation des sols.....	20
3. Impact des pesticides sur la dégradation des sols.....	21
3.1. Qu'est-ce qu'un pesticide ? Définition et objectifs.....	21
3.2. Classification des pesticides.....	21
3.2.1. Classification selon l'origine.....	21
3.2.2. Classification selon la composition chimique.....	22
3.2.2.1. Pesticides organochlorés (OC).....	22
3.2.2.2. Pesticides organophosphorés (OP).....	22
3.2.2.3. Pesticides carbamates.....	23
3.2.2.4. Pyréthrine et pyréthroides.....	23
3.2.2.5. Biopesticides.....	23
3.2.3. Classification selon les organismes cibles.....	24
3.2.3.1. Herbicides.....	24
3.2.3.2. Insecticides.....	24
3.2.3.3. Fongicides.....	24
3.2.3.4. Rodenticides.....	25
4. Impacts des pesticides sur l'environnement.....	25
4.1. Effets sur les organismes non ciblés.....	25
4.2. Effets sur les insectes.....	25
4.3. Effets sur la santé humaine.....	26
4.4. Effets des pesticides sur le sol.....	26

Chapitre III : Matériels et méthodes

I. Description du cadre général de l'aire d'étude.....	28
1. Situation géographique.....	28
1.2. Relief.....	28
1.3. Cadre climatique.....	28
1.3.1. Température.....	29

1.3.2. Précipitation.....	30
2. Présentation de la région d'étude.....	30
2.1. Situation géographique.....	30
3. Pesticides.....	31
3.1. Colzor trio.....	31
3.2. Callisto.....	32
3.3. Toprex.....	33
4. Matériel végétal : Brassica napus.L.....	34
4.1. Définitions.....	34
5. Conduite de l'essai.....	35
6. Traitement phytosanitaire.....	35
7. Méthodes d'échantillonnage.....	36
7.1. Méthode d'échantillonnage du sol.....	36
7.2. Stades de prélèvement.....	37
8. Méthode d'échantillonnage du végétal.....	38
8.1. Stades de prélèvement.....	39
9. Méthodes d'analyses.....	39
9.1. Méthode d'analyses physico-chimiques du sol.....	39
9.1.1. Préparation du sol.....	39
9.1.2. Paramètres mesurés.....	40
9.1.2.1. pH : (eau et KCl).....	40
9.1.2.2. Humidité hygroscopique.....	40
9.1.2.3. Calcaire total.....	40
9.1.2.4. Calcaire actif.....	40
9.1.2.5. Carbone organique.....	40
9.1.2.6. Porosité.....	40
9.1.2.8 Granulométrie.....	40
9.1.2.9. Phosphore assimilable.....	40
9.2. Extraction et analyse des résidus de pesticides.....	41
9.3. Analyse des paramètres physio-biochimiques des feuilles de colza.....	41
9.3.1. Dosage de la chlorophylle.....	42
9.3.2. Dosage des sucres solubles.....	43
9.3.3. Dosage des protéines totales.....	43
9.3.4. Dosage de la proline.....	43
9.4. Étude des paramètres agronomiques du rendement.....	43
9.4.1. Nombre de plantes par mètre carré.....	43
9.4.2. Taux d'avortement %.....	43
9.4.3. Le nombre de branches fructifères par plante.....	44
9.4.4. Le nombre de branches non fructifères par plante.....	44
9.4.5. Poids de 1000 graines (g).....	44
9.4.6. Rendement (Qx/ha).....	44
9.4.7. Nombre de graines / silique.....	44
10. Analyses statistiques des données.....	45

Chapitre IV. Résultats et discussion

1. Résultats de paramètres physicochimiques du sol.....	46
1.1. Campagne 2021- 2022.....	46
1.1.1. Avant semi.....	46
1.1.1.1. pH eau.....	47
1.1.1.2. pH KCl.....	48
1.1.1.3. Carbone organique.....	49
1.1.1.4. Calcaire total.....	50
1.1.1.5. Calcaire actif.....	51
1.1.1.6. Phosphore assimilable.....	53
1.1.1.7. Humidité hygroscopique.....	54
1.1.1.8. Porosité.....	56
1.1.2. Stade Rosette.....	57
1.1.2.1. pH eau.....	57
1.1.2.2. pH KCl.....	58
1.1.2.3. Carbone organique.....	59
1.1.2.4. Calcaire total.....	61
1.1.2.5. Calcaire actif.....	62
1.1.2.6. Phosphore assimilable.....	63
1.1.2.7. Humidité hygroscopique.....	64
1.1.2.8. Porosité.....	65
1.1.3. Stade Floraison.....	67
1.1.3.1. pH eau.....	67
1.1.3.2. pH KCl.....	68
1.1.3.3. Carbone organique.....	69
1.1.3.4. Calcaire total.....	71
1.1.3.5. Calcaire actif.....	72
1.1.3.6. Phosphore assimilable.....	74
1.1.3.7. Humidité hygroscopique.....	75
1.1.3.8. Porosité.....	76
1.1.4. Après récolte.....	77
1.1.4.1. pH eau.....	77
1.1.4.2. pH KCl.....	79
1.1.4.3. Carbone organique.....	80
1.1.4.4. Calcaire total.....	82
1.1.4.5. Calcaire actif.....	83
1.1.4.6. Phosphore assimilable.....	85
1.1.4.7. Humidité hygroscopique.....	86
1.1.4.8. Porosité.....	87
1.2. Campagne 2022- 2023.....	91
1.2.1. Avant semi.....	91
1.2.1.1. pH eau.....	91
1.2.1.2. pH KCl.....	92
1.2.1.3. Carbone organique.....	93

1.2.1.4. Calcaire total.....	95
1.2.1.5. Calcaire actif.....	96
1.2.1.6. Phosphore assimilable.....	97
1.2.1.7. Humidité hygroscopique.....	99
1.2.1.8. Porosité.....	100
1.2.2. Stade rosette.....	101
1.2.2.1. pH eau.....	102
1.2.2.2. pH KCl.....	103
1.2.2.3. Carbone organique.....	104
1.2.2.4. Calcaire total.....	105
1.2.2.5. Calcaire actif.....	107
1.2.2.6. Phosphore assimilable.....	108
1.2.2.7. Humidité hygroscopique.....	109
1.2.2.8. Porosité.....	110
1.2.3. Stade floraison.....	111
1.2.3.1. pH eau.....	111
1.2.3.2. pH KCl.....	113
1.2.3.3. Carbone organique.....	114
1.2.3.4. Calcaire total.....	116
1.2.3.5. Calcaire actif.....	117
1.2.3.6. Phosphore assimilable.....	118
1.2.3.7. Humidité hygroscopique.....	120
1.2.3.8. Porosité.....	121
1.2.4. Après récolte.....	122
1.2.4.1. pH eau.....	122
1.2.4.2. pH KCl.....	123
1.2.4.3. Carbone organique.....	124
1.2.4.4. Calcaire total.....	126
1.2.4.5. Calcaire actif.....	127
1.2.4.6. Phosphore assimilable.....	128
1.2.4.7. Humidité hygroscopique.....	129
1.2.4.8. Porosité.....	131
2. Résultats des paramètres physio-biochimiques du colza (brassica napus.L).....	135
2.1. Première campagne.....	135
2.1.1. Stade rosette.....	135
2.1.1.1. Chlorophylle (a).....	135
2.1.1.2. Chlorophylle (b).....	136
2.1.1.3. Chlorophylle (a+b).....	136
2.1.1.4. Protéines totales.....	137
2.1.1.5. Proline.....	139
2.1.1.6. Sucres solubles.....	139
2.1.2. Stade floraison.....	140
2.1.2.1. Chlorophylle (a).....	140
2.1.2.2. Chlorophylle (b).....	141
2.1.2.3. Chlorophylle (a+b).....	142
2.1.2.4. Protéines totales.....	144
2.1.2.5. Proline.....	144

2.1.2.6. Sucres solubles.....	145
2.2. Deuxième campagne.....	146
2.2.1. Stade rosette.....	146
2.2.1.1. Chlorophylle (a).....	146
2.2.1.2. Chlorophylle (b).....	147
2.2.1.3. Chlorophylle (a+b).....	149
2.2.1.4. Protéines totales.....	149
2.2.1.5. Proline.....	150
2.2.1.6. Sucres solubles.....	151
2.2.2. Stade floraison.....	152
2.2.2.1. Chlorophylle (a).....	152
2.2.2.2. Chlorophylle (b).....	153
2.2.2.3. Chlorophylle (a+b).....	154
2.2.2.4. Protéines totales.....	155
2.2.2.5. Proline.....	156
2.2.2.6. Sucres solubles.....	157
3. Paramètres agronomiques.....	158
3.1. Nombre moyen de plantes/m ²	158
3.2. Nombre de branches fructifères par plantes.....	158
3.3. Nombre de branches non fructifères par plante.....	159
3.4. Taux d'avortement.....	160
3.5. Nombre de graines / silique.....	162
3.6. Poids de 1000 graines.....	162
3.7. Rendement réel (Qx/ha).....	163
4. Dosage des résidus de pesticides.....	167
4.1 Première campagne.....	167
4.2 Seconde campagne.....	168
Discussion générale.....	171
Conclusion et perspectives	175
Références bibliographiques	

Introduction

Introduction

Introduction :

La croissance rapide de la population mondiale entraîne une demande croissante en nourriture, énergie et ressources agricoles. Selon les projections démographiques, la population mondiale pourrait atteindre près de dix milliards d'ici 2050 (Ridwan et al., 2025) ce qui oblige les systèmes agricoles à augmenter leur production tout en réduisant leur impact environnemental. Ce constat pose un défi majeur : produire suffisamment pour nourrir la population sans endommager les sols, l'eau ou la biodiversité (Maja et al., 2021). Dans ce contexte, Le colza (*Brassica napus* L.) figure parmi les grandes cultures les plus largement cultivées à l'échelle mondiale. Cette plante dicotylédone, appartenant à la famille des Brassicacées, est issue du croisement naturel entre le chou (*Brassica oleracea*) et la navette (*Brassica campestris*) (Katche et al., 2023). Sa domestication remonte à plusieurs millénaires : il était déjà cultivé dans l'Antiquité en Asie, notamment en Inde, en Chine et au Japon, avant de se diffuser progressivement vers l'Europe au cours du Moyen Âge, en particulier dans les régions économiquement développées comme les Pays-Bas (Gupta et Pratap, 2017). Aujourd'hui, le colza occupe une place majeure parmi les cultures oléagineuses mondiales. Il constitue une source importante d'huile alimentaire, de protéines utilisées en alimentation animale et de matières premières destinées à la production de biocarburants (Wang et Yin, 2014 ; Zhang et al., 2022).

Cependant, le colza est une espèce sensible, confrontée à divers défis tels que les ravageurs, les maladies, les mauvaises herbes, ou le stress climatique et nutritionnel. Ces contraintes réduisent la régularité des rendements et, dans la majorité des systèmes, conduisent à un usage intensif de produits phytosanitaires.

Au cours des dernières décennies, l'emploi des pesticides s'est considérablement accru à l'échelle mondiale, tant en quantité totale qu'en dose appliquée par unité de surface. Plus de 4 millions de tonnes de pesticides sont utilisées chaque année dans le monde (Shattuck et al., 2023). Malheureusement, ce chiffre ne devrait qu'augmenter en raison de l'explosion de la population mondiale qui exige davantage de nourriture sur des terres agricoles . Bien que ces produits jouent un rôle clé dans la protection des cultures et la sécurisation des récoltes, leur généralisation suscite des préoccupations croissantes en raison de leurs effets potentiels sur l'environnement et la santé humaine. Si leur efficacité contre les organismes nuisibles est bien établie, leurs impacts indirects sur les équilibres des agroécosystèmes restent encore imparfaitement compris (Wisnujati., 2023).

Introduction

Le sol figure parmi les compartiments les plus exposés à ces effets ; il représente une ressource non renouvelable à l'échelle humaine. Il assure de multiples fonctions écologiques et agronomiques, notamment le soutien à la production végétale, le recyclage des éléments nutritifs, la régulation du cycle de l'eau et le maintien d'une biodiversité abondante (Muñoz-Bautista et al., 2025). L'ensemble de ces fonctions dépend étroitement de ces propriétés physiques, biologiques et biochimiques, qui déterminent sa fertilité et sa capacité à soutenir durablement les systèmes de culture. , notamment de sa teneur en matière organique, de son pH, de sa structure et de la disponibilité des éléments minéraux. Or, une part importante des pesticides appliqués sur les cultures finit par atteindre le sol, où ces substances peuvent être adsorbées, transformées ou dégradées selon les conditions édaphiques et climatiques (Kaur *et al.*,2024). Ces interactions sont susceptibles de modifier la dynamique des nutriments, la stabilité de la matière organique et, plus largement, la fertilité des sols (Tiwari *et al.*,2024).

Si l'influence des pesticides sur les microorganismes et l'activité biologique du sol a été relativement bien documentée, leurs effets directs sur les propriétés physico-chimiques demeurent moins étudiés et souvent dispersés dans la littérature. Pourtant, des changements même modestes du pH, du carbone organique ou de la capacité de rétention des nutriments peuvent avoir des conséquences durables sur la productivité et la résilience des systèmes agricoles (Adil *et al.*, 2023) . Dans le cas du colza, fortement dépendant des intrants, ces enjeux sont particulièrement marqués. Cette culture bénéficie d'une protection chimique pour maintenir ses rendements, mais elle constitue aussi un cadre pertinent pour évaluer les répercussions de l'usage répété des pesticides sur le fonctionnement des sols.

Ainsi, cette thèse s'inscrit dans une problématique centrale : bien que les pesticides contribuent à la protection du colza et à l'optimisation de sa production, leurs effets sur les caractéristiques physico-chimiques du sol restent encore mal élucidés. Ces altérations pourraient influencer la disponibilité des nutriments, la fertilité et, à long terme, la durabilité des agroécosystèmes.

L'objectif général de ce travail est donc d'analyser l'impact des traitements phytosanitaires sur les propriétés physico-chimiques d'un sol cultivé en colza (*Brassica napus L.*). De façon plus spécifique, il s'agit de :

- caractériser les propriétés physico-chimiques du sol après traitement,
- examiner la variabilité des réponses du sol selon les conditions expérimentales,
- Analyser les relations entre les changements physico-chimiques du sol et la performance du colza, notamment en termes de croissance et de rendement.

Introduction

- Analyser la relation entre la présence de résidus de pesticides et les propriétés physico-chimiques du sol, afin de comprendre les mécanismes de rétention, de transformation ou de persistance des molécules.
- discuter les implications agronomiques et environnementales de ces résultats.

À travers cette étude, l'objectif est de contribuer à une meilleure compréhension des interactions entre pesticides et sol, afin de concilier protection du colza, maintien de la productivité et durabilité des agroécosystèmes

Chapitre I : Le sol : propriétés et modes de fonctionnement

Chapitre I : Le sol : propriétés et modes de fonctionnement

I. Le sol :

1. De quoi s'agit-il ?

Le sol est le produit d'un processus de formation complexe, issu des interactions entre les composantes physiques de la lithosphère et les organismes vivants de la biosphère. Il se compose essentiellement de matériaux minéraux provenant de l'altération et de la transformation progressive des roches, appelés altérites. (Ferreira et al., 2021). Ce phénomène, appelé pédogenèse, est lié aux mécanismes physiques et chimiques qui provoquent la dégradation des roches. Ces mécanismes sont souvent initiés ou renforcés par les conditions climatiques, notamment les événements météorologiques (Tang et al., 2022). Divers processus d'altération minérale et l'activité des êtres vivants occupent une place déterminante dans la genèse et l'évolution des sols. La matière organique produite au cours des processus biologiques interagit avec les minéraux altérés pour créer un complexe organo-minéral. Ce complexe est indispensable au fonctionnement biologique du sol ainsi qu'à ses processus chimiques. La vie dans le sol renforce sa complexité fonctionnelle en établissant un réseau d'échanges de matière, d'énergie et d'informations (Obalum et al., 2017). Au-delà de ses dimensions écologiques et biologiques, le sol a aussi une valeur symbolique et culturelle. Il est lié aux sociétés humaines, non seulement comme support matériel de la vie, mais également comme symbole, mémoire collective et marque d'appartenance (Yazıcı, 2020). Cette relation va au-delà du cadre scientifique, touchant aussi aux perceptions, aux traditions et aux pratiques.

2. Définition générale du sol :

Le sol est un élément fondamental des écosystèmes terrestres. Il relie la surface de la Terre à la roche-mère en dessous. Il se forme d'une stratification des couches horizontales, chacune ayant ses propres propriétés physiques, chimiques et biologiques (Philippot et al., 2023). Le sol remplit de nombreuses fonctions naturelles et humaines. Dans une perspective écologique plus large, le concept de sol inclut aussi certains matériaux géologiques perméables. Cela comprend des roches sédimentaires poreuses, ainsi que l'eau qu'elles contiennent et les nappes phréatiques (Yudina et al., 2023).

3. Fonction pédologique : milieu d'altération colonisé par le vivant

D'un point de vue agronomique, le sol est essentiel comme support physique et nutritif pour les plantes, elles entretiennent des interactions essentielles avec les micro-organismes et les éléments minéraux, principalement au niveau de la zone racinaire, appelée rhizosphère. Cette zone a une forte activité biologique, stimulée par les exsudats racinaires qui modifient localement la chimie du sol et favorisent la prolifération microbienne (Caracciolo et al., 2021; Korenblum et al., 2022). Le sol joue un rôle central dans les enjeux agronomiques. Il sert de support direct aux activités agricoles et subit fréquemment des interventions mécaniques comme le labour ou le décompactage (Topa et al., 2025). Sa fertilité, qui est sa capacité à soutenir durablement la croissance des plantes, dépend à la fois de ses propriétés intrinsèques (texture, structure, matière organique, etc.) et des interventions humaines. Ces interventions incluent la fertilisation, les amendements minéraux ou organiques, le drainage, l'irrigation et l'application de produits phytosanitaires (Santos, 2024). L'adoption progressive de systèmes innovants, comme les techniques culturales simplifiées (TCS), montre une volonté d'ajuster les méthodes de gestion des sols aux besoins d'une agriculture plus durable. Cela rapproche la productivité de la préservation des ressources pédologiques (Sharma, 2024).

D'un point de vue pédologique, le sol représente une mince couche superficielle de l'écorce terrestre résultant de l'altération de la roche-mère. Cette altération peut être physique, causée par des processus mécaniques tels que le gel, la dessiccation, l'hydratation ou les variations thermiques qui engendrent la fissuration et la désagrégation progressive des roches (Totsche, 2020). Elle peut aussi être chimique, par dissolution, hydrolyse, oxydation ou réduction, entraînant des modifications de la composition minérale, de l'organisation des pores et de l'aspect chromatique du matériau, et conduisant à la différenciation des horizons du sol par lessivage ou accumulation de matières (Deng et al., 2025). L'activité biologique, en particulier celle de la végétation, joue un rôle catalyseur dans ces processus. Les êtres vivants présents dans le sol participent à la dégradation de la matière organique, à l'organisation de la structure du sol et à la mise à disposition des éléments nutritifs pour les plantes. Cette diversité et cette complexité des sols proviennent de l'alliance dynamique entre altération minérale et influence biologique, conférant à chaque sol une signature unique liée à son histoire pédogénétique et aux conditions environnementales locales. (Mergelov et al., 2018).

4. Fonction écologique :

Du point de vue écologique, le sol possède une structure à trois phases : Une phase solide constituée de minéraux et de matière organique, garantissant la stabilité du sol ; une phase liquide correspondant à la solution présente dans le sol contenant des nutriments dissous, et une phase gazeuse qui occupe les pores non saturés, facilitant les échanges gazeux nécessaires à la respiration des racines et des micro-organismes. (Huang et al., 2023).

Cette organisation donne au sol un caractère très réactif, semblable à celui d'un réacteur biogéochimique. Grâce à ses propriétés colloïdales et à son aptitude à échanger des ions, le sol assure des fonctions essentielles : l'alimentation végétale, la gestion de l'eau et le stockage des nutriments. Il constitue aussi un réservoir pour la transformation biologique, participant activement au cycle du carbone, de l'azote et d'autres éléments essentiels. Ces processus sont largement régulés par l'activité microbienne, qui favorise la minéralisation de la matière organique, dégrade les contaminants et initie de nouveaux processus pédogénétiques (Singh et al., 2025).

5. Mécanismes de formation et d'évolution des sols :

La formation et la transformation des sols sont influencées par cinq facteurs fondamentaux, initialement identifiés par Hans Jenny en 1941. Ces facteurs interagissent de manière dynamique modulant les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques qui définissent le sol. Ils incluent :

- a) **Le matériau d'origine** : désigne le substrat minéral initial, issu de la roche-mère ou des dépôts sédimentaires, dont l'altération progressive forme les composants minéraux du sol. Sa composition chimique et sa texture influencent directement la composition, la fertilité potentielle, et la vitesse de formation du sol (Bensa et al., 2021).
- b) **Le climat** : Le climat est un facteur clé dans la genèse des sols, notamment à travers les précipitations et la température. Ces deux paramètres influencent directement l'altération des roches la modification des minéraux et la décomposition de la matière organique .Lorsque les conditions deviennent trop sèches ou soumises à des températures extrêmes (froides ou chaudes), les mécanismes de formation du sol deviennent très lents, voire quasi inexistant. Dans les régions froides et humides, la matière organique tend à s'accumuler en raison d'une décomposition ralentie. À l'opposé, sous des climats chauds et humides, l'altération chimique des minéraux

s'intensifie, et l'activité biologique du sol est plus marquée (Kronnäs et al., 2023) . Un autre indicateur essentiel est le bilan hydrique, calculé par la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (P-ETP). Ce dernier détermine les mouvements de l'eau dans le sol : un excédent hydrique favorise le lessivage des éléments altérés, ce qui modifie la structure du sol et la formation de ses horizons (Vieira-Filho et al., 2023).

- c) **La biosphère (végétation et organismes vivants) :** Les êtres vivants du sol (végétaux, micro-organismes et animaux) jouent un rôle majeur dans l'accumulation de matière organique, la mise en place de la structure du sol et à la remise en circulation des nutriments. En plus, la végétation régule les paramètres microclimatiques locaux, en particulier grâce à son ombrage et à sa capacité à restituer l'eau dans l'atmosphère. (Li et al., 2024).
- d) **La topographie :** L'inclinaison et l'exposition des versants conditionnent de manière déterminante l'écoulement des eaux, les phénomènes érosifs, le dépôt des sédiments et la répartition du couvert végétal. Ces facteurs morphologiques conditionnent significativement les processus locaux de formation des sols (Toxanbayeva et al., 2025).
- e) **Le temps :** La période d'exposition aux différents facteurs de formation conditionne directement le niveau d'évolution du sol. Une durée prolongée permet aux mécanismes pédogénétiques de produire des sols plus matures, caractérisés par une différenciation nette des horizons (Saprykine et al., 2022).

6. Phase initiale de la pédogenèse :

La genèse du sol débute par la désintégration progressive de la roche-mère, constituée soit de roches dures (telles que le granite ou le schiste), soit de matériaux plus friables ou meubles (argiles, sables, éboulis, etc.). Cette phase initiale repose sur l'action conjointe de processus physiques (fragmentation mécanique) et chimiques (réactions d'altération), dont l'intensité et la nature sont principalement régulées par le climat, facteur prépondérant de la pédogenèse (Raj, 2023).

L'altération physique se traduit par la fragmentation de la roche en éléments grossiers, tels que des blocs et des graviers. Parallèlement, l'altération chimique transforme les minéraux primaires en particules plus fines (sables, limons) et en substances colloïdales, notamment les argiles secondaires. Ces argiles, souvent enrichies en oxydes de fer, confèrent au matériau une coloration rougeâtre ou jaunâtre caractéristique.

À cette phase, on observe également l'apparition de complexes d'altération structures transitoires issues de l'altération des minéraux d'origine, accompagnées de la mise en solution de certains cations (magnésium, potassium, calcium, sodium), bien que ces derniers restent encore faiblement solubles. Il est important de souligner qu'à ce stade, bien que les transformations soient déjà avancées, il ne s'agit pas encore d'un sol au sens pédologique strict. Le matériau altéré constitue seulement une base minérale précurseur, sur laquelle d'autres processus (biologiques, organiques, climatiques) viendront ultérieurement agir pour donner naissance à un véritable profil pédologique (Hong et al., 2023).

6.1. Enrichissement du sol par l'introduction de matière organique :

La pédogenèse débute véritablement lorsque des éléments organiques résultant surtout de la dégradation des végétaux, de l'activité biologique du sol et des micro-organismes, se mêlent aux éléments minéraux issus de la dégradation de la roche mère. Cet apport organique initie des réactions biochimiques qui structurent progressivement le sol. (Totsche et al., 2024).

Au fil du temps, des couches organo-minérales distinctes apparaissent par :

- L'accumulation de litière (feuilles, branches, racines en décomposition)
- La transformation des débris végétaux par l'action microbienne
- Les interactions physico-chimiques entre matière organique et minéraux

Ces processus aboutissent à la formation d'un sol à la fois biologiquement actif, doté d'une structure stable, et apte à remplir ses fonctions écologiques.

6.2. Différenciation des horizons pédologiques via la migration verticale

Au fur et à mesure que le sol se forme et s'approfondit, il facilite une circulation verticale de matière, principalement sous l'effet de l'eau. Ce phénomène, nommé migration ou translocation, mobilise et transporte des éléments solubles ou colloïdaux comme les sels de calcium, les oxydes de fer, l'argile ou l'humus (Fang et al., 2020).

La direction de ces flux dépend fortement du climat :

Le mouvement vers le bas, fréquent dans les zones à fortes précipitations, cause un lessivage (ou éluviation) des particules fines et des substances solubles des horizons supérieurs vers les plus profonds.

Chapitre I : Le sol : propriétés et modes de fonctionnement

Le mouvement vers le haut, dominant dans les régions sèches ou semi-arides où l'évaporation dépasse les précipitations, entraîne une remontée capillaire de l'eau et des sels dissous (illuviation inverse).

Ces mécanismes conduisent à une différenciation progressive des horizons : certains horizons sont appauvris en éléments fins (éluviés), tandis que d'autres accumulent argile, matière organique ou composés ferriques (illuviaux) (Wang et al., 2019 ; Wei et al., 2024).

Selon leur degré d'évolution, on distingue :

- Les sols peu évolués ou jeunes, peu différenciés, proches de la roche-mère, avec un ou deux horizons peu contrastés.
- Les sols matures, issus de processus prolongés, présentant une structuration claire en horizons successifs témoignant de dynamiques d'altération, de lessivage et d'accumulation (Koop et al., 2020).

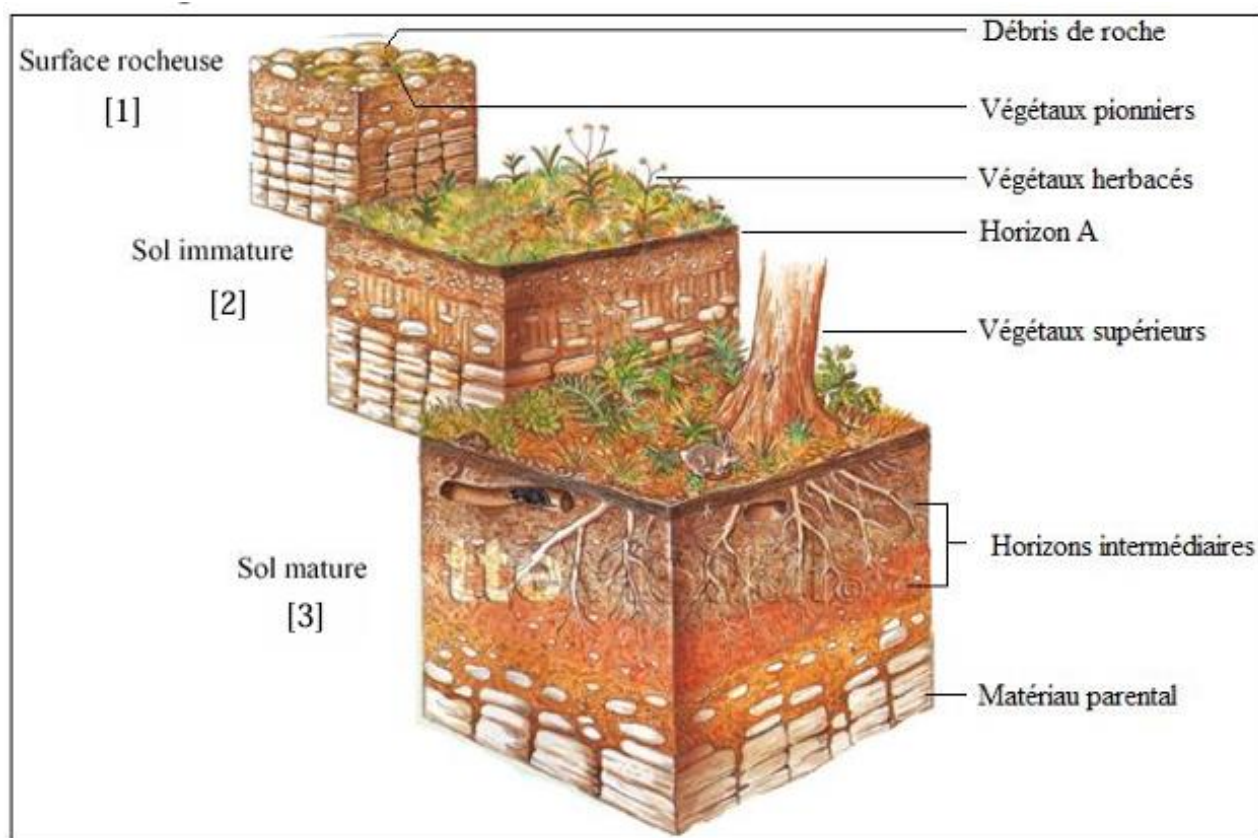


Figure 1 : Évolution de la formation du sol à partir de la roche mère jusqu'au sol mature : stades de développement pédogénétique (Brady, 2016).

7. Caractéristiques physico-chimiques du sol.

7.1. Propriétés physiques du sol :

7.1.1. Structure :

La structure du sol désigne la disposition des particules qui le composent dans l'espace, pouvant être analysée à deux niveaux complémentaires. À un niveau macroscopique, elle correspond à l'organisation visible à l'œil nu, tandis qu'à un niveau microscopique, elle se réfère à la microstructure ou à la micromorphologie du sol. Cette organisation résulte d'interactions entre processus physiques, chimiques, biologiques et mécaniques, dont l'intensité relative détermine la nature des structures observées (Schlüter et al., 2020). Selon Yudina, A., & Kuzyakov, Y. (2023), deux approches principales permettent de définir la structure du sol : l'une repose sur l'étude de la distribution spatiale des différents composants solides, et l'autre sur la caractérisation du réseau d'agrégats formé par ces composants. Ces méthodes reposent sur des critères géométriques et utilisent des techniques d'observation non destructives. La structure du sol reflète la disposition de ses particules solides et l'intensité de leurs liaisons, illustrant l'hétérogénéité dans l'espace et dans le temps des propriétés physiques, chimiques et biologiques (Tisdall, 2020). Elle constitue une mosaïque de microenvironnements, chacun ayant ses propres caractéristiques qui jouent un rôle majeur dans la dynamique du sol. La mise en place et la stabilité de cette structure reposent sur plusieurs facteurs, comme la texture, le comportement colloïdal, la teneur en matière organique, l'humidité et l'activité biologique, notamment celle de la faune édaphique (Wu et al., 2025). En réalité, la taille, la forme et la cohésion des agrégats jouent un rôle plus déterminant dans la porosité effective du sol que la simple composition minérale (Šimkovic et al., 2025). Ainsi, les sols présentent divers degrés d'organisation structurale, chacun ayant un niveau de stabilité qui influence fortement leurs fonctions écologiques.

Selon la manière dont ces éléments sont constitués et disposés, plusieurs grands types de structures peuvent être distingués (Anderson et al., 2024) :

- a) **Structure sans agrégats visibles** : notamment observée dans les matériaux organo-minéraux peu différenciés, elle se caractérise par l'absence de véritables agrégats cohésifs, indiquant un stade initial ou peu organisé de la structuration du sol.
- b) **Structure massive ou compacte** : les particules sont incorporées dans une matrice argileuse continue, sans formation d'agrégats distincts. Ce type de sol est dense, peu

perméable, difficilement accessible aux racines, et souvent défavorable à l'activité biologique.

- c) **Structure particulière ou fragmentaire** : dans ce cas, les éléments minéraux sont simplement juxtaposés, sans liaison colloïdale visible. Ces sols, généralement meubles et très filtrants, se dessèchent rapidement et ont une faible capacité de rétention en eau et en nutriments.
- d) **Structure grumeleuse (ou en petits agrégats ronds)** : résultant de l'interaction entre matières organiques et particules argileuses, elle apparaît sous forme de petits agrégats arrondis, stables et bien aérés. Cette structure est particulièrement avantageuse pour la fertilité du sol, grâce à sa bonne porosité.
- e) **Structure à agrégats anguleux** : Formées le plus souvent par des phénomènes physiques tels que le gonflement et le retrait des argiles (ex. smectites), ces structures se distinguent par des arêtes distinctes. Elles indiquent une forte influence des dynamiques hydriques sur l'organisation du sol.
- f) **Structure prismatique** : typique des horizons argileux en milieux alcalins, elle se compose de prismes verticaux pouvant limiter les échanges gazeux et hydriques dans certaines conditions.

7.1.2. Texture :

Correspond à la proportion relative des différentes fractions granulométriques qui le constituent, en particulier les sables (grossiers et fins), les limons et les argiles. C'est une propriété intrinsèque et relativement stable du sol au fil du temps (Dembovetsky et al., 2024 ; Ding et al., 2024).

7.1.2.1. Méthodes de détermination :

Sur le terrain, la texture est souvent estimée de manière empirique grâce à la méthode tactile, appelée aussi méthode "pifométrique", qui repose sur la sensation au toucher des particules humides. En laboratoire, la détermination s'appuie sur des analyses granulométriques plus précises, utilisant le principe de la sédimentation dans l'eau basé sur la loi de Stokes, qui relie la taille des particules à leur vitesse de décantation (Schadosin et al., 2023).

7.1.2.2. Composition texturale :

La texture résulte de l'association de particules de tailles diverses dont la proportion varie selon l'origine et la nature des sols (Messing et al., 2024). Elle est habituellement évaluée à l'aide du

triangle textural, un diagramme graphique classant les sols selon leur contenu en sable, limon et argile.

i. Sables ($\varnothing = 50$ à $2000 \mu\text{m}$) :

Ces particules, issues de la fragmentation de roches peu altérées, sont chimiquement inertes. Elles jouent un rôle marginal dans la fertilité chimique du sol mais sont essentielles pour la structuration physique, car elles favorisent l'aération et le drainage (Stepień et al., 2018).

ii. Limons ($\varnothing = 2$ à $50 \mu\text{m}$) :

Ils possèdent des propriétés intermédiaires entre le sable et l'argile. Plus instables, ils contribuent néanmoins à la fertilité grâce à leur grande surface spécifique. Les limons peuvent résulter d'une désagrégation mécanique ou d'une agrégation secondaire (Benslama, 2016).

iii. Argiles ($\varnothing < 2 \mu\text{m}$) :

En cas d'altération des roches mères ou de transformations secondaires, les argiles sont la fraction la plus chimiquement active (Schadosin et al., 2023). Constituées principalement de phyllosilicates d'aluminium microcristallins, elles présentent des propriétés colloïdales remarquables :

- Une forte capacité d'échange cationique, grâce à leur charge négative, ce qui leur permet de retenir les nutriments essentiels.
- Un potentiel de gonflement, notamment chez certains types comme les smectites, qui entraîne des variations importantes de volume selon l'humidité.
- Une fonction protectrice de la matière organique, en formant des complexes organo-minéraux, moins accessibles aux micro-organismes, ce qui ralentit sa dégradation. (Sonsri et al., 2023; Xie et al., 2023).

7.1.3. La porosité du sol :

On définit la porosité totale d'un sol comme la fraction de son volume occupée par les espaces poreux. , exprimée en pourcentage, par rapport au volume total du sol (Robinson et al., 2022). Ces pores peuvent être partiellement ou complètement remplis d'eau ou d'air, selon les conditions d'humidité (Nimmo, 2013). En raison de l'évolution de l'humidité dans le temps, la porosité effective peut connaître de fortes fluctuations. Les pores jouent un rôle clé dans les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère, notamment en permettant la diffusion

de l'oxygène indispensable aux racines et aux micro-organismes aérobiques. De plus, la porosité influence la distribution, la rétention et la disponibilité de l'eau, tout en offrant un habitat essentiel à la biodiversité microbienne du sol (Robinson et al., 2022). Elle sert aussi d'indicateur principal de la qualité structurale et de la fertilité globale du sol (De Lima et al., 2022). Sur le plan fonctionnel, plusieurs paramètres structuraux et édaphiques affectent la porosité : la texture du sol (proportion relative de sable, limon et argile), la teneur en matière organique (qui favorise la formation de complexes stables et grumeleux), le degré d'humidité (qui modifie la proportion de pores occupés par l'air ou l'eau), ainsi que les facteurs biologiques (activité des organismes fouisseurs comme les vers de terre et les racines) et anthropiques (tassement ou travail du sol). L'hétérogénéité spatiale entraîne une grande variabilité dans la répartition et la connectivité des pores (Zhao et al., 2020). La porosité totale se quantifie par la relation entre la densité apparente (d_a , en g/cm^3), représentant la masse de sol sec par volume total, et la densité réelle (d_r), soit la densité des solides, habituellement estimée à $2,65 \text{ g/cm}^3$ pour les sols minéraux. La formule de calcul est :

$$P \text{ \%} = [1 - (d_a/d_r)] \cdot 10$$

7.1.4. Profondeur d'enracinement maximale (PEM) :

La profondeur d'enracinement maximale (PEM) désigne la profondeur maximale du sol pouvant être colonisée par le système racinaire d'une plante (Stocker et al., 2023). Cette limite varie en fonction de l'espèce, de son stade de développement, ainsi que des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Dans la nature, la PEM est souvent déterminée en observant le développement racinaire des plantes adultes, surtout dans le cas de végétation pérenne (Li et al., 2022). Pour les cultures annuelles, cette évaluation se fait généralement lorsque l'enracinement atteint sa plus grande extension. Lorsque la végétation est absente ou que le sol présente des contraintes sévères (compaction, horizon dur, nappe perchée, salinité, acidité, etc.), la PEM doit être estimée selon des critères édaphiques qui identifient les obstacles à la pénétration des racines (Fan et al., 2017). La PEM est essentielle pour évaluer la réserve en eau d'un sol, car elle délimite la profondeur où l'eau peut être prélevée par les plantes. Elle permet également d'estimer le volume d'eau disponible dans un sol ou une unité géographique, en additionnant la capacité de rétention utile des horizons situés entre la surface et cette profondeur maximale.

7.1.5. Humidité du sol :

L'humidité est essentielle pour réguler l'activité biologique des sols. En environnement sec, les processus microbiens ralentissent, mais une augmentation graduelle de l'humidité stimule leur réactivation jusqu'à un seuil optimal. Au-delà, une humidité excessive diminue l'activité microbienne (Hao et al., 2025). L'eau dans le sol ne sert pas seulement à hydrater : elle facilite aussi le transport des ions, minéraux, et composés organiques, jouant un rôle dans la solubilisation et la précipitation des nutriments (Evans et al., 2022), ce qui influence leur biodisponibilité. Cependant, un excès d'eau réduit l'aération, créant des conditions partiellement anaérobies qui modifient la composition du microbiote, favorisant des espèces adaptées à un faible oxygène (Greenlon et al., 2022). À l'inverse, un déficit d'eau prolongé entraîne une sélection microbienne différente, privilégiant des micro-organismes résistants à la sécheresse, dont les fonctions diffèrent considérablement de celles présentes en milieu humide.

7.1.6. Température du sol :

La température est un facteur essentiel qui influence la croissance et l'activité des micro-organismes dans le sol (Zhao et al., 2023). Elle joue un rôle clé dans les mouvements verticaux, notamment la migration vers les couches plus profondes où les variations de température sont moins importantes. Pendant l'hiver, l'activité biologique, en particulier celle de la faune du sol, diminue considérablement, et les périodes de gel peuvent causer la mort de nombreux organismes (Tong et al., 2020). Cela peut limiter la croissance de certains parasites végétaux. Toutefois, même si une faune spécifique apparaît en saison chaude ou froide, l'impact exact de la température sur la pédofaune est parfois exagéré, surtout parce que beaucoup d'organismes s'adaptent aux changements de température liés aux saisons (Kuzmina et al., 2024).

7.2. Propriétés chimiques du sol :

7.2.1. Le pH du sol :

L'acidité d'un sol reflète la concentration en ions hydrogène (H^+) dans la solution du sol, mesurée sur une échelle de 0 à 14 (Li et al., 2023). Cette valeur indique la réaction chimique du sol et influence fortement son comportement biologique et chimique. Les substrats dont le pH se situe entre 6,5 et 8,5 se décomposent plus rapidement, ce qui favorise l'activité biologique (Patra et al., 2021). Les micro-organismes du sol réagissent différemment selon le pH : les bactéries et actinobactéries, qui préfèrent un pH proche de la neutralité, sont moins compétitives dans les environnements acides. En revanche, les champignons s'y adaptent

mieux et ont tendance à y dominer (Xiong et al., 2024). De plus, le pH influence indirectement la communauté microbienne en modifiant les propriétés physico-chimiques du sol, ce qui affecte la solubilité et la biodisponibilité des nutriments.

7.2.2. Pouvoir tampon du sol :

Le pouvoir tampon désigne la capacité d'un sol à limiter les variations de pH suite à l'ajout d'acides ou de bases (Arwenyo et al., 2023). Cette propriété indique à la fois le degré d'évolution du sol et sa résistance aux perturbations chimiques, notamment celles causées par les dépôts atmosphériques polluants. Plus un sol possède une capacité d'échange cationique élevée — liée à la présence d'argile et de matière organique, comme l'humus —, plus son pouvoir tampon est grand. Ces composants fonctionnent comme des complexes d'adsorption, capables de retenir ou de libérer des ions selon les variations du milieu (Wei et al., 2022).

7.2.3. Capacité d'échange cationique :

La capacité d'échange cationique (CEC) désigne la faculté du sol à adsorber et retenir des cations sous une forme échangeable (Ćirić et al., 2023). Cette propriété, essentielle pour caractériser la fertilité du sol, influence directement la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (Sule et al., 2025). De plus, la CEC joue un rôle clé dans la régulation des contaminants métalliques, servant d'indicateur du comportement chimique du sol face aux ions présents dans sa solution.

7.2.4. La salinité :

Désigne la concentration en sels solubles dans un sol. Elle constitue un indicateur important des composés ionisables, c'est-à-dire des cations et anions dissous, qui affectent la conductivité électrique de la solution du sol (Mu et al., 2024). En effet, plus la concentration en ions est élevée, plus la conductivité augmente, reflétant l'intensité de cette propriété électrochimique. Cependant, une salinité élevée exerce une pression osmotique importante, freinant la croissance des micro-organismes. Bien que certaines bactéries halophiles tolèrent le stress salin (Smayilov et al., 2021), la majorité de la microflore du sol voit son activité diminuer dans un environnement salin. Cela entraîne une accumulation de matière organique non décomposée et limite la disponibilité des nutriments essentiels à la croissance végétale, ce qui impacte négativement la dynamique biologique du sol.

7.2.5. Matière organique :

La matière organique du sol provient principalement de résidus végétaux, comme les feuilles mortes ou les branches, qui se déposent en surface et sont rapidement décomposés par les organismes du sol (Prescott et al., 2021). Cette matière joue un rôle clé dans la formation des agrégats, contribuant à la structure et à la stabilité du sol. Un manque de matière organique peut souvent entraîner une instabilité structurale (Da Silva et al., 2022).

7.2.6. Calcaire :

Le calcaire se trouve dans le sol sous diverses formes, allant de gros fragments (blocs, graviers) à des particules colloïdales, souvent liées à l'argile (Paastor et al., 2019). La plupart de ces éléments proviennent de l'altération de la roche mère, mais une partie du calcaire peut aussi avoir une origine biologique, notamment composée de restes de coquilles de gastéropodes comme les Helicidae (Turniški et al., 2023).

7.2.7. Azote total :

L'azote total désigne la quantité totale d'azote stockée en permanence dans l'humus du sol (Bonanomi et al., 2019). Sa disponibilité pour les plantes dépend principalement du type d'humus (mull, Moder, mor), chaque forme ayant un potentiel de minéralisation différent. Ce paramètre est généralement analysé en relation avec le rapport carbone/azote (C/N), ce qui en fait un indicateur fiable de la fertilité du sol (Van Der Sloot et al., 2022).

**Chapitre II : Dégradation
des sols : Origines, formes et
conséquences**

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

1. Fertilité et qualité des sols en contexte agricole :

Dans le contexte agricole, la qualité du sol est essentielle pour garantir une production végétale durable. Un sol de bonne qualité se distingue par une fertilité élevée, qui résulte de l'équilibre entre sa richesse en matière organique, sa biodiversité microbienne et sa capacité à retenir l'eau ainsi que les nutriments (Topa et al., 2025). La fertilité du sol désigne sa capacité à fournir aux plantes les nutriments indispensables à leur croissance et à leur développement. Elle influence non seulement la vigueur des cultures, mais aussi la performance des rendements agricoles et la valeur nutritionnelle des produits récoltés (Qiao et al., 2022). Par conséquent, il est crucial de préserver ou de restaurer la fertilité des sols pour assurer la sécurité alimentaire et la pérennité des systèmes agricoles.

2. Dégradation des sols :

La dégradation des sols désigne l'altération de leur état de santé, entraînant une diminution ou une perte totale de leur capacité à remplir les fonctions écosystémiques essentielles (Qiao et al., 2022 ; Sofu et al., 2021). Elle se traduit par une baisse de la productivité biologique, de la capacité de rétention d'eau, de la fertilité chimique ou encore de la biodiversité microbienne. Un sol dégradé ne peut plus remplir efficacement ses rôles fondamentaux, comme la régulation des cycles biogéochimiques, la filtration des polluants ou la production végétale (Coban et al., 2022). Par conséquent, la dégradation du sol compromet directement la fourniture de biens et services éco systémiques, impactant à la fois les systèmes agricoles et les équilibres environnementaux plus larges.

2.1. Types de dégradation des sols :

2.1.1. Dégradation physique :

Ce type concerne les propriétés physiques essentielles du sol, telles que la perméabilité, l'aération et la facilité de pénétration racinaire (Delgado-Baquerizo et al., 2020). La formation de croûtes superficielles, due à l'impact des gouttes de pluie ou au tassement, empêche l'infiltration de l'eau et favorise le ruissellement (Hu et al., 2023). Cela nuit aux premières phases de développement des cultures, comme la germination et la levée. Moins d'infiltration réduit aussi la capacité de rétention d'eau, exposant le sol et les plantes à un stress hydrique

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

accru. (Ferreira et al., 2021) Plusieurs processus sont à l'origine de cette dégradation, notamment l'encroûtement, la compaction et l'érosion :

2.1.1.1. Encroûtement superficiel :

Il résulte d'une réorganisation des particules superficielles du sol, souvent sous l'effet de l'eau ou du vent. Ce phénomène se produit fréquemment lorsque le lit de semence, récemment préparé, subit des cycles rapides d'humidification et de dessiccation (Zhuo et al., 2024). Une croûte dense et peu perméable se forme alors dans les premiers centimètres du sol, créant une barrière physique qui bloque la levée des cultures et limite l'infiltration d'eau, renforçant le ruissellement (Bhaduri et al., 2022).

2.1.1.2. Compaction du sol :

Elle désigne la densification du sol causée par une pression externe, comme le piétinement du bétail en conditions humides ou le passage répété d'engins agricoles lourds (Romero-Ruiz et al., 2023 ; Zhang et al., 2024). Cela réduit la porosité, entrave la circulation de l'eau et de l'air, et diminue l'activité biologique. En perturbant les échanges hydriques verticaux, la compaction favorise le ruissellement et peut conduire à l'érosion de surface. Elle diminue durablement la productivité des sols agricoles et forestiers (Woldeyohannis et al., 2024).

2.1.1.3. Érosion des sols :

L'érosion consiste à détacher et transporter les particules du sol, principalement sous l'effet du vent (érosion éolienne) ou de l'eau (érosion hydrique) (Mao et al., 2022). Elle entraîne la perte progressive de la couche arable, riche en matières organiques et en nutriments.

2.1.1.4. Érosion éolienne :

Ce type d'érosion survient quand il n'y a pas de végétation protectrice. Le vent soulève, transporte et dépose des particules fines, dégradant le site d'origine et pouvant enfouir des terres sur d'autres surfaces, comme les cultures voisines ou les infrastructures. L'effet abrasif des particules aggrave la dégradation (Zhao et al., 2025).

2.1.1.5. Érosion hydrique :

Provoquée par l'action des eaux de ruissellement, elle désagrège et déplace latéralement les particules du sol. Son intensité dépend de plusieurs facteurs, dont les précipitations, la couverture végétale, la pente du terrain, et les caractéristiques physiques du sol (Zhang et al., 2025).

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

2.1.2. Dégradation biologique :

La dégradation biologique résulte de la perturbation de la vie du sol, notamment de la pédofaune, qui est un indicateur clé de la fertilité (Kang et al., 2024). Ces organismes dépendent d'un sol structuré et vivant pour se développer. Cependant, plusieurs pratiques agricoles, notamment certaines techniques de préparation du sol, ont un impact direct sur leur densité, leur diversité et leur vitesse de décomposition (Pedrinho et al., 2024). Une baisse de cette activité biologique compromet les processus de transformation de la matière organique et influence la dynamique des nutriments.

2.1.3. Dégradation chimique :

La dégradation chimique englobe toutes les altérations de la composition chimique du sol, telles que l'accumulation excessive de sels solubles (salinisation), la saturation en sodium échangeable (alcalinisation), la baisse du pH (acidification), ainsi que le déclin progressif des éléments nutritifs essentiels (Hu et al., 2023 ; Ferreira et al., 2021). Ces processus nuisent à la fertilité, modifient la circulation des nutriments et détériorent les fonctions écologiques du sol.

2.1.3.1. Salinisation :

La salinisation résulte d'une accumulation excessive de sels solubles (chlorures, sulfates, bicarbonates de sodium, calcium ou magnésium) dans la solution du sol. Elle est évaluée par la conductivité électrique, qui indique la concentration en ions mobiles capables de conduire l'électricité (Mu et al., 2024). La salinisation limite la disponibilité de l'eau pour les plantes en créant une contrainte osmotique, pouvant ralentir ou arrêter la croissance végétale. Elle est souvent aggravée par une irrigation inadéquate ou un mauvais drainage (Bañón et al., 2021).

2.1.3.2. Alcalinisation :

L'alcalinisation se manifeste par une concentration élevée de sodium échangeable dans le complexe du sol (Liu et al., 2025). Elle est marquée par une forte saturation en ions Na^+ , ce qui provoque la désagrégation des particules argileuses, une détérioration de la structure du sol et une diminution de sa capacité à laisser circuler l'eau et l'air (Gao et al., 2022). Ces changements réduisent les échanges gazeux, empêchent l'infiltration de l'eau et freinent la croissance racinaire. Ce type de dégradation est fréquent dans les sols sodiques des zones arides ou semi-arides.

2.1.3.3. Acidification :

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

L'acidification du sol provient d'une baisse du pH, généralement due à la décalcification du complexe ou à l'application d'engrais acidifiants (Wu et al., 2022). Dans les sols non inondés, cela peut provoquer une toxicité aluminique, particulièrement nuisible aux racines. Une acidité excessive diminue la disponibilité de nutriments comme le phosphore ou le molybdène, tout en augmentant celle d'éléments toxiques comme l'aluminium ou le manganèse, déséquilibrant l'environnement chimique du sol (Kicińska et al., 2021).

2.1.3.4. Appauvrissement en nutriments et matière organique :

La perte de nutriments est une dégradation majeure ayant des impacts agronomiques, économiques et écologiques (Awoonor et al., 2024) . Elle survient lorsque les exportations liées aux récoltes ne sont pas compensées par des apports suffisants (engrais organiques ou minéraux, jachère régénératrice) (Mishra et al., 2022) Le lessivage des éléments solubles vers les horizons profonds et la fixation du phosphore par les oxydes de fer réduisent encore leur disponibilité. Par ailleurs, le déclin de la matière organique, souvent dû à une mauvaise gestion des résidus cultureux (pailles, racines), affaiblit la structure du sol et sa capacité à retenir l'eau et les nutriments (Dong et al., 2021).

2.2. Causes anthropiques de la dégradation des sols :

Outre l'usage excessif de pesticides, plusieurs activités humaines contribuent fortement à la dégradation des sols, compromettant leur rôle écologique et agricole :

- Les rejets industriels et émissions polluantes : De nombreux sites industriels, anciens ou actifs, ainsi que les émissions des véhicules, déposent des polluants organiques et des métaux lourds, affectant durablement la qualité des sols environnants (Dehkordi et al., 2024 ; De Silva et al., 2023) .
- L'érosion accélérée : La disparition de la végétation, due à des incendies, déforestation ou pratiques agricoles inadéquates, favorise l'érosion des sols, entraînant une perte de matière organique et de nutriments, modifiant le relief et appauvrissant les terres (Jeong et al., 2021).
- L'imperméabilisation des surfaces : La croissance urbaine (routes, bâtiments) recouvre artificiellement les sols, interrompant les échanges gazeux, hydriques et biologiques avec l'environnement. Cette artificialisation réduit la biodiversité du sol et bloque toute activité biologique ou agricole (Tardieu et al., 2021).

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

- L'intensification agricole : Transitions de prairies ou forêts en terres cultivables, labour intensif, et gestion insuffisante des résidus (comme les pailles) entraînent une baisse progressive de la biodiversité du sol et de sa teneur en matière organique, essentiels à sa fertilité (Erktan et al., 2024).

3. Impact des pesticides sur la dégradation des sols :

Même si les processus naturels et les pratiques agricoles intensives sont généralement reconnus comme des causes majeures de dégradation des sols, l'utilisation accrue de pesticides pose également une problématique importante en perturbant l'équilibre pédologique (Beaumelle et al 2023). Ces produits chimiques, conçus pour éliminer ou contrôler certains organismes nuisibles, interagissent avec les composants physico-chimiques et biologiques du sol (Gunstone et al., 2021). Leur accumulation ou leur transformation peut nuire à la biodiversité microbienne, faire varier le pH, perturber les cycles biogéochimiques ou désorganiser la structure des agrégats. À long terme, ces effets peuvent entraîner une dégradation chimique, biologique et même physique des sols, compromettant leur fertilité et leur capacité à remplir leurs fonctions écologiques et agricoles durables (Tang et al., 2021).

3.1. Qu'est-ce qu'un pesticide ? Définition et objectifs :

Le terme pesticide désigne toutes les substances, qu'elles soient naturelles ou synthétiques, utilisées pour contrôler, repousser, attirer ou éliminer des organismes vivants considérés comme nuisibles (Hassaan et al., 2020). Ces organismes peuvent compromettre la salubrité domestique, ou de nuire à la santé publique ou animale. Les pesticides sont employés dans divers contextes, de la protection des cultures aux traitements des parasites domestiques (comme les poux ou les cafards), en passant par la lutte contre les vecteurs de maladies (Pathak et al., 2022). Leur utilisation vise principalement à augmenter la productivité agricole et la qualité des récoltes, tout en limitant les pertes dues aux agents biologiques agresseurs.

3.2. Classification des pesticides :

3.2.1. Classification selon l'origine :

Les pesticides peuvent être classés en fonction de leur origine en deux grandes catégories : les pesticides chimiques et les biopesticides (Garud et al.,2024).

Les pesticides chimiques regroupent principalement des composés organiques, qu'ils soient d'origine naturelle ou issus de la synthèse industrielle (Abubakar et al., 2020) .À l'inverse, les

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

biopesticides sont des substances d'origine naturelle, capables de contrôler les organismes nuisibles par des mécanismes non toxiques (Ayilara et al., 2023 ; Roca-Couso et al., 2021).

3.2.2. Classification selon la composition chimique :

Cette classification repose sur les caractéristiques physico-chimiques des substances actives, ce qui permet d'en déduire le mode d'action, les précautions à prendre lors de leur utilisation, ainsi que les doses d'application appropriées (Abubakar et al., 2020). Quatre grandes familles sont généralement distinguées :

3.2.2.1. Pesticides organochlorés (OC) :

Les organochlorés sont des composés organiques formés d'une chaîne d'hydrocarbures liée à un ou plusieurs atomes de chlore. Historiquement utilisés comme insecticides en agriculture, ils ont permis de combattre de nombreux ravageurs. (Keswani et al., 2021 ; Tan et al., 2024). Ces substances sont lipophiles, très stables chimiquement, et se dégradent lentement dans l'environnement. Du fait de leur forte persistance et de leur capacité à s'accumuler progressivement dans les organismes vivants et de leurs effets toxiques potentiels (mutagènes, cancérigènes, perturbateurs enzymatiques, tératogènes, etc.), les OC sont classés parmi les polluants organiques persistants (POP) (Harit, 2019).

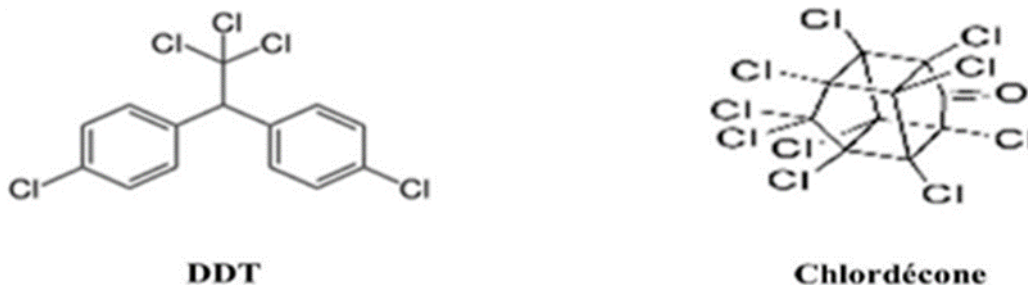


Figure 2 : Représentation des structures moléculaires de pesticides organochlorés typiques, tels que le DDT et la chlordécone (Mhadhbi, 2019).

3.2.2.2. Pesticides organophosphorés (OP) :

Les organophosphorés correspondent à des composés organiques intégrant au moins une liaison phosphore-carbone (Kaushal et al., 2020). Généralement liquides, peu volatils et peu solubles dans l'eau, ces pesticides sont largement utilisés en agriculture pour leur efficacité insecticide. Contrairement aux organochlorés, les OP se dégradent rapidement dans l'environnement, ce

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

qui limite leur persistance, mais leur toxicité aiguë reste souvent plus élevée (Jokanović et al., 2022 ; Zhao et al., 2023).

3.2.2.3. Pesticides carbamates :

Les carbamates, dérivés de l'acide carbamique, ont une structure comprenant un groupe amino lié à un ester (Mdeni et al., 2022). Ils sont avantageusement plus biodégradables que d'autres familles comme les organophosphorés ou organochlorés, réduisant ainsi leur durée de présence dans les sols et l'eau (Ripley et al., 2020). Cependant, malgré cette biodégradabilité, ils sont très toxiques pour le système nerveux central. À faible dose, ils agissent comme perturbateurs endocriniens, pouvant affecter aussi bien les humains que les animaux sauvages (Kumar et al., 2022).

3.2.2.4. Pyréthrines et pyréthroides :

Les pyréthrines, extraites des fleurs de *Tanacetum cinerariaefolium* (ou *Chrysanthemum cinerariaefolium*), sont des insecticides naturels aussi appelés pyrèthre (Hodoşan et al., 2023). Bien qu'efficaces contre une large gamme d'insectes, ces composés sont sensibles à la lumière et se dégradent rapidement sous l'effet du soleil. Pour remédier à cette instabilité, des analogues synthétiques, appelés pyréthroides, ont été développés. Ils offrent une efficacité renforcée, une meilleure résistance à la dégradation par l'air et la lumière, et une plus grande persistance dans le sol, où ils se fixent fortement (Singh et al., 2022). Ces pesticides sont généralement pulvérisés directement sur les cultures, ce qui peut laisser des résidus sur feuilles, fruits et légumes (Hodoşan et al., 2023). Bien que considérés comme moins toxiques pour l'homme, une exposition répétée ou mal contrôlée peut entraîner divers effets indésirables : irritations respiratoires, troubles neurologiques (céphalées, vertiges), troubles gastro-intestinaux (nausées, vomissements), et réactions cutanées (Tewari, 2024).

3.2.2.5. Biopesticides :

Les biopesticides sont des moyens de lutte biologique d'origine naturelle, provenant d'organismes vivants tels que les plantes, les bactéries, les champignons et les virus, ou encore de certaines substances minérales.. Contrairement aux pesticides chimiques de synthèse, ils agissent par des mécanismes non toxiques, ce qui réduit leur impact environnemental et leur dangerosité pour la santé humaine (Gupta et al., 2023). On identifie principalement trois types de biopesticides :

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

- Les pesticides microbiens, qui utilisent des micro-organismes nuisibles pour les pestes (Bravo et al., 2023) ;
- Les pesticides biochimiques, composés de substances naturelles (extraits végétaux, phéromones, acides organiques) qui perturbent le comportement des ravageurs (Gajger et al., 2021) ;
- Les protecteurs intégrés aux plantes (PIP), issus de modifications génétiques permettant à la plante de produire ses propres agents de défense (Pierce et al., 2022).

Les biopesticides offrent une alternative prometteuse pour une agriculture durable, même si, à cause de leur moindre stabilité et de leur plus grande sensibilité aux conditions environnementales, ils peuvent être moins efficaces que les produits chimiques traditionnels.

3.2.3. Classification selon les organismes cibles :

Outre leur origine et leur composition chimique, les pesticides peuvent être classés selon les types d'organismes nuisibles qu'ils visent à éliminer ou à contrôler (Garud et al., 2024). Cette classification fonctionnelle distingue plusieurs catégories principales, chacune ayant ses mécanismes d'action et profils toxicologiques spécifiques.

3.2.3.1. Herbicides :

Les herbicides sont des substances actives, seules ou en mélange, utilisées pour supprimer ou limiter la croissance des plantes adventices, qui peuvent concurrencer les cultures pour les ressources du sol (eau, lumière, nutriments) (Garud et al., 2024). Ils sont généralement appliqués avant ou pendant la période de culture pour optimiser les rendements agricoles (Arora, 2019). Leur utilisation s'étend aussi à la gestion des espaces forestiers, urbains et périurbains (Akashe et al., 2018).

3.2.3.2. Insecticides :

Les insecticides ciblent les insectes nuisibles aux cultures. Leur action repose sur divers mécanismes, comme la neurotoxicité, l'inhibition de la respiration ou la perturbation hormonale, qui affectent le développement des insectes (Garud et al., 2024). Bien que certains composés organochlorés aient été utilisés historiquement, leur forte persistance et toxicité ont conduit à leur remplacement progressif par des organophosphorés et des carbamates, moins toxiques pour les oiseaux et mammifères, mais plus risqués pour la faune aquatique.

3.2.3.3. Fongicides :

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

Les fongicides sont des produits chimiques conçus pour détruire les champignons pathogènes ou empêcher la germination de leurs spores (Arora, 2019). Très employés en agriculture, ils aident à limiter les maladies cryptogamiques pouvant affecter les plantes tout au long du cycle de culture. Leur utilisation est particulièrement répandue dans les filières de production intensive, afin d'assurer la qualité sanitaire et commerciale des récoltes (Raffa & Chiampo, 2021).

3.2.3.4. Rodenticides :

Les rodenticides sont des substances destinées à éliminer les rongeurs, notamment les rats, les souris et les campagnols qui peuvent causer d'importantes pertes économiques en détruisant les cultures, en contaminant les aliments ou en transmettant certaines zoonoses (Babii et al., 2023). Leur emploi concerne aussi bien les milieux agricoles que les zones urbaines, réseaux d'égouts, dépôts de déchets ou espaces ouverts.

4. Impacts des pesticides sur l'environnement :

4.1. Effets sur les organismes non ciblés :

L'utilisation massive et croissante des pesticides dans les écosystèmes agricoles entraîne un déclin notable des populations d'organismes non ciblés. Ces effets se manifestent par plusieurs voies de dissémination dans l'environnement, comme le ruissellement, le lessivage, l'érosion, l'évaporation et l'ingestion directe par les animaux (Wan et al., 2025; Oliveira et al., 2021).

Les composés volatils sont transportés sur de longues distances par voie atmosphérique, atteignant des zones éloignées de leur site d'application (Carvalho., 2017; Oliveira et al., 2021). Les résidus de pesticides sont liés à divers effets écotoxicologiques : retards dans la métamorphose des amphibiens, accumulation dans les tissus vivants, et diminution des populations de pollinisateurs. La faune du sol n'est pas épargnée, puisque certains insecticides agricoles affectent particulièrement les organismes du sol (Parameswari et al., 2020).

4.2. Effets sur les insectes :

En Allemagne, des études ont montré une importante diminution de la biomasse des insectes dans des zones naturelles en milieu agricole (Brühl et al., 2021). Les insectes jouent un rôle crucial dans les écosystèmes : en tant que consommateurs primaires, ils constituent une nourriture pour de nombreux prédateurs (oiseaux, reptiles, amphibiens, mammifères) et remplissent des fonctions écologiques essentielles telles que la pollinisation, la décomposition,

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

la formation du sol, la purification de l'eau, ainsi que la régulation biologique et le recyclage des nutriments (Noriega et al., 2018 ; Van der Sluijs, 2020). La diminution de la biodiversité insecte dans les zones agricoles a également été associée à une baisse parallèle des populations d'oiseaux en Europe depuis les années 1980 (Reif & Vermouzek, 2019).

4.3. Effets sur la santé humaine :

L'exposition humaine aux pesticides peut se produire par diverses voies : ingestion d'aliments et d'eau contaminés, inhalation de vapeurs ou poussières, ou contact direct lors de leur utilisation (usage domestique, professionnel ou agricole). Les voies d'entrée dans l'organisme comprennent la peau, les yeux, les voies respiratoires et le système digestif (Raffa & Chiampo, 2021). À l'échelle mondiale, les pesticides figurent parmi les principales menaces chimiques pour la santé humaine (Landrigan et al., 2017). Ils sont suspectés ou reconnus pour leur implication dans plusieurs troubles graves : cancers, effets neurotoxiques, perturbations du développement, déséquilibres endocriniens, et maladies respiratoires (Skaarup et al., 2022).

4.4. Effets des pesticides sur le sol :

L'usage fréquent de pesticides influence considérablement la qualité des sols en perturbant leurs fonctions biologiques, chimiques et physiques (Meidl et al., 2024). Une grande partie de ces substances chimiques appliquées à la surface s'accumule dans les couches superficielles du sol, où elles interagissent avec micro-organismes, matière organique et minéraux.

Sur le plan biologique, les pesticides peuvent endommager la biodiversité microbienne, en réduisant la biomasse et l'activité enzymatique, essentielles au bon fonctionnement des cycles biogéochimiques (azote, phosphore, carbone). Ce déséquilibre freine la décomposition de la matière organique et finit par affaiblir la fertilité du sol sur le long terme (Sabzevari et al., 2021).

Du point de vue chimique, les résidus de pesticides peuvent altérer la capacité du sol à retenir les nutriments, en modifiant son pH, sa capacité d'échange cationique et ses propriétés tampon. Ces changements peuvent rendre certains éléments nutritifs moins accessibles aux plantes, ou, au contraire, favoriser leur lessivage (Riedo et al., 2021 ; Meidl et al., 2024).

Sur le plan physique, certains pesticides dégradent la stabilité des agrégats du sol, Ils altèrent la stabilité des agrégats du sol, ce qui entraîne une désorganisation de sa structure et une

II. Dégradation des sols : Origines, formes et conséquences

diminution de sa porosité et une infiltration d'eau diminuée. Cela favorise l'érosion, la compaction et le ruissellement, augmentant le transport des contaminants vers les nappes phréatiques (Tang & Maggi., 2021).

Chapitre III : Matériels et méthodes

I. Description du cadre général de l'aire d'étude.

1. Situation géographique :

La wilaya de Guelma, localisée dans le nord-est de l'Algérie aux coordonnées 36°46' de latitude nord et 7°28' de longitude est, se trouve à environ 60 km du littoral méditerranéen. Elle est située à une altitude moyenne de 279 mètres au-dessus du niveau de la mer. Cette wilaya couvre une superficie de 3 686,84 km² et est entourée par plusieurs wilayas : Annaba au nord, Skikda au nord-ouest, El Tarf au nord-est, Constantine à l'ouest, et Souk Ahras ainsi qu'Oum El Bouaghi au sud-est.

I.2. Relief :

La wilaya présente une géographie marquée par une grande diversité de reliefs (figure 2). Elle est traversée par son principal cours d'eau, l'oued Seybouse. L'organisation du relief se répartit en plusieurs ensembles. Les zones montagneuses occupent 37,82 % du territoire et comprennent notamment les massifs de Mahouna à Ben Djerrah, culminant à 1 411 m d'altitude, Houara à Aïn Ben Beïda, Taya à Bouhamdane avec une altitude de 1 292 m, ainsi que D'bagh à Hammam Debagh, qui atteint 1 060 m. Les plaines et plateaux représentent 27,22 % de la superficie totale, tandis que les collines et piémonts couvrent 26,29 %. Les autres formes de relief constituent environ 8,67 % du territoire.

I.3. Cadre climatique :

La wilaya de Guelma bénéficie d'un climat méditerranéen, marqué par l'alternance de deux saisons distinctes : une période humide et pluvieuse et une autre sèche. Les précipitations annuelles moyennes s'établissent à environ 570 mm, tandis que la température moyenne s'établit autour de 18 °C.

Sur le plan spatial, le climat est de type subhumide dans les zones centrales et septentrionales de la wilaya, alors qu'il devient semi-aride vers le sud (figure 5). Globalement, les hivers y sont relativement doux et arrosés, alors que les étés sont chauds et secs.

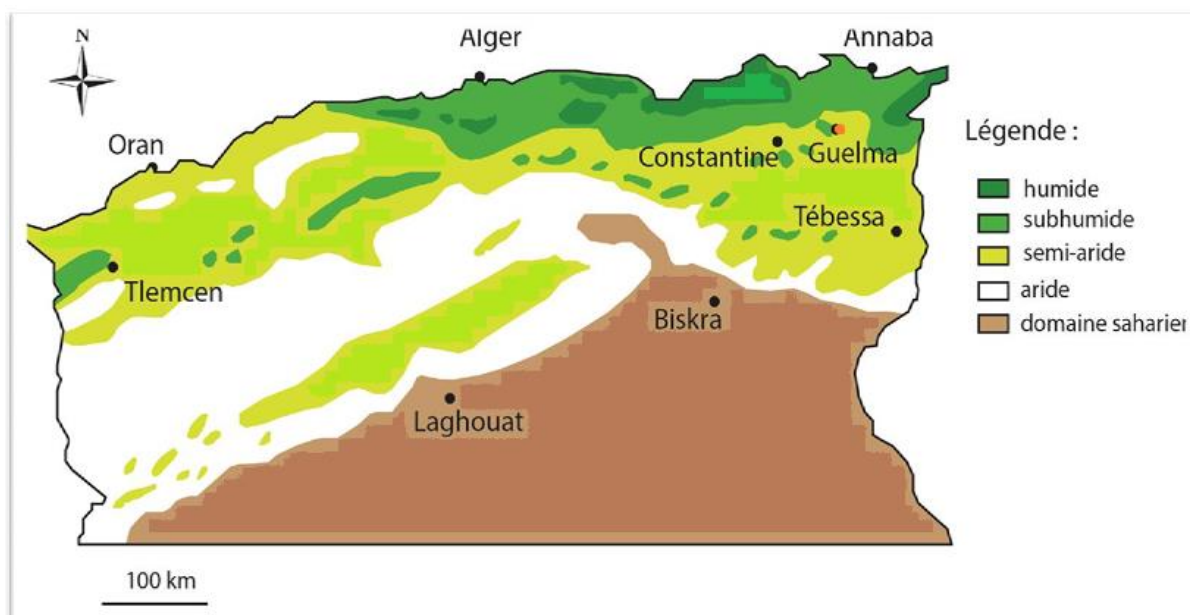


Figure 3 : Répartition des étages bioclimatiques dans le nord de l’Algérie (Hassaan et al., 2020).

1.3.1. Température :

Dans la région de Guelma, l’évolution mensuelle des températures moyennes montre des valeurs relativement élevées entre juin et octobre, oscillant entre 20 et 27,51 °C. Le pic thermique est observé au mois d’août, avec une température maximale avoisinant 29,56 °C. À l’inverse, la saison hivernale, qui s’étend de décembre à mars, se distingue par des températures nettement plus basses, comprises entre 9 et 12,47 °C. Le mois de janvier enregistre les conditions les plus froides, avec une température minimale pouvant descendre jusqu’à 9,04 °C.

Les températures moyennes mensuelles enregistrées à la station de Guelma durant la période allant de 1990 à 2015 sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Températures moyennes mensuelles la région de Guelma (1990 - 2015).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
T(°C)	9.04	9.95	13.26	16.44	21.01	25.87	29.54	29.56	25.1	20.44	14.35	10.14

1.3.2. Précipitation :

L'analyse des variations des précipitations enregistrées à la station météorologique de la wilaya de Guelma sur la période 1990–2015 met en évidence une concentration plus importante des pluies durant la saison humide. Le maximum pluviométrique est observé en décembre, avec une valeur atteignant 88,71 mm. En revanche, les quantités de pluie diminuent progressivement pour atteindre leur minimum en juillet, qui constitue le mois le plus sec, avec une moyenne d'environ 4,67 mm de précipitations.

Tableau 2 : Distribution mensuelle moyenne des précipitations enregistrées à Guelma (1990–2015)

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
P(mm)	82.7	69.84	63.82	54.84	49.49	17.75	4.67	11.74	39.02	41.04	66.88	88.71

2. Présentation de la région d'étude :

2.1. Situation géographique :

L'étude a été conduite au sein de la station expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Guelma, située au sud-est du chef-lieu de la wilaya, à une altitude de 256 m. Elle s'inscrit dans la région de l'Atlas tellien et se localise aux coordonnées géographiques suivantes : latitude 36°28'N et longitude 7°26'E. En projection UTM (fuseau 32), la zone d'étude est délimitée sur la feuille topographique Guelma n° 5-6 à l'échelle 1/25 000, entre :

X : 360 930 – 362 255 m

Y : 4 035 650 – 4 036 415 m.

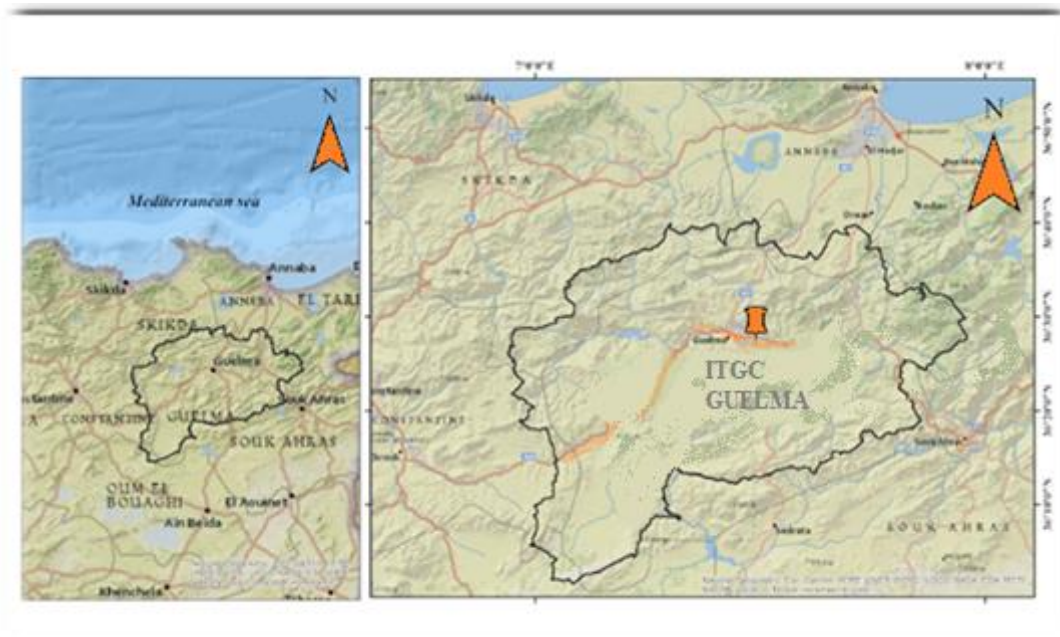


Figure 4 : Situation géographique de la station expérimentale ITGC de Guelma

3. Pesticides :

Au cours de cette étude, deux herbicides et un fongicide ont été appliqués

3.1. Colzor trio :

Colzor Trio est un herbicide homologué en application de prélevée sur colza d'hiver, formulé à partir d'une association de trois substances actives complémentaires : clomazone, diméthachlore et napropamide. Cette triple combinaison confère à la spécialité un spectre d'efficacité étendu, couvrant à la fois les dicotylédones adventices majeures (*Centaurea cyanus*, *Capsella bursa-pastoris*, *Matricaria* spp, *Veronica* spp.) et les graminées annuelles problématiques (*Lolium* spp, *Alopecurus* spp.)

Dose : 4 l/ha.

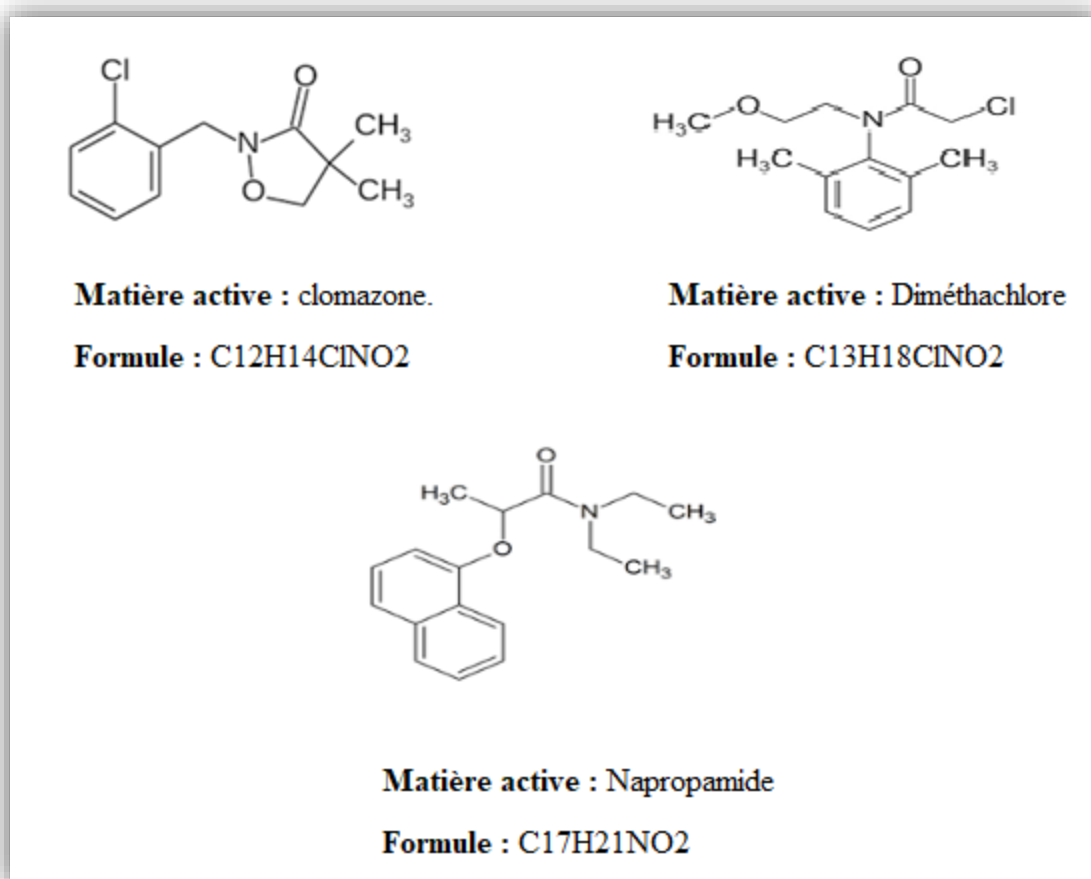


Figure 5 : Structure chimique des trois substances actives composant l’herbicide Colzor Trio – clomazone, diméthachlore et napropamide.

3.2. Callisto :

Callisto est un herbicide systémique à large spectre, efficace contre un grand nombre de graminées et de dicotylédones. Son mode d’action s’exerce à la fois par voie foliaire et racinaire, avec une activité anti-germinative marquée sur les adventices sensibles telles que *Chenopodium* spp., *Solanum* spp., *Amaranthus* spp. Et *Polygonum persicaria*, entre autres.

La dose recommandée est de 0,15 L/ha.

Formulation : SC (suspension concentrée).

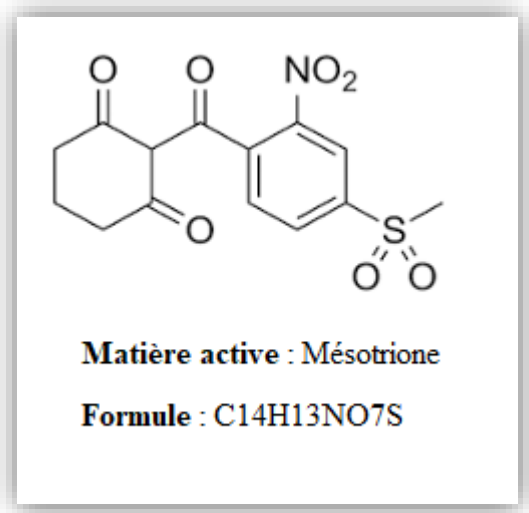


Figure 6 : Représentation chimique de la matière active mésotriane, principe actif de l'herbicide Callisto

3.3. Toprex :

Toprex est un produit phytosanitaire combinant deux substances actives : le paclobutrazol, régulateur de croissance, et le difénoconazole, fongicide. Cette association confère une double action sur les cultures de colza et de lin, en assurant à la fois un contrôle des maladies et une régulation de la croissance.

Parmi ses principaux avantages :

- Efficacité élevée contre un large spectre de maladies fongiques.
- Action régulatrice du paclobutrazol réduisant le risque de verse.
- Alternance de modes d'action grâce au difénoconazole, limitant les résistances.
- Polyvalence d'usage sur deux cultures majeures : colza et lin.
- Potentiel de gain de rendement par stimulation des ramifications secondaires et contrôle de la cylindrosporiose.
- Amélioration des conditions de récolte grâce à une floraison et une maturité plus homogènes.

Dose recommandée : 0,3 l/ha.

Formulation : SC (suspension concentrée)

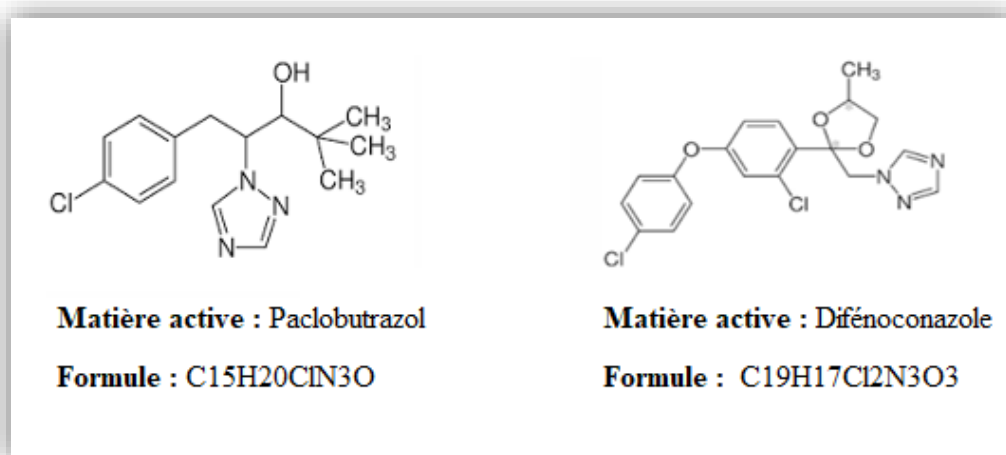


Figure 7 : Structures moléculaires et formules brutes des substances actives du Toprex : paclobutrazol et difénoconazole.

4. Matériel végétal : *Brassica napus*.L

4.1. Définitions :

Le colza (*Brassica napus* L.), appelé rapeseed en anglais, est une plante annuelle appartenant à la famille des Brassicacées, autrefois désignée sous le nom de Crucifères. Le mot « colza » trouve son origine dans le terme néerlandais koolzaad, qui signifie « graine de chou ». Cette culture compte parmi les plus anciennes plantes domestiquées, comme l'attestent de nombreux écrits issus de civilisations européennes et asiatiques anciennes (Nabloussi, 2015).

Sur le plan botanique, *Brassica napus* est une espèce dicotylédone issue d'un croisement naturel entre le chou (*Brassica oleracea*) et la navette (*Brassica campestris*) (Amy, 2021).

Dans le cadre de ce travail, plusieurs variétés de colza ont été étudiées. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 3 : Caractéristiques des variétés de colza utilisées : origine, nom commercial, fournisseur et poids de mille grains (PMG).

Fournisseur	Origine	Variétés lignées	PMG (g)
ITGC	Témoin (semence ordinaire)	LIGNEE	3.6
SARL SRID	France	RGT MUZZICAL	4
		RGT GINFIZZ	4.9
		RGT CUZZCO	6.2
SYNGENTA	Allemagne	SY MATTEO	5
		SY HARNAS	5
		SY GLORIETTA	5

5. Conduite de l'essai :

Le dispositif expérimental s'étend sur une surface totale de 3036,80 m², subdivisée en sept parcelles. Chacune d'elles mesure 50 mètres de long pour 7,2 mètres de large, avec un espacement de 1 mètre entre les blocs et une bordure de sécurité de 1 mètre.

Le traitement phytosanitaire est appliqué uniquement sur un cinquième de la surface de chaque parcelle (7.2m x 10m). La zone restante, délimitée en rouge (Figure x), est conservée comme témoin non traité.

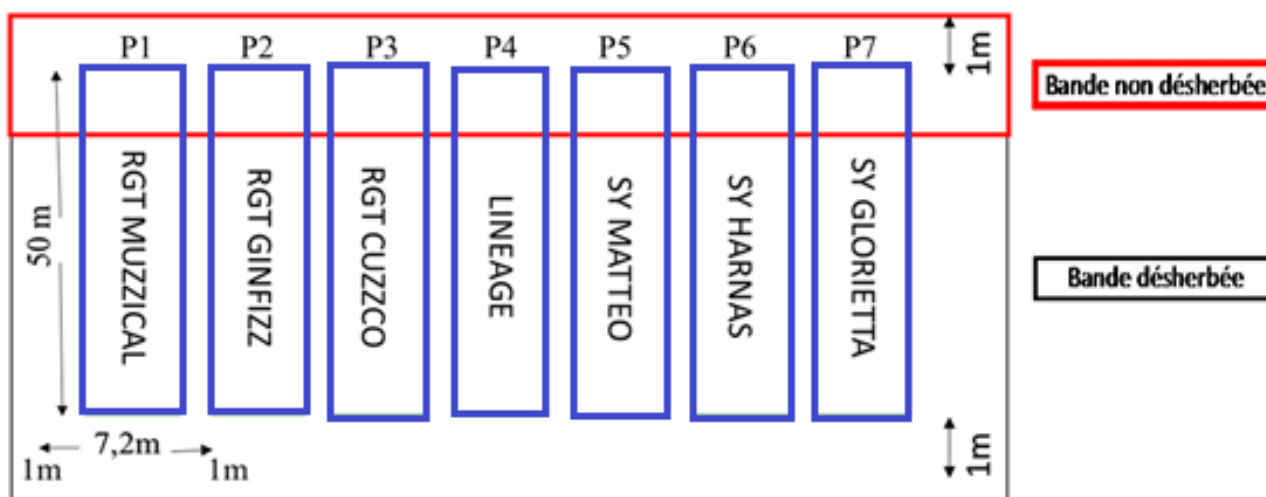


Figure 8 : Schéma du protocole expérimental et répartition des variétés de colza testées

6. Traitement phytosanitaire :

Chapitre III : Matériels et méthodes

Le protocole de désherbage mis en œuvre dans le cadre de l'essai comporte deux étapes distinctes :

- 1) **Après le semis, avant l'émergence** : Une première application est réalisée dans les 2 à 3 jours suivant le semis, en utilisant un herbicide à large spectre tel que le COLZOR Trio.

- 2) **Après l'émergence** : Une seconde intervention est effectuée à partir du stade 2 feuilles et peut se prolonger jusqu'au stade rosette. Cette phase repose sur l'utilisation d'herbicides à effet plus spécifique, comme le CALLISTO, généralement appliqué lorsque le colza atteint le stade 6 feuilles. C'est également à ce stade qu'un traitement fongicide avec le produit TOPREX est appliqué afin d'assurer une protection efficace de la culture.

7. Méthodes d'échantillonnage :

Afin de garantir la représentativité des analyses, les échantillonnages du sol et des parties végétales seront effectués au centre de la parcelle expérimentale. Les prélèvements seront réalisés dans une zone homogène, en évitant soigneusement les bordures susceptibles de présenter des variations liées aux effets de l'environnement ou aux interventions culturales. Cette approche permet de minimiser les biais et d'assurer la fiabilité des résultats obtenus.

7.1. Méthode d'échantillonnage du sol :

Les échantillons de sol ont été collectés à l'aide d'une tarière manuelle, jusqu'à une profondeur de 30 cm. Un total de 14 points d'échantillonnage a été sélectionné de manière à représenter de façon homogène la zone ciblée. Les échantillons prélevés ont été placés dans des sacs en papier de format 20 x 30 cm, spécialement choisis pour permettre une bonne aération et éviter toute

altération du contenu. Chaque sac a été muni d'une étiquette clairement marquée afin d'assurer une traçabilité rigoureuse de chaque prélèvement.



Figure 9 : échantillons du sol collectés (cliché Merouani, 2023)

7.2. Stades de prélèvement :

Les prélèvements de sol ont été réalisés à quatre stades clés du développement du colza, dans le but de suivre l'évolution des propriétés du sol tout au long du cycle cultural :

- **Avant semis**, pour établir les conditions initiales du sol,
- **Stade rosette**, correspondant à une phase de développement végétatif structurant,
- **Stade floraison**, moment crucial pour les besoins nutritionnels de la plante,
- **Post-récolte**, afin d'évaluer l'impact global de la culture sur le sol.



Figure 10 : Parcelles expérimentales au stade floraison (cliché Merouani, 2023)

8. Méthode d'échantillonnage du végétal :

Sur chaque parcelle élémentaire, dix (10) plants de colza sont prélevés aléatoirement sur une longueur d'un (1) mètre linéaire, La partie aérienne de chaque plante est coupée à l'aide de ciseaux ou d'un sécateur, à une hauteur comprise entre 5 et 8 cm au-dessus du sol, en veillant à éviter toute contamination par les particules de terre.

Le matériel utilisé pour l'échantillonnage doit être soigneusement nettoyé avant chaque utilisation afin de garantir la fiabilité des résultats. Le dispositif comprend :

Un sécateur ou une paire de ciseaux propre ;

Des sachets en papier de dimensions 20 x 30 cm pour le conditionnement ;

Une caisse en carton pour le transport sécurisé des échantillons ;

Des étiquettes et un marqueur pour l'identification précise de chaque prélèvement.

8.1. Stades de prélèvement :

Dans le cadre de l'étude sur Brassica napus, les deux stades de prélèvement les plus pertinents pour une évaluation précise du développement végétal sont le stade rosette et le stade floraison. Le stade rosette correspond à une phase clé du développement végétatif, tandis que le stade floraison représente une période cruciale pour la plante, où ses besoins nutritionnels sont maximaux. Ces deux stades offrent des informations critiques sur l'interaction entre la culture et l'environnement, permettant d'optimiser les pratiques culturales et de mieux comprendre l'impact des facteurs abiotiques sur le rendement.

9. Méthodes d'analyses :

Les propriétés physico-chimiques du sol ont été analysées au sein du laboratoire d'éco-pédologie. La quantification des résidus de pesticides a été confiée aux laboratoires de Fertial. Par ailleurs, l'évaluation des paramètres physiologiques, biochimiques et agronomiques du colza a été réalisée dans le laboratoire de physiologie végétale.

9.1. Méthode d'analyses physico-chimiques du sol :

9.1.1. Préparation du sol :

Au laboratoire, les échantillons ont été d'abord séchés à l'air libre pendant plusieurs jours, puis broyés de manière homogène et tamisés à l'aide d'un tamis de 2 mm afin d'obtenir une fraction fine et représentative pour les analyses.



Figure 11 : Préparation des échantillons de sol par broyage et tamisage (cliché Merouani, 2023)

9.1.2. Paramètres mesurés :

Les principales caractéristiques physico-chimiques analysées dans cette étude sont les suivantes :

9.1.2.1. pH : (eau et KCl) : Le pH du sol a été mesuré en suspension dans l'eau (pH_{eau}) et dans une solution de chlorure de potassium (pH_{KCl}) à l'aide d'un pH-mètre étalonné.

9.1.2.2. Humidité hygroscopique : Cette teneur a été évaluée après séchage du sol dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures.

9.1.2.3. Calcaire total : Le taux de calcaire total a été déterminé par titrimétrie classique.

9.1.2.4. Calcaire actif : Le dosage du calcaire actif a été réalisé selon la méthode de Druineau-Galet, basée sur la solubilisation dans l'acétate d'ammonium.

9.1.2.5. Carbone organique : Le carbone organique a été déterminé selon la méthode d'Anne.

9.1.2.6. Porosité : La porosité du sol a été calculée à partir de la densité réelle (D_r) et apparente (D_a) selon la formule :

$$\text{9.1.2.7. Porosité (\%)} = [(D_r - D_a) / D_r] \times 100$$

9.1.2.8. Granulométrie : L'analyse granulométrique a été réalisée selon la méthode internationale, en utilisant une pipette de Robinson, permettant de distinguer les fractions sableuses, limoneuses et argileuses.

9.1.2.9. Phosphore assimilable : Le phosphore disponible pour les plantes a été dosé selon la méthode de Joret-Hebert. L'interprétation des résultats a été faite à l'aide d'une courbe d'étalonnage :

$$Y = 0,295 X + 0,026, \text{ où } Y \text{ est la concentration en phosphore (mg/kg) et } X \text{ l'absorbance.}$$

9.2. Extraction et analyse des résidus de pesticides :

L'analyse des résidus de pesticides a été menée au sein du laboratoire FERTIAL. L'extraction des composés a été réalisée à partir de 10 g de chaque échantillon de sol, mis en contact avec 200 ml de toluène. Ce mélange a été agité pendant 12 heures afin d'assurer une extraction optimale. Par la suite, une centrifugation à 4500 tours par minute a permis de séparer la phase liquide, qui a été soigneusement récupérée. Celle-ci a ensuite été filtrée à l'aide de membranes en PTFE, adaptées à l'analyse de l'ensemble des pesticides recherchés. Les extraits obtenus ont ensuite été soumis à des analyses spécifiques pour quantifier les résidus présents.

9.3. Analyse des paramètres physio-biochimiques des feuilles de colza :

L'étude a porté sur la quantification de plusieurs paramètres physio-biochimiques dans les feuilles de colza, à savoir : la teneur en chlorophylle, en sucres solubles, en protéines totales et en proline. Ces composés ont été dosés par spectrophotométrie à partir d'extraits foliaires.

Pour chaque parcelle expérimentale, deux types d'échantillons de feuilles vertes ont été prélevés : l'un correspondant aux plants témoins et l'autre aux plants traités. Ces prélèvements ont servi de base aux analyses biochimiques comparatives.



Figure 12 : Préparation des extraits foliaires au laboratoire (cliché Merouani, 2022)

9.3.1. Dosage de la chlorophylle :

L'extraction de la chlorophylle a été réalisée selon la méthode décrite initialement par Mackinney (1941), puis optimisée par Holden (1975). Cette méthode repose sur l'utilisation d'un solvant organique pour extraire les pigments chlorophylliens à partir des tissus foliaires. L'évaluation quantitative de la chlorophylle a été effectuée par spectrophotométrie, en mesurant l'absorbance des extraits à des longueurs d'onde spécifiques correspondant à la chlorophylle *a* et *b*.

9.3.2. Dosage des sucres solubles :

La teneur en sucres solubles a été déterminée selon la méthode décrite par Shields et Barnett (1960). Cette méthode repose sur l'extraction des sucres à partir des tissus foliaires, suivie d'une quantification spectrophotométrique à l'aide d'un réactif spécifique permettant de mesurer leur concentration.

9.3.3. Dosage des protéines totales :

La quantification des protéines totales a été effectuée selon la méthode de Bradford (1976). Cette technique colorimétrique repose sur la liaison du colorant bleu de Coomassie aux protéines, entraînant un changement d'absorbance mesurable par spectrophotométrie, généralement à 595 nm.

9.3.4. Dosage de la proline :

La teneur en proline a été déterminée selon la méthode proposée par Monneveux et Nemmar (1986). Cette technique repose sur l'extraction de la proline à partir des tissus foliaires, suivie de sa réaction avec l'acide ninhydrine en milieu acide. Le complexe coloré formé est ensuite quantifié par spectrophotométrie, permettant d'estimer la concentration en proline dans les échantillons analysés.

9.4. Étude des paramètres agronomiques du rendement :

Plusieurs paramètres agronomiques, directement liés à l'évaluation du rendement, ont été mesurés pour chaque parcelle expérimentale. Les indicateurs étudiés sont les suivants :

9.4.1. Nombre de plantes par mètre carré :

Comptage manuel du nombre de plantes présentes sur une surface de référence d'un mètre carré, réalisé à plusieurs emplacements représentatifs de chaque parcelle pour obtenir une moyenne.

9.4.2. Taux d'avortement %:

Le taux d'avortement chez le colza a été déterminé en suivant le développement des fleurs et des siliques. Le nombre d'organes reproducteurs ayant abouti à des siliques matures a été comparé au nombre initialement formé. Le taux d'avortement a été calculé en pourcentage des organes avortés par rapport au total formé.

9.4.3. Le nombre de branches fructifères par plante :

Comptabilisé en recensant les branches portant des siliques matures sur chaque plant de colza. La moyenne a été calculée à partir des observations faites sur un échantillon de plantes par parcelle.

9.4.4. Le nombre de branches non fructifères par plante :

Ce paramètre a été déterminé en comptant les branches ne portant aucune silique, sur chaque plant de colza. La moyenne a été calculée à partir des observations effectuées sur un échantillon de plantes par parcelle.

9.4.5. Poids de 1000 graines (g) :

Après récolte et séchage, un échantillon de graines est pesé en comptant précisément 1000 unités. Le poids est exprimé en grammes et représente un indicateur important de la taille et de la qualité des graines.

9.4.6. Rendement réel (Qx/ha) :

Le rendement global est calculé en extrapolant la quantité de graines récoltée sur une surface donnée (souvent 1 m²) à l'hectare. Les résultats sont exprimés en quintaux par hectare (1 quintal = 100 kg).

9.4.7. Nombre de graines par silique :

Le nombre de graines par silique est calculé en divisant le nombre total de graines comptées par le nombre total de siliques analysées.

10. Analyses statistiques des données :

Les données obtenues ont été soumises à une analyse statistique afin d'évaluer l'effet des traitements sur les paramètres étudiés. Dans un premier temps, la normalité des distributions a été vérifiée à l'aide de tests de normalité appropriés. La représentation graphique des données a également été réalisée afin de mieux visualiser leur distribution et leur variabilité.

- Pour les paramètres physico-chimiques du sol, les données ont été présentées sous forme d'histogrammes. Après vérification de la normalité, la comparaison entre les modalités a été effectuée à l'aide du test t de Student. Les résultats obtenus ont été exprimés par des moyennes \pm écart-type, afin d'évaluer les différences significatives entre les sols témoins et traités.
- Concernant les paramètres physiologiques et biochimiques du végétal, les résultats ont été illustrés par des courbes d'évolution. La comparaison entre les deux groupes (traité et témoin) a été réalisée à l'aide du test non paramétrique de Mann-Whitney, en raison de la non-normalité des données.
- Les paramètres agronomiques ont été représentés sous forme d'histogrammes. Les différences entre les traitements ont été analysées à l'aide du test de Mann-Whitney, permettant de comparer les deux modalités indépendantes.
- Pour les résidus de pesticides, les données ont été présentées sous forme d'histogrammes. La comparaison des concentrations entre les différentes parcelles a été réalisée à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Par ailleurs, les variations des résidus selon les stades phénologiques ont été évaluées à l'aide du test de Friedman, adapté à l'analyse de données appariées sur le logiciel R (R Codes TEAM 2018) version 3.6.4.

L'ensemble des tests statistiques a été réalisé avec un seuil de significativité fixé à $p < 0,05$.

Chapitre IV. Résultats et discussion

Chapitre IV. Résultats et discussion

1. Résultats de paramètres physicochimiques du sol

- **Caractéristiques physicochimiques du sol :**

Propriétés physico-chimiques du sol : Il s'agit d'un ensemble de caractéristiques résultant de processus physico-chimiques et chimiques, dépendants des conditions climatiques et de l'activité des êtres vivants. Ces propriétés interagissent de manière complexe pour constituer l'un des déterminants majeurs de la fertilité des sols, influençant directement le potentiel de production des cultures (Li et al., 2019 ; Imran et al., 2021).

- ❖ **Analyse granulométrique du sol étudié :**

L'analyse granulométrique du sol du terrain d'étude a révélé une prédominance de la fraction sableuse (55 %), associée à une proportion notable d'argile (35 %), tandis que la fraction limoneuse reste faible (10 %). Selon la classification texturale de l'USDA, le sol est classé sableux-argileux. Cette texture confère au sol une bonne perméabilité tout en assurant une capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs non négligeable, ce qui influence le fonctionnement physico-biochimique du sol.

Tableau 4 : Composition granulométrique du sol du terrain d'étude.

FRACTION GRANULOMETRIQUE	PROPORTION (%)
SABLE	55
LIMON	10
ARGILE	35
Texture (usda)	SABLEUSE -ARGILEUSE

1.1. Campagne 2021- 2022

1.1.1. Avant semi :

1.1.1.1. pH eau :

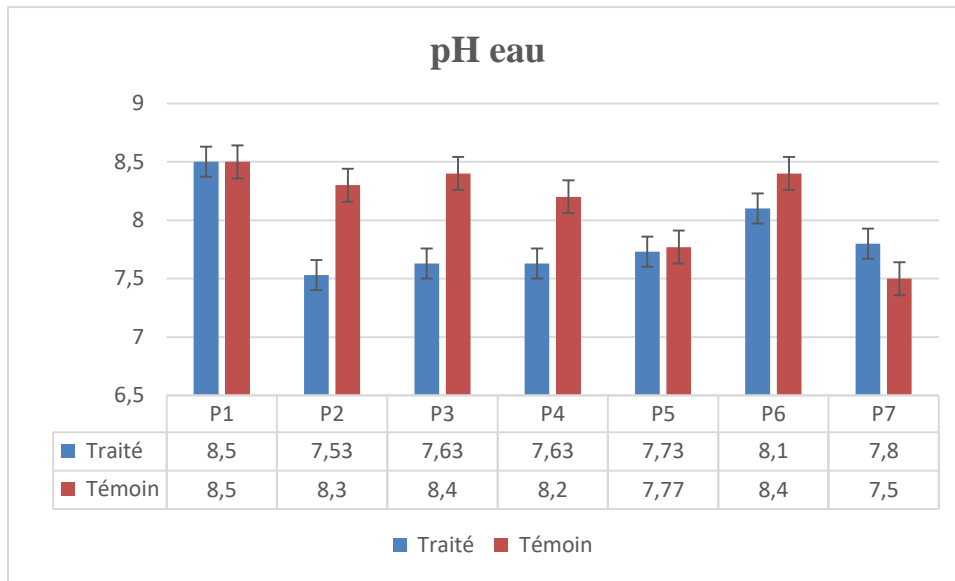


Figure 13 : Variation de pH eau du sol avant Semi

Les résultats mettent en évidence des variations marquées de pH entre les parcelles traitées et celles de contrôle. Les pH des sols traités varient de 7,53 à 8,5, alors que celui des sols témoins se situe entre 7,5 et 8,5. Ces changements laissent à penser que les interventions effectuées ont un impact sur le pH du sol, même si toutes les valeurs demeurent dans une plage légèrement acide à neutre. L'analyse du test t de Student (tableau 5) révèle qu'aucune différence significative n'existe entre les moyennes pour la plupart des parcelles, à l'exception de P2, P3 et P4. (p est inférieur à 0,05).

Tableau 5. Test t de student (pH eau avant semi)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	8.5 ± 0.5	a
P1 traité	8.5 ± 0.2	a
P2 témoin	8.3 ± 0.3	a
P2 traité	7.53 ± 0.15	b
P3 témoin	8.4 ± 0.2	a
P3 traité	7.63 ± 0.15	b
P4 témoin	8.2 ± 0.2	a
P4 traité	7.63 ± 0.3	b

P5 témoin	7.77 ± 0.2	a
P5 traité	7.73 ± 0.2	a
P6 témoin	8.4 ± 0.3	a
P6 traité	8.1 ± 0.1	a
P7 témoin	7.5 ± 0.2	a
P7 traité	7.8 ± 0.2	a

Les moyennes de chaque ligne portant la même lettre ne présentent pas de différence significative selon le test t à un niveau de confiance de 95 %.

1.1.1.2. pH KCl :

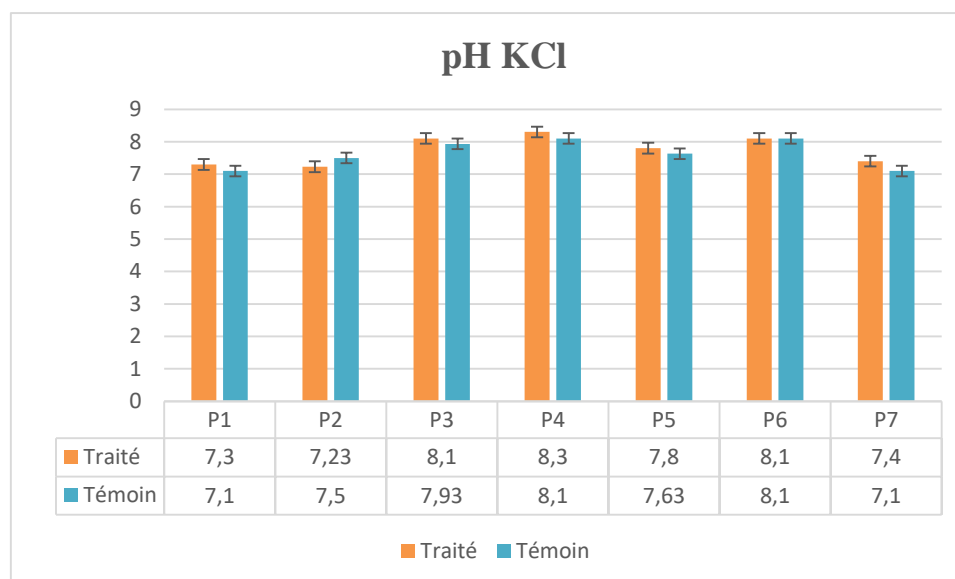


Figure 14 : Variation de pH KCl du sol avant Semi

Le pH se situe entre 7,1 et 8,3. Les témoins présentent une variabilité un peu plus importante, comprenant des valeurs inférieures (7,1) et supérieures (8,3), tandis que les échantillons traités démontrent une cohérence accrue. Suite à l'analyse comparative des répartitions de pH, les résultats issus du test t de Student (Tableau 6) démontrent que la plupart des parcelles ne présentent pas de différence notable en termes de moyennes, à l'exception de la parcelle P2.

Tableau 6. Test t de student (pH KCl avant semi)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.1 ± 0.1	a
P1 traité	7.3 ± 0.1	a
P2 témoin	7.5 ± 0.2	a
P2 traité	7.23 ± 0.1	b
P3 témoin	7.93 ± 0.05	a
P3 traité	8.1 ± 0.1	a
P4 témoin	8.1 ± 0.15	a
P4 traité	8.3 ± 0.1	a
P5 témoin	7.63 ± 0.15	a
P5 traité	7.8 ± 0.1	a
P6 témoin	8.1 ± 0.1	a
P6 traité	8.1 ± 0.15	a
P7 témoin	7.4 ± 0.1	a
P7 traité	7.1 ± 0.1	a

1.1.1.3. Carbone organique :

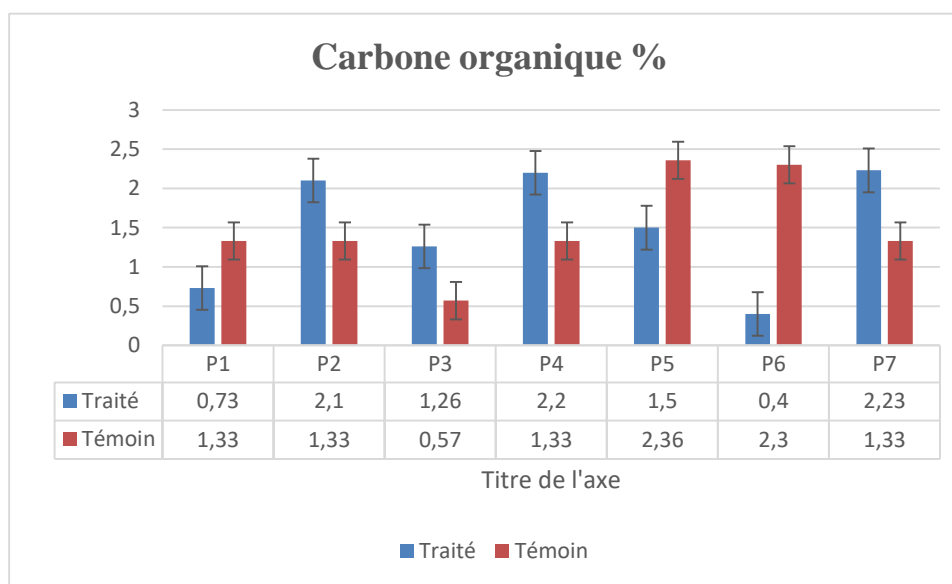


Figure 15 : Variation de taux de carbone organique du sol avant Semi

Les parcelles P2, P4 et P7 présentent une hausse de la concentration en carbone organique par rapport aux échantillons témoins. Par contre, les échantillons traités pour les parcelles P1, P3, P5 et P6 montrent une baisse du carbone organique, particulièrement P6 où le niveau passe de 2,30 % à 0,40 %. L'examen statistique

utilisant le test t de Student (voir Tableau 7) révèle une différence significative entre les moyennes de l'ensemble des parcelles testées.

Tableau 7. Test t de student (Carbone organique avant semi)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	1.33 ± 0.3	a
P1 traité	0.73 ± 0.15	b
P2 témoin	1.33 ± 0.3	a
P2 traité	2.1 ± 0.2	b
P3 témoin	0.57 ± 0.4	b
P3 traité	1.26 ± 0.2	a
P4 témoin	1.33 ± 0.3	b
P4 traité	2.2 ± 0.2	a
P5 témoin	2.36 ± 0.3	a
P5 traité	1.5 ± 0.17	b
P6 témoin	2.3 ± 0.3	a
P6 traité	0.4 ± 0.25	b
P7 témoin	1.33 ± 0.3	b
P7 traité	2.23 ± 0.25	a

1.1.1.4. Calcaire total :

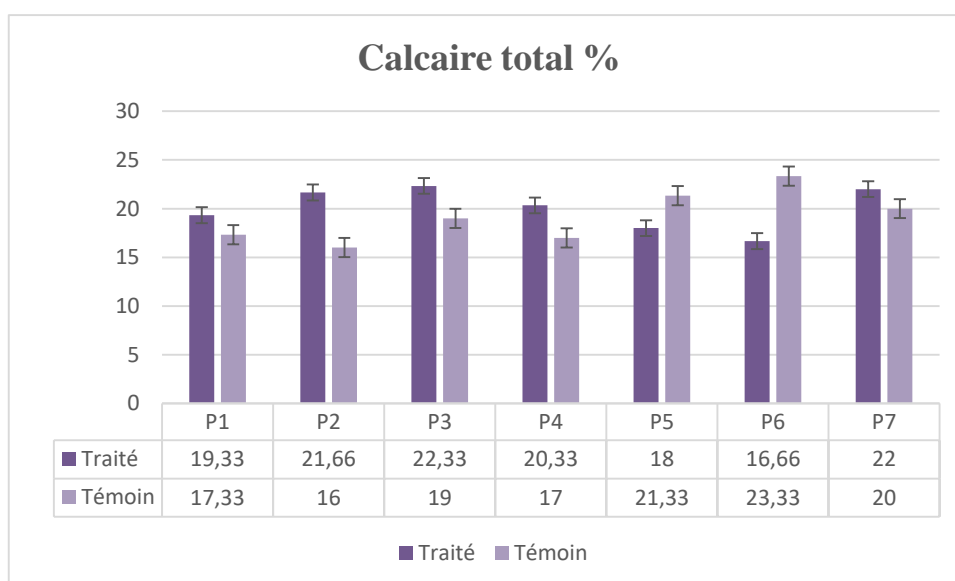


Figure 16 : Variation de taux de Calcaire total du sol avant Semi

Chapitre IV. Résultats et discussion

Dans les parcelles analysées, le taux de calcaire total fluctue entre 16,66 % et 22,33 %, affichant généralement une moyenne supérieure à celle des échantillons témoins. La parcelle 3 présente le taux le plus haut parmi les traités (22,33 %), alors que dans le groupe de contrôle, les pourcentages varient entre 16 % et 23,33 %, avec la parcelle 6 atteignant la valeur supérieure (23,33 %). Parmi les sept échantillons, il n'y a pas de différence statistiquement significative pour les moyennes des parcelles P1, P3 et P5, alors que c'est le cas pour les autres parcelles.

Tableau 8. Test t de student (Calcaire total avant semi)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	17.33 ± 1.52	a
P1 traité	19.33 ± 2.09	a
P2 témoin	16 ± 1	b
P2 traité	21.66 ± 2.08	a
P3 témoin	19 ± 1	a
P3 traité	22.33 ± 1.5	a
P4 témoin	17 ± 1	b
P4 traité	20.33 ± 1.5	a
P5 témoin	21.33 ± 1.52	a
P5 traité	18.0 ± 2	a
P6 témoin	23.33 ± 2.08	a
P6 traité	16.66 ± 3.21	b
P7 témoin	20 ± 1	b
P7 traité	22 ± 2	a

1.1.1.5. Calcaire actif :

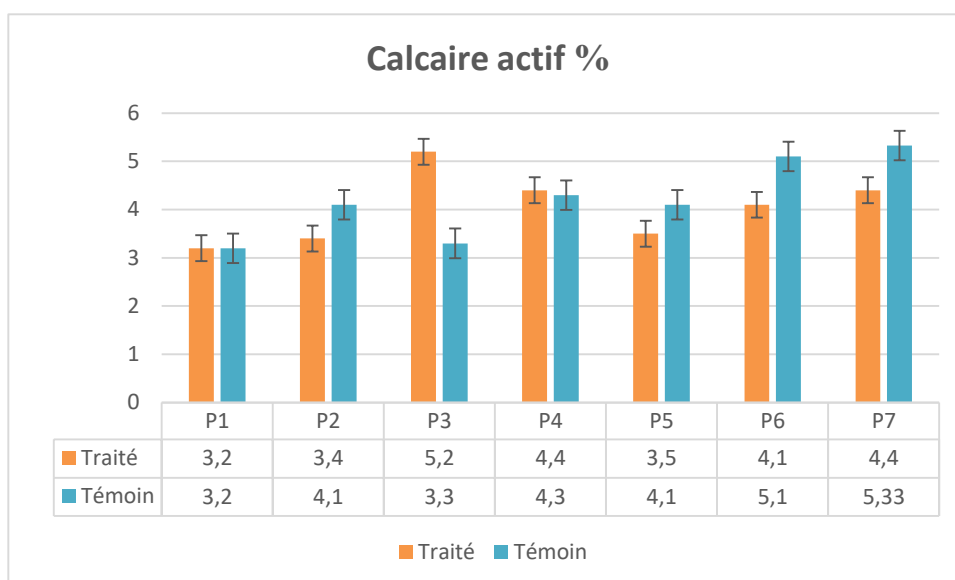


Figure 17 : Variation de taux de Calcaire actif du sol avant Semi

Les teneurs en calcaire actif dans les échantillons traités varient de 3,2 % à 5,2 %, tandis que celles des témoins vont de 3,2 % à 5,33 %. Le plus grand écart en faveur du traitement apparaît à l'échantillon 3, avec 5,2 %, contre 3,3 % pour le témoin. En revanche, pour les échantillons 2, 5, 6 et 7, les témoins présentent des valeurs plus élevées, notamment 5,33 % à l'échantillon 7 contre 4,4 % chez le traité, ce qui représente la valeur maximale chez les témoins. L'analyse statistique indique que, pour les parcelles P1, P4 et P5, les différences entre les moyennes des groupes témoin et traité ne sont pas significatives. Cependant, des différences statistiquement significatives apparaissent dans les autres parcelles, montrant un effet variable du traitement selon les sites.

Tableau 9. Test t de student (Calcaire actif avant semi)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	3.2 ± 0.2	a
P1 traité	3.2 ± 0.2	a
P2 témoin	4.1 ± 0.15	a
P2 traité	3.4 ± 0.1	b
P3 témoin	3.3 ± 0.2	b
P3 traité	5.2 ± 0.1	a
P4 témoin	4.3 ± 0.3	a
P4 traité	4.4 ± 0.2	a
P5 témoin	4.1 ± 0.1	a
P5 traité	3.5 ± 0.3	a
P6 témoin	5.1 ± 0.1	a
P6 traité	4.1 ± 0.1	b
P7 témoin	5.33 ± 0.3	a
P7 traité	4.4 ± 0.2	b

1.1.1.6. Phosphore assimilable :

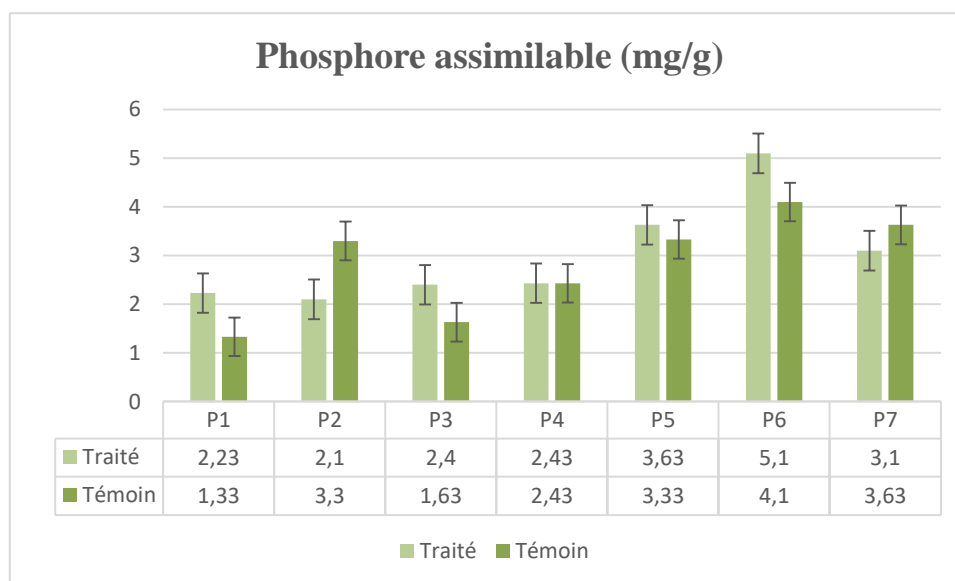


Figure 18 : Variation du taux de phosphore assimilable du sol avant Semi

Les niveaux de phosphore assimilable diffèrent d'une parcelle à l'autre. En général, les terres traitées montrent des valeurs plus hautes, en particulier pour les parcelles P1, P3, P5 et P6. En

revanche, les valeurs des parcelles P2 et P7 sont plus élevées chez les témoins. L'analyse statistique révèle des différences significatives pour la plupart des parcelles, à l'exception de P4 et P5 (Tableau 10).

Tableau 10. Test t de student (Phosphore assimilable avant semi)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	1.33 ± 0.3	b
P1 traité	2.23 ± 0.2	a
P2 témoin	3.3 ± 0.3	a
P2 traité	2.1 ± 0.1	b
P3 témoin	1.63 ± 0.1	b
P3 traité	2.4 ± 0.3	a
P4 témoin	2.43 ± 0.3	a
P4 traité	2.43 ± 0.41	a
P5 témoin	3.33 ± 0.3	a
P5 traité	3.63 ± 0.15	a
P6 témoin	4.1 ± 0.1	b
P6 traité	5.1 ± 0.1	a
P7 témoin	3.63 ± 0.1	a
P7 traité	3.1 ± 0.1	b

1.1.1.7. Humidité hygroscopique :

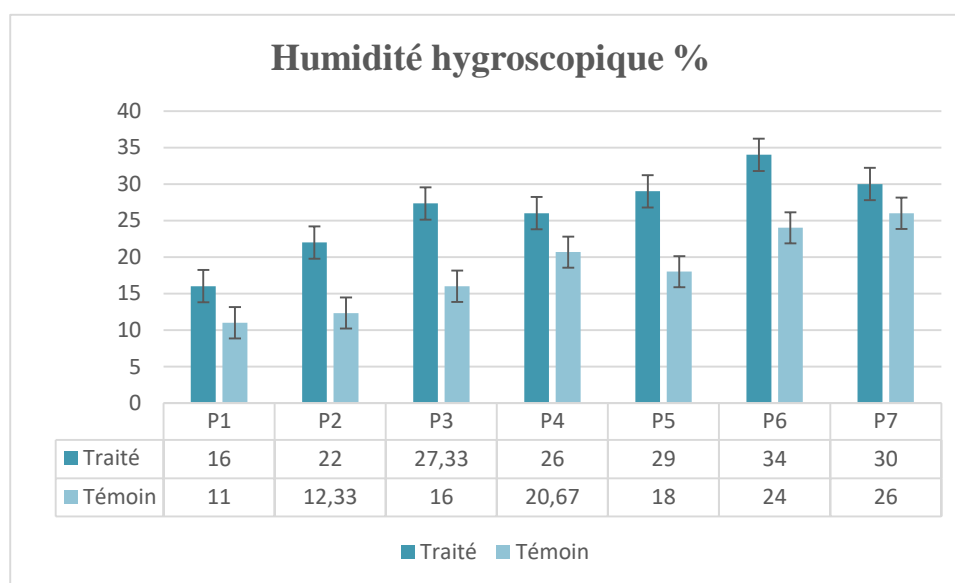


Figure 19 : Variation du taux d'humidité hygroscopique du sol avant Semi

Chapitre IV. Résultats et discussion

Pour les échantillons traités, le taux d'humidité hygroskopique se situe entre 16 % et 34 %, alors que pour les échantillons témoins, il fluctue de 11 % à 26 %. Habituellement, les échantillons traités présentent des valeurs supérieures à celles des témoins. L'analyse statistique (Tableau 11) ne révèle aucune différence notable pour la majorité des parcelles, à l'exception de P1 et P2.

Tableau 11. Test t de student (humidité hygroskopique avant semi)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	11 ± 1	b
P1 traité	16 ± 2	a
P2 témoin	12.33± 1.5	b
P2 traité	22 ± 2	a
P3 témoin	16 ±2	a
P3 traité	27.33 ± 2.5	a
P4 témoin	20.67 ± 2.08	a
P4 traité	26 ± 2	a
P5 témoin	18 ± 2	a
P5 traité	29 ± 2	a
P6 témoin	24 ± 2	a
P6 traité	34 ± 2	a
P7 témoin	26 ± 2	a
P7 traité	30 ± 2	a

1.1.1.8. Porosité :

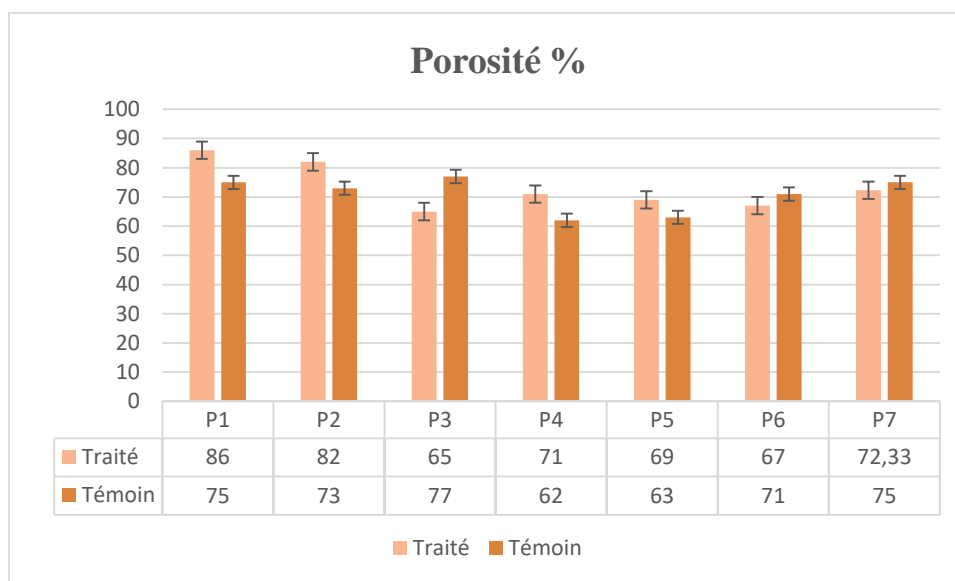


Figure 20 : Variation de taux de porosité avant Semi

L'étude de la porosité met en évidence des différences entre les sols traités et témoins selon les parcelles. Généralement, les sols traités affichent des valeurs plus élevées, notamment dans les parcelles P1, P2, P4 et P5. Toutefois, une tendance inverse apparaît dans les parcelles P3, P6 et P7. Le test t de Student indique qu'aucune différence significative n'a été observée, sauf pour la parcelle P2 (voir Tableau 12).

Tableau 12. Test t de student (Porosité avant semi)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	75 ± 2	a
P1 traité	86 ± 2	a
P2 témoin	73 ± 2	b
P2 traité	82 ± 2	a
P3 témoin	77 ± 2	a
P3 traité	65 ± 2	a
P4 témoin	62 ± 2	a
P4 traité	71 ± 1.15	a
P5 témoin	63 ± 2	a
P5 traité	69 ± 1	a
P6 témoin	71 ± 1	a

P6 traité	67 ± 1	a
P7 témoin	75 ± 2	a
P7 traité	72.33 ± 1.5	a

1.1.2. Stade Rosette :

1.1.2.1. pH eau :

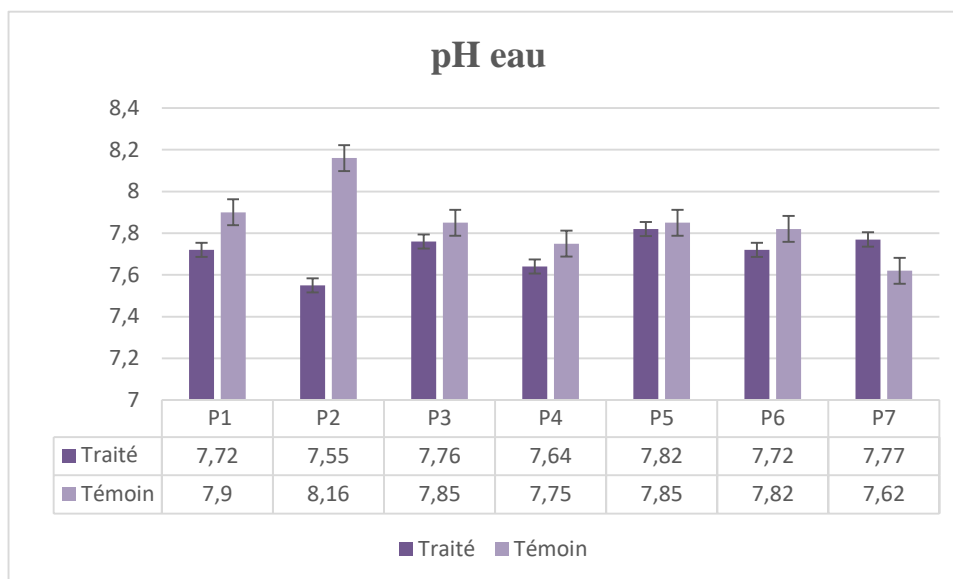


Figure 21 : Variation du taux de pH eau durant stade rosette

Les valeurs de pH relevées sur l'ensemble des parcelles, qu'elles soient sous contrôle ou soumises à un traitement, oscillent généralement entre 7,55 et 8,16, signalant une ambiance légèrement alcaline. Habituellement, les parcelles de contrôle montrent constamment un pH supérieur à celles qui ont bénéficié d'un traitement. On a noté une distinction marquée entre les moyennes des deux groupes (témoin et traité) dans la plupart des cas, sauf pour les parcelles P1, P5 et P7, où aucune variation significative n'a été identifiée (Tableau 13).

Tableau 13. Test t de Student (pH eau avant stade rosette)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.9 ± 0.01	a
P1 traité	7.72 ± 0.11	a
P2 témoin	8.16 ± 0.01	b
P2 traité	7.55 ± 0.03	a
P3 témoin	7.85 ± 0.01	a
P3 traité	7.76 ± 0.01	b
P4 témoin	7.75 ± 0.01	a
P4 traité	7.64± 0.01	b
P5 témoin	7.85 ± 0.01	a
P5 traité	7.82 ± 0.01	a
P6 témoin	7.82 ± 0.01	a
P6 traité	7.72± 0.01	b
P7 témoin	7.62± 0.01	a
P7 traité	7.77± 0.03	a

1.1.2.2. pH KCl :

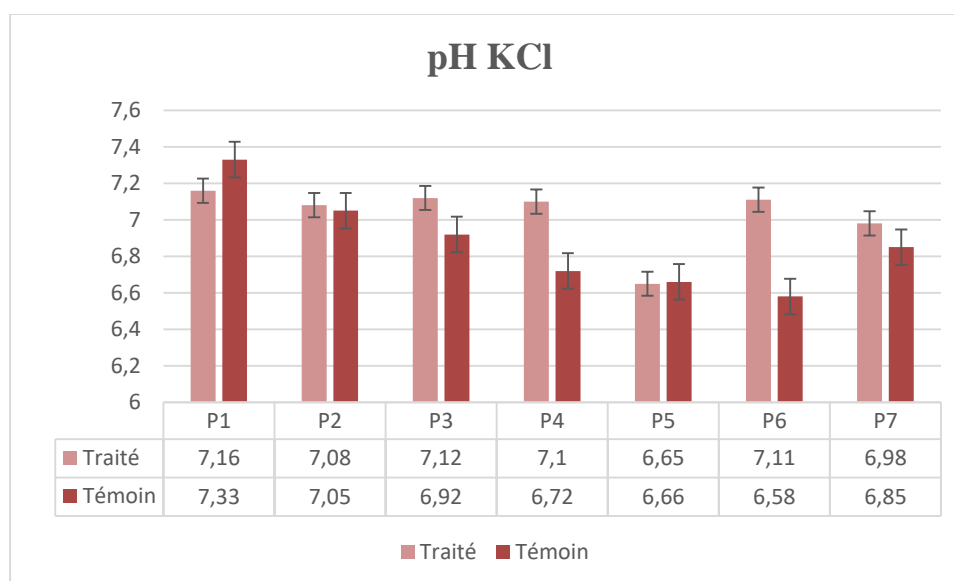


Figure 22 : Variation du taux de pH de KCl durant le stade rosette

Les sols traités présentent un pH plus uniforme et légèrement plus neutre que celui des témoins. L'examen statistique indique des disparités notables uniquement pour les parcelles P4 et P6, alors qu'aucune fluctuation importante n'a été observée dans d'autres parcelles.

Tableau 14. Test t de student (pH KCl durant stade rosette)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.33 ± 0.01	a
P1 traité	7.16 ± 0.15	a
P2 témoin	7.05 ± 0.01	a
P2 traité	7.08 ± 0.01	a
P3 témoin	6.92 ± 0.01	a
P3 traité	7.12 ± 0.01	a
P4 témoin	6.72 ± 0.01	b
P4 traité	7.1 ± 0.1	a
P5 témoin	6.66 ± 0.01	a
P5 traité	6.65 ± 0.01	a
P6 témoin	6.58 ± 0.01	b
P6 traité	7.11 ± 0.01	a
P7 témoin	6.85 ± 0.01	a
P7 traité	6.98 ± 0.01	a

1.1.2.3. Carbone organique :

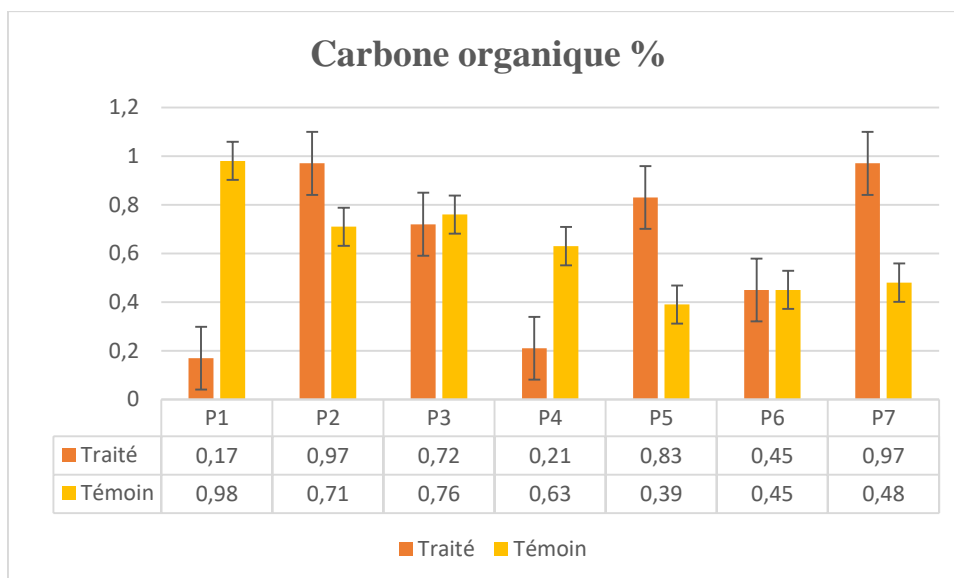


Figure 23 : Variation du taux de carbone organique durant stade rosette

Chapitre IV. Résultats et discussion

Globalement, on observe des variations importantes des niveaux de carbone organique. Auprès des témoins, les valeurs variant de 0,39 % à 0,98 %, ce qui témoigne d'une stabilité relative du contenu organique dans les sols non traités. Cependant, les sols traités montrent des concentrations plus éparpillées, variant de 0,17 % à 0,97 % dans certains terrains (P2, P5, P7), où elles surpassent fréquemment celles des témoins. Par contre, dans d'autres cas (P1, P4), elles sont manifestement moins importantes. L'analyse statistique révèle une disparité notable entre les modalités contrôle et traitement dans la majorité des parcelles, à l'exception de la sixième où aucune variation significative n'est observée.

Tableau 15. Test t de student (Carbone organique durant stade rosette)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	0.98 ± 0.01	a
P1 traité	0.17 ± 0.01	b
P2 témoin	0.71 ± 0.01	b
P2 traité	0.97 ± 0.01	a
P3 témoin	0.76 ± 0.01	a
P3 traité	0.72 ± 0.01	b
P4 témoin	0.63 ± 0.01	b
P4 traité	0.83 ± 0.01	a
P5 témoin	0.39 ± 0.01	a
P5 traité	0.83 ± 0.01	b
P6 témoin	0.45 ± 0.01	a
P6 traité	0.45 ± 0.01	a
P7 témoin	0.48 ± 0.01	b
P7 traité	0.97 ± 0.01	a

1.1.2.4. Calcaire total :

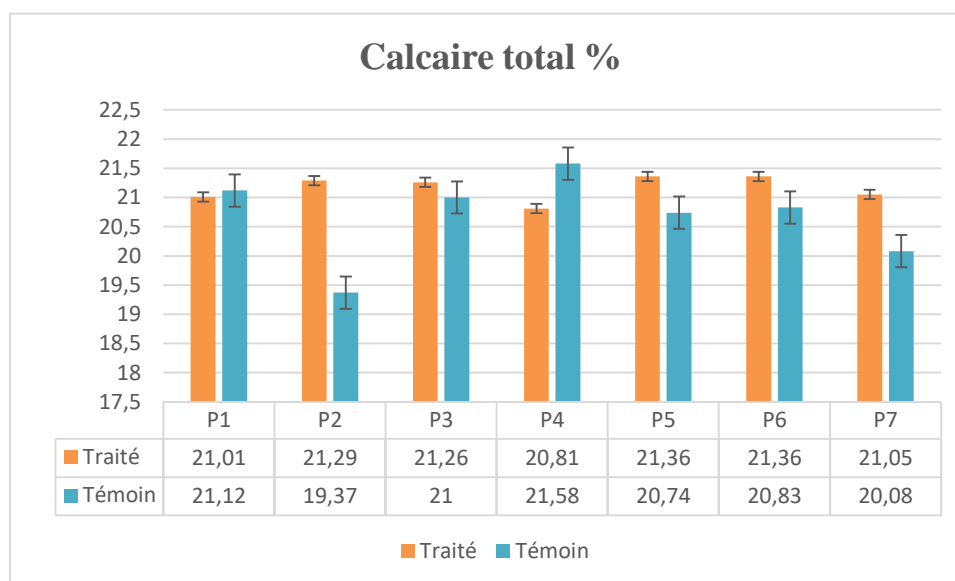


Figure 24 : Variation du taux de calcaire total durant stade rosette

Les pourcentages globaux de calcaire total se rapprochent de 21 % pour les deux modalités, signifiant une uniformité relative entre les échantillons. Pour les témoins, les valeurs oscillent entre $19,37 \pm 0,3$ % et $21,58 \pm 0,04$ %, alors que pour les traités, elles se placent entre $20,81 \pm 0,06$ % et $21,36 \pm 0,15$ %. L'analyse statistique montre des disparités notables entre les modalités traitée et contrôle dans la majorité des parcelles. Cependant, aucune fluctuation notable n'a été observée pour les parcelles 1 (référez-vous au Tableau 16).

Tableau 16. Test t de student (Calcaire total durant stade rosette)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	21.12 ± 0.12	a
P1 traité	21.01 ± 0.01	a
P2 témoin	19.37 ± 0.3	b
P2 traité	21.29 ± 0.16	a
P3 témoin	21 ± 1	a
P3 traité	21.26 ± 0.3	a
P4 témoin	21.58 ± 0.04	a
P4 traité	20.81 ± 0.06	b
P5 témoin	20.74 ± 0.12	b

P5 traité	21.36 ± 0.15	a
P6 témoin	20.83 ± 0.05	b
P6 traité	21.36 ± 0.15	a
P7 témoin	20.08 ± 0.02	b
P7 traité	21.05 ± 0.05	a

1.1.2.5. Calcaire actif :

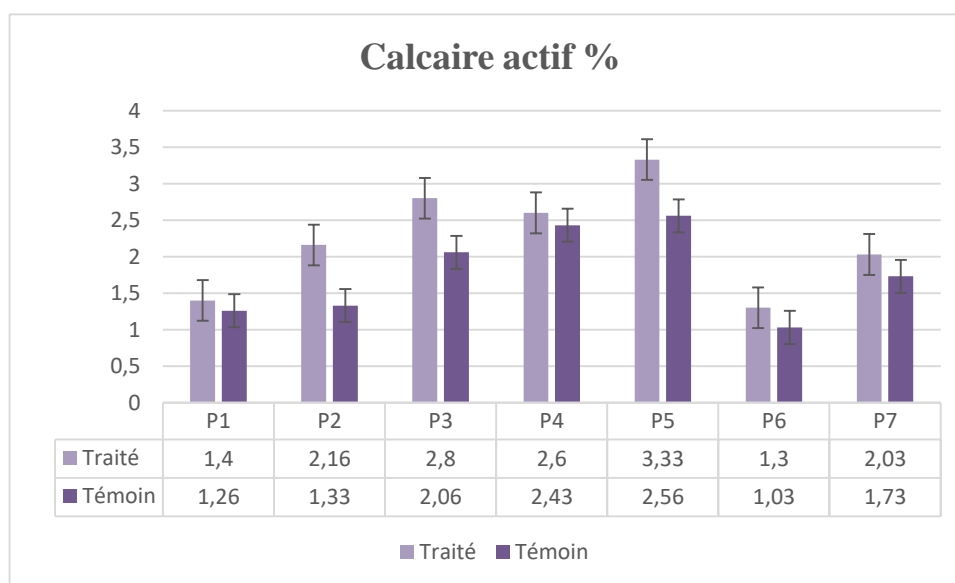


Figure 25 : Variation de taux de calcaire actif durant stade rosette

Le calcaire actif présente une légère augmentation dans les sols traités par rapport aux témoins, avec des écarts plus marqués dans les parcelles P2, P3, P4 et P5. Les disparités notées sont statistiquement pertinentes pour toutes les parcelles, attestant de l'impact du traitement sur ce paramètre.

Tableau 17. Test t de student (Calcaire actif durant stade rosette)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	1.26 ± 0.05	b
P1 traité	1.4 ± 0.36	a
P2 témoin	1.33 ± 0.57	b

P2 traité	2.16 ± 0.15	a
P3 témoin	2.06 ± 0.05	b
P3 traité	2.8 ± 0.26	a
P4 témoin	2.43 ± 0.05	b
P4 traité	2.6 ± 0.1	a
P5 témoin	2.56 ± 0.05	b
P5 traité	3.33 ± 0.2	a
P6 témoin	1.03 ± 0.05	b
P6 traité	1.3 ± 0.1	a
P7 témoin	1.73 ± 0.15	b
P7 traité	2.03 ± 0.05	a

1.1.2.6. Phosphore assimilable mg/g :

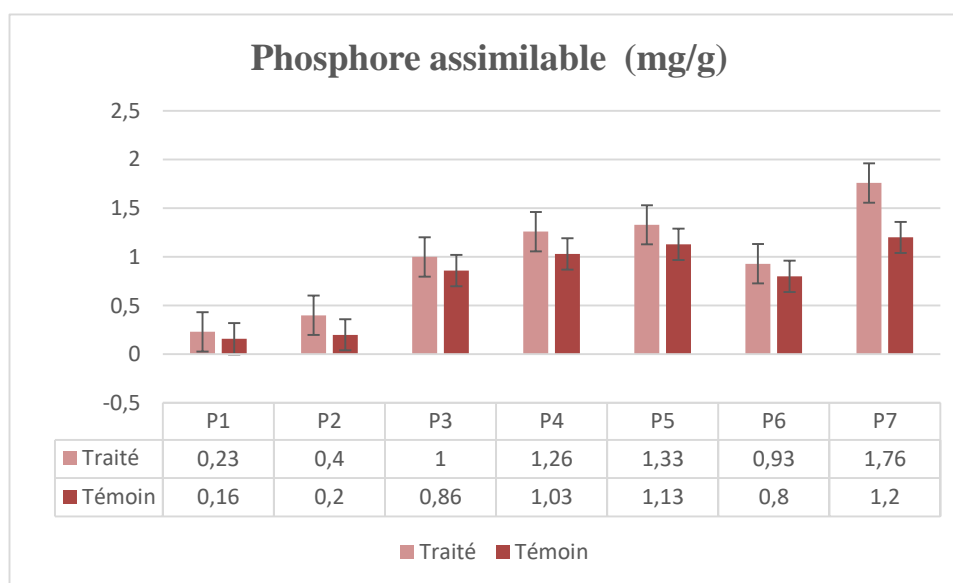


Figure 26 : Variation du taux de phosphore assimilable durant stade rosette

L'étude des concentrations en phosphore assimilable indique une prépondérance des valeurs dans les sols traités comparativement aux témoins. Sur les premières parcelles (P1 et P2), les écarts sont minimes mais persistants, alors qu'à partir de la parcelle P3, les divergences commencent à être plus prononcées. Les parcelles P5, P6 et P7 corroborent cette tendance, la dernière affichant le chiffre le plus haut (1,76 % pour le sol traité contre 1,20 % pour le témoin). L'analyse statistique révèle des disparités significatives uniquement dans les

parcelles P2, P4 et P7, pendant que les autres parcelles n'ont montré aucun changement marquant (tableau 18).

Tableau 18. Test t de student (Phosphore assimilable durant stade rosette)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	0.16 ± 0.05	a
P1 traité	0.23 ± 0.15	a
P2 témoin	0.2 ± 0	b
P2 traité	0.4 ± 0	a
P3 témoin	0.86 ± 0.05	a
P3 traité	1 ± 0.1	a
P4 témoin	1.03 ± 0.05	b
P4 traité	1.26 ± 0.05	a
P5 témoin	1.13 ± 0.05	a
P5 traité	1.33 ± 0.15	a
P6 témoin	0.8 ± 0.1	a
P6 traité	0.93 ± 0.05	a
P7 témoin	1.2 ± 0	b
P7 traité	1.76 ± 0.15	a

1.1.2.7. Humidité hygroscopique :

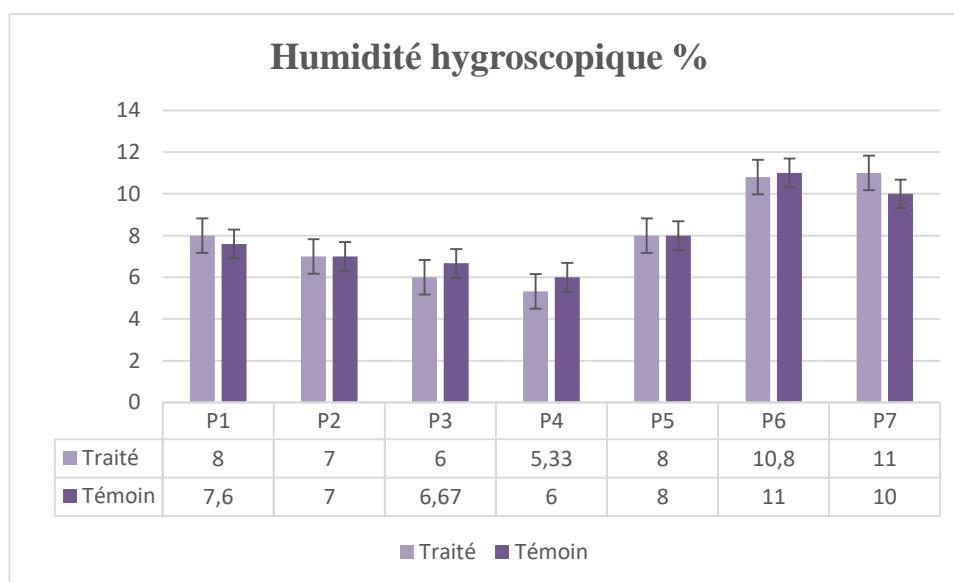


Figure 27 : Variation du taux d'humidité hygroscopique du sol durant stade rosette.

Selon les parcelles, le taux d'humidité hygroscopique fluctue entre 5 % et 11 %. Les dissemblances entre les sols traités et témoins sont minimales, illustrant une aptitude d'adsorption de l'eau globalement comparable. On n'a noté aucune différence statistiquement pertinente entre les deux modalités.

Tableau 19. Test t de student (Humidité hygroscopiques durant stade rosette)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.6 ± 1	a
P1 traité	8 ± 1	a
P2 témoin	7 ± 0	a
P2 traité	7 ± 0	a
P3 témoin	6.67 ± 1	a
P3 traité	6 ± 1	a
P4 témoin	6 ± 0	a
P4 traité	5.33 ± 1	a
P5 témoin	8 ± 1	a
P5 traité	8 ± 1	a
P6 témoin	11 ± 1	a
P6 traité	10.8 ± 1	a
P7 témoin	10 ± 1	a
P7 traité	11 ± 1	a

1.1.2.8. Porosité :

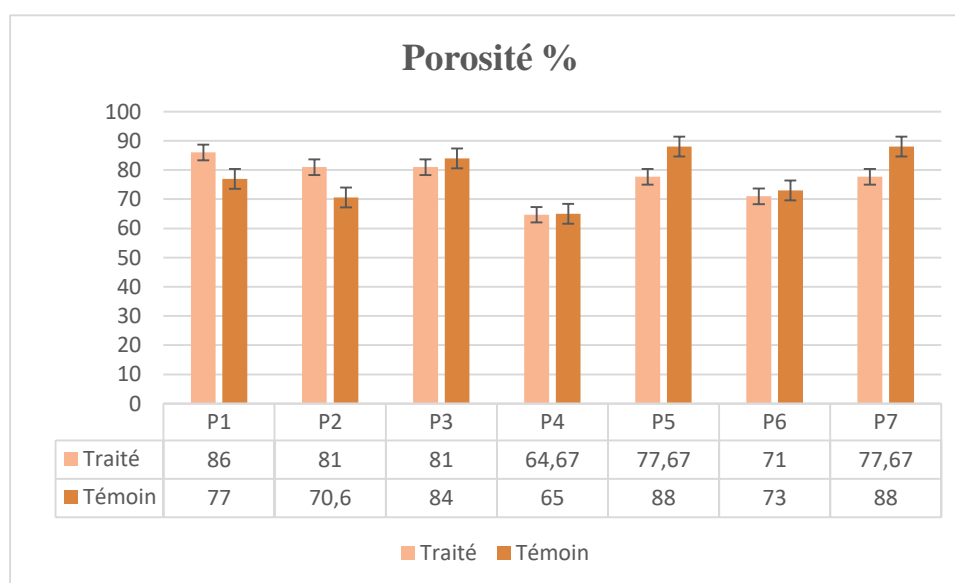


Figure 28 : Variation du taux de porosité du sol durant stade rosette.

L'analyse comparative de la porosité (%) entre les modalités traitées et témoins révèle des valeurs allant environ de 65 % à 88 %, en fonction des parcelles. Les parcelles traitées montrent une porosité plus importante comparativement aux témoins (P1 et P2), indiquant une progression de ce paramètre suite au traitement. Par contre, pour certaines parcelles (P5 et P7), les témoins affichent des valeurs plus élevées, indiquant une tendance inverse. Concernant d'autres parcelles (P3, P4 et P6), les résultats des deux options demeurent semblables. Des divergences significatives entre les parcelles traitées et témoins n'ont été notées que pour P1, P2 et P5. Par ailleurs, aucune différence statistiquement pertinente n'a été observée dans les autres parcelles (voir Tableau 20).

Tableau 20. Test t de student (Porosité du sol durant stade rosette)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	77 ± 0.58	b
P1 traité	86 ± 0.58	a
P2 témoin	70.6 ± 0.33	b
P2 traité	81 ± 0.58	a
P3 témoin	84 ± 0.58	a
P3 traité	81 ± 0.58	a
P4 témoin	65.00 ± 0.58	a
P4 traité	64.67 ± 0.88	a
P5 témoin	88.00 ± 0.58	a
P5 traité	77.67 ± 0.88	b
P6 témoin	73± 0.58	a
P6 traité	71 ± 0.88	a
P7 témoin	88 ± 0.58	a
P7 traité	77.67 ± 0.88	a

1.1.3. Stade Floraison :

1.1.3.1. pH eau :

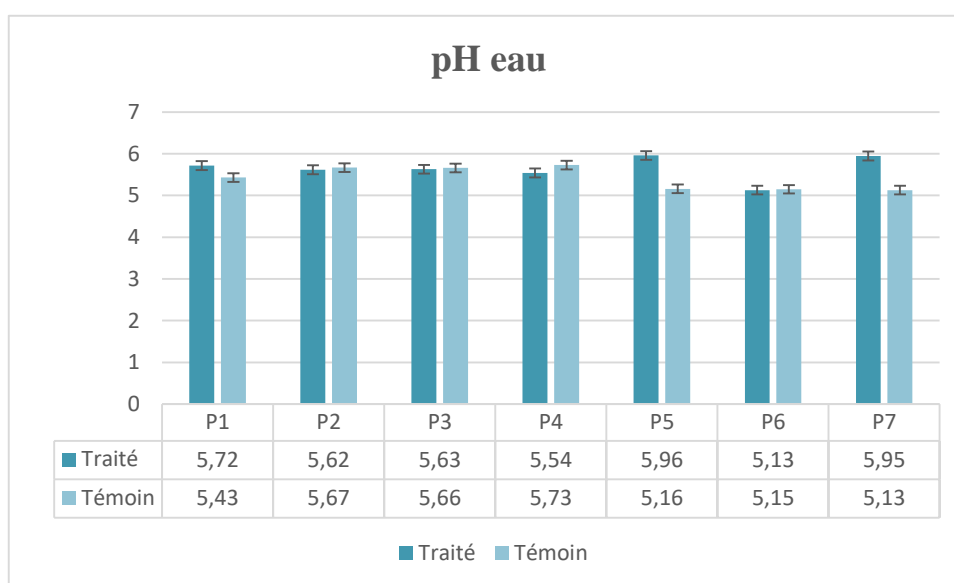


Figure 29 : Variation du taux de pH eau du sol durant stade floraison.

Les relevés de pH de l'eau dans les diverses parcelles oscillent entre 5,13 et 5,96, signalant une légère acidité de l'environnement. Globalement, les différences entre les groupes traités et témoins restent minimales. Cependant, on observe que les parcelles P1 et P5 affichent des valeurs un peu plus élevées dans les sols traités, ce qui suggère une légère influence du traitement sur la neutralisation de l'acidité. En revanche, sur la parcelle P4, le pH est plus élevé chez le témoin (5,73) que chez le traité (5,54), tandis que les valeurs de pH des parcelles P2, P3 et P6 sont quasiment équivalentes. L'analyse statistique indique des divergences marquées uniquement dans les parcelles P4, P5 et P7, tandis qu'on n'a noté aucune variation importante pour les autres (tableau 21).

Tableau 21. Test t de student (pHeau du sol durant stade floraison)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	5.43 ± 0.2	a
P1 traité	5.72 ± 0.06	a
P2 témoin	5.67 ± 0.02	a
P2 traité	5.62 ± 0.02	a
P3 témoin	5.66 ± 0.04	a
P3 traité	5.63 ± 0.02	a

P4 témoin	5.73 ± 0.01	a
P4 traité	5.54 ± 0.02	b
P5 témoin	5.16 ± 0.01	a
P5 traité	5.96 ± 0.01	b
P6 témoin	5.15 ± 0.01	a
P6 traité	5.13 ± 0.06	a
P7 témoin	5.13 ± 0.01	b
P7 traité	5.95 ± 0.01	a

1.1.3.2. pH KCl :

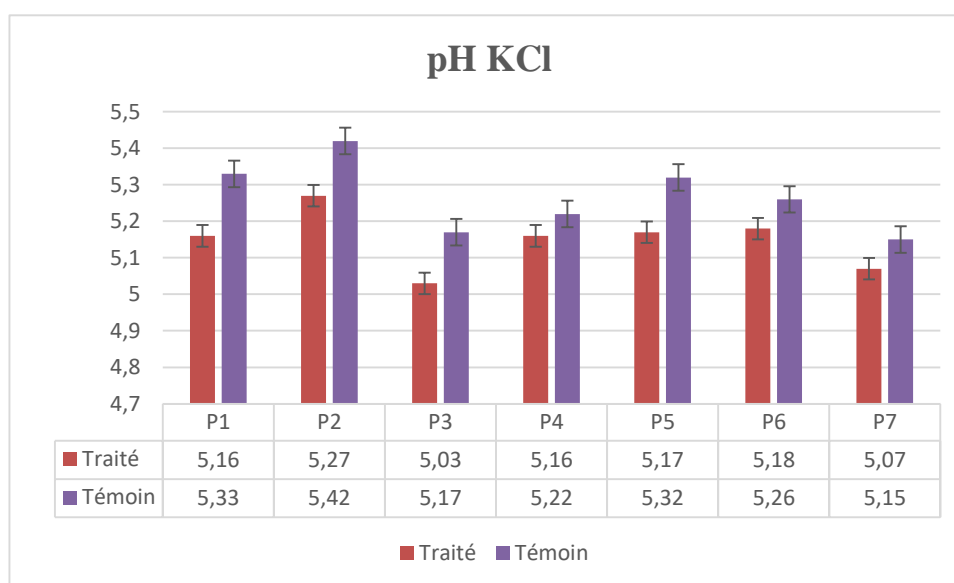


Figure 30 : Variation du taux de pH KCl durant stade floraison

L'analyse des valeurs de pH relevées dans la solution KCl révèle une fluctuation allant de 5,03 à 5,27 pour les échantillons traités, et de 5,15 à 5,42 pour les témoins. De façon générale, les témoins montrent constamment des valeurs un peu plus hautes que celles relevées chez les échantillons traités. Les données statistiques démontrent qu'il existe une différence notable entre les échantillons traités et témoins dans l'ensemble des parcelles (Tableau 22).

Tableau 22. Test t de student (pH KCl du sol durant stade floraison)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	5.33 ± 0.01	a
P1 traité	5.16 ± 0.01	b
P2 témoin	5.42 ± 0.005	a
P2 traité	5.27 ± 0.01	b
P3 témoin	5.17 ± 0.01	a
P3 traité	5.03 ± 0.01	b
P4 témoin	5.22 ± 0.01	a
P4 traité	5.16 ± 0.01	b
P5 témoin	5.32 ± 0.01	a
P5 traité	5.17 ± 0.01	b
P6 témoin	5.26 ± 0.01	a
P6 traité	5.18 ± 0.01	b
P7 témoin	5.15 ± 0.005	b
P7 traité	5.07 ± 0.01	a

1.1.3.3. Carbone organique :

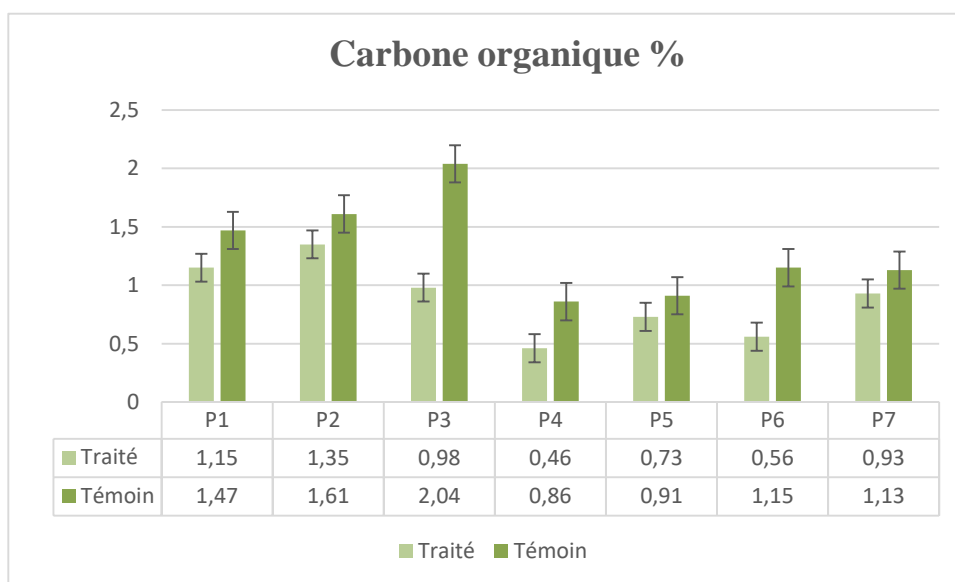


Figure 31 : Variation du taux de carbone organique du sol durant stade floraison

Chapitre IV. Résultats et discussion

De manière générale, les teneurs en carbone organique sont plus élevées dans les parcelles témoins que dans les parcelles traitées. Les valeurs varient globalement entre 0,46 % et 1,35 % pour les sols traités, alors qu'elles s'échelonnent de 0,86 % à 2,04 % chez les témoins. Cette tendance est particulièrement marquée en P3, où la teneur atteint 2,04 % chez le témoin contre seulement 0,98 % dans la modalité traitée, Ce qui traduit une diminution du carbone organique sous l'effet du traitement.

Dans toutes les parcelles étudiées, l'évaluation statistique met en évidence des différences significatives entre les modalités traitée et témoin (Tableau 23).

Tableau 23. Test t de student (Carbone organique du sol durant stade floraison)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	1.47 ± 0.01	a
P1 traité	1.15 ± 0.01	b
P2 témoin	1.61 ± 0.01	a
P2 traité	1.35 ± 0.01	b
P3 témoin	2.04 ± 0.02	a
P3 traité	0.98 ± 0.01	b
P4 témoin	0.86 ± 0.01	a
P4 traité	0.46 ± 0.01	b
P5 témoin	0.91 ± 0.05	a
P5 traité	0.73 ± 0.01	b
P6 témoin	1.15 ± 0.01	a
P6 traité	0.56 ± 0.02	b
P7 témoin	1.13 ± 0.01	b
P7 traité	0.93 ± 0.01	a

1.1.3.4. Calcaire total :

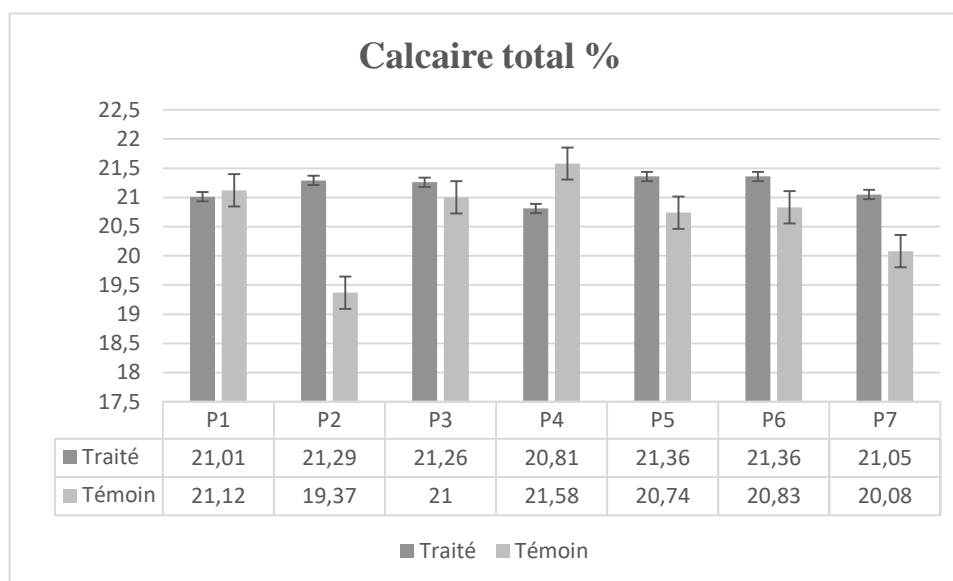


Figure 32 : Variation du taux de calcaire total durant stade floraison.

Les teneurs en calcaire total montrent une faible variation entre les unités, avec des valeurs comprises entre 19,37 % et 21,58 %, ce qui témoigne d’une relative homogénéité du statut calcaire des sols étudiés. De manière générale, les sols ayant reçu un traitement affichent des concentrations en calcaire total comparables, voire légèrement supérieures à celles des témoins, en particulier dans les unités P2, P5, P6 et P7. À l’inverse, les parcelles P1 et P4 présentent des teneurs plus élevées dans les témoins, En P3, les valeurs sont pratiquement identiques entre les deux modalités, indiquant l’absence d’un effet notable du traitement sur ce paramètre dans cette parcelle.

Des écarts significatifs entre les moyennes des modalités témoins et traitées n’ont été mis en évidence qu’au niveau des parcelles P1 et P2. En revanche, aucune différence statistiquement probante n’a été constatée pour les autres parcelles (voir Tableau 24).

Tableau 24. Test t de student (Calcaire total durant stade floraison)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	22.29 ± 0.1	a

P1 traité	22.53 ± 0.01	b
P2 témoin	22.2 ± 0.1	b
P2 traité	22.4 ± 0.1	a
P3 témoin	22.03 ± 0.01	a
P3 traité	22.2 ± 0.02	a
P4 témoin	21.85 ± 0.01	a
P4 traité	22.04 ± 0.02	a
P5 témoin	22.42 ± 0.01	a
P5 traité	22.42 ± 0.01	a
P6 témoin	22.41 ± 0.01	a
P6 traité	22.41 ± 0.01	a
P7 témoin	22.43 ± 0.05	a
P7 traité	22.43 ± 0.05	a

1.1.2.5. Calcaire actif :

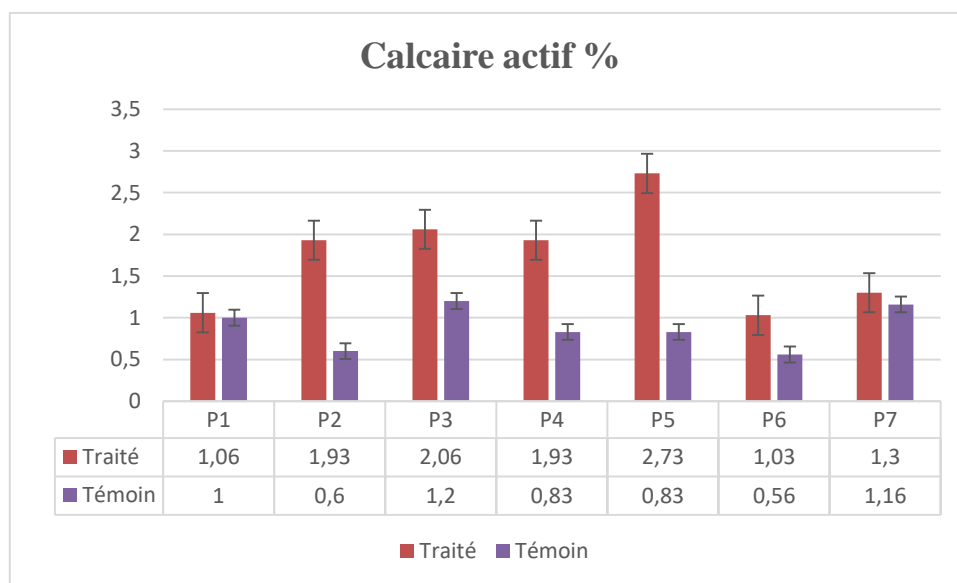


Figure 33 : Variation du taux de calcaire actif durant stade floraison

Les résultats indiquent une teneur en calcaire actif globalement plus élevée dans les sols ayant reçu le traitement, en comparaison avec les témoins. Cette tendance est particulièrement marquée au niveau des parcelles P2, P3, P4 et surtout P5, où la valeur atteint 2,73 % chez les sols traités, contre seulement 0,83 % dans les témoins.

Chapitre IV. Résultats et discussion

Cette différence nette suggère une réponse significative du sol au traitement appliqué. L'analyse statistique met en évidence des écarts significatifs entre les conditions témoins et traitées dans la majorité des parcelles. Toutefois, aucune différence notable n'a été observée au niveau des parcelles 1, 6 et 7. (Voir tableau 25).

Tableau 25. Test t de student (Calcaire actif durant stade floraison)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	1 ± 0	a
P1 traité	1.06 ± 0.05	a
P2 témoin	0.6 ± 0.1	b
P2 traité	1.93 ± 0.05	a
P3 témoin	1.2 ± 0.1	b
P3 traité	2.06 ± 0.1	a
P4 témoin	0.83 ± 0.05	b
P4 traité	1.93 ± 0.05	a
P5 témoin	0.83 ± 0.05	b
P5 traité	2.73 ± 0.05	a
P6 témoin	0.56 ± 0.05	a
P6 traité	1.03 ± 0.05	a
P7 témoin	1.16 ± 0.15	a
P7 traité	1.3 ± 0.1	a

1.1.2.5. Phosphore assimilable :

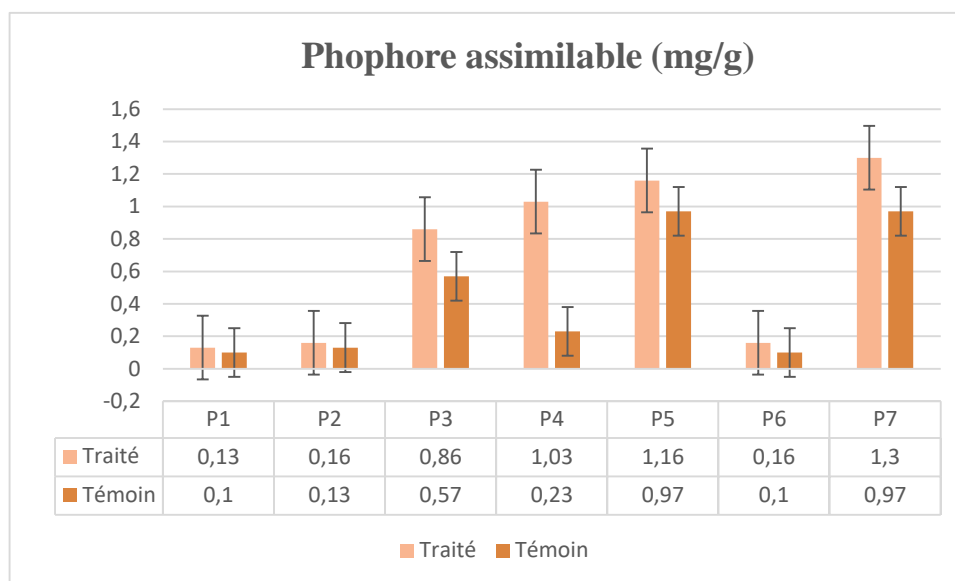


Figure 34 : Variation du taux de Phosphore assimilable durant stade floraison

L'évaluation des concentrations en phosphore assimilable met en évidence une augmentation générale dans les sols traités par rapport aux témoins. Cette hausse est particulièrement notable dans les parcelles P3, P4, P5 et P7, où les teneurs observées dans les sols traités s'élèvent respectivement à 0,86 %, 1,03 %, 1,16 % et 1,3 %, contre 0,57 %, 0,23 %, 0,97 % et 0,97 % dans les sols témoins. À l'inverse, les parcelles P1, P2 et P6 affichent des niveaux relativement bas et similaires entre les deux modalités, ce qui indique une réponse limitée, voire inexistante, au traitement dans ces cas.

L'analyse statistique révèle des différences significatives entre les modalités traitée et témoin dans la plupart des parcelles. Cependant, aucune variation significative n'a été constatée pour les parcelles 1 et 6 (voir Tableau 26).

Tableau 26. Test t de student (Phosphore assimilable durant stade floraison)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	0.1 ± 0.01	a
P1 traité	0.13 ± 0.05	a

P2 témoin	0.13 ± 0.05	a
P2 traité	0.16 ± 0.05	b
P3 témoin	0.57 ± 0.11	b
P3 traité	0.86 ± 0.05	a
P4 témoin	0.23 ± 0.15	b
P4 traité	1.03 ± 0.05	a
P5 témoin	0.97 ± 0.05	b
P5 traité	1.16 ± 0.05	a
P6 témoin	0.1 ± 0.01	a
P6 traité	0.16 ± 0.05	a
P7 témoin	0.97 ± 0.05	b
P7 traité	1.3 ± 0.1	a

1.1.2.6. Humidité hygroscopique :

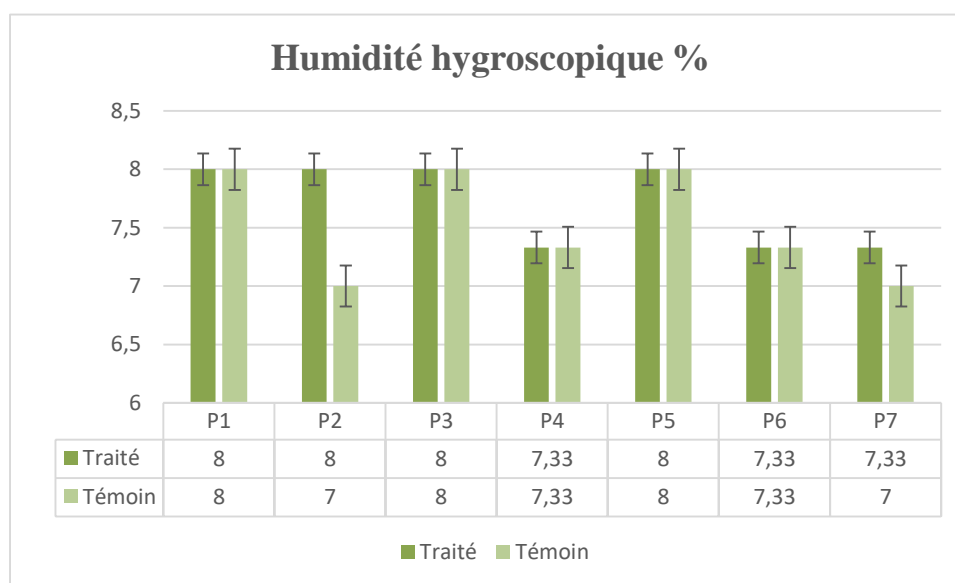


Figure 35 : Variation du taux d'humidité hygroscopique du sol durant stade floraison.

L'analyse des résultats relatifs à l'humidité hygroscopique montre une stabilité globale entre les modalités traitées et témoins, sans variations notables dans l'ensemble des parcelles. Dans presque tous les cas, les valeurs mesurées sont identiques ou très proches, oscillant majoritairement autour de 8 % ou 7,33 %.

Pour les totalités des parcelles, l'analyse statistique n'a révélé aucune différence notable entre les modalités (voir Tableau 27)

Tableau 27. Test t de student (humidité hygroscopique durant stade floraison)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	8 ± 1	a
P1 traité	8 ± 1	a
P2 témoin	7 ± 1	a
P2 traité	8 ± 1	a
P3 témoin	8 ± 0	a
P3 traité	8 ± 0	a
P4 témoin	7.33 ± 1.5	a
P4 traité	7.33 ± 0.5	a
P5 témoin	8 ± 1	a
P5 traité	8 ± 1	a
P6 témoin	7.33 ± 0.58	a
P6 traité	7.33 ± 0.58	a
P7 témoin	7 ± 0	a
P7 traité	7.33 ± 0.58	a

1.1.2.7. Porosité :

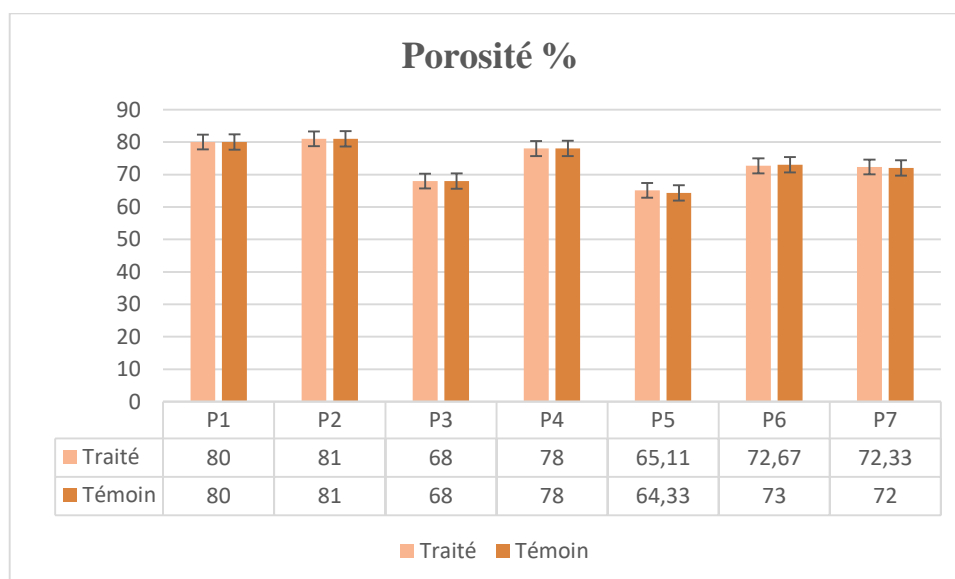


Figure 36 : Variation du taux de porosité du sol durant stade floraison.

Chapitre IV. Résultats et discussion

L'analyse de la porosité révèle une relative stabilité entre les échantillons traités et témoins pour la plupart des points étudiés. Aux positions P1, P2, P3 et P4, les valeurs sont quasiment identiques entre les deux groupes (respectivement 80 %, 81 %, 68 % et 78 %), indiquant que le traitement appliqué n'a pas modifié de manière significative la porosité dans ces conditions.

En revanche, des écarts plus notables apparaissent à partir de P5, où la porosité mesurée chez les échantillons traités atteint 65,11 % contre 64,33 % pour les témoins. Bien que la différence absolue reste faible, cette variation traduit une tendance légère à l'augmentation sous traitement.

L'analyse statistique réalisée sur l'ensemble des parcelles n'a mis en évidence aucune différence significative entre les différentes modalités (voir Tableau 28).

Tableau 28. Test t de student (Porosité de sol durant stade floraison)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	80 ± 1	a
P1 traité	80 ± 1	a
P2 témoin	81 ± 1	a
P2 traité	81 ± 1	a
P3 témoin	68 ± 1	a
P3 traité	68 ± 1	a
P4 témoin	78 ± 1	a
P4 traité	78 ± 1	a
P5 témoin	64.33 ± 1.5	a
P5 traité	65.11 ± 0.84	a
P6 témoin	73 ± 1	a
P6 traité	72.67 ± 0.58	a
P7 témoin	72 ± 1	a
P7 traité	72.33 ± 0.58	a

1.1.4. Après récolte :

1.1.4.1. pH eau

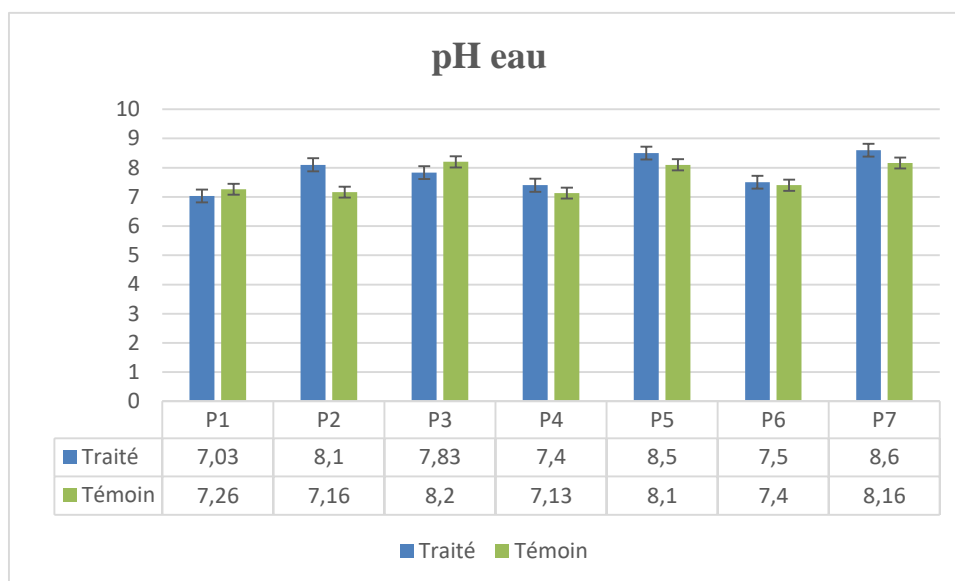


Figure 37 : Variation du taux de pH de l'eau du sol après récolte.

Les valeurs de pH mesurées dans l'eau varient entre 7,03 et 8,60 pour les sols traités, et entre 7,13 et 8,20 pour les témoins. Dans la majorité des cas, les sols traités affichent des valeurs légèrement plus élevées que celles observées dans les témoins. Cette tendance est particulièrement marquée en P2 (8,10 contre 7,16), en P5 (8,50 contre 8,10) et en P7 (8,60 contre 8,16). À l'inverse, certaines parcelles présentent des résultats comparables ou inversés, comme en P1 (7,03 contre 7,26) et en P3 (7,83 contre 8,20), où les témoins affichent un pH légèrement plus élevé.

Les résultats statistiques montrent que, si la plupart des parcelles présentent des différences significatives entre les deux modalités, les parcelles 3 et 5 ne révèlent pas de distinction marquée (Tableau 29).

Tableau 29. Test t de student (pH eau du sol après récolte)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.26 ± 0.2	a
P1 traité	7.03 ± 0.05	b
P2 témoin	7.16 ± 0.15	b
P2 traité	8.1 ± 0.1	a
P3 témoin	8.2 ± 0.05	a
P3 traité	7.83 ± 0.05	a
P4 témoin	7.13 ± 0.15	b
P4 traité	7.4 ± 0.15	a
P5 témoin	8.1 ± 0.1	a
P5 traité	8.5 ± 0.2	a
P6 témoin	7.4 ± 0.3	b
P6 traité	7.5 ± 0.05	a
P7 témoin	8.16 ± 0.15	b
P7 traité	8.6 ± 0.1	a

1.1.4.2. pH KCl :

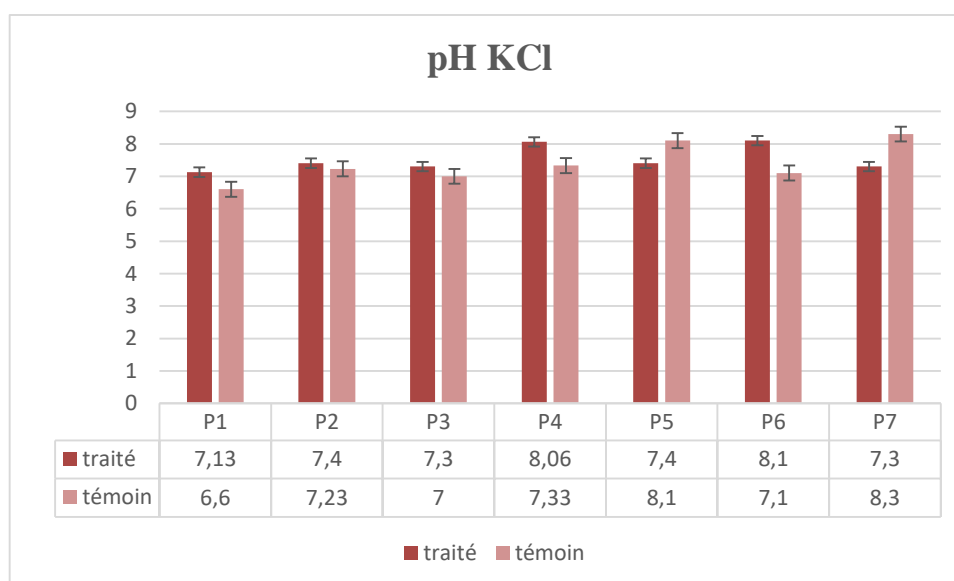


Figure 38 : Variation du taux de pH KCl du sol après récolte.

Les mesures de pH effectuées sur différentes parcelles indiquent que les sols ont généralement un pH neutre à légèrement alcalin, oscillant entre 6,6 et 8,3. La comparaison entre les parcelles traitées et témoins révèle une tendance à l'augmentation du pH dans celles ayant reçu le

Chapitre IV. Résultats et discussion

traitement. Cet effet est notamment évident sur les parcelles P1, P2, P3, P4 et P6, où le pH des sols traités dépasse celui des témoins.

L'analyse statistique met en évidence des écarts significatifs entre les parcelles traitées et les témoins dans la plupart des cas. Néanmoins, aucune différence notable n'a été observée au niveau de la parcelle 3 (tableau 30).

Tableau 30. Test t de student (pH KCl après récolte)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	6.6 ± 0.1	b
P1 traité	7.13 ± 0.15	a
P2 témoin	7.23 ± 0.2	b
P2 traité	7.4 ± 0.3	a
P3 témoin	7 ± 0.1	a
P3 traité	7.3 ± 0.1	a
P4 témoin	7.33 ± 0.3	b
P4 traité	8.06 ± 0.1	a
P5 témoin	8.1 ± 0.05	a
P5 traité	7.4 ± 0.3	b
P6 témoin	7.1 ± 0.1	b
P6 traité	8.1 ± 0.1	a
P7 témoin	8.3 ± 0.1	b
P7 traité	7.3 ± 0.3	a

1.1.4.3. Carbone organique :

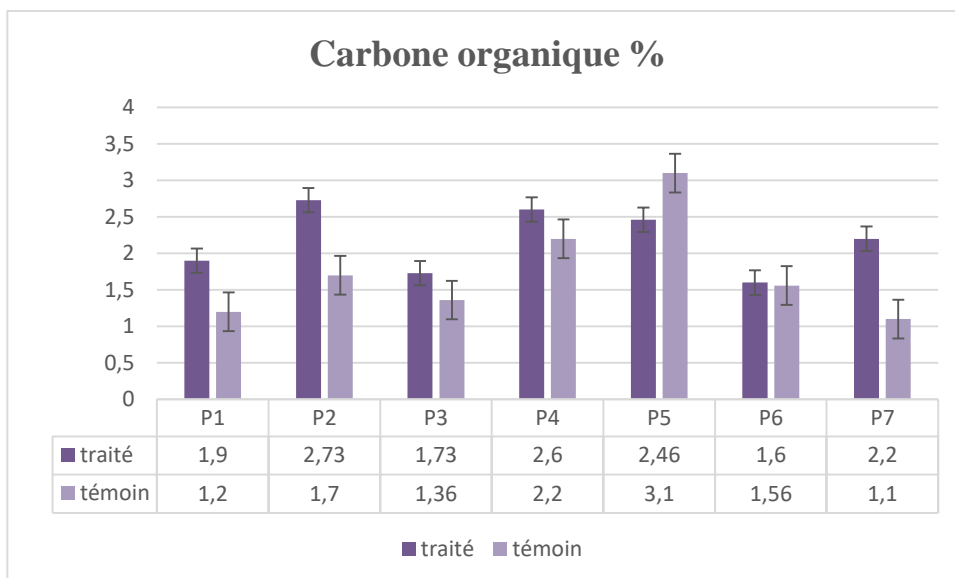


Figure 39 : Variation du taux de carbone organique du sol après récolte

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en carbone organique varient entre 1,1 % et 3,1 % selon les parcelles. De manière générale, les parcelles traitées présentent des concentrations plus élevées en carbone organique que les témoins, ce qui suggère un effet positif du traitement sur l'accumulation de la matière organique dans le sol. Cet effet est particulièrement marqué dans les parcelles P1, P2, P3, P4 et P7, où les valeurs enregistrées chez les sols traités dépassent nettement celles des témoins.

L'analyse statistique révèle des différences significatives entre les parcelles ayant reçu le traitement et les témoins dans la majorité des situations. Toutefois, la parcelle 6 ne présente pas de variation significative entre les deux modalités (tableau 31).

Tableau 31. Test t de student (Carbone organique après récolte)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	1.2 ± 0.2	b
P1 traité	1.9 ± 0.1	a
P2 témoin	1.7 ± 0.7	b
P2 traité	2.73 ± 0.3	a
P3 témoin	1.36 ± 0.3	b
P3 traité	1.73 ± 0.05	a

P4 témoin	2.2 ± 0.2	b
P4 traité	2.6 ± 0.1	a
P5 témoin	3.1 ± 0.1	a
P5 traité	2.46 ± 0.2	b
P6 témoin	1.56 ± 0.2	a
P6 traité	1.6 ± 0.1	a
P7 témoin	1.1 ± 0.1	b
P7 traité	2.2 ± 0.2	a

1.1.4.4. Calcaire total :

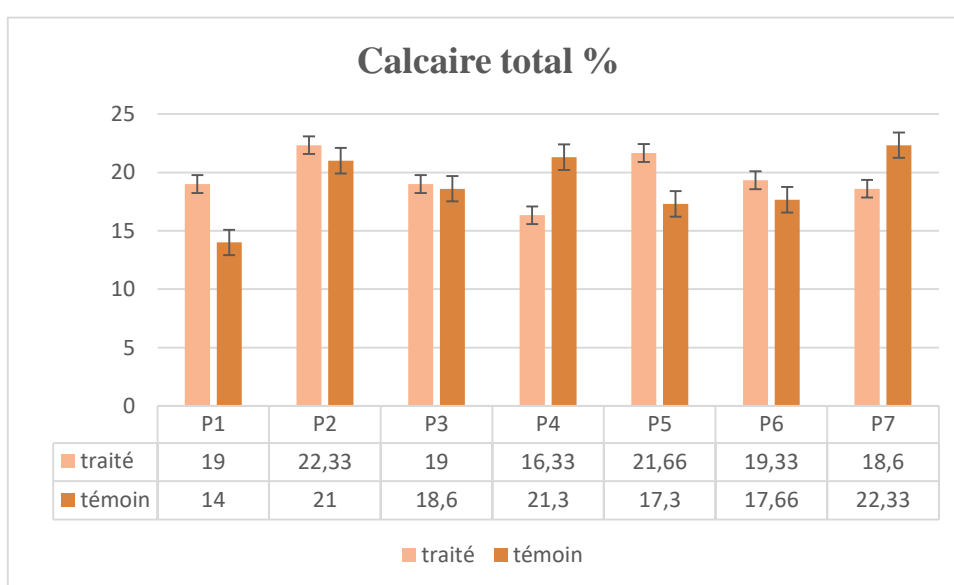


Figure 40 : Variation du taux de calcaire total du sol après récolte

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en calcaire total varient entre 14 % et 22,33 % selon les parcelles. Dans l'ensemble, les différences entre les sols traités et témoins ne suivent pas une tendance uniforme. Dans certaines parcelles (P1, P2, P3, P5 et P6), les valeurs observées dans les sols traités sont légèrement supérieures à celles des témoins, À l'inverse, les parcelles P4 et P7 présentent des teneurs plus élevées chez les témoins.

L'analyse statistique met en évidence des différences notables entre les parcelles traitées et les témoins dans la plupart des cas. Cependant, aucune différence significative n'a été enregistrée pour la parcelle 2 (voir tableau 32).

Tableau 32. Test t de student (Calcaire total après récolte)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	14 ± 1	b
P1 traité	19 ± 1	a
P2 témoin	21 ± 1	a
P2 traité	22.33 ± 1.52	a
P3 témoin	18.6 ± 2.08	b
P3 traité	19 ± 1	a
P4 témoin	21.3 ± 2.3	a
P4 traité	16.33 ± 1.5	b
P5 témoin	17.3 ± 1.52	b
P5 traité	21.66 ± 2	a
P6 témoin	17.66 ± 1.52	b
P6 traité	19.33 ± 1.5	a
P7 témoin	22.33 ± 1.52	a
P7 traité	18.6 ± 1.5	b

1.1.4.5. Calcaire actif :

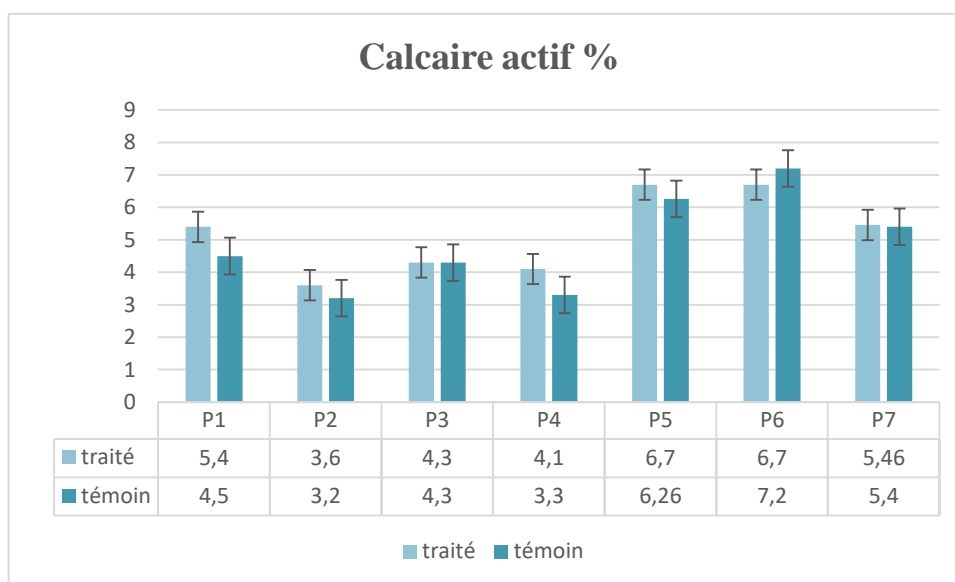


Figure 41 : Variation du taux de calcaire actif du sol après récolte

Chapitre IV. Résultats et discussion

Les teneurs en calcaire actif mesurées dans les différentes parcelles varient entre 3,2 % et 7,2 %. Les parcelles P1, P2, P4, P5 et P7 présentent des concentrations en calcaire actif plus importantes dans les sols traités, suggérant que le traitement pourrait contribuer à une meilleure stabilisation ou disponibilité des formes actives de carbonate de calcium. Cependant, dans les parcelles P3 et P6, les teneurs en calcaire actif sont similaires ou légèrement supérieures chez les témoins. Le test T de Student met en évidence une différence significative entre les modalités traitée et témoin pour les parcelles 1, 4, 5 et 6, tandis qu'aucune variation notable n'a été observée pour les autres parcelles.

Tableau 33. Test t de student (Calcaire actif après récolte)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	4.5 ± 0.5	b
P1 traité	5.4 ± 0.3	a
P2 témoin	3.2 ± 0.2	a
P2 traité	3.6 ± 0.05	a
P3 témoin	4.3 ± 0.3	a
P3 traité	4.3 ± 0.1	a
P4 témoin	3.3 ± 0.2	b
P4 traité	4.1 ± 0.1	a
P5 témoin	6.26 ± 0.3	b
P5 traité	6.7 ± 0.2	a
P6 témoin	7.2 ± 0.2	a
P6 traité	6.7 ± 0.2	b
P7 témoin	5.4 ± 0.2	a
P7 traité	5.46 ± 0.3	a

1.1.4.6. Phosphore assimilable (mg/g) :

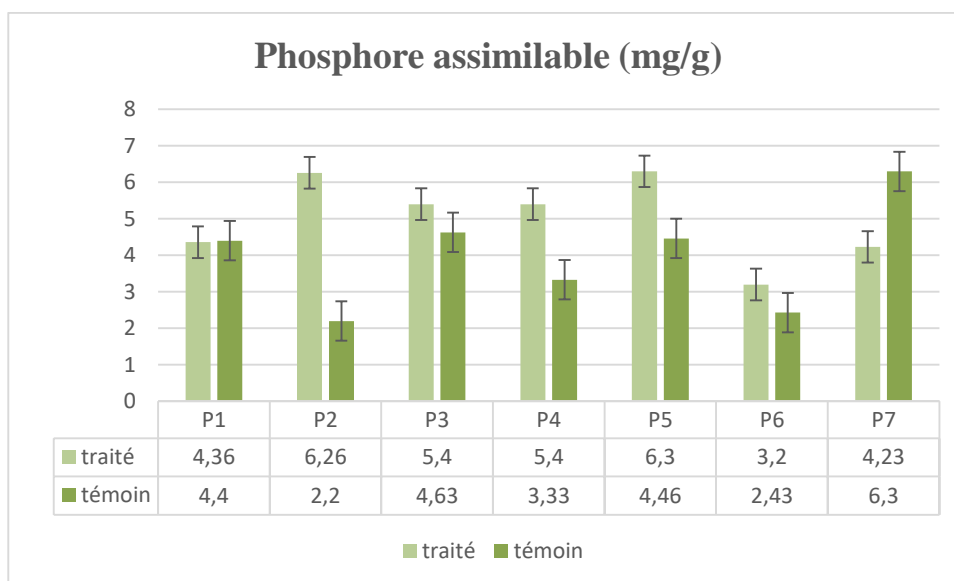


Figure 42 : Variation du phosphore assimilable du sol après récolte

Les résultats obtenus montrent que les teneurs en phosphore assimilable varient entre 2,2 et 6,3 mg/g selon les parcelles. Dans l'ensemble, les sols traités présentent des valeurs plus élevées que les témoins, indiquant un effet positif du traitement sur la disponibilité du phosphore. Le test statistique révèle des écarts significatifs entre les sols traités et témoins dans la majorité des parcelles. Néanmoins, aucune différence significative n'a été enregistrée au niveau de la première parcelle (tableau 34).

Tableau 34. Test t de student (phosphore assimilable après récolte)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	4.4 ± 0.3	a
P1 traité	4.36 ± 0.4	a
P2 témoin	2.2 ± 0.2	b
P2 traité	6.26 ± 0.3	a
P3 témoin	4.63 ± 0.15	b
P3 traité	5.4 ± 0.3	a
P4 témoin	3.33 ± 0.1	b
P4 traité	5.4 ± 0.26	a
P5 témoin	4.46 ± 0.4	b
P5 traité	6.3 ± 0.3	a
P6 témoin	2.43 ± 0.4	b

P6 traité	3.2 ± 0.15	a
P7 témoin	6.3 ± 0.3	a
P7 traité	4.23 ± 0.25	b

1.1.4.7. Humidité hygroscopique :

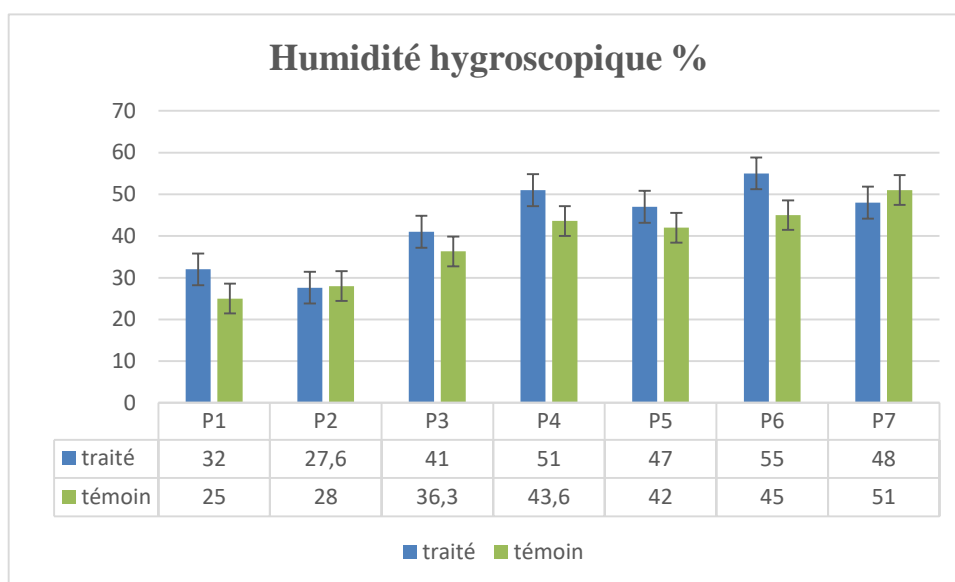


Figure 43 : Variation du taux d’humidité du sol après récolte

Les résultats montrent que l’humidité hygroscopique est globalement plus élevée dans les sols traités que dans les témoins, indiquant une meilleure capacité de rétention d’eau liée au traitement. Les différences sont particulièrement marquées dans les parcelles P1, P3, P4, P5 et P6. En revanche, la parcelle P2 ne présente pas de variation notable, tandis que la parcelle P7 affiche une valeur légèrement supérieure chez le témoin.

L’application du test t de Student a révélé des différences statistiquement significatives entre les sols traités et les témoins pour la majorité des parcelles. Toutefois, aucune différence marquée n’a été constatée au niveau des parcelles 4 et 6.

Tableau 35. Test t de student (humidité hygrosopique après récolte)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	25 ± 1	a
P1 traité	32 ± 2	a
P2 témoin	28 ± 2	a
P2 traité	27.6 ± 2.5	a
P3 témoin	36.3 ± 1.5	a
P3 traité	41 ± 1	a
P4 témoin	43.6 ± 1.5	b
P4 traité	51 ± 1	a
P5 témoin	42 ± 2	a
P5 traité	47 ± 2.64	a
P6 témoin	45 ± 2.64	b
P6 traité	55 ± 2	a
P7 témoin	51 ± 1	a
P7 traité	48 ± 1	a

1.1.4.8. Porosité :

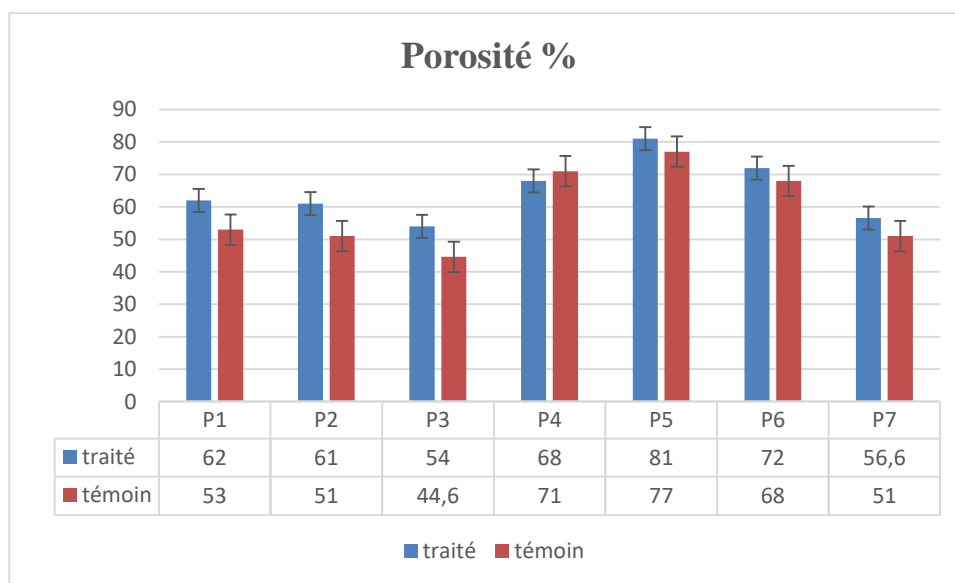


Figure 44 : Variation du taux de porosité du sol après récolte

L’analyse de la porosité met en évidence des variations entre les sols traités et les témoins. Dans l’ensemble, les parcelles ayant reçu le traitement présentent des valeurs légèrement plus

élevées, traduisant une amélioration potentielle de la structure du sol et de sa capacité d'aération. Toutefois, le test statistique appliqué n'a pas mis en évidence de différences significatives pour la totalité des parcelles (tableau 36), indiquant que les variations observées demeurent faibles et ne traduisent pas un effet marqué du traitement.

Tableau 36. Test t de student (porosité après récolte)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	53 ± 1	a
P1 traité	62 ± 1	a
P2 témoin	51 ± 1	a
P2 traité	61 ± 1	a
P3 témoin	44.6 ± 4.5	a
P3 traité	54 ± 2	a
P4 témoin	71 ± 1	a
P4 traité	68 ± 1	a
P5 témoin	77 ± 1	a
P5 traité	81 ± 1	a
P6 témoin	68 ± 1	a
P6 traité	72 ± 1	a
P7 témoin	51 ± 1	a
P7 traité	56.6 ± 1.5	a

Chapitre IV. Résultats et discussion

L'analyse globale de la première campagne révèle une influence variable du traitement sur les propriétés physico-chimiques des sols, reflétant à la fois des effets immédiats et des ajustements progressifs selon le stade de développement des cultures. Cette variabilité témoigne de la complexité des interactions entre la matière organique, les éléments minéraux et la dynamique biologique du sol.

Effets initiaux (avant semis) : Au début, les changements se concentrent surtout sur le pH, le carbone organique et le phosphore assimilable. La hausse du pH observée dans plusieurs parcelles traitées indique une neutralisation partielle de l'acidité, probablement due à la présence d'éléments basiques dans le traitement (Yang et al., 2025 ; Zhang et al., 2023). Ces éléments remplacent les ions acides, élèvent le pH et améliorent la fertilité, ce qui bénéficie à la productivité agricole et à la santé du sol (Ng et al., 2022). En outre, l'augmentation du taux de carbone organique dans certaines unités avant le semis peut s'expliquer, selon Alvarez (2024), par la présence résiduelle de matières organiques issues des cultures précédentes, comme les racines, les chaumes ou les feuilles non complètement décomposées. En se dégradant lentement, ces composants végétaux libèrent progressivement du carbone organique particulaire (Liu et al., 2023).

L'enrichissement en phosphore assimilable observé avant le semis pourrait être attribué à la minéralisation progressive de la matière organique résiduelle présente dans le sol après les précédentes cultures (Raguet et al., 2024).

Stade rosette : À ce stade, les analyses montrent une stabilité relative des propriétés chimiques du sol, indiquant un équilibre progressif après les premières interactions entre le sol, les variétés cultivées et les produits phytosanitaires. Les variations du carbone organique et du calcaire actif suggèrent une réorganisation du complexe argilo-humique, probablement induite par la minéralisation naturelle des résidus organiques et les différences physiologiques entre variétés (Liang et al., 2023 ; Kumar et al., 2022). L'augmentation du phosphore assimilable dans les sols traités pourrait être liée à une modification de l'activité microbienne sous l'effet des pesticides (Wang et al., 2022), tandis que la porosité accrue indique une amélioration de la structure physique du sol.

Stade floraison : Au stade floraison, les sols ont un pH légèrement acide, mais les échantillons traités tendent à garder une meilleure stabilité chimique que les témoins. La réduction du carbone organique dans certains échantillons pourrait résulter d'une

minéralisation plus rapide (Xia et al., 2024 ; Zhang et al., 2024), phénomène souvent observé lorsque la biomasse microbienne est stimulée. L'augmentation du phosphore assimilable dans plusieurs parcelles confirme la mobilisation prolongée des nutriments induite par le traitement (Chakraborty et al., 2024). Cette étape indique une maturation du profil chimique, où les effets initiaux du traitement commencent à améliorer la fertilité de manière Fonctionnelle.

Après récolte : Les résultats post-récolte mettent en évidence un renforcement des effets positifs observés précédemment. L'élévation du carbone organique et du phosphore assimilable dans les sols traités traduit une amélioration durable de la fertilité chimique et une accumulation de matière organique stable (Khan et al., 2023). La hausse du calcaire actif et de la porosité témoigne d'une meilleure structure et aération du sol, conditions favorables à la durabilité de la production (Yu et al., 2021). Ces tendances suggèrent que le traitement a contribué à rétablir un équilibre physico-chimique et biologique propice à la productivité à long terme. Toutefois, la variabilité spatiale entre parcelles souligne que l'efficacité du traitement dépend des caractéristiques locales du sol, notamment de sa texture, de son taux initial de matière organique et de son historique cultural. Les résultats de la première campagne indiquent que le traitement appliqué a modifié de manière sélective les propriétés physico-chimiques du sol en fonction des stades de développement et des variétés cultivées. Avant le semis, les ajustements du pH, ainsi que l'enrichissement en carbone et en phosphore, témoignent de la réactivation des processus biogéochimiques hérités des cultures précédentes. Au stade rosette et lors de la floraison, la stabilité chimique observée traduit une interaction équilibrée entre la dynamique microbienne, la structure du sol et l'impact des produits phytosanitaires. Après la récolte, l'augmentation du carbone organique, du phosphore assimilable, et de la porosité confirme une amélioration durable de la fertilité et de la qualité structurale des sols. Ces tendances suggèrent que le traitement favorise une évolution positive du sol, modulée par les caractéristiques variétales et pédologiques.

1.2. Campagne 2022- 2023

1.2.1. Avant semi

1.2.1.1. pH eau :

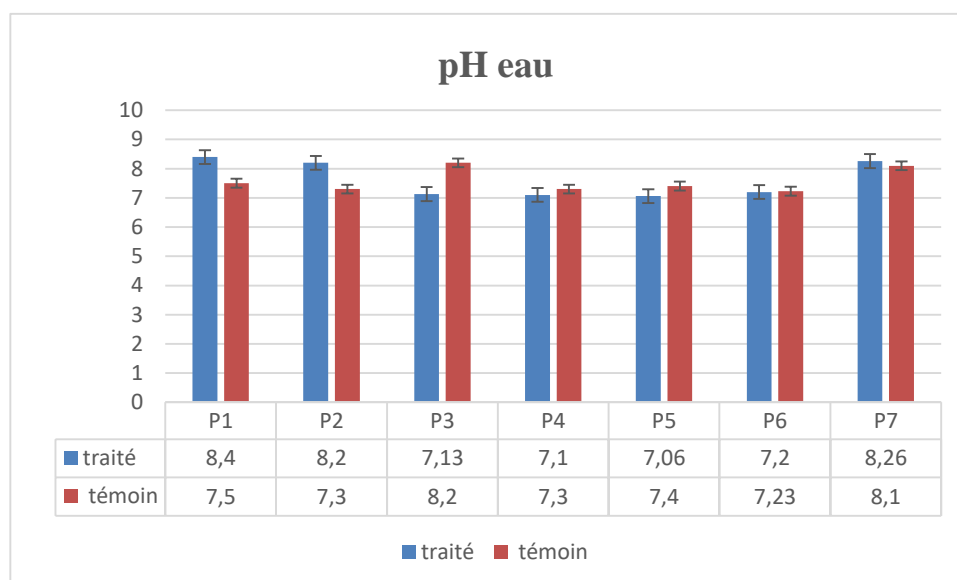


Figure 45 : Variation du taux de pH eau du sol avant semi (2^{ème} campagne)

Les valeurs de pH mesurées dans les sols varient globalement entre 7,06 et 8,40 pour les échantillons traités et entre 7,23 et 8,20 pour les témoins, Les parcelles P1 (8,4 contre 7,5), P2 (8,2 contre 7,3) et P7 (8,26 contre 8,1) présentent des pH plus élevés dans les sols traités que dans les témoins. À l'inverse, dans les parcelles P3 (7,13 contre 8,2), P4 (7,1 contre 7,3), P5 (7,06 contre 7,4) et P6 (7,2 contre 7,23), les valeurs sont légèrement supérieures chez les témoins. Globalement, les pH se situent dans une plage neutre à légèrement alcaline. Cependant, l'analyse statistique n'a révélé de différence notable entre les deux modalités que pour les parcelles P1, P2 et P3 tandis que pour les autres parcelles, les écarts observés demeurent faibles et statistiquement non significatifs.

Tableau 37. Test t de student (pH eau avant semi 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.5 ± 0.5	b
P1 traité	8.4 ± 0.4	a

P2 témoin	7.3 ± 0.3	b
P2 traité	8.2 ± 0.25	a
P3 témoin	8.2 ± 0.3	a
P3 traité	7.13 ± 0.23	b
P4 témoin	7.3 ± 0.3	a
P4 traité	7.1 ± 0.1	a
P5 témoin	7.4 ± 0.1	a
P5 traité	7.06 ± 0.1	a
P6 témoin	7.23 ± 0.2	a
P6 traité	7.2 ± 0.2	a
P7 témoin	8.1 ± 0.15	a
P7 traité	8.26 ± 0.2	a

1.2.1.2. pH KCl :

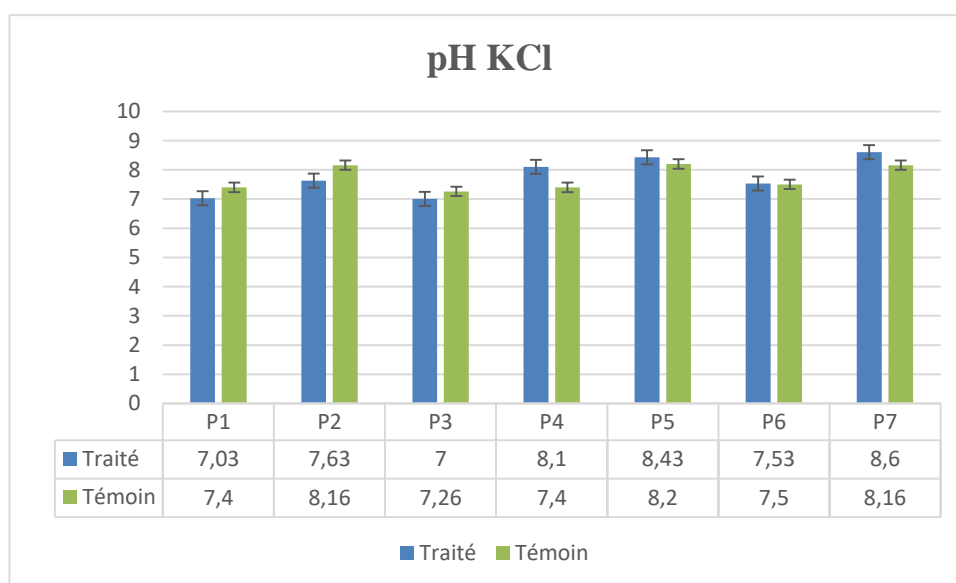


Figure 46 : Variation du taux de pH KCl du sol avant semi (2^{ème} campagne)

Les valeurs de pH mesurées dans la solution de KCl varient généralement entre 7,00 et 8,60 pour les sols traités, et entre 7,26 et 8,20 pour les témoins, indiquant un environnement globalement neutre à faiblement alcalin. Dans les parcelles P4, P5, P6 et P7, les sols traités présentent des pH légèrement plus élevés, suggérant un effet alcalinisant du traitement. En

revanche, dans les parcelles P1, P2 et P3, le pH reste légèrement plus élevé chez les témoins, ce qui reflète une réponse différenciée du sol. Toutefois, l'analyse statistique révèle des différences significatives entre les deux modalités pour la plupart des parcelles, tandis que dans d'autres, les écarts sont faibles et non significatifs.

Tableau 38. Test t de student (pH KCl avant semi 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy \pm ET	Significativité
P1 témoin	7.4 \pm 0.15	b
P1 traité	7.03 \pm 0.05	a
P2 témoin	8.16 \pm 0.15	a
P2 traité	7.63 \pm 0.15	b
P3 témoin	7.26 \pm 0.3	a
P3 traité	7 \pm 0	a
P4 témoin	7.4 \pm 0.1	b
P4 traité	8.1 \pm 0.15	a
P5 témoin	8.2 \pm 0.1	a
P5 traité	8.43 \pm 0.15	a
P6 témoin	7.5 \pm 0.1	a
P6 traité	7.53 \pm 0.15	a
P7 témoin	8.16 \pm 0.15	b
P7 traité	8.6 \pm 0.2	a

1.2.1.3. Carbone organique :

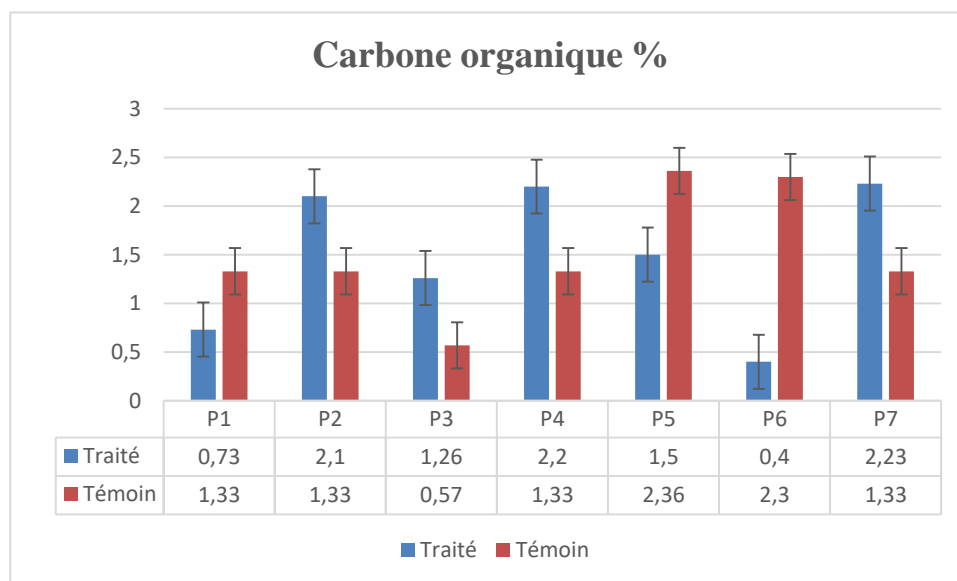


Figure 47 : Variation du taux de carbone organique du sol avant semis (2^{ème} campagne)

L'analyse des teneurs en carbone organique met en évidence une variabilité marquée entre les parcelles. Globalement, les sols traités présentent des valeurs plus élevées que les témoins, notamment dans les parcelles P2, P3, P4 et P7, ce qui suggère une stimulation de l'accumulation de la matière organique liée au traitement appliqué. Cette augmentation pourrait traduire une meilleure activité biologique et une stabilisation accrue des composés organiques dans le sol.

À l'inverse, certaines unités comme P5 et P6 affichent des valeurs plus importantes chez les témoins. Selon le test statistique Une différence significative a été mise en évidence dans l'ensemble des parcelles étudiées (Tableau 39).

Tableau 39. Test t de student (Carbone organique avant semis 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	1.33 ± 0.3	a
P1 traité	0.73 ± 0.15	b
P2 témoin	1.33 ± 0.3	b
P2 traité	2.1 ± 0.2	a
P3 témoin	0.57 ± 0.4	b
P3 traité	1.26 ± 0.2	a

P4 témoin	1.33 ± 0.3	b
P4 traité	2.2 ± 0.2	a
P5 témoin	2.36 ± 0.3	a
P5 traité	1.5 ± 0.17	b
P6 témoin	2.3 ± 0.3	a
P6 traité	0.4 ± 0.25	b
P7 témoin	1.33 ± 0.3	b
P7 traité	2.23 ± 0.25	a

1.2.1.4. Calcaire total :

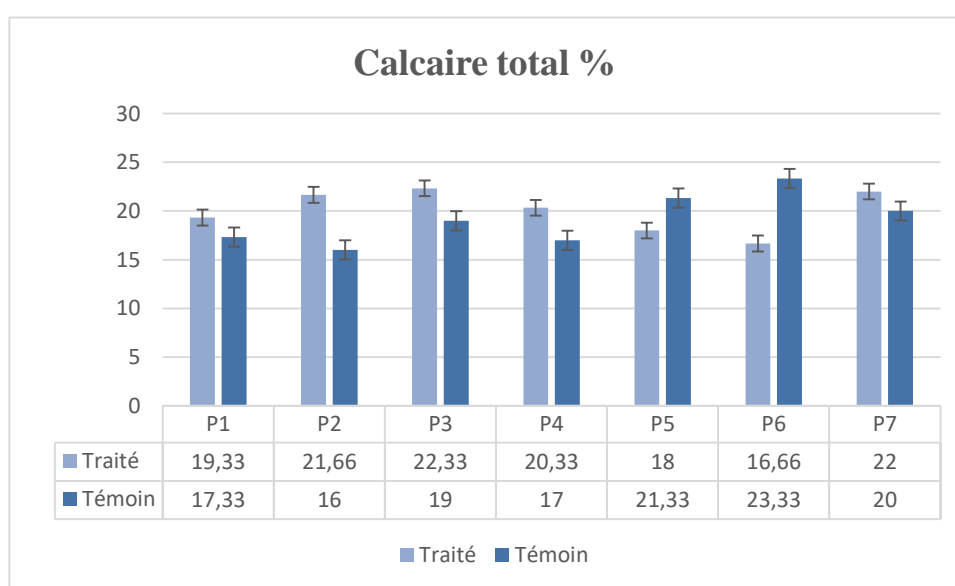


Figure 48 : Variation du taux de Calcaire total du sol avant semis (2^{ème} campagne)

Les teneurs en calcaire total se situent entre 16,66 % et 22,33 % dans les sols traités et entre 16 % et 23,33 % dans les témoins, ce qui traduit un fort potentiel carbonaté du milieu. Les parcelles P1, P2, P3, P4 et P7 présentent des niveaux légèrement supérieurs dans les sols traités, ce qui suggère une influence favorable du traitement sur la stabilisation ou la disponibilité du calcium carbonaté. En revanche, les parcelles P5 et P6 présentent des valeurs plus élevées chez les témoins. Le test statistique révèle des différences significatives entre les sols traités et témoins dans toutes les parcelles analysées à l'exception de la première parcelle (Tableau 35).

Tableau 40. Test t de student (Calcaire total avant semi 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	17.33 ± 1.52	a
P1 traité	19.33 ± 2.09	a
P2 témoin	16 ± 1	b
P2 traité	21.66 ± 2.08	a
P3 témoin	19 ± 1	b
P3 traité	22.33 ± 1.5	a
P4 témoin	17 ± 1	b
P4 traité	20.33 ± 1.5	a
P5 témoin	21.33 ± 1.52	a
P5 traité	18.0 ± 2	b
P6 témoin	23.33 ± 2.08	a
P6 traité	16.66 ± 3.21	b
P7 témoin	20 ± 1	b
P7 traité	22 ± 2	a

1.2.1.5. Calcaire actif :

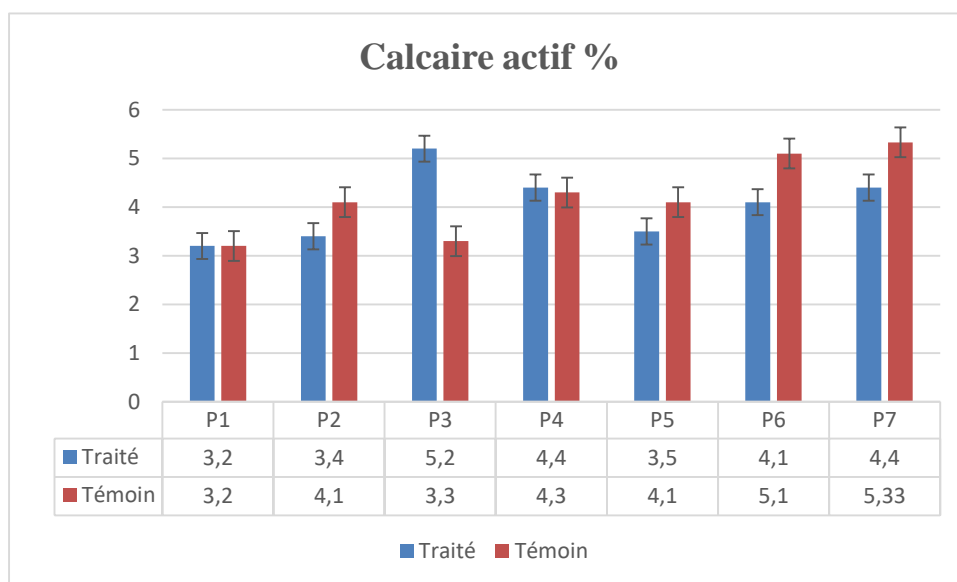


Figure 49 : Variation du taux de Calcaire total du sol avant semi (2^{ème} campagne)

Chapitre IV. Résultats et discussion

Les valeurs du calcaire actif varient entre 3,2 % et 5,2 % dans les sols traités et entre 3,2 % et 5,33 % chez les témoins, indiquant des sols modérément calcaires. Quelques parcelles montrent une légère hausse après traitement (P3, P4) tandis que d'autres enregistrent une baisse (P2, P5, P6, P7), traduisant une réponse variable selon les conditions locales du sol. Le test statistique met en évidence des différences significatives entre les sols traités et les témoins dans presque toutes les parcelles, sauf dans la parcelle P1 et P4, où aucune variation notable n'a été observée (Tableau 41).

Tableau 41. Test t de student (Calcaire actif avant semi 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	3.2 ± 0.2	a
P1 traité	3.2 ± 0.2	a
P2 témoin	4.1 ± 0.15	a
P2 traité	3.4 ± 0.1	b
P3 témoin	3.3 ± 0.2	b
P3 traité	5.2 ± 0.1	a
P4 témoin	4.3 ± 0.3	a
P4 traité	4.4 ± 0.2	a
P5 témoin	4.1 ± 0.1	a
P5 traité	3.5 ± 0.3	b
P6 témoin	5.1 ± 0.1	a
P6 traité	4.1 ± 0.1	b
P7 témoin	5.33 ± 0.3	a
P7 traité	4.4 ± 0.2	b

1.2.1.6. Phosphore assimilable :

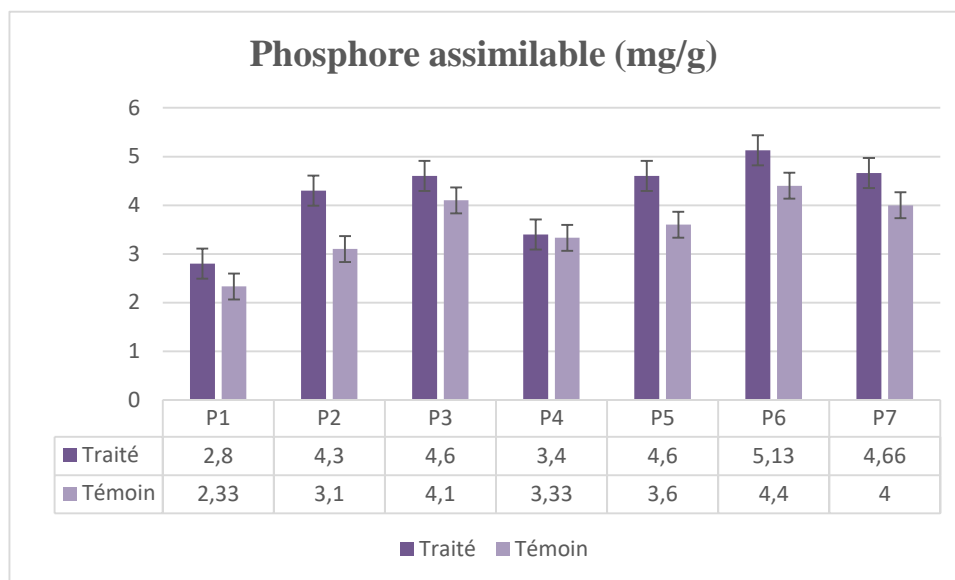


Figure 50 : Variation du Phosphore assimilable du sol avant semis (2^{ème} campagne)

Les teneurs en phosphore assimilable varient entre 2,8 et 5,13 mg/g dans les sols traités et entre 2,33 et 4,4 mg/g chez les témoins. Dans l'ensemble, les sols ayant reçu le traitement présentent des valeurs plus élevées, notamment dans les parcelles P2, P3, P5, P6 et P7, ce qui traduit une amélioration de la disponibilité du phosphore sous l'effet du traitement. Cependant, dans certaines parcelles comme P1 et P4, les différences entre les deux modalités demeurent faibles. L'analyse statistique révèle des écarts significatifs entre les modalités traitées et témoins pour la majorité des parcelles, à l'exception des parcelles P1 et P4, où les valeurs demeurent proches et sans différence marquée.

Tableau 42. Test t de student (phosphore assimilable avant semis 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	2.33 ± 0.3	a
P1 traité	2.8 ± 0.2	a
P2 témoin	3.1 ± 0.1	a
P2 traité	4.3 ± 0.2	b
P3 témoin	4.1 ± 0.1	b
P3 traité	4.6 ± 0.3	a
P4 témoin	3.33 ± 0.25	a
P4 traité	3.4 ± 0.2	a
P5 témoin	3.6 ± 0.5	a

P5 traité	4.6 ± 0.15	b
P6 témoin	4.4 ± 0.1	a
P6 traité	5.13 ± 0.15	b
P7 témoin	4 ± 0.2	a
P7 traité	4.66 ± 0.3	b

1.2.1.7. Humidité hygroscopique :

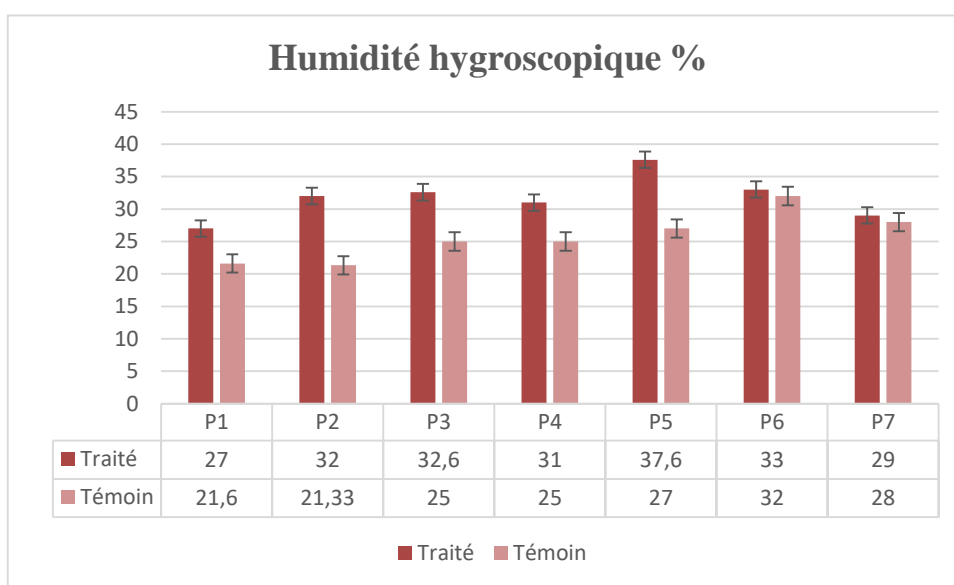


Figure 51 : Variation du taux d’humidité du sol avant semi (2^{ème} campagne)

L’humidité hygroscopique est globalement plus élevée dans les sols traités (27 à 37,6 %) que dans les témoins (21,3 à 32 %), traduisant une meilleure capacité de rétention d’eau. L’analyse statistique n’a pas montré de différences significatives entre les sols traités et témoins dans la plupart des parcelles, à l’exception des parcelles P2 et P4, où des écarts notables ont été observés.

Tableau 43. Test t de student (Humidité hygroscopique avant semi 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	21.6 ± 2.08	a
P1 traité	27 ± 2	a
P2 témoin	21.33 ± 1.5	b

P2 traité	32 ± 2	a
P3 témoin	25 ± 1	a
P3 traité	32.6 ± 2	a
P4 témoin	25 ± 2.5	b
P4 traité	31 ± 1	a
P5 témoin	27 ± 2	a
P5 traité	37.6 ± 2.5	a
P6 témoin	32 ± 2	a
P6 traité	33 ± 3	a
P7 témoin	28 ± 2	a
P7 traité	29 ± 3.6	a

1.2.1.8. Porosité :

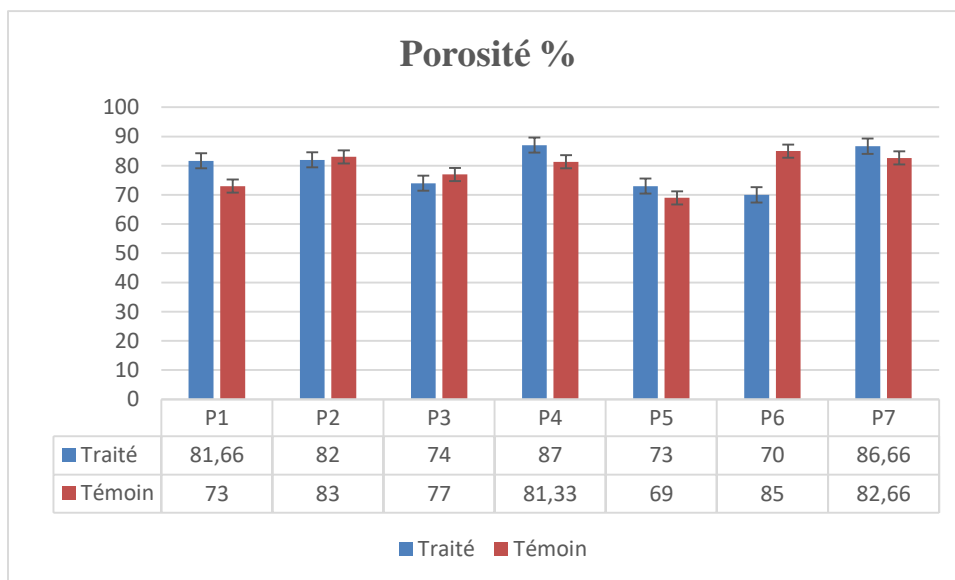


Figure 52 : Variation du taux de porosité du sol avant semis (2^{ème} campagne)

Les résultats indiquent une variabilité importante de la porosité selon les traitements et les parcelles. Les valeurs varient entre 70 % et 87 % pour les sols traités, et entre 69 % et 85 % pour les témoins, attestant d'une bonne aération des horizons supérieurs. Généralement, les sols traités ont une porosité plus élevée que les témoins, notamment dans les parcelles P1, P4 et P7, ce qui suggère un effet bénéfique du traitement sur la structure du sol. Cependant, dans les parcelles P2 et P6, les valeurs de porosité dans les sols traités sont légèrement inférieures.

L'évaluation statistique indique une absence de différences significatives entre les sols traités et témoins dans la plupart des parcelles. Toutefois, des écarts marqués ont été relevés dans la parcelle P6.

Tableau 44. Test t de student (Porosité avant semi 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	73 ± 1	a
P1 traité	81.66 ± 1.5	a
P2 témoin	83 ± 2	a
P2 traité	82 ± 2	a
P3 témoin	77 ± 1	a
P3 traité	74 ± 1	a
P4 témoin	81.33 ± 1.5	a
P4 traité	87 ± 1	a
P5 témoin	69 ± 1	a
P5 traité	73 ± 2.6	a
P6 témoin	85 ± 1	a
P6 traité	70 ± 2	b
P7 témoin	82.66 ± 1.52	a
P7 traité	86.66 ± 1.5	a

1.2.2. Stade rosette

1.2.2.1. pH eau :

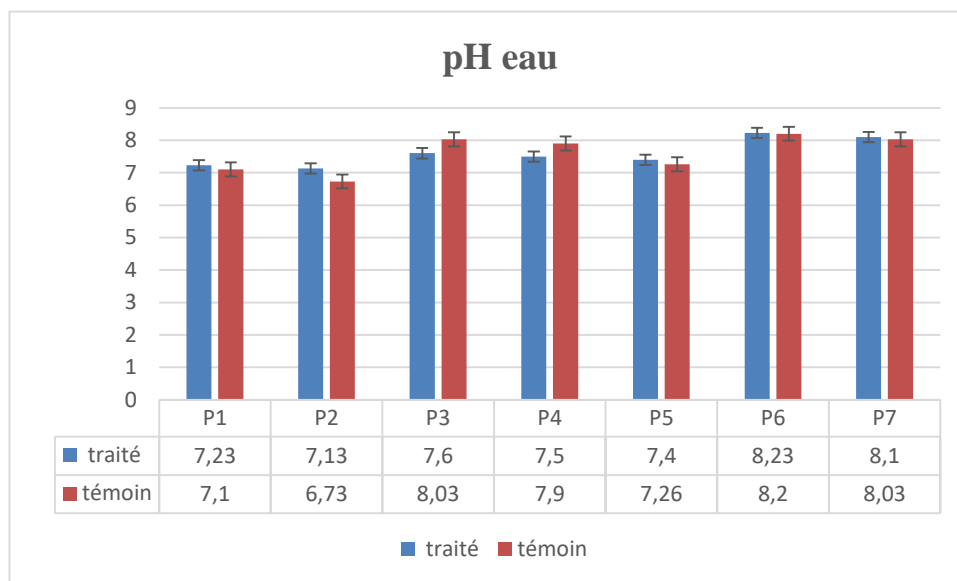


Figure 53 : Variation du taux de pH eau du sol stade rosette (2^{ème} campagne)

Les valeurs du pH de l’eau varient entre 7,1 et 8,23, indiquant un environnement globalement neutre à légèrement basique. Les différences entre les sols traités et les témoins sont faibles, sauf dans les parcelles P1 et P2, où une légère augmentation du pH indique une neutralisation partielle de l’acidité du sol due au traitement. Le test t de Student n’a montré aucune différence significative entre les sols traités et les témoins dans la majorité des parcelles, excepté pour la parcelle P3, où un écart statistiquement significatif a été détecté.

Tableau 45. Test t de student (pH eau stade rosette 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.1 ± 0.1	a
P1 traité	7.23 ± 0.2	a
P2 témoin	6.73 ± 0.2	a
P2 traité	7.13 ± 0.15	a
P3 témoin	8.03 ± 0.05	a
P3 traité	7.6 ± 0.1	b
P4 témoin	7.9 ± 0.1	a

P4 traité	7.5 ± 0.3	a
P5 témoin	7.26 ± 0.25	a
P5 traité	7.4 ± 0.1	a
P6 témoin	8.2 ± 0.2	a
P6 traité	8.23 ± 0.2	b
P7 témoin	8.03 ± 0.15	a
P7 traité	8.1 ± 0.17	a

1.2.2.2. pH KCl :

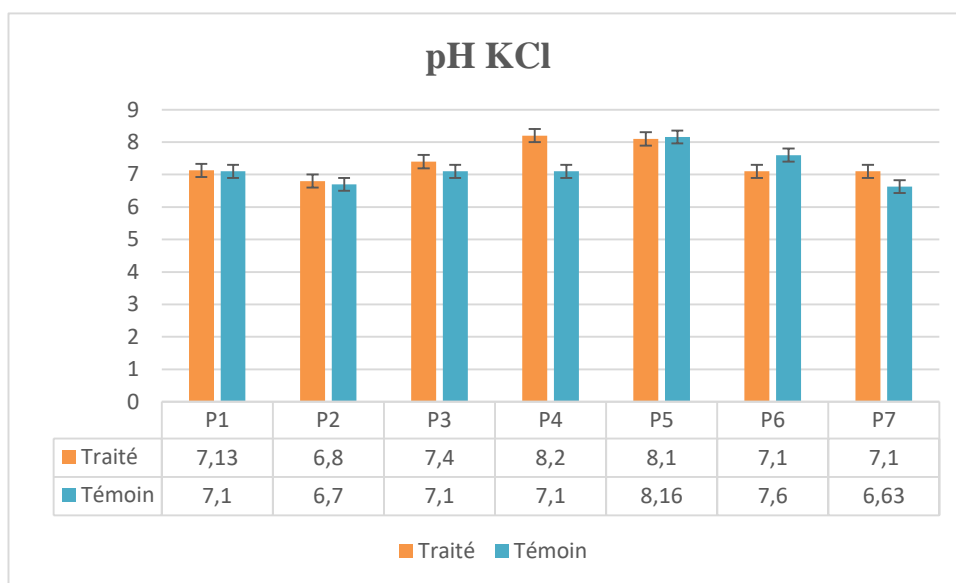


Figure 54 : Variation du taux de pH KCl du sol stade rosette (2^{ème} campagne)

Les valeurs de pH mesurées dans le KCl oscillent généralement entre 6,8 et 8,2. Ces valeurs indiquent que les sols sont neutres à légèrement alcalins. La majorité des parcelles présentent peu de différences entre traitements, sauf quelques écarts localisés, notamment en P4. Le test t de Student indique que les sols traités et témoins présentent des valeurs comparables dans la majorité des parcelles, à l'exception de la parcelle P4, où une différence statistiquement significative a été mise en évidence.

Tableau 46. Test t de student (pH KCl stade rosette 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.1 ± 0.1	a
P1 traité	7.13 ± 0.15	a
P2 témoin	6.7 ± 0.2	a
P2 traité	6.8 ± 0.1	a
P3 témoin	7.1 ± 0.1	a
P3 traité	7.4 ± 0.1	a
P4 témoin	7.1 ± 0.1	b
P4 traité	8.2 ± 0.2	a
P5 témoin	8.16 ± 0.15	a
P5 traité	8.1 ± 0.1	a
P6 témoin	7.6 ± 0.1	a
P6 traité	7.1 ± 0.1	b
P7 témoin	6.63 ± 0.15	a
P7 traité	7.1 ± 0.1	a

1.2.2.3. Carbone organique :

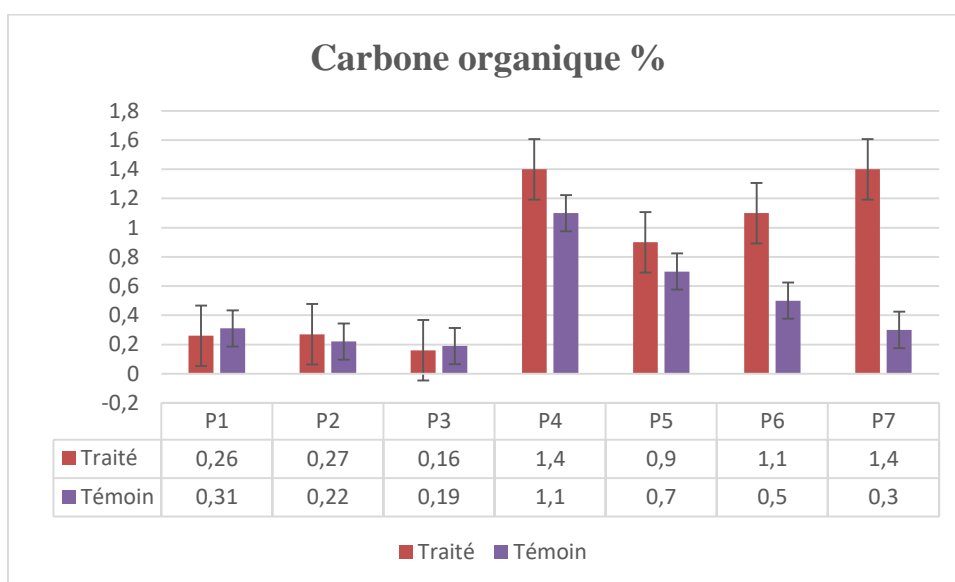


Figure 55 : Variation du taux de carbone du sol stade rosette (2^{ème} campagne)

Chapitre IV. Résultats et discussion

Les résultats montrent que les teneurs en carbone organique varient entre 0,16 % et 1,40 % dans les sols traités et entre 0,19 % et 1,10 % dans les témoins. Globalement, les sols traités présentent des concentrations plus élevées dans la majorité des parcelles, notamment P4, P5, P6 et P7, ce qui suggère une amélioration du stock de matière organique sous l'effet du traitement. En revanche, dans les parcelles P1, P2 et P3, les valeurs observées sont légèrement inférieures à celles des témoins. Le test t de Student confirme la présence de différences significatives entre les modalités dans plusieurs parcelles, indiquant que le traitement exerce un effet différencié selon le contexte pédologique et la dynamique biologique propre à chaque parcelle expérimentale.

Tableau 47. Test t de student (Carbone organique stade rosette 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	0.31 ± 0.01	a
P1 traité	0.26 ± 0.01	b
P2 témoin	0.22 ± 0.01	b
P2 traité	0.27 ± 0.01	a
P3 témoin	0.19 ± 0.01	a
P3 traité	0.16 ± 0.01	a
P4 témoin	1.1 ± 0.1	b
P4 traité	1.4 ± 0.1	a
P5 témoin	0.7 ± 0.1	a
P5 traité	0.9 ± 0.1	a
P6 témoin	0.5 ± 0.1	b
P6 traité	1.1 ± 0.1	a
P7 témoin	0.3 ± 0.1	b
P7 traité	1.4 ± 0.36	a

1.2.2.4. Calcaire total :

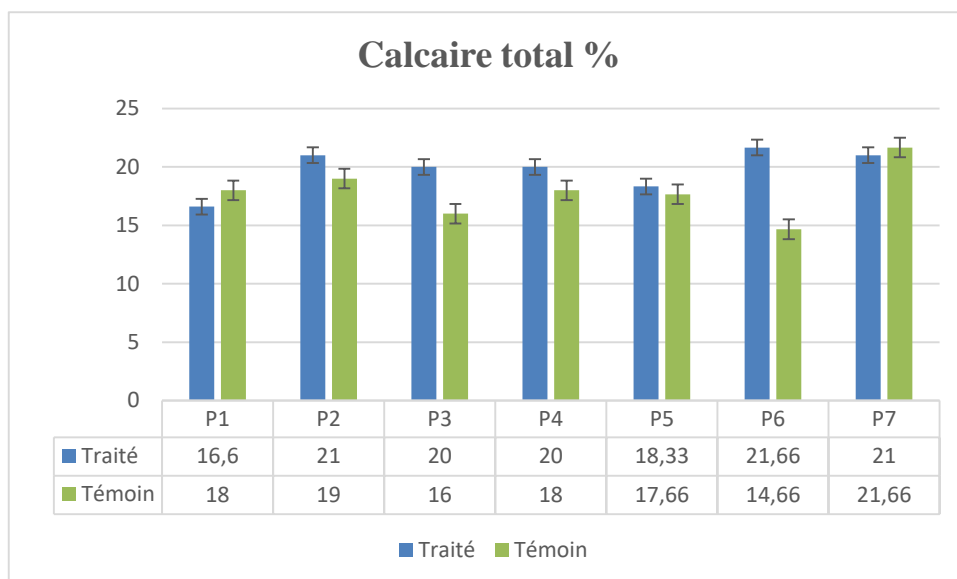


Figure 56 : Variation du taux de calcaire total du sol stade rosette (2^{ème} campagne)

Les résultats révèlent que les teneurs en calcaire total varient de 16,6 % à 21,66 % pour les sols traités et de 14,66 % à 21,66 % pour les témoins, montrant que les sols étudiés sont globalement riches en carbonates. Sur la majorité des points (P2, P3, P4, P5 et P6), les valeurs du lot traité dépassent celles du témoin, suggérant que le traitement pourrait favoriser une augmentation du calcaire total. L'analyse statistique montre que seules les parcelles P4, P5 et P6 présentent des différences significatives. En revanche, pour les autres parcelles, les écarts entre le témoin et le traité ne sont pas suffisants pour conclure à un effet significatif du traitement.

Tableau 48. Test t de student (Calcaire total stade rosette 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	18 ± 1	a
P1 traité	16.6 ± 2	a
P2 témoin	19 ± 1	a
P2 traité	21 ± 1	a
P3 témoin	16 ± 1	a
P3 traité	20 ± 1	a
P4 témoin	18 ± 1	b
P4 traité	20 ± 1	a
P5 témoin	17.66 ± 2	b

P5 traité	18.33 ± 2	a
P6 témoin	14.66 ± 1.5	b
P6 traité	21.66 ± 2	a
P7 témoin	21.66 ± 1.5	a
P7 traité	21 ± 1	a

1.2.2.5. Calcaire actif

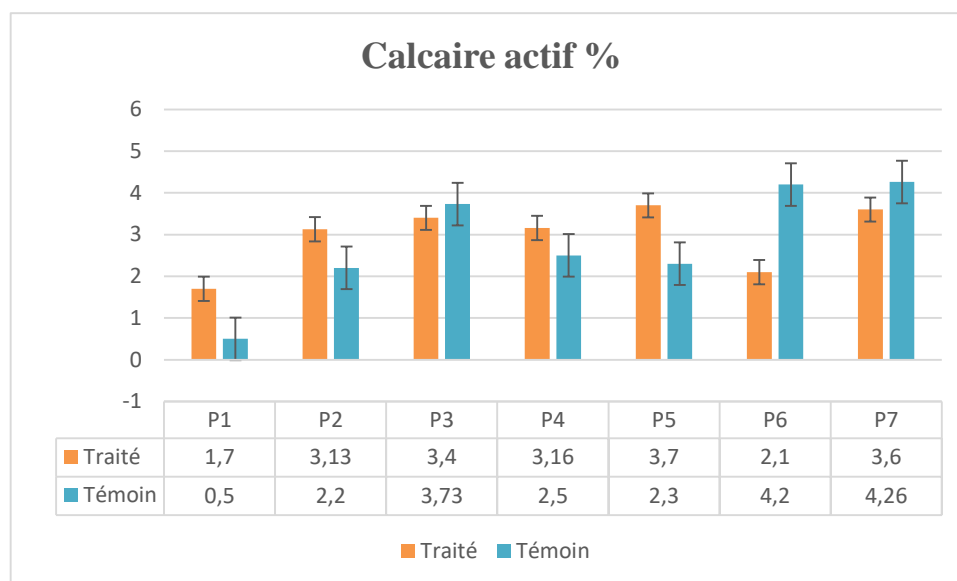


Figure 57 : Variation du taux de calcaire actif du sol stade rosette (2^{ème} compagne)

L'analyse du calcaire actif montre une réponse variable des parcelles au traitement. Dans plusieurs zones, comme P1, P2, P4 et P5, les valeurs après traitement dépassent celles du témoin. En revanche, P6 et P7 présentent des niveaux de calcaire actif plus élevés en condition témoin. La parcelle P3 affiche une réponse intermédiaire avec des valeurs proches dans les deux conditions. Le test t de Student confirme des différences significatives entre les modalités dans la plupart des parcelles, sauf pour P3 et P7.

Tableau 49. Test t de student (Calcaire actif stade rosette 2^{ème} compagne)

Parcelle	Moy ± ET	Significativité
P1 témoin	0.5 ± 0.4	b

P1 traité	1.7 ± 0.2	a
P2 témoin	2.2 ± 0.2	b
P2 traité	3.13 ± 0.15	a
P3 témoin	3.73 ± 0.25	a
P3 traité	3.4 ± 0.2	a
P4 témoin	2.5 ± 0.2	b
P4 traité	3.16 ± 0.2	a
P5 témoin	2.3 ± 0.3	b
P5 traité	3.7 ± 0.2	a
P6 témoin	4.2 ± 0.2	b
P6 traité	2.1 ± 0.1	a
P7 témoin	4.26 ± 0.2	a
P7 traité	3.6 ± 0.3	a

1.2.2.6. Phosphore Assimilable :

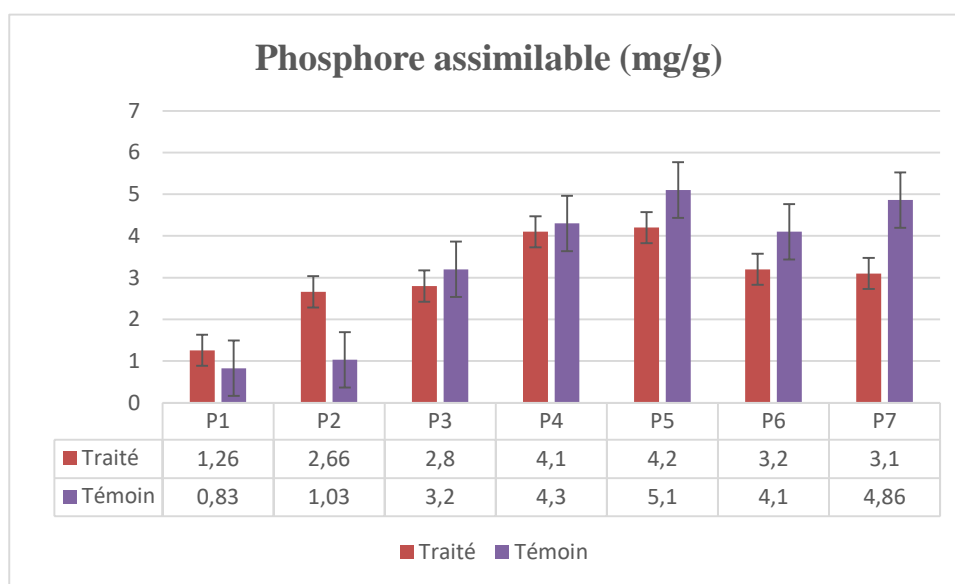


Figure 58 : Variation du taux de phosphore assimilable du sol stade rosette (2^{ème} campagne)

Les valeurs de phosphore assimilable indiquent que le traitement offre un avantage uniquement lors des premiers points d'échantillonnage. Aux points P1 et P2, les sols traités ont des teneurs plus élevées (1,26 et 2,66 mg/g) que les témoins (0,83 et 1,03 mg/g), ce qui suggère un effet initial positif. À partir de P3, cette tendance s'inverse : les témoins présentent toujours des valeurs plus élevées. Le test t de Student révèle des différences significatives entre les modalités

dans la majorité des parcelles, sauf pour la parcelle 4 où aucune différence notable n'a été observée.

Tableau 50. Test t de Student (phosphore assimilable stade rosette 2^eme campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	0.83 ± 0.15	b
P1 traité	1.26 ± 0.30	a
P2 témoin	1.03 ± 0.25	b
P2 traité	2.66 ± 0.30	a
P3 témoin	3.2 ± 0.2	a
P3 traité	2.8 ± 0.2	b
P4 témoin	4.3 ± 0.3	a
P4 traité	4.1 ± 0.1	a
P5 témoin	5.1 ± 0.1	b
P5 traité	4.2 ± 0.1	a
P6 témoin	4.1 ± 0.1	a
P6 traité	3.2 ± 0.1	b
P7 témoin	4.86 ± 0.15	a
P7 traité	3.1 ± 0.1	b

1.2.2.7. Humidité hygroscopique :

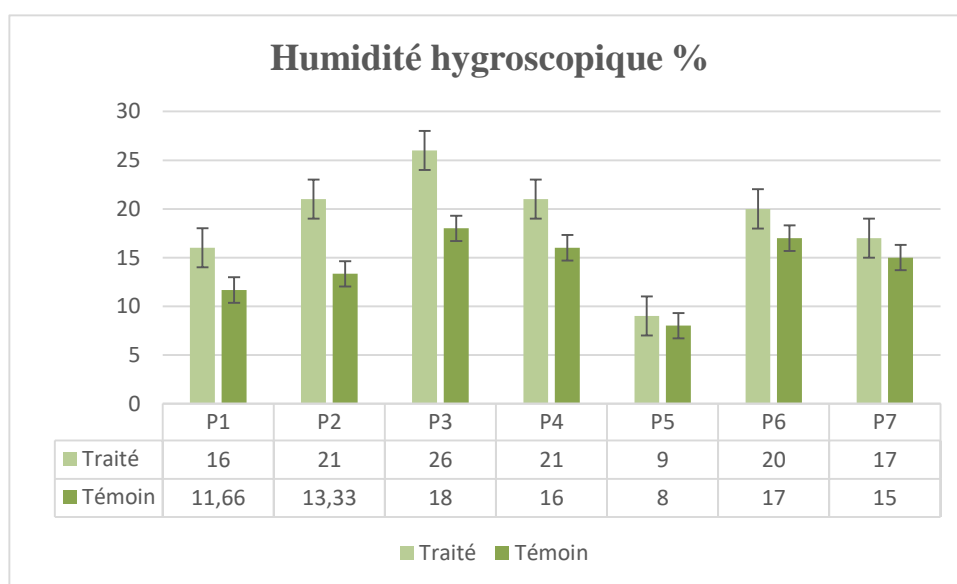


Figure 59 : Variation du taux d'humidité du sol stade rosette (2^eme campagne)

L'étude de l'humidité hygroscopique montre des variations entre différentes parcelles et entre les deux modalités expérimentales (Témoin vs Traité). Cependant, ces différences ne sont pas statistiquement significatives selon le test utilisé (voir Tableau 51). Malgré cela, une tendance générale se dégage : les parcelles traitées affichent des valeurs d'humidité hygroscopique légèrement supérieures à celles des témoins.

Tableau 51. Test t de student (humidité hygroscopique stade rosette 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	11.66 ± 1.5	a
P1 traité	16 ± 1	a
P2 témoin	13.33 ± 1.5	a
P2 traité	21 ± 1	a
P3 témoin	18 ± 1	a
P3 traité	26 ± 1	a
P4 témoin	16 ± 1	a
P4 traité	21 ± 1	a
P5 témoin	8 ± 1	a
P5 traité	9 ± 1	a
P6 témoin	17 ± 1	a
P6 traité	20 ± 1	a
P7 témoin	15 ± 1	a
P7 traité	17 ± 1	a

1.2.2.8. Porosité :

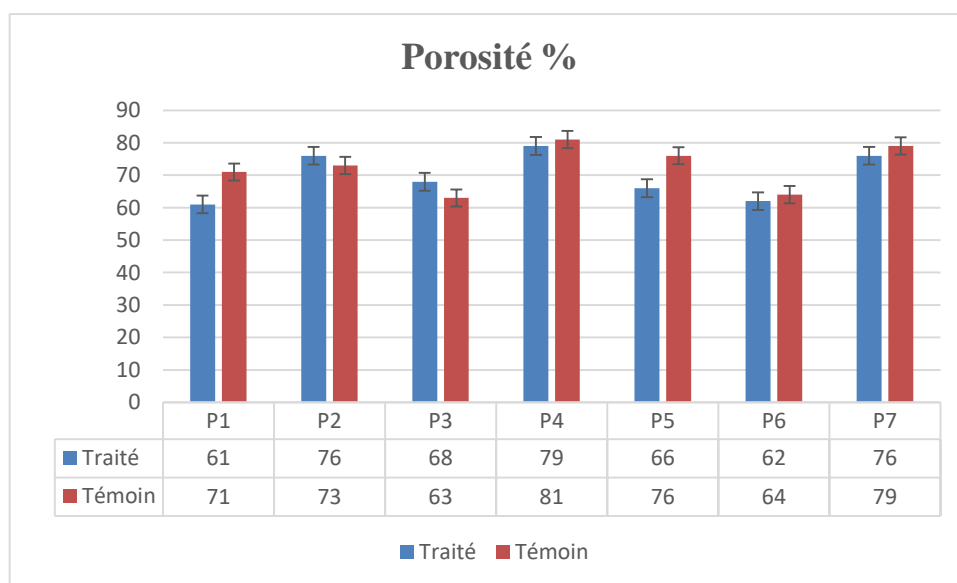


Figure 60 : Variation du taux de porosité du sol stade rosette (2^{ème} campagne)

Pour les sols traités, les valeurs de porosité observées varient de 61 à 79 %, tandis que pour les échantillons témoins, elles fluctuent entre 63 et 81 %. Malgré l'existence de petites variations en fonction des parcelles, aucune n'est statistiquement pertinente selon le test appliqué (voir Tableau 52). Habituellement, les différences d'une parcelle à l'autre sont minimales et ne montrent pas de tendance régulière.

Tableau 52. Test t de student (Porosité stade rosette 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	71 ± 1	a
P1 traité	61 ± 1	a
P2 témoin	73 ± 1	a
P2 traité	76 ± 1	a
P3 témoin	63 ± 1	a
P3 traité	68 ± 2	a
P4 témoin	81 ± 1	a
P4 traité	79 ± 1	a
P5 témoin	76 ± 1	a
P5 traité	66 ± 1	a
P6 témoin	64 ± 1	a
P6 traité	62 ± 1	a
P7 témoin	79 ± 1	a
P7 traité	76 ± 1	a

1.2.3. Stade floraison :

1.2.3.1. pH eau :

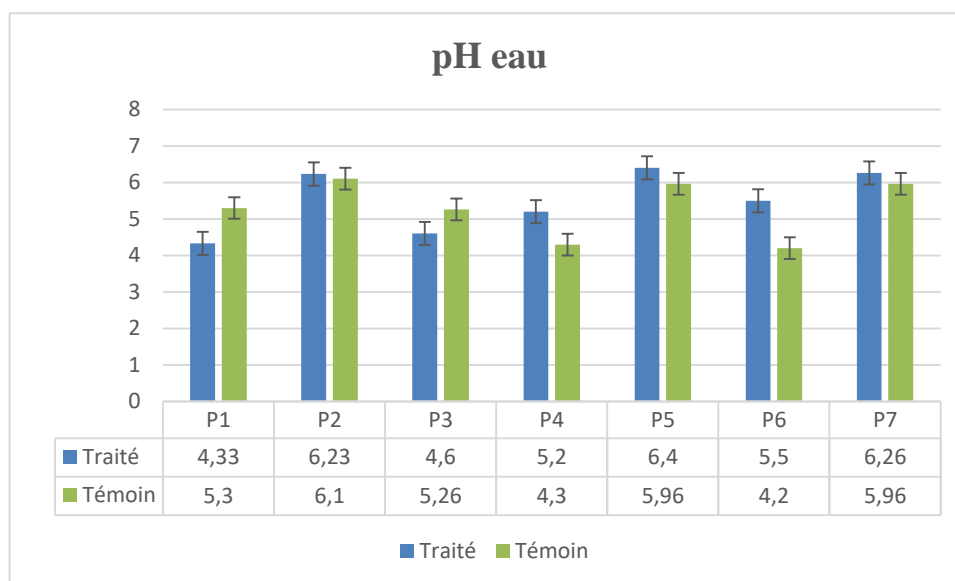


Figure 61 : Variation du taux de pH eau du sol stade floraison (2^{ème} campagne)

Les valeurs relatives aux modalités Le Traité et le Témoin diffèrent grandement d'une parcelle à l'autre. Des parcelles telles que P2, P4, P5, P6 et P7 affichent des valeurs supérieures avec le traitement comparativement au témoin, alors que d'autres (P1, P3) semblent montrer le contraire. Cette variation illustre le manque de réponse homogène lors du traitement. L'étude statistique met en évidence des disparités notables dans la majorité des parcelles. Cependant, aucune variation notable n'a été observée au sein des parcelles P1, P2 et P5.

Tableau 53. Test t de student (pH eau stade floraison 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	5.3 ± 0.2	a
P1 traité	4.33 ± 0.15	a
P2 témoin	6.1 ± 0.1	a
P2 traité	6.23 ± 0.2	a
P3 témoin	5.26 ± 0.2	a
P3 traité	4.6 ± 0.5	b
P4 témoin	4.3 ± 0.1	b
P4 traité	5.2 ± 0.1	a
P5 témoin	5.96 ± 0.15	a
P5 traité	6.4 ± 0.1	a

P6 témoin	4.2 ± 0.1	b
P6 traité	5.5 ± 0.1	a
P7 témoin	5.96 ± 0.25	b
P7 traité	6.26 ± 0.25	a

1.2.3.2. pH KCl :

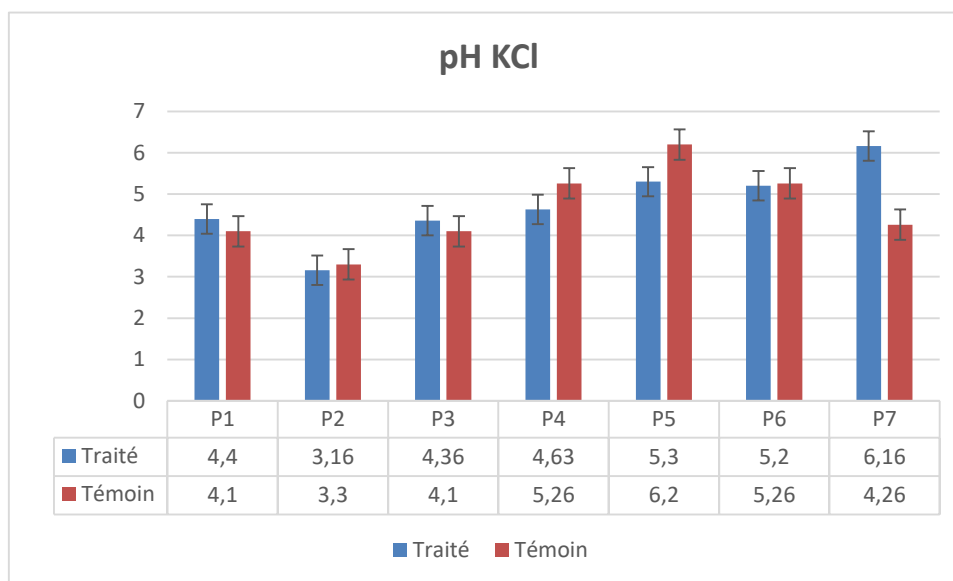


Figure 62 : Variation du taux de pH KCl du sol stade floraison (2^{ème} campagne)

Les mesures de pH du KCl indiquent que l'effet du traitement varie grandement d'une parcelle à l'autre. Tandis que P1, P3 et P7 démontrent une augmentation du pH, d'autres comme P2, P4 et P5 indiquent une acidification. En contrepartie, la parcelle P6 présente une variation pratiquement inexistante, ce qui témoigne d'une réaction très restreinte au traitement. L'analyse statistique révèle que la plupart des parcelles montrent des différences notables entre les modalités examinées. Cependant, aucune variation statistiquement notable n'a été détectée pour les parcelles P1, P2 et P6, indiquant que l'impact du traitement y reste faible ou similaire à celui du témoin. (Tableau 54).

Tableau 54. Test t de student (pH KCl stade floraison 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	4.1 ± 0.1	a
P1 traité	4.4 ± 0.1	a
P2 témoin	3.3 ± 0.1	a
P2 traité	3.16 ± 0.2	a
P3 témoin	4.1 ± 0.1	a
P3 traité	4.36 ± 0.15	b
P4 témoin	5.26 ± 0.25	a
P4 traité	4.63 ± 0.15	b
P5 témoin	6.2 ± 0.2	a
P5 traité	5.3 ± 0.2	b
P6 témoin	5.26 ± 0.15	a
P6 traité	5.2 ± 0.2	a
P7 témoin	4.26 ± 0.25	b
P7 traité	6.16 ± 0.15	a

1.2.3.3. Carbone organique :

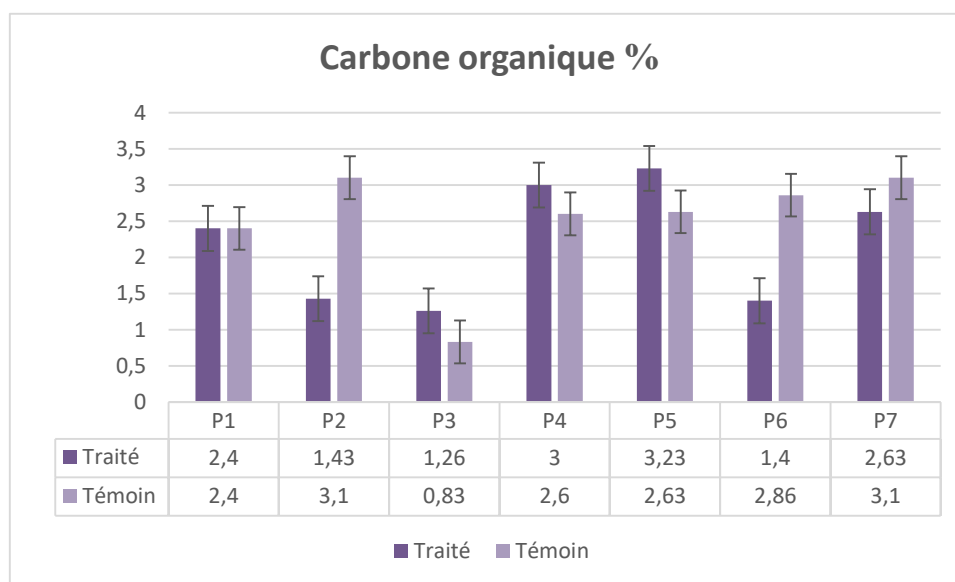


Figure 63 : Variation du taux de Carbone du sol stade floraison (2^{ème} campagne)

Chapitre IV. Résultats et discussion

Les sols traités présentent des taux de carbone organique allant de 1,26 % à 3,23 %, tandis que les témoins affichent des valeurs comprises entre 0,83 % et 3,1 %. L'évaluation statistique révèle que le traitement induit des écarts significatifs pour toutes les parcelles, sauf pour P1, où aucun changement marquant n'est constaté. L'impact du traitement sur le carbone organique semble donc variable : certaines parcelles, comme P3, P4 et P5, montrent une hausse du carbone organique, alors que d'autres, en particulier P2, P6 et P7, affichent une baisse significative. La parcelle P1 demeure constante, attestant l'absence d'impact notable du traitement dans cette parcelle.

Tableau 55. Test t de student (Carbone organique stade floraison 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	2.4 ± 0.3	a
P1 traité	2.4 ± 0.2	a
P2 témoin	3.1 ± 0.1	a
P2 traité	1.43 ± 0.2	b
P3 témoin	0.83 ± 0.15	b
P3 traité	1.26 ± 0.3	a
P4 témoin	2.6 ± 0.1	b
P4 traité	3 ± 0.1	a
P5 témoin	2.63 ± 0.15	b
P5 traité	3.23 ± 0.15	a
P6 témoin	2.86 ± 0.15	a
P6 traité	1.4 ± 0.2	b
P7 témoin	3.1 ± 0.1	a
P7 traité	2.63 ± 0.15	a

1.2.3.4. Calcaire total :

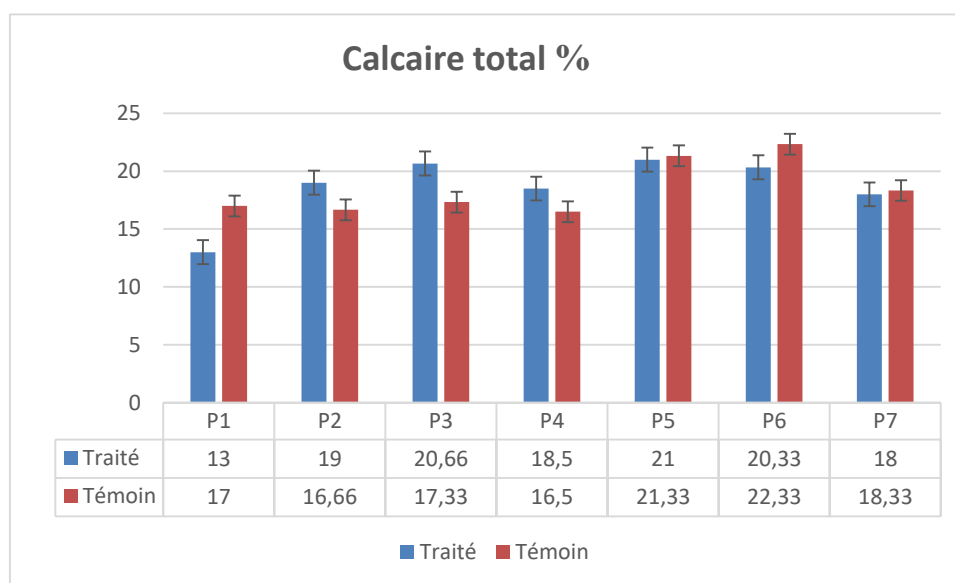


Figure 64 : Variation du taux de Calcaire total du sol stade floraison (2^{ème} campagne)

Les valeurs de calcaire total varient entre 13 % et 21 % pour les sols traités et entre 16,5 % et 22,33 % pour les témoins. Les réponses des parcelles au traitement sont hétérogènes, avec des augmentations, des diminutions ou une stabilité selon les parcelles. Les écarts les plus importants apparaissent en P1 : 13 % (Traité) < 17 % (Témoin) (diminution notable) et en P2 : 19 % (Traité) > 16,66 % (Témoin) (augmentation modérée). L'évaluation statistique révèle que la majorité des parcelles présentent des différences significatives entre les modalités, indiquant une réponse marquée au traitement appliqué.

Tableau 56. Test t de student (Calcaire total stade floraison 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	17 ± 1	a
P1 traité	13 ± 1	b
P2 témoin	16.66 ± 1.5	a
P2 traité	19 ± 1	a
P3 témoin	17.33 ± 0.5	b
P3 traité	20.66 ± 0.5	a
P4 témoin	16.5 ± 0.5	b

P4 traité	18.5 ± 1.32	a
P5 témoin	21.33 ± 0.5	a
P5 traité	21 ± 1	a
P6 témoin	22.33 ± 2.08	a
P6 traité	20.33 ± 1.5	b
P7 témoin	18.33 ± 1.5	a
P7 traité	18 ± 1	a

1.2.3.5. Calcaire actif :

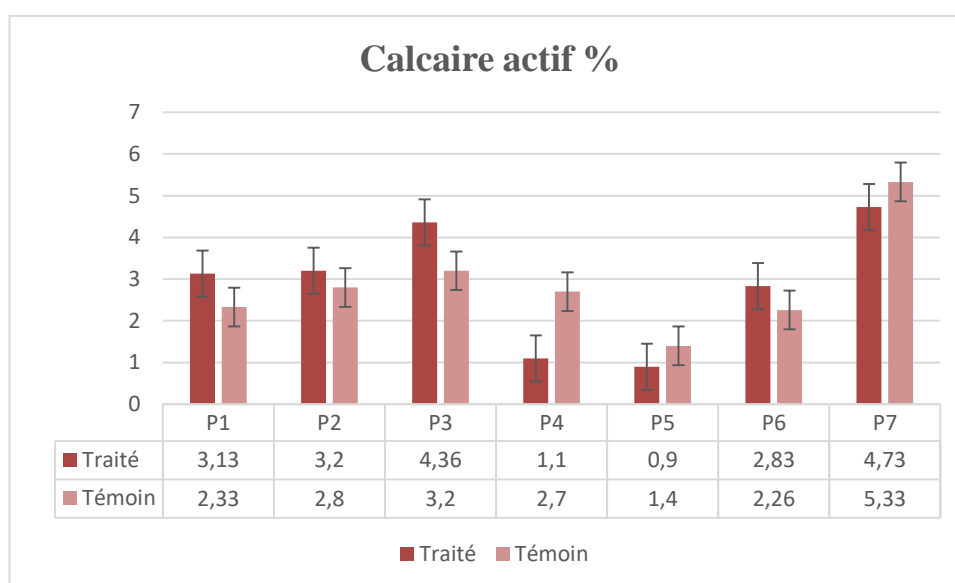


Figure 65 : Variation du taux de Calcaire actif du sol stade floraison (2^{ème} campagne)

Les valeurs de calcaire actif observées fluctuent entre 0,90% et 4,73% dans les sols traités, tandis que dans les sols témoins, elles oscillent entre 1,40% et 5,33%. Dans plusieurs zones, dont P1, P2, P3 et P6, les sols traités montrent des niveaux légèrement supérieurs de calcaire actif par rapport aux échantillons témoins, indiquant une propension à l'élévation de cette composante suite au traitement. Par contre, une tendance inverse est observable dans les parcelles P4, P5 et P7, où l'on note des baisses significatives puisque les valeurs du témoin surpassent celles du traitement. L'analyse statistique révèle que, dans le plus grand nombre de parcelles, les différences notées entre les modalités sont assez marquées pour être considérées significatives (Tableau 57).

Tableau 57. Test t de student (Calcaire actif stade floraison 2 éme campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	2.33 ± 0.3	b
P1 traité	3.13 ± 0.15	a
P2 témoin	2.8 ± 0.1	b
P2 traité	3.2 ± 0.2	a
P3 témoin	3.2 ± 0.1	b
P3 traité	4.36 ± 0.32	a
P4 témoin	2.7 ± 0.26	a
P4 traité	1.1 ± 0.3	b
P5 témoin	1.4 ± 0.1	a
P5 traité	0.9 ± 0.1	b
P6 témoin	2.26 ± 0.3	a
P6 traité	2.83 ± 0.15	a
P7 témoin	5.33 ± 0.32	a
P7 traité	4.73 ± 0.2	a

1.2.3.6. Phosphore assimilable :

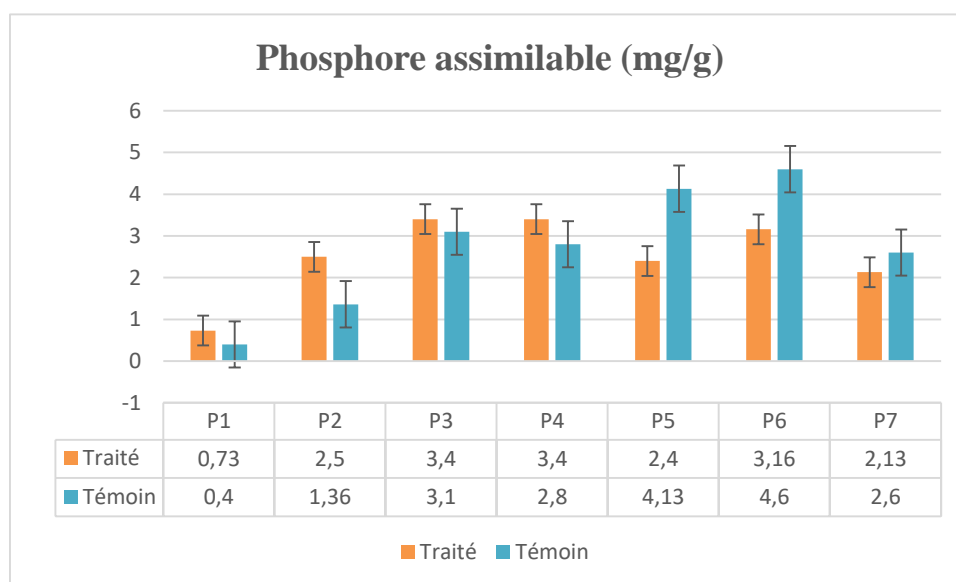


Figure 66 : Variation du taux de phosphore assimilable du sol stade floraison (2 éme campagne)

Chapitre IV. Résultats et discussion

Dans les sols traités, le taux de phosphore assimilable fluctue entre 0,73 et 3,40 mg/g, alors que pour les témoins, on observe des valeurs allant de 0,40 à 4,60 mg/g. Dans plusieurs cas, notamment en P1, P2, P3, P4 et P7, les valeurs obtenues dans les sols traités sont supérieures à celles des témoins, ce qui suggère une amélioration de la disponibilité du phosphore sous l'effet du traitement. En revanche, les parcelles P5 et P6 affichent une baisse significative du phosphore assimilable dans les sols traités comparativement aux témoins, signalant une diminution de la fraction accessible dans ces secteurs. L'étude statistique démontre que pour la plupart des parcelles, les disparités notées entre les modalités sont assez marquées pour être jugées significatives (Tableau 58).

Tableau 58. Test t de student (Phosphore assimilable stade floraison 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	0.4 ± 0.1	b
P1 traité	0.73 ± 0.2	a
P2 témoin	1.36 ± 0.3	b
P2 traité	2.5 ± 0.4	a
P3 témoin	3.1 ± 0.1	b
P3 traité	3.4 ± 0.1	a
P4 témoin	2.8 ± 0.1	b
P4 traité	3.4 ± 0.3	a
P5 témoin	4.13 ± 0.15	a
P5 traité	2.4 ± 0.3	b
P6 témoin	4.6 ± 0.1	a
P6 traité	3.16 ± 0.15	b
P7 témoin	2.6 ± 0.1	a
P7 traité	2.13 ± 0.15	a

1.2.3.7. Humidité hygroscopique :

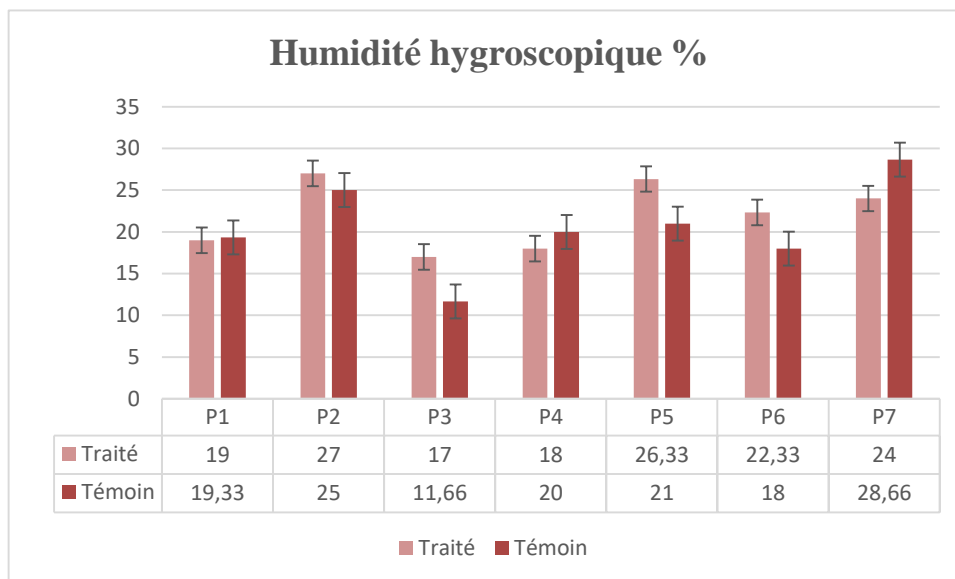


Figure 67 : Variation du taux d’humidité hygroscopique du sol stade floraison (2^{ème} campagne)

Les données relatives à l’humidité hygroscopique indiquent des divergences marquées entre les sols traités et les témoins, en fonction des parcelles. Dans P2, P3, P5 et P6, les échantillons traités ont présenté des valeurs plus élevées. Les écarts demeurent minimales dans P1 et P4. Par contre, la parcelle P7 affiche une valeur supérieure dans le témoin. Toutefois, aucune variation statistiquement significative n’a été observée pour la majorité des parcelles.

Tableau 59. Test t de student (humidité hygroscopique stade floraison 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	19.33 ± 2.08	b
P1 traité	19 ± 1	a
P2 témoin	25 ± 1	a
P2 traité	27 ± 2	a
P3 témoin	11.66 ± 2.08	a
P3 traité	17 ± 1	a
P4 témoin	20 ± 1	a
P4 traité	18 ± 1	a
P5 témoin	21 ± 1	a

P5 traité	26.33 ± 3.21	b
P6 témoin	18 ± 1	a
P6 traité	22.33 ± 1.52	a
P7 témoin	28.66 ± 1.52	a
P7 traité	24 ± 1	a

1.2.3.8. Porosité :

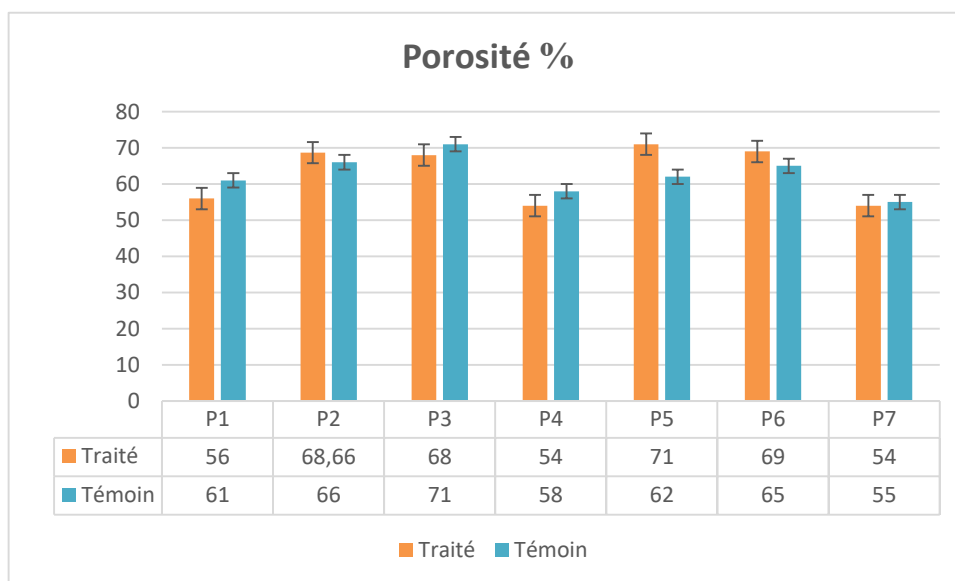


Figure 68 : Variation du taux de porosité du sol stade floraison (2^{ème} campagne)

Pour les parcelles traitées, la porosité varie entre 54 et 71 %, tandis que pour les témoins, elle se situe entre 55 et 71 %. Le traitement provoque une hausse notable dans P2, P5 et P6, alors que d'autres parcelles (P1, P4, P7) affichent une baisse. L'analyse statistique révèle que, pour la majorité des parcelles, les écarts constatés entre les modalités restent minimes et ne signifient pas une variation réellement notable à l'exception de P5 et P1.

Tableau 60. Test t de student (porosité stade floraison 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	61 ± 1	a
P1 traité	56 ± 1	b
P2 témoin	66 ± 1	a

P2 traité	68.66 ± 1	a
P3 témoin	71 ± 1	a
P3 traité	68 ± 1	a
P4 témoin	58 ± 1	a
P4 traité	54 ± 2	a
P5 témoin	62 ± 1	b
P5 traité	71 ± 1	a
P6 témoin	65 ± 1	a
P6 traité	69 ± 1	a
P7 témoin	55 ± 1	a
P7 traité	54 ± 2	a

1.2.4. Après récolte :

1.2.4.1. pH eau :

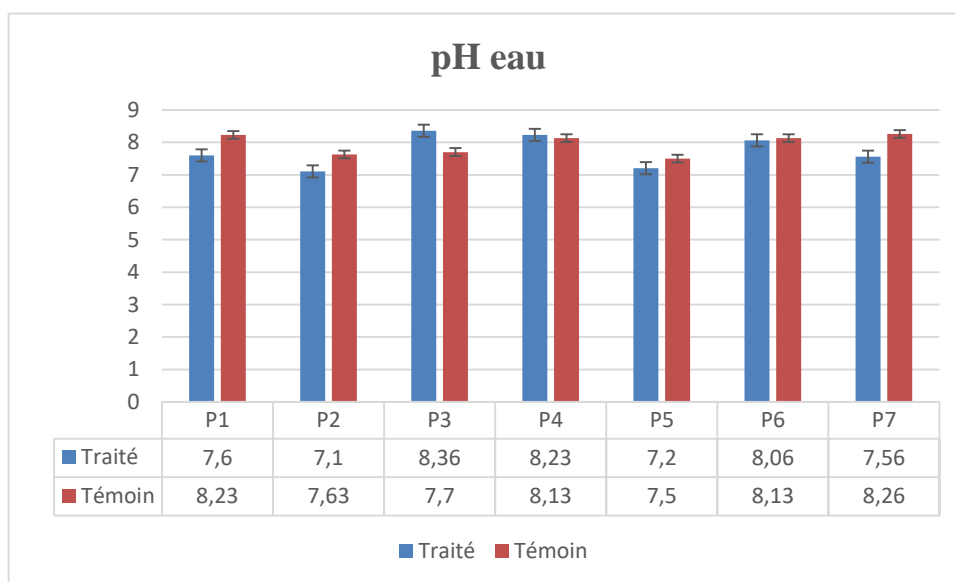


Figure 69 : Variation du taux de pH eau du sol après récolte (2^{ème} campagne)

Le pH demeure généralement neutre, voire légèrement alcalin, variant entre 7,1 et 8,36 pour les sols soumis à un traitement, et entre 7,5 et 8,26 pour les témoins. Sur la plupart des parcelles, le traitement entraîne une diminution significative modérée du pH : c'est le cas pour P1, P2, P5, P6 et P7, avec des variations approximatives de 0,1 à 0,7 unité de pH. À l'inverse, P3 et P4 montrent un pH supérieur dans les parcelles traitées par rapport aux témoins, néanmoins, la différence reste assez minime

Tableau 61. Test t de student (pH eau après récolte 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	8.23 ± 0.2	a
P1 traité	7.6 ± 0.3	b
P2 témoin	7.63 ± 0.15	a
P2 traité	7.1 ± 0.1	b
P3 témoin	7.7 ± 0.2	a
P3 traité	8.36 ± 0.3	a
P4 témoin	8.13 ± 0.15	a
P4 traité	8.23 ± 0.15	a
P5 témoin	7.5 ± 0.2	a
P5 traité	7.2 ± 0.1	b
P6 témoin	8.13 ± 0.15	a
P6 traité	8.06 ± 0.1	b
P7 témoin	8.26 ± 0.25	a
P7 traité	7.56 ± 0.2	b

1.2.4.2. pH KCl :

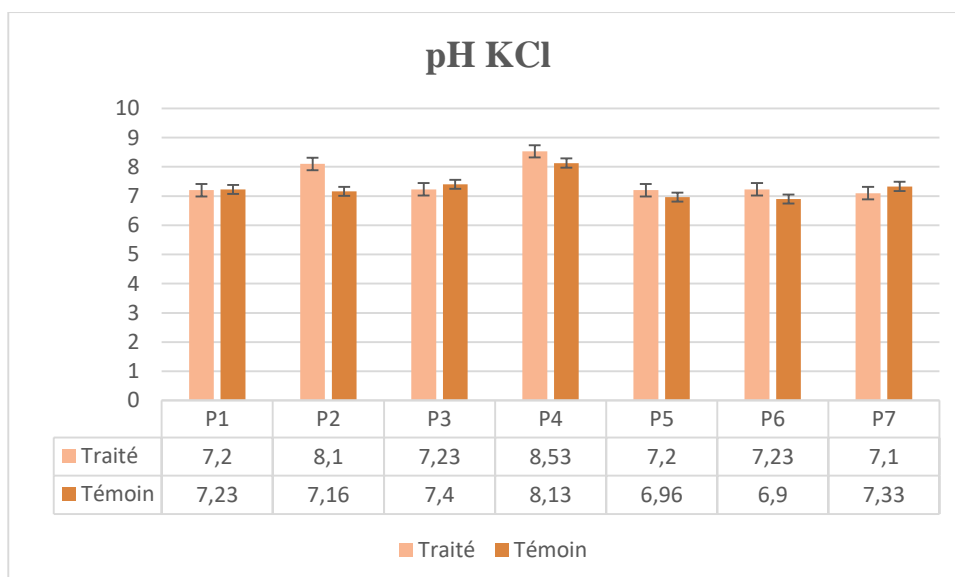


Figure 70 : Variation du taux de pH KCl du sol après récolte (2^{ème} campagne)

Chapitre IV. Résultats et discussion

Les évaluations du pH KCl indiquent généralement la présence de sols alcalins sur l'ensemble des parcelles, avec une prédominance de valeurs au-delà de 7. Le traitement indique une élévation significative du pH dans plusieurs parcelles, y compris P2, P4, P5 et P6, où les valeurs observées sont supérieures à celles des témoins. Contrairement aux P1, P3 et P7 où le pH témoin excède celui du traité.

Tableau 62. Test t de student (pH KCl après récolte 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	7.23 ± 0.2	a
P1 traité	7.2 ± 0.1	a
P2 témoin	7.16 ± 0.15	b
P2 traité	8.1 ± 0.1	a
P3 témoin	7.4 ± 0.1	a
P3 traité	7.23 ± 0.2	a
P4 témoin	8.13 ± 0.15	b
P4 traité	8.53 ± 0.15	a
P5 témoin	6.96 ± 0.05	b
P5 traité	7.2 ± 0.1	a
P6 témoin	6.9 ± 0.1	b
P6 traité	7.23 ± 0.20	a
P7 témoin	7.33 ± 0.3	a
P7 traité	7.1 ± 0.17	a

1.2.4.3. Carbone organique :

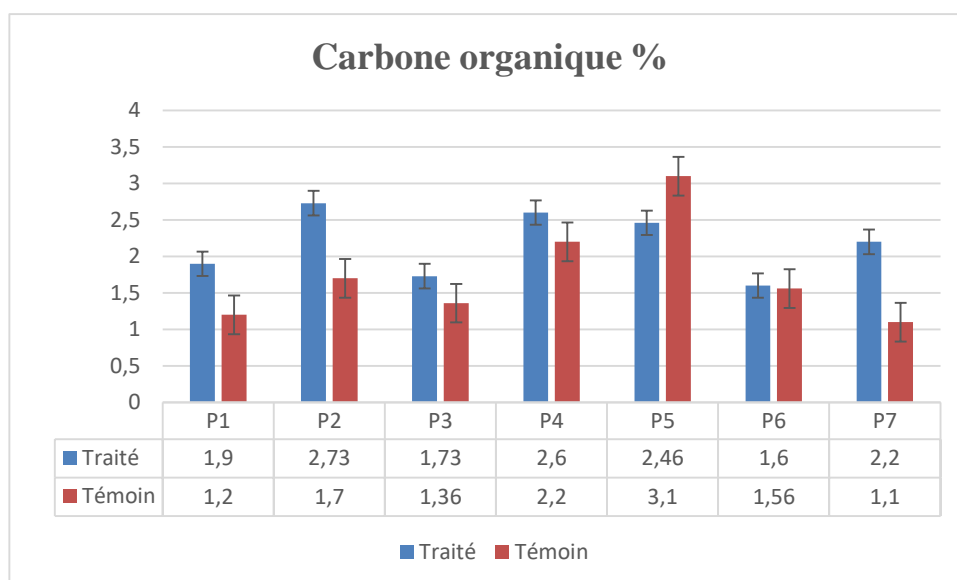


Figure 71 : Variation du taux de carbone organique du sol après récolte (2^{ème} campagne)

Les données sur le carbone organique, variant de 1,6% à 2,73% pour les échantillons traités et de 1,1% à 3,1% pour les témoins, montrent une tendance favorable du traitement pour la matière organique dans la plupart des parcelles. Dans P1, P2, P3, P4, P6 et P7, les valeurs traitées sont nettement plus élevées que celles des témoins. (Tableau 63).

Tableau 63. Test t de student (Carbone organique du sol après récolte 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	1.2 ± 0.2	b
P1 traité	1.9 ± 0.1	a
P2 témoin	1.7 ± 0.7	b
P2 traité	2.73 ± 0.3	a
P3 témoin	1.36 ± 0.3	b
P3 traité	1.73 ± 0.05	a
P4 témoin	2.2 ± 0.2	b
P4 traité	2.6 ± 0.1	a
P5 témoin	3.1 ± 0.1	a
P5 traité	2.46 ± 0.2	a
P6 témoin	1.56 ± 0.25	b
P6 traité	1.6 ± 0.1	a

P7 témoin	1.1 ± 0.1	b
P7 traité	2.2 ± 0.2	a

1.2.4.4. Calcaire total :

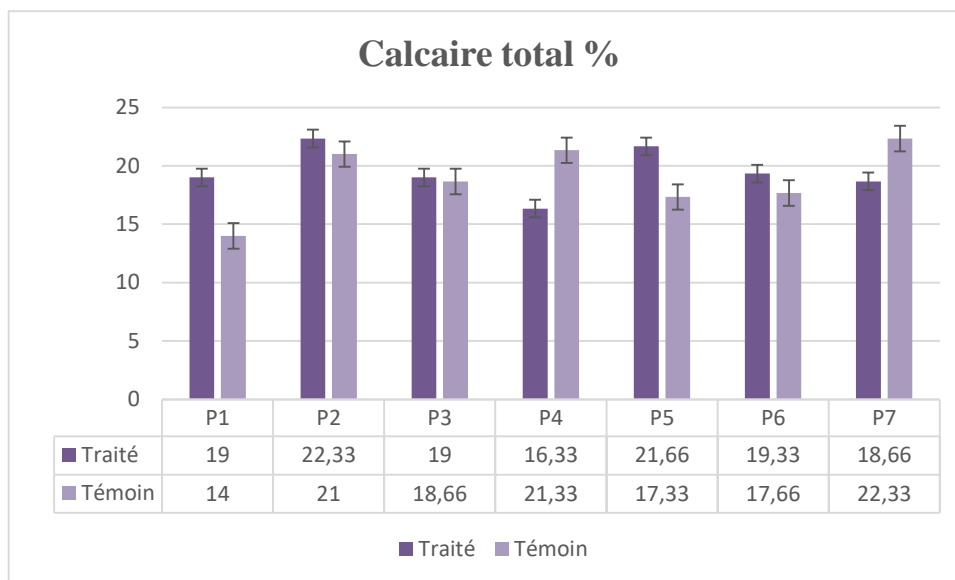


Figure 72 : Variation du taux de calcaire total du sol après récolte (2^{ème} campagne)

Le groupe traité affiche des valeurs allant de 16,33% à 22,33%, alors que le groupe de contrôle fluctue entre 14% et 22,33%. Les données indiquent que le traitement a un effet variable sur la quantité totale de calcaire en fonction des échantillons. Globalement, les échantillons traités montrent généralement des concentrations significativement plus élevées que les témoins, même si certaines parcelles comme P4 et P7 présentent une baisse sans signification notable.

Tableau 64. Test t de student (Calcaire total du sol après récolte 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	14 ± 1	b
P1 traité	19 ± 1	a
P2 témoin	21 ± 1	b
P2 traité	22.33 ± 1.5	a
P3 témoin	18.66 ± 2.08	b

P3 traité	19 ± 1	a
P4 témoin	21.33 ± 2	a
P4 traité	16.33 ± 1.5	a
P5 témoin	17.33 ± 1.5	a
P5 traité	21.66 ± 2.08	a
P6 témoin	17.66 ± 1.5	b
P6 traité	19.33 ± 1.5	a
P7 témoin	22.33 ± 1.5	a
P7 traité	18.66 ± 1.5	a

1.2.4.5. Calcaire actif :

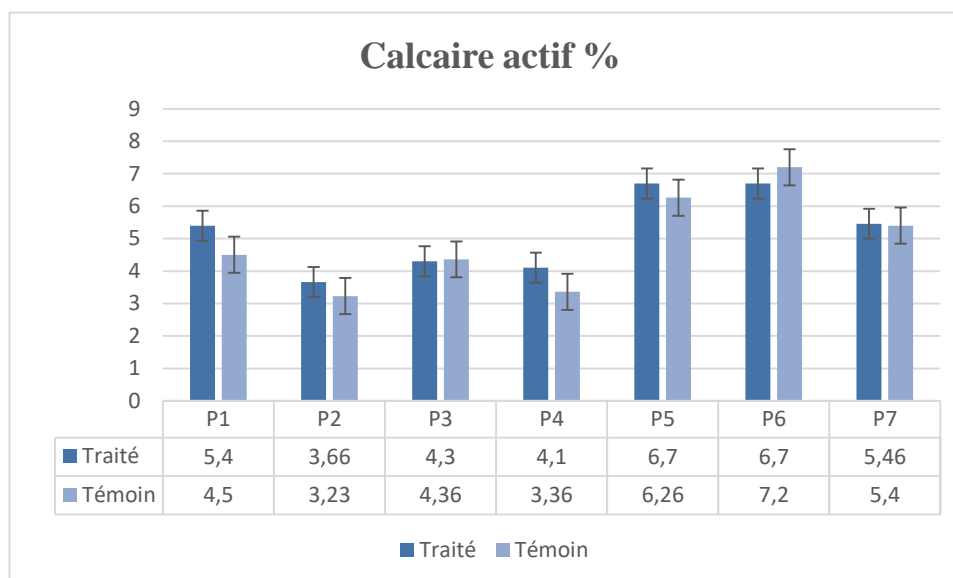


Figure 73 : Variation du taux de calcaire actif du sol après récolte (2^{ème} campagne)

Les valeurs du calcaire actif pour le groupe traité se situent entre 3,66 et 6,7, alors que le témoin présente une variation de 3,23 à 7,2. On note généralement des niveaux similaires entre les deux groupes, avec une légère tendance à la hausse dans les parcelles traitées, en particulier pour les échantillons P1, P2, P4 et P5. Cependant, cette tendance n'est pas constante, car les échantillons P3 et P6 affichent des valeurs un peu plus hautes dans le témoin. L'étude statistique démontre que pour la plupart des parcelles, les disparités notées entre les modalités sont assez marquées pour être considérées significatives (tableau 65).

Tableau 65. Test t de student (Calcaire actif du sol après récolte 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	4.5 ± 0.5	b
P1 traité	5.4 ± 0.3	a
P2 témoin	3.23 ± 0.2	b
P2 traité	3.66 ± 0.05	a
P3 témoin	4.36 ± 0.3	b
P3 traité	4.3 ± 0.1	a
P4 témoin	3.36 ± 0.2	b
P4 traité	4.1 ± 0.1	a
P5 témoin	6.26 ± 0.3	b
P5 traité	6.7 ± 0.2	a
P6 témoin	7.2 ± 0.26	b
P6 traité	6.7 ± 0.2	a
P7 témoin	5.4 ± 0.2	a
P7 traité	5.46 ± 0.3	a

1.2.4.6. Phosphore assimilable :

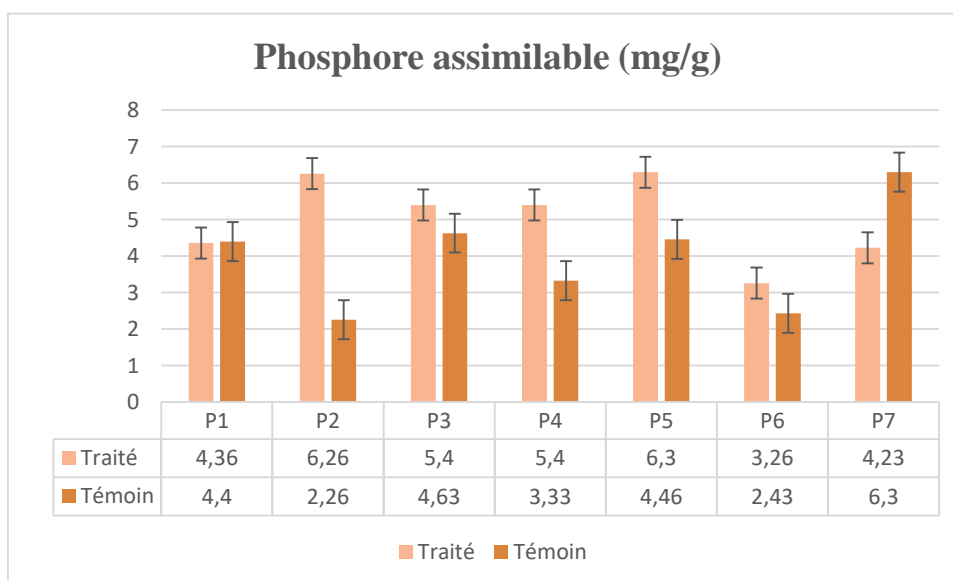


Figure 74 : Variation du taux de phosphore assimilable du sol après récolte (2^{ème} campagne)

Chapitre IV. Résultats et discussion

Dans le groupe traité, les concentrations de phosphore assimilable vont de 3,26 mg/g à 6,3 mg/g, alors que dans le groupe témoin elles oscillent entre 2,26 mg/g et 6,3 mg/g. Dans l'ensemble, les valeurs relevées dans les parcelles traitées sont supérieures pour la plupart des échantillons, indiquant une hausse de la disponibilité du phosphore dans le sol. L'analyse statistique révèle que pour la majorité des parcelles, les différences observées entre les modalités sont suffisamment prononcées pour être jugées significatives.

Tableau 66. Test t de student (Phosphore assimilable du sol après récolte 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	4.4 ± 0.3	a
P1 traité	4.36 ± 0.4	a
P2 témoin	2.26 ± 0.25	b
P2 traité	6.26 ± 0.3	a
P3 témoin	4.63 ± 0.15	b
P3 traité	5.4 ± 0.3	a
P4 témoin	3.33 ± 0.1	b
P4 traité	5.4 ± 0.2	a
P5 témoin	4.46 ± 0.40	b
P5 traité	6.3 ± 0.3	a
P6 témoin	2.43 ± 0.40	b
P6 traité	3.26 ± 0.15	a
P7 témoin	6.3 ± 0.3	a
P7 traité	4.23 ± 0.25	a

1.2.4.7. Humidité hygroscopique :

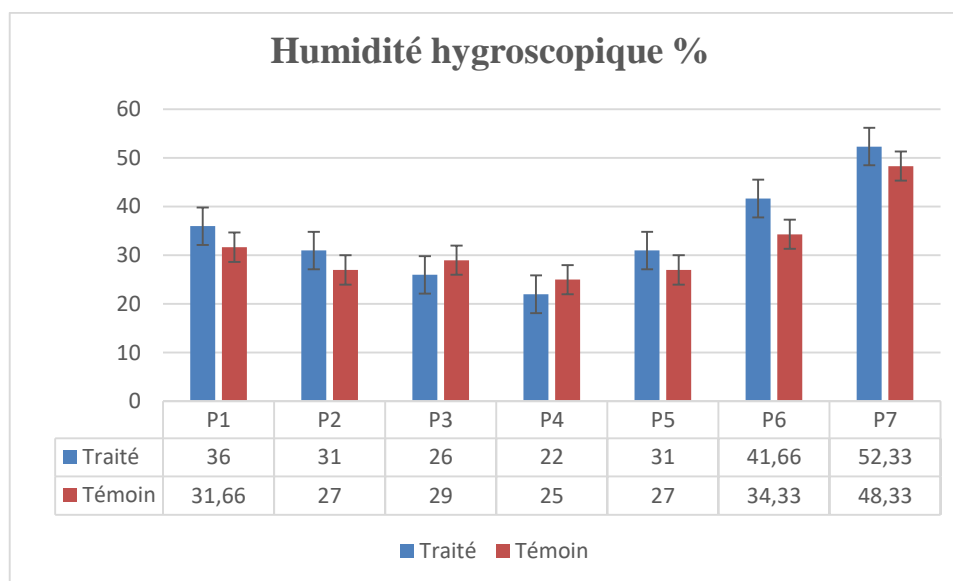


Figure 75 : Variation du taux d’humidité hygroscopique du sol après récolte (2^{ème} campagne)

L’humidité hygroscopique du groupe traité varie de 22% à 52,33%, tandis que celle du groupe témoin fluctue entre 27% et 48,33%. Dans la plupart des parcelles P1, P2, P5, P6 et P7, l’humidité hygroscopique est supérieure dans le traitement par rapport au témoin ; toutefois, pour P3 et P4, les valeurs sont presque identiques entre les deux méthodes, avec même un léger excès par rapport au témoin. L’analyse statistique indique que, sur la plupart des parcelles, aucune différence significative n’est constatée entre les modalités.

Tableau 67. Test t de student (humidité hygroscopique après récolte 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	31.66 ± 1.52	b
P1 traité	36 ± 2	a
P2 témoin	27 ± 1	a
P2 traité	31 ± 1	a
P3 témoin	29 ± 1	a
P3 traité	26 ± 1	a
P4 témoin	25 ± 1	a
P4 traité	22 ± 1	a
P5 témoin	27 ± 2	a
P5 traité	31 ± 1	a

P6 témoin	34.33 ± 1.5	a
P6 traité	41.66 ± 1.52	a
P7 témoin	48.33 ± 0.5	a
P7 traité	52.33 ± 2.5	a

1.2.4.8. Porosité :

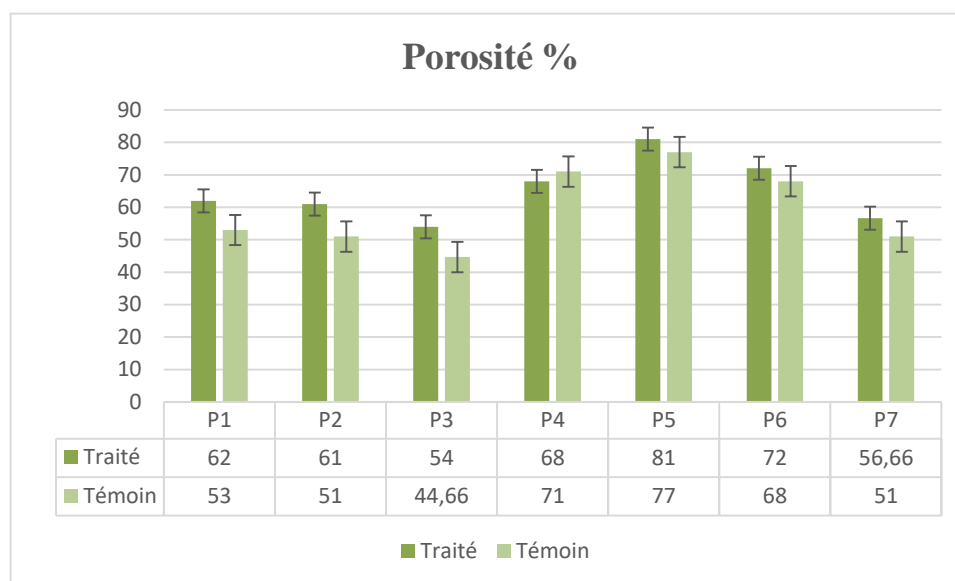


Figure 76 : Variation du taux de porosité du sol après récolte (2^{ème} campagne)

Dans la plupart des situations, les résultats indiquent une porosité supérieure dans les sols traités par rapport aux témoins. Les échantillons traités pour les parcelles P1, P2, P3, P5, P6 et P7 montrent des valeurs accrues, signalant une amélioration globale de la structure du sol due au traitement. La seule exception est P4, où la porosité du témoin dépasse légèrement celle du traité. L'analyse statistique met en évidence des écarts significatifs que pour la première et la deuxième parcelle.

Tableau 68. Test t de student (Porosité après récolte 2^{ème} campagne)

Parcelle	Moy± ET	Significativité
P1 témoin	53 ± 1	b
P1 traité	62 ± 1	a
P2 témoin	51 ± 1	b
P2 traité	61 ± 1	a
P3 témoin	44.66 ± 2	a
P3 traité	54 ± 2	a
P4 témoin	71 ± 1	a
P4 traité	68 ± 1	a
P5 témoin	77 ± 1	a
P5 traité	81 ± 1	a
P6 témoin	68 ± 1	a
P6 traité	72 ± 1	a
P7 témoin	51 ± 1	a
P7 traité	56.66 ± 1.52	a

Avant semis : L'évaluation des caractéristiques physicochimiques du sol avant la plantation démontre que le pesticide induit des changements initiaux, bien qu'en général, ils restent modérés. Le pH et le pH KCl se maintiennent dans une plage neutre à légèrement alcaline, Plusieurs études confirment que l'application de pesticides peut entraîner des variations saisonnières du pH du sol, mais celui-ci reste souvent proche de la neutralité (pH 6,9 à 7,9) au début de la culture, avec une légère tendance à l'alcalinité (Meidl et al.,2024 ; Merouani et al.,2025). On constate une tendance à l'augmentation du carbone organique et du phosphore assimilable dans les sols traités, ce qui laisse présager une amélioration potentielle de la disponibilité des nutriments et de l'activité biologique. nos observations confirment les conclusions de (Virk et al.,2025). L'augmentation modérée du taux de calcaire, d'humidité hygroscopique et de porosité dans les sols traités indique une amélioration de la structure du sol et de sa capacité à retenir l'eau. Selon (Pihlap, 2021 ; Hu et al., 2024), le calcaire joue un rôle dans la stabilité des agrégats, tandis que le traitement peut temporairement stimuler l'activité microbienne, contribuant ainsi à la cohésion des particules et à la création de pores.

Toutefois, ces effets ne sont pas uniformes et fluctuent en fonction des conditions locales propres à chaque parcelle.

Stade Rosette : à phase de rosette, les pesticides ont un impact limité et variable selon les parcelles. Le pH reste neutre à légèrement alcalin, tandis que le carbone organique montre la variation la plus notable. certaines parcelles démontrent une hausse suite au traitement, Ce phénomène peut être attribué à un accroissement de l'activité microbienne et à une meilleure décomposition des résidus de colza, favorisant ainsi la stabilisation du carbone dans les structures du sol (Voltr et al., 2021 ; Merouani et al., 2025) , et une légère baisse dans d'autres pourrait résulter de l'impact spécifique des différentes variétés de colza sur la production de biomasse et la décomposition du carbone (Zhang et al., 2022). Le calcaire total tend à augmenter sous traitement, alors que le calcaire actif présente une réponse moins homogène. Le phosphore assimilable est d'abord accru, puis diminue, ce qui suggère une immobilisation progressive. Ces résultats sont cohérents avec plusieurs études : (Kataria et al., 2024 ; Lai et al., 2025). L'humidité hygroscopique et la porosité restent stables, indiquant une structure du sol globalement conservée.

Stade de floraison : Lors de la période de floraison, la plante active sa phase reproductive, redirigeant une portion de son énergie et de ses nutriments vers le développement des fleurs et des graines (Cho et al., 2025). Les impacts du traitement sur les caractéristiques du sol demeurent hétérogènes et liés aux parcelles. Le pH (eau et KCl) ne présente pas de tendance globale : certaines régions démontrent une légère alcalinisation tandis que d'autres s'acidifient, avec peu de variations statistiquement significatives. Le carbone organique réagit de manière hétérogène : certaines parcelles montrent une augmentation liée à une activité microbienne accrue et à la stabilisation des résidus organiques (Balík et al., 2025), tandis que d'autres présentent une baisse due à la minéralisation rapide et aux différences entre variétés de colza (Zhang et al., 2022). Les niveaux de carbonates (calcaire total et actif) montrent une fluctuation inconstante en fonction des parcelles, alternant entre des hausses peuvent être dus au traitement qui favorise la stabilisation ou la disponibilité des carbonates, renforçant l'agrégation et la structure du sol et des baisses peuvent résulter de processus de dissolution, de lixiviation ou d'adsorption sur d'autres composés du sol (Kim et al., 2024). Le phosphore assimilable présente généralement une disponibilité accrue ; cependant, il diminue dans certaines régions, ce qui

pourrait suggérer la présence de processus d'immobilisation ou de compétition dans ces sols (Lai et al., 2025).

En fin de compte, la porosité et l'humidité hygroscopique ne montrent pas de variations statistiquement notables dans la plupart des situations, indiquant que le traitement n'influence pas considérablement les caractéristiques physiques du sol à ce point.

Après récolte : juste après la récolte, les effets du traitement sur les propriétés physico-chimiques du sol restent visibles, mais varient selon les parcelles. Le pH de l'eau tend à diminuer légèrement dans la plupart des parcelles traitées, tandis que le pH KCl indique une alcalinisation légère, reflétant des modifications locales du statut acido-basique du sol dues aux réactions chimiques et à l'activité racinaire (Ng et al., 2022 ; Iticha et al., 2024). Les teneurs en calcaire total restent élevées et montrent une tendance à la hausse dans la majorité des parcelles, indiquant une influence positive sur la stabilisation des carbonates. Certaines études suggèrent que la présence de carbonates dans le sol peut modifier l'adsorption des pesticides, mais cela concerne l'effet des carbonates sur le comportement des pesticides, et non l'inverse, selon El-Aswad et al. (2022). Le traitement tend à améliorer la disponibilité du carbone et du phosphore, deux éléments clés pour la fertilité du sol et la nutrition des plantes, tandis que d'autres propriétés comme le pH, l'humidité hygroscopique et la porosité restent relativement stables.

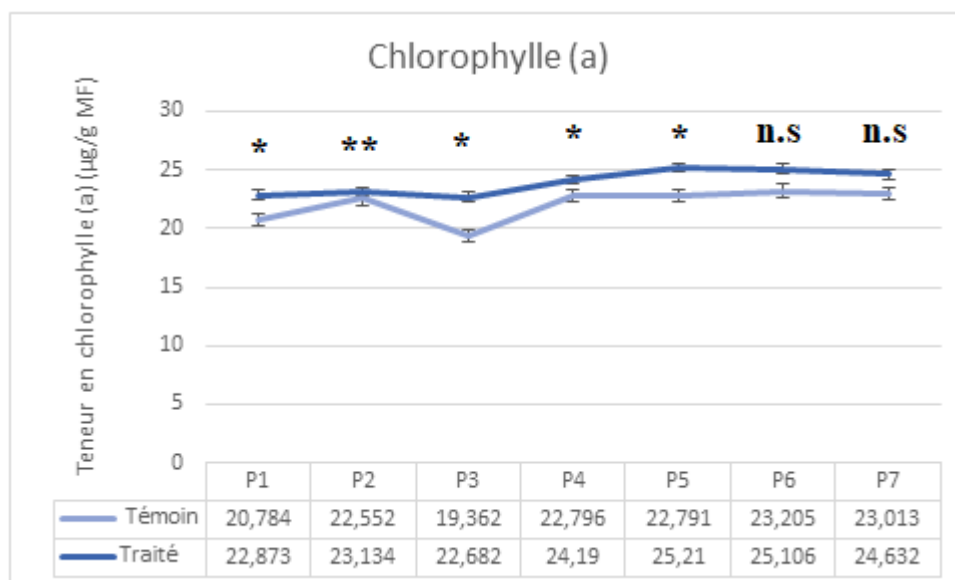
L'effet du traitement semble à la fois complexe et variable. Plutôt qu'un impact direct et uniforme, les pesticides agissent en fonction du contexte local, pouvant être bénéfiques ou neutres selon la nature du sol. Le processus tend à augmenter la disponibilité du carbone et du phosphore, deux éléments clés pour la fertilité, tandis que le pH, l'humidité hygroscopique et la porosité restent principalement inchangés. La structure du sol reste stable grâce à la préservation ou à une légère augmentation des carbonates. En résumé, le pesticide favorise la chimie du sol tout en préservant ses propriétés physiques.

2. Résultats des paramètres physio-biochimiques du colza (*brassica napus.L*) :

2.1. Première campagne

2.1.1. Stade rosette :

2.1.1.1. Chlorophylle (a) :



* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$; n.s. Différence non significative ($p > 0,05$).

Figure 77 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a) ($\mu\text{g/g MF}$) entre les parcelles des échantillons témoins et traités (Stade rosette).

Les résultats de l'analyse des teneurs en chlorophylle (a) montrent que, pour plusieurs points de prélèvement, les valeurs observées chez les plantes traitées diffèrent significativement de celles du groupe témoin. En général, les premiers indicateurs (P1 à P5) indiquent une augmentation notable de la chlorophylle (a) dans le groupe traité comparé au témoin, suggérant un effet mesurable du traitement sur la couleur des feuilles à ces étapes. Toutefois, aux points P6 et P7, les niveaux des deux groupes se rapprochent, et aucune différence significative ($p > 0,05$) n'est plus détectée, ce qui laisse penser que l'impact du traitement s'atténue ou devient plus aléatoire à ces phases.

2.1.1.2. Chlorophylle (b) :

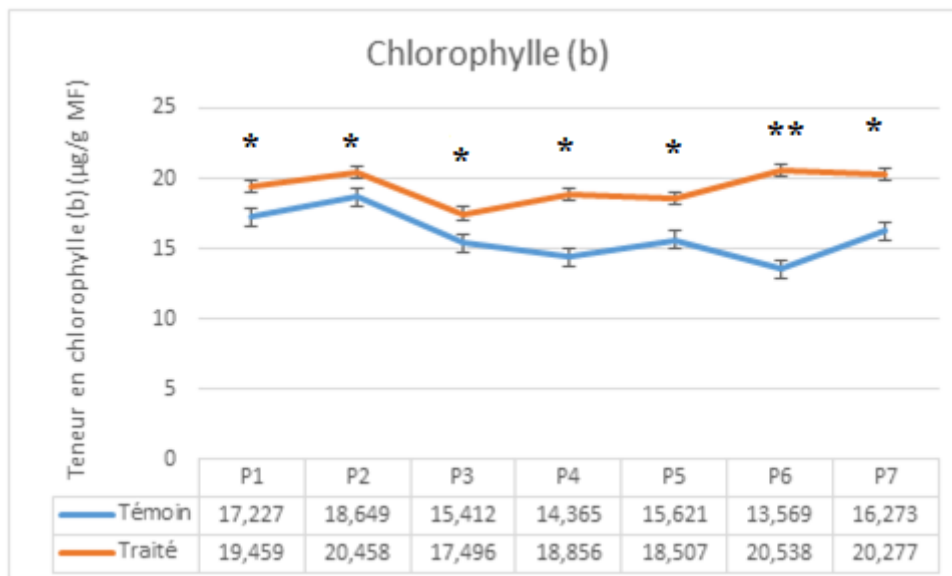


Figure 78 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (b) ($\mu\text{g/g MF}$) entre les parcelles des échantillons témoins et traités (Stade de rosette).

Parmi toutes les mesures (de P1 à P7), le groupe traité présente toujours des concentrations plus élevées en chlorophylle (b) que le groupe témoin. Les valeurs du groupe traité varient entre 17,5 et 20,5 $\mu\text{g/g MF}$, tandis que celles du groupe témoin se situent entre 13,6 et 18,6 $\mu\text{g/g MF}$. Aux points P1, P2, P3, P4 et P5, les différences, allant de 1,8 à 4,5 $\mu\text{g/g MF}$, dépassent le seuil de $p < 0,05$. La plus grande différence est observée à P6 (environ 7 $\mu\text{g/g MF}$), avec une significativité encore plus forte ($p < 0,01$). À P7, malgré une différence d'environ 4 $\mu\text{g/g MF}$, celle-ci reste statistiquement significative ($p < 0,05$).

2.1.1.3. Chlorophylle (a+b) :

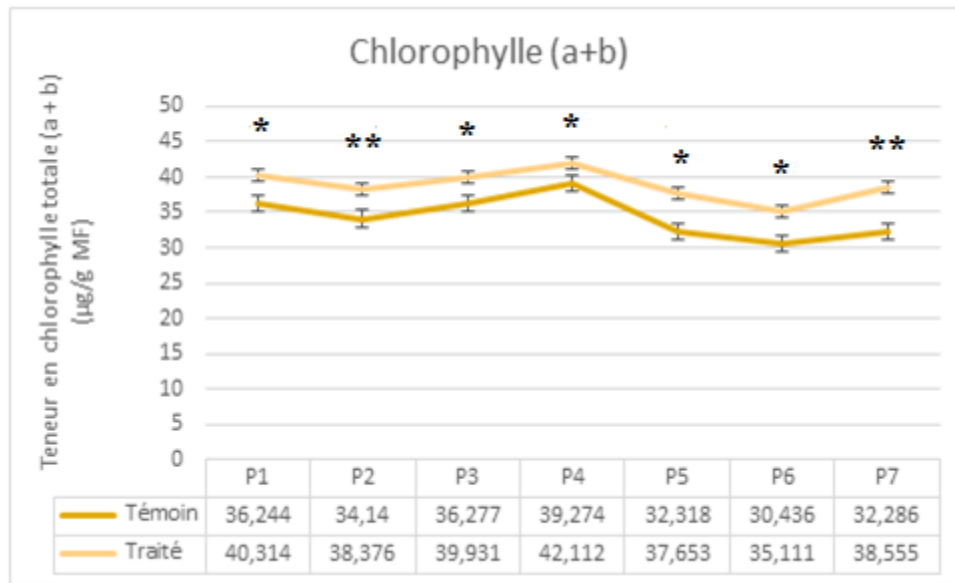


Figure 79 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a+b) ($\mu\text{g/g MF}$) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette).

L'analyse des concentrations de chlorophylle totale (a+b) montre une tendance générale : les plantes traitées ont toujours des niveaux plus élevés que ceux du témoin. Les écarts observés varient habituellement entre 3 et plus de 6 $\mu\text{g/g MF}$, ce qui indique une augmentation significative du pigment suite au traitement. Le test de Mann-Whitney confirme des différences statistiquement significatives ($p < 0,05$) aux points P1, P3, P4, P5 et P6. En outre, les points P2 et P7 présentent des différences encore plus marquées, avec un seuil de signification plus strict ($p < 0,01$).

2.1.1.4. Protéines totales :

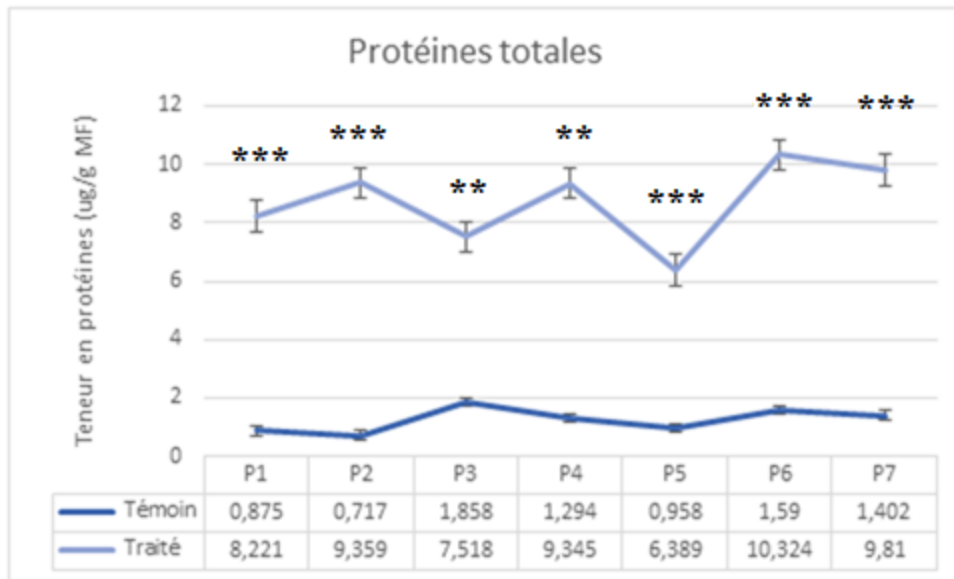


Figure 80 : Analyse comparative de la teneur totale en protéines ($\mu\text{g/g MF}$) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette).

L'évaluation des protéines totales indique une augmentation marquée dans toutes les variétés après traitement. Les valeurs passent généralement de 0,717 à 1,858 $\mu\text{g/g MF}$ pour les témoins, pour atteindre entre 6,389 et 10,324 $\mu\text{g/g MF}$ dans les parcelles traitées. À chaque point d'échantillonnage (de P1 à P7), des différences très significatives sont visibles entre le groupe témoin et le groupe traité, comme en témoignent les niveaux ** ($p < 0,01$) et *** ($p < 0,001$).

2.1.1.5. Proline :

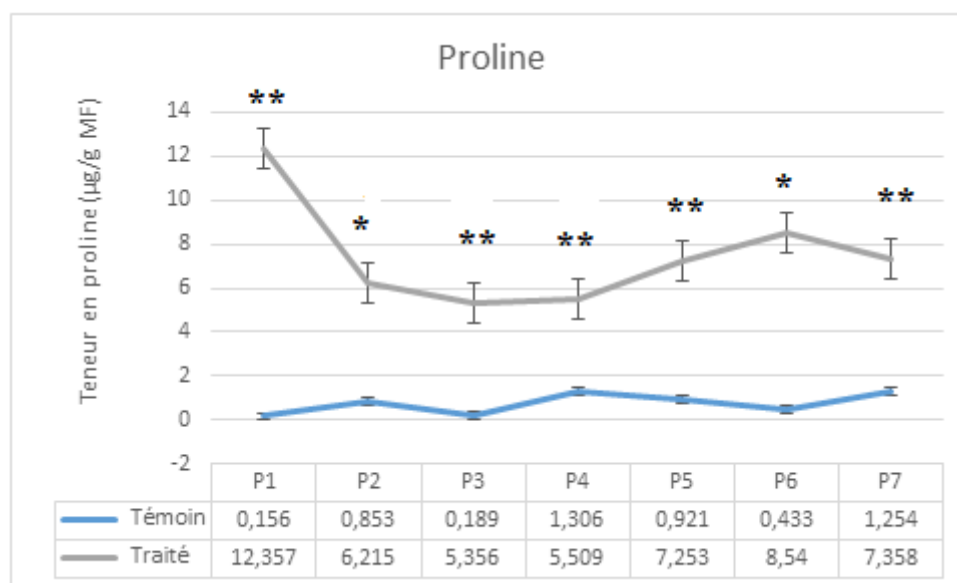


Figure 81 : Analyse comparative de la teneur en proline ($\mu\text{g/g MF}$) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette).

L'analyse des concentrations en proline montre une augmentation notable dans toutes les plantes traitées comparée aux témoins. Les valeurs, allant de 0,156 à 1,306 $\mu\text{g/g MF}$ pour les témoins, atteignent entre 5,356 et 12,357 $\mu\text{g/g MF}$ chez les plantes traitées. La parcelle P1 affiche la plus forte augmentation, tandis que P2 et P3 ont des hausses plus modérées mais toujours largement supérieures à celles des témoins. D'après l'analyse statistique, ces différences sont toutes significatives, ce qui indique que le traitement favorise fortement l'accumulation de proline.

2.1.1.6. Sucres solubles :

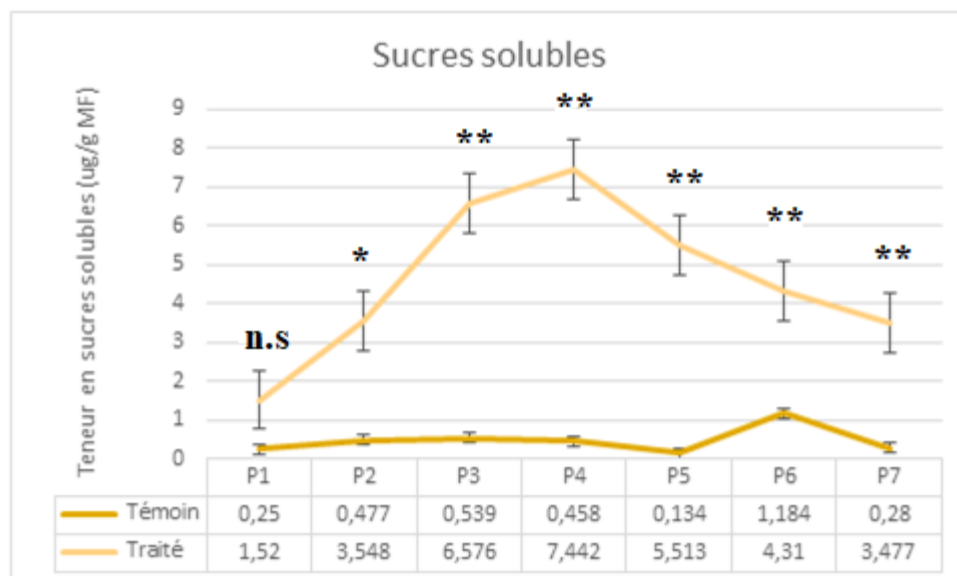


Figure 82 : Analyse comparative de la teneur en sucres solubles ($\mu\text{g/g MF}$) entre les parcelles des échantillons témoins et traités (Stade rosette).

L'analyse des sucres solubles montre une augmentation significative dans toutes les zones traitées comparativement aux témoins. Sous contrôle, les niveaux varient de 0,134 à 1,184 $\mu\text{g/g MF}$, tandis que dans les plantes traitées, ils oscillent entre 1,52 et 7,442 $\mu\text{g/g MF}$. La variété P1 ne présente pas de différence statistiquement significative (n.s.) entre le groupe témoin et le groupe traité, malgré des valeurs plus élevées dans le traitement. À partir de P2, les différences deviennent significatives et s'amplifient selon les variétés. P2 montre une augmentation notable (*, $p < 0,05$), tandis que P3 à P7 ont des effets encore plus marqués, avec des niveaux de signification plus élevés (**, $p < 0,01$).

2.1.2. Stade floraison :

2.1.2.1. Chlorophylle (a) :

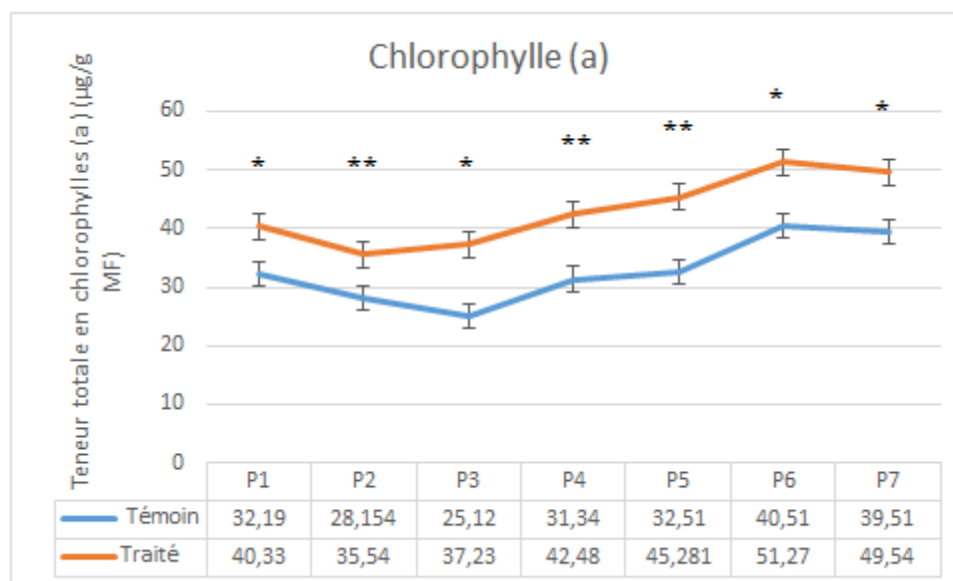


Figure 83 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a) ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)

L'analyse de la concentration en chlorophylle (a) dans les sept parcelles (P1 à P7) indique une augmentation significative chez tous les plants traités comparés aux témoins. Des variations marquantes sont observées notamment dans P3, P5, P6 et P7, avec des hausses pouvant atteindre près de 48 %, comme par exemple pour P3 : de 25,124 $\mu\text{g/g}$ (contrôle) à 37,236 $\mu\text{g/g}$ (traitement). Cette différence est confirmée par une signification statistique : chaque échantillon montre une différence notable entre le groupe témoin et le groupe traité, avec un niveau de signification allant de * ($p < 0,05$) à ** ($p < 0,01$). Les variétés P2, P4, P5 et P6 réagissent de façon plus importante, tandis que les autres présentent également une progression notable, mais un peu moins marquée.

2.1.2.2. Chlorophylle (b) :

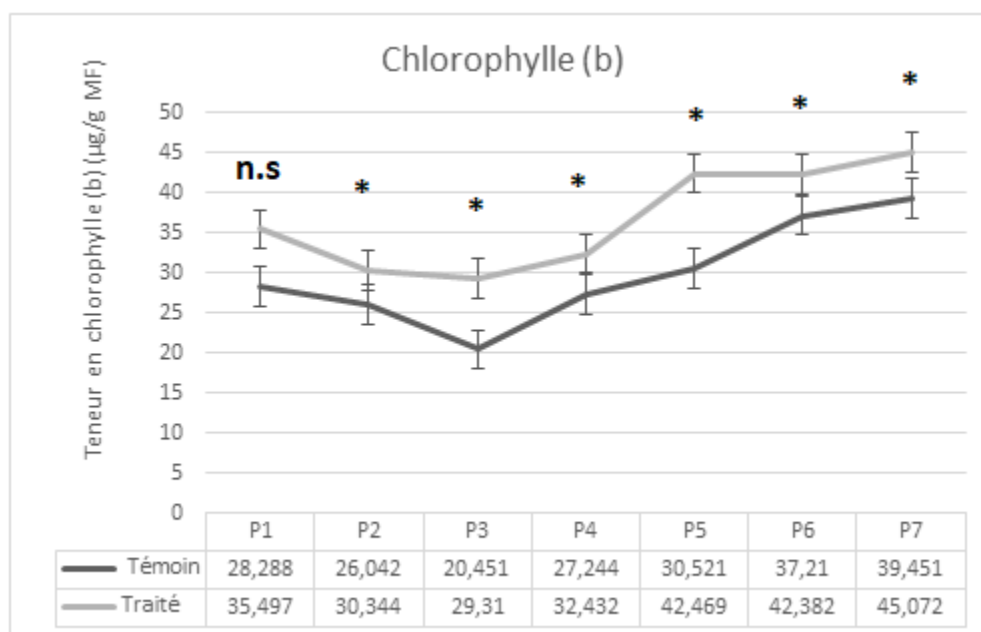


Figure 84 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (b) ($\mu\text{g/g MF}$) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)

L'analyse comparative entre les groupes Témoin et Traité montre une hausse constante et significative de la chlorophylle (b) chez les végétaux traités par rapport au groupe témoin. La variation la plus marquante se situe dans la section P5, où le niveau passe de $30,521 \mu\text{g/g MF}$ (contrôle) à $42,469 \mu\text{g/g MF}$ (traitement), soit une augmentation d'environ 40 %. À l'exception de la variété P1, où la différence n'est pas significative (n.s.), toutes les autres parcelles présentent une différence statistiquement significative, surtout indiquée par * ($p < 0,05$).

2.1.2.2. Chlorophylle (a+b) :

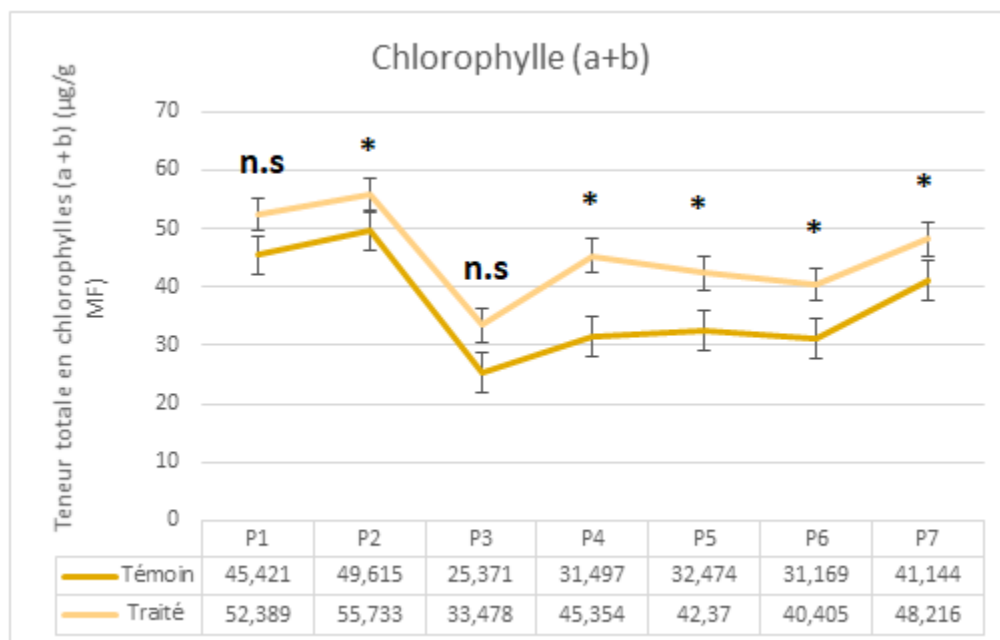


Figure 85 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a+b) ($\mu\text{g/g MF}$) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)

Les données révèlent une augmentation générale du niveau de chlorophylles chez les plantes traitées. La parcelle P4 connaît la hausse la plus notable, passant de 31,497 $\mu\text{g/g MF}$ (contrôle) à 45,354 $\mu\text{g/g MF}$ (traité). Les parcelles P1 et P3 ne montrent pas de différence significative ; toutefois, toutes les autres variétés présentent des augmentations significatives (* $p < 0,05$), indiquant une réponse positive au traitement avec une augmentation notable du contenu total de chlorophylles.

2.1.2.3. Protéines totales :

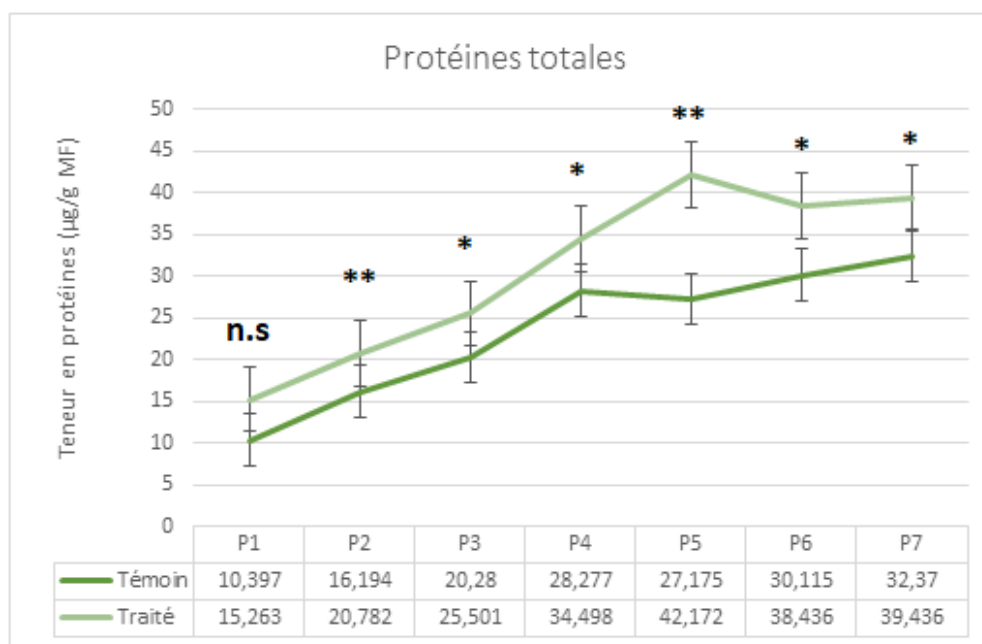


Figure 86 : Analyse comparative de la teneur en protéines totales ($\mu\text{g/g MF}$) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)

Les résultats montrent une augmentation générale de la concentration en protéines dans les échantillons traités. Dès P2, une différence notable apparaît, avec une concentration passant de 16,194 $\mu\text{g/g MF}$ (témoin) à 20,782 $\mu\text{g/g MF}$ (traité). La variation la plus importante se trouve en P5, où la concentration augmente significativement, de 27,175 $\mu\text{g/g MF}$ (contrôle) à 42,172 $\mu\text{g/g MF}$ (traité). La parcelle P1 ne montre pas de différence significative entre les deux groupes, tandis que toutes les autres présentent des augmentations nettes et statistiquement significatives (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$).

2.1.2.4. Proline :

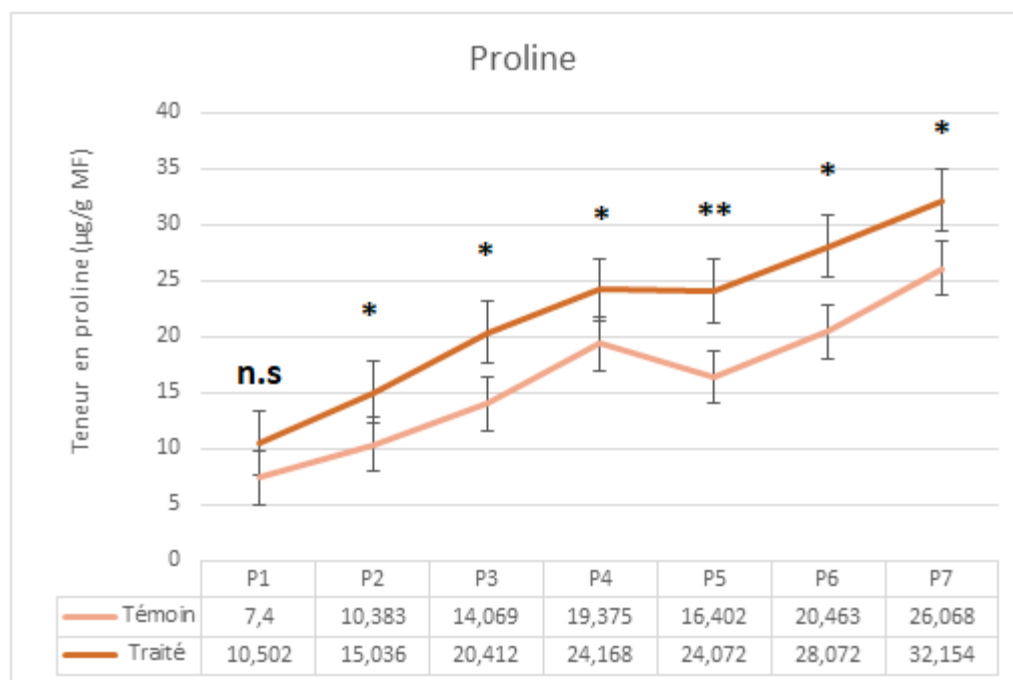


Figure 87 : Analyse comparative de la teneur en proline ($\mu\text{g/g}$ MF) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)

L'analyse du contenu en proline, exprimé en $\mu\text{g/g}$ de matière fraîche (MF), révèle une augmentation continue et significative chez les échantillons traités comparée aux témoins tout au long de l'expérience (de P1 à P7). Une hausse notable, pouvant atteindre +46,8 %, est observée notamment à P5, avec des valeurs de 24,072 $\mu\text{g/g}$ pour les échantillons traités contre 16,402 $\mu\text{g/g}$ pour les témoins. Tous les points montrent des augmentations significatives, avec une différence statistique (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$), sauf pour la première parcelle.

2.1.2.5. Sucres solubles :

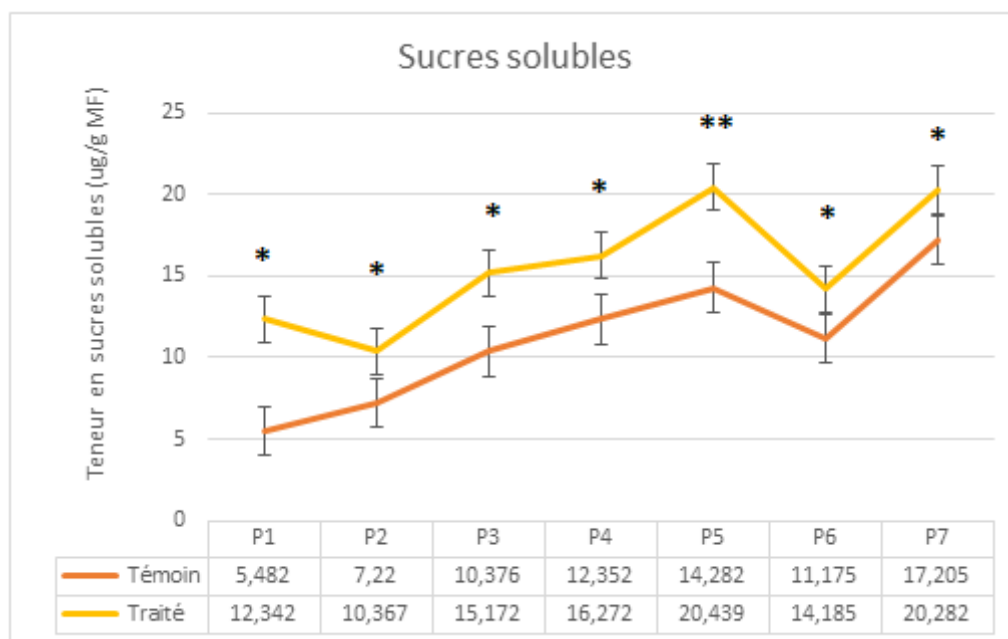


Figure 88 : Analyse comparative de la teneur en sucres solubles ($\mu\text{g/g MF}$) selon les parcelles entre les échantillons témoins et traités (Stade floraison)

Les résultats indiquent une augmentation régulière et significative du taux de sucres solubles chez les plantes traitées comparé aux témoins dans toutes les parcelles. Cette hausse est statistiquement significative (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$). L'effet le plus marqué est observé dans la parcelle P1, où le contenu passe de $5,482 \mu\text{g/g MF}$ chez les témoins à $12,342 \mu\text{g/g MF}$ chez les plants traités.

2.2. Deuxième campagne

2.2.1. Stade rosette :

2.2.1.1. Chlorophylle (a) :

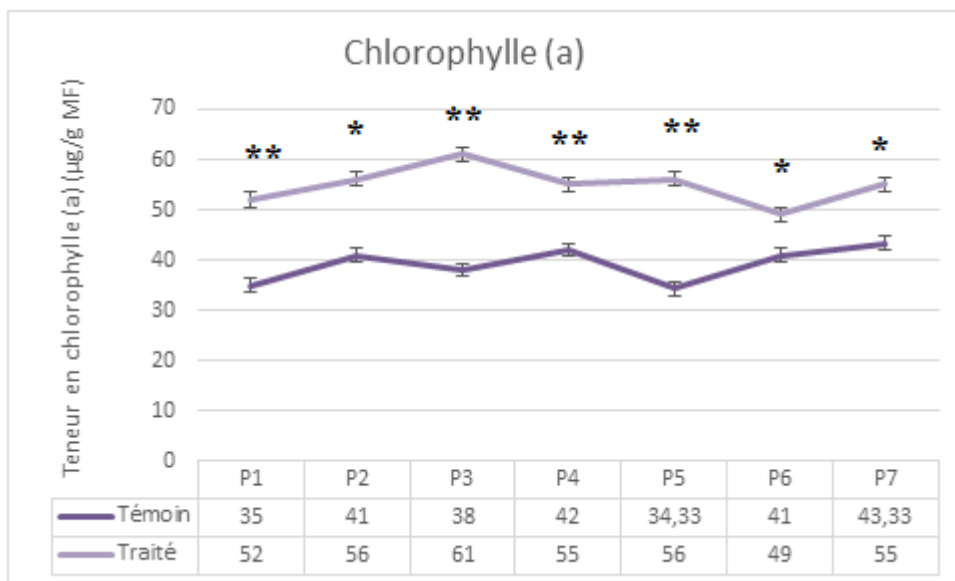


Figure 89 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a) ($\mu\text{g/g MF}$) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)

Les résultats de la concentration en chlorophylle (a) montrent une augmentation significative ou très significative dans le groupe traité comparé au témoin, sur toutes les parcelles analysées. La différence la plus marquée apparaît en P3 : le témoin présente $38 \mu\text{g/g MF}$, tandis que le traité affiche $61 \mu\text{g/g MF}$, ce qui est extrêmement significatif (**).

2.2.1.2. Chlorophylle (b) :

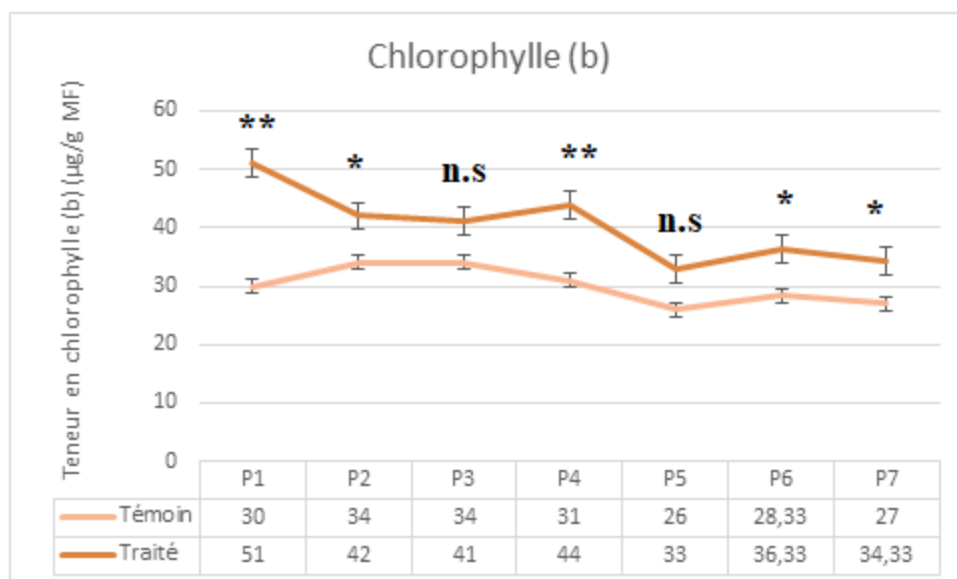


Figure 90 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (b) ($\mu\text{g/g MF}$) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)

Les niveaux de chlorophylle (b) sont généralement plus élevés dans les échantillons traités comparés aux témoins. Les différences sont particulièrement marquées à P1 et P4, où les valeurs augmentent de 30 à 51 $\mu\text{g/g MF}$ et de 31 à 44 $\mu\text{g/g MF}$, avec une grande significativité ($p < 0,01$). À P2, l'augmentation est également significative, passant de 34 à 42 $\mu\text{g/g MF}$ (*), tandis qu'à P3 et P5, les différences ne sont pas statistiquement significatives. Le traitement a un effet notable à P6 (28,33 à 36,33 $\mu\text{g/g MF}$, *) et à P7 (27 à 34,33 $\mu\text{g/g MF}$, *).

2.2.1.3. Chlorophylle (a+b) :

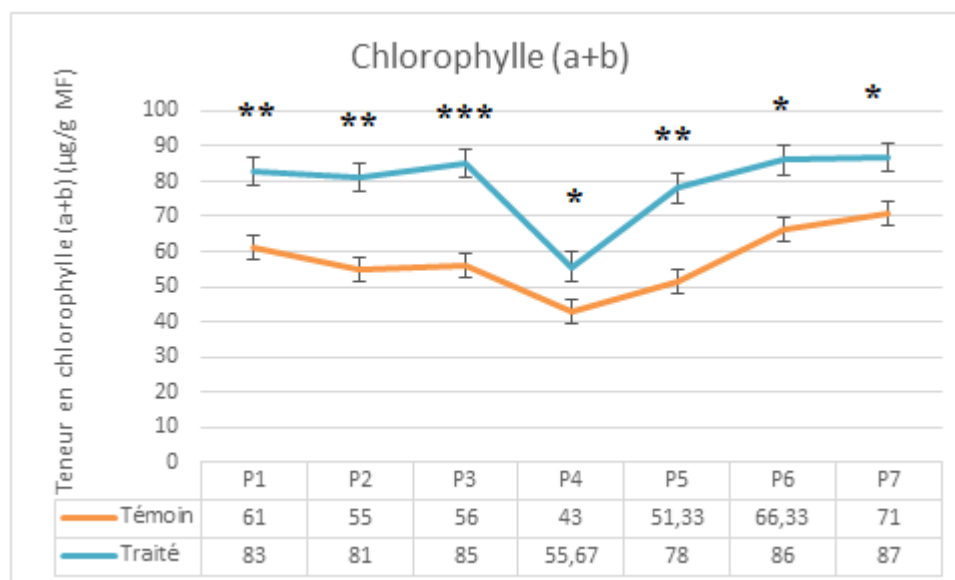


Figure 91 : Analyse comparative de la teneur en chlorophylle (a+b) ($\mu\text{g/g MF}$) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)

Les niveaux de chlorophylle totale (a+b) sont nettement plus élevés dans le groupe traité à chaque étape. Les écarts les plus marqués apparaissent au début de l'étude, notamment à P1, P2 et P3, où les valeurs passent respectivement de 61 à 83 $\mu\text{g/g}$ de MF, de 55 à 81 $\mu\text{g/g}$ et de 56 à 85 $\mu\text{g/g}$. Bien qu'une diminution soit observée à P4, le traitement reste significativement supérieur (43 contre 55,67 $\mu\text{g/g}$ de MF, *). La tendance positive se maintient à P5, P6 et P7, avec des augmentations importantes allant jusqu'à 87 $\mu\text{g/g}$ chez les plantes traitées.

2.2.1.4. Protéines totales :

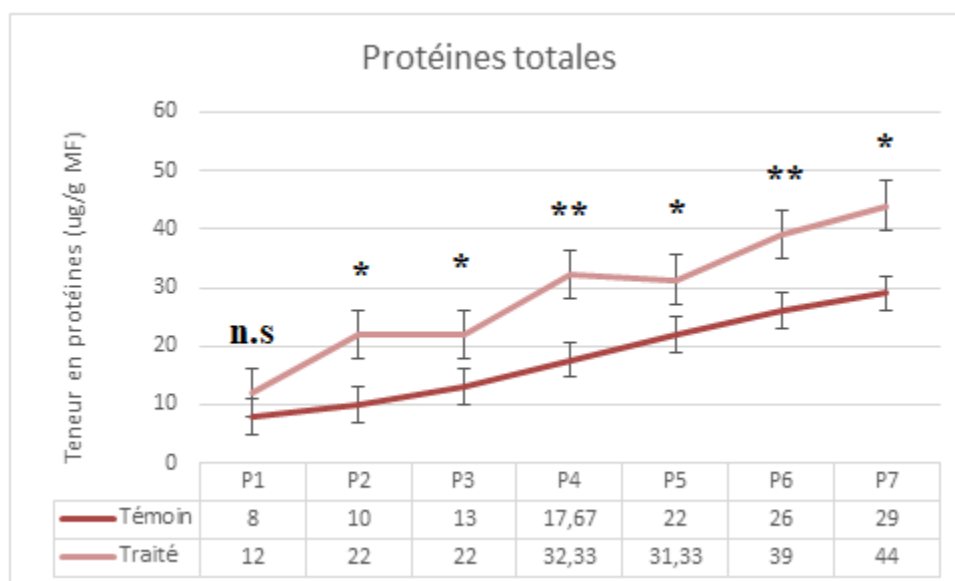


Figure 92 : Analyse comparative de la teneur en protéines totales ($\mu\text{g/g}$ MF) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)

L'analyse de la teneur en protéines totales révèle une augmentation progressive dans toutes les parcelles traitées par rapport aux témoins. Les valeurs des témoins varient de 8 à 29 $\mu\text{g/g}$ de matière fraîche, tandis que celles des plantes traitées se situent entre 12 et 44 $\mu\text{g/g}$. La hausse est particulièrement marquée dans P2 (+120 %) et P4 (+83 %). Selon les analyses statistiques, aucune différence significative n'est détectée à P1, suggérant l'absence d'effet du traitement. En revanche, une différence significative apparaît dès P2 et devient hautement significative à P4 et P6. À P7, l'effet du traitement reste significatif.

2.2.1.5. Proline :

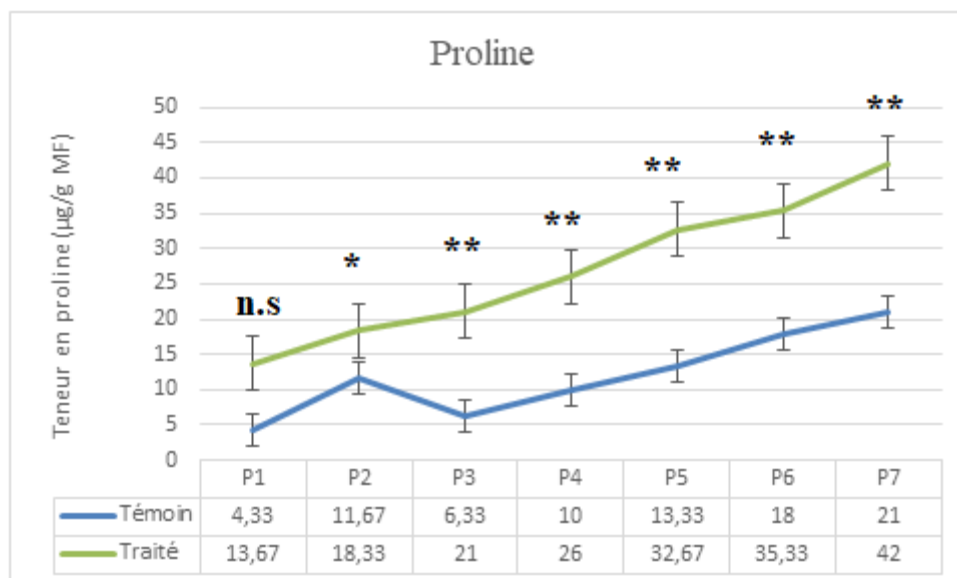


Figure 93 : Analyse comparative de la teneur en proline ($\mu\text{g/g MF}$) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)

La teneur en proline est sensiblement plus élevée chez les plantes traitées, variant de 13,67 à 42 $\mu\text{g/g MF}$, comparée à celle des témoins, qui varie entre 4,33 et 21 $\mu\text{g/g MF}$. Cette augmentation est observée dans toutes les parcelles. Sur le plan statistique, aucune différence significative n'est détectée à P1, ce qui indique l'absence d'effet du traitement. En revanche, à partir de P2, une différence significative apparaît, devenant hautement significative dès P3. Cette forte signification se maintient jusqu'à P7.

2.2.1.6. Sucres solubles :

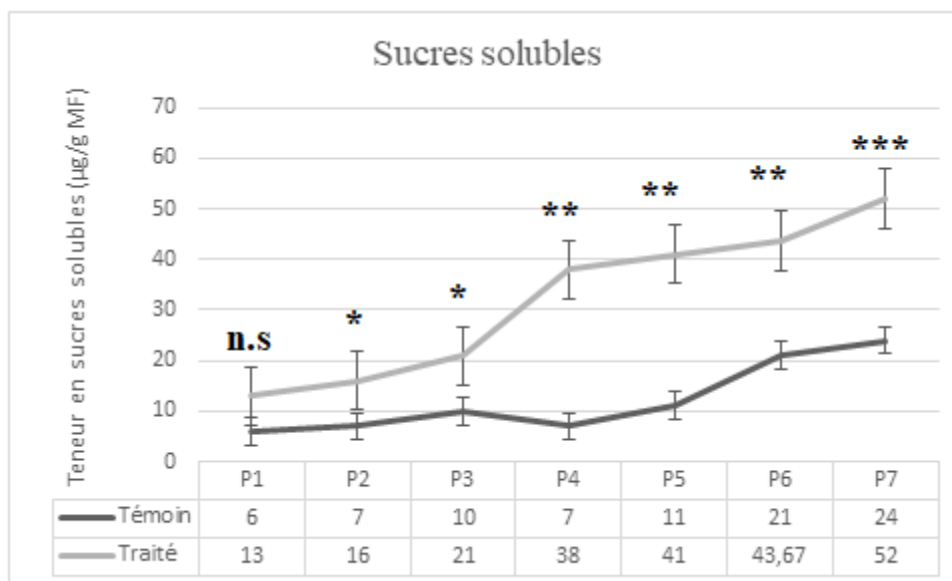


Figure 94 : Analyse comparative de la teneur en sucres solubles ($\mu\text{g/g MF}$) entre les échantillons témoins et traités (Stade rosette 2e campagne)

L'application du traitement entraîne une augmentation notable des sucres solubles dans toutes les parcelles par rapport aux témoins. Les concentrations varient de 6 à 24 $\mu\text{g/g MF}$ (témoin) et de 13 à 52 $\mu\text{g/g MF}$ (traité). Les hausses sont particulièrement marquées dans les parcelles P4 (+443 %) et P5 (+273 %). Aucune différence significative n'est détectée à P1. Néanmoins, une différence significative apparaît dès P2 et P3, devenant très significative à partir de P4. Cette différence s'accroît aux stades P5 et P6 et devient très hautement significative à P7.

2.2.2. Stade floraison :

2.2.2.1. Chlorophylle (a) :

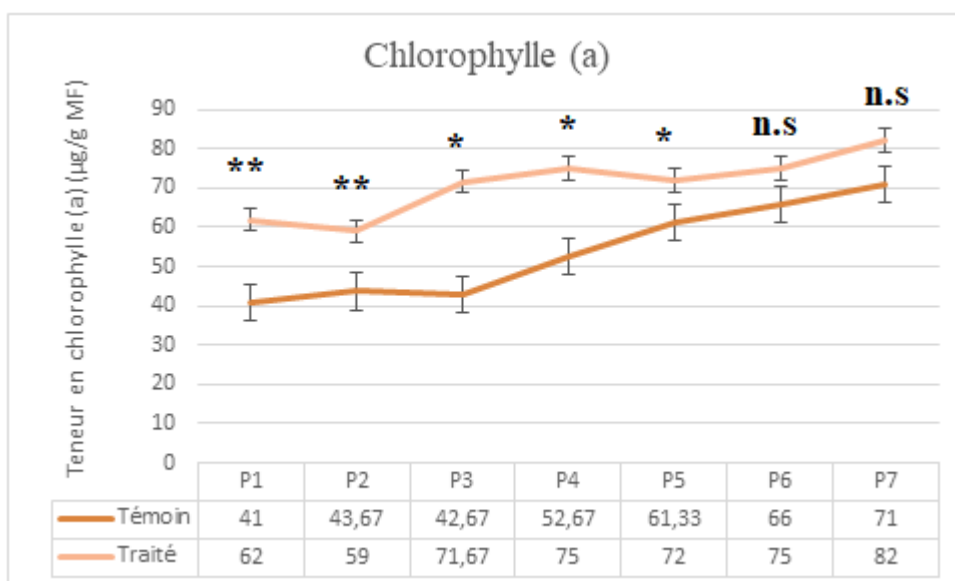


Figure 95 : Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a) au cours du stade floraison (2e campagne)

La quantité de chlorophylle (a) est généralement plus élevée chez les plantes traitées que chez les témoins dans toutes les parcelles analysées. Sur le plan statistique, des différences significatives et très significatives sont observées aux P1 et P2, indiquant un effet précoce du traitement. Cet effet reste significatif aux P3, P4 et P5, ce qui confirme l'impact positif du traitement sur l'accumulation de chlorophylle (a). En revanche, aucune différence significative n'est relevée aux P6 et P7.

2.2.2.2. Chlorophylle (b) :

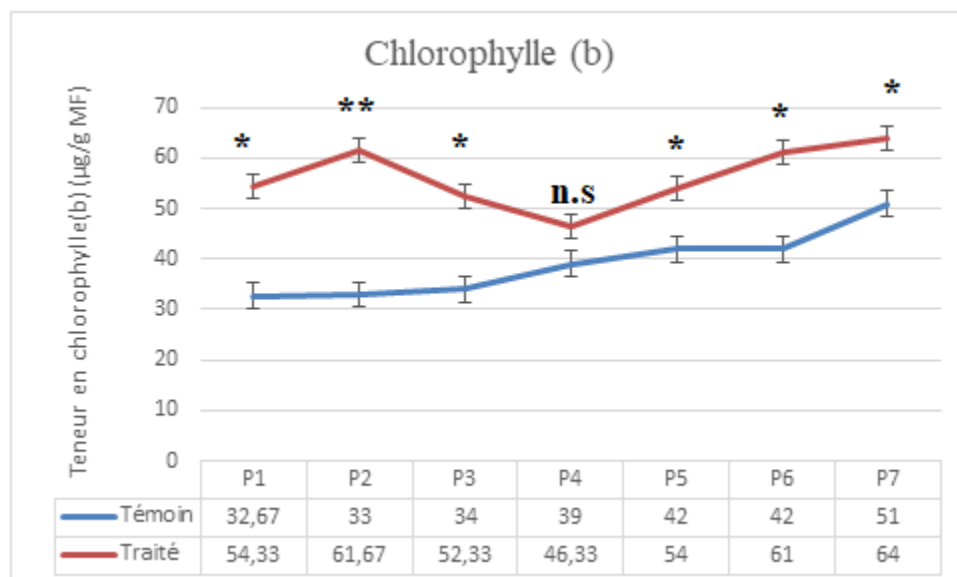


Figure 96 : Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (b) au cours du stade floraison (2e campagne)

La concentration de chlorophylle (b) reste toujours plus élevée dans les parcelles traitées par rapport aux témoins. L'analyse statistique indique des différences significatives dans les parcelles P1, P3, P5, P6 et P7, tandis qu'une différence très significative est observée en P2, indiquant un effet marqué du traitement dans cette zone. En revanche, aucune différence notable n'est détectée en P4.

2.2.2.3. Chlorophylle (a+b) :

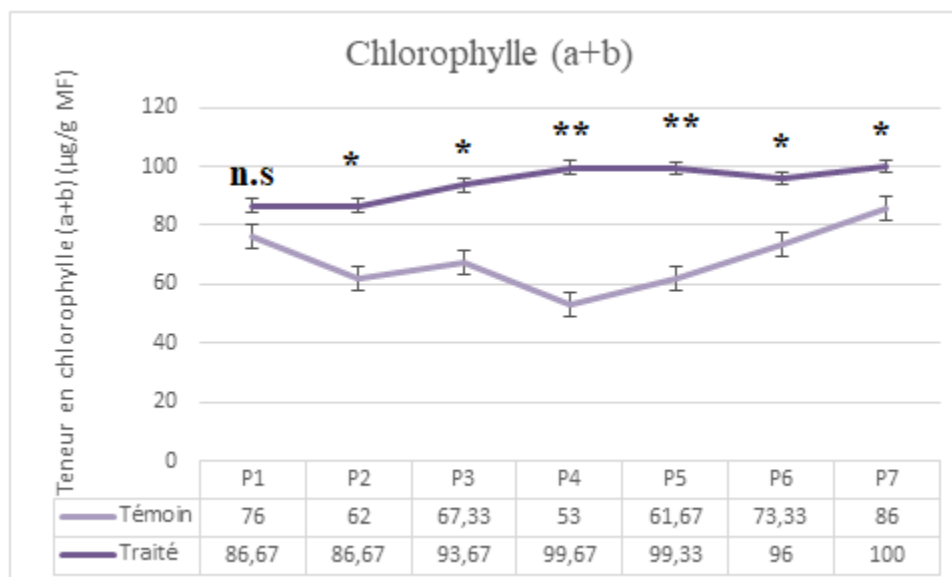


Figure 97 : Effet du traitement sur la teneur en chlorophylle (a+b) au cours du stade floraison (2e campagne)

L'évolution du contenu chlorophyllien montre que les valeurs de chlorophylle (a+b) sont plus élevées que celles du témoin dans toutes les parcelles analysées. L'analyse statistique ne met pas en évidence de différence significative entre le témoin et le traitement au stade P1 (n.s.). Cependant, à partir de P2, des différences significatives apparaissent, avec des niveaux de signification variables selon les stades (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$). Les différences les plus marquées entre les deux modalités sont constatées dans les parcelles P4 et P5.

2.2.2.4. Protéines totales :

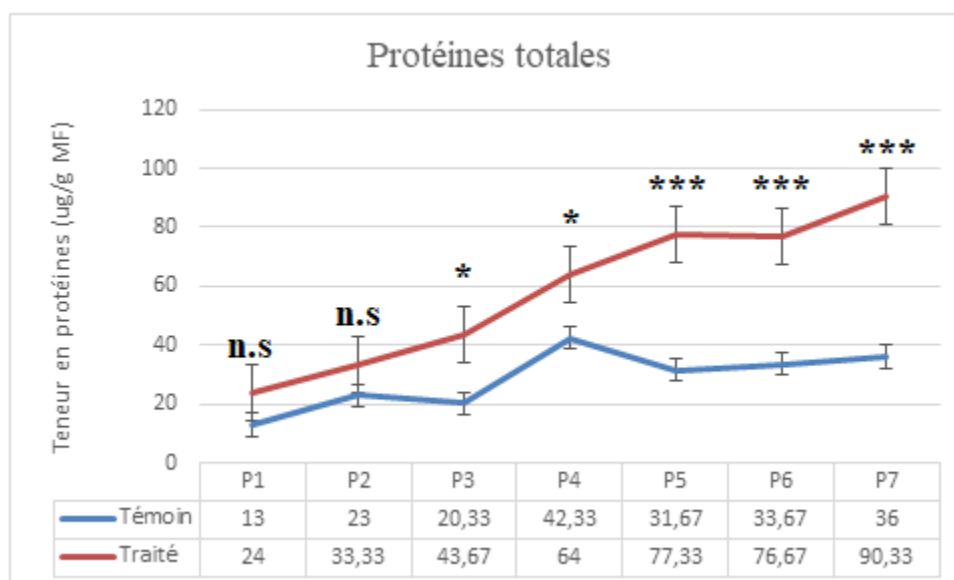


Figure 98 : Effet du traitement sur la teneur en protéines totales au cours du stade floraison (2e campagne)

La comparaison entre les parcelles témoins et traitées met en évidence un effet clair du traitement sur la teneur en protéines totales, en $\mu\text{g/g}$ de matière fraîche. Toutes les parcelles étudiées (P1 à P7) montrent des valeurs dans les zones traitées toujours plus élevées que celles des témoins. Dans P1 et P2, ces différences ne sont pas statistiquement significatives. Cependant, à partir de P3, le traitement entraîne une augmentation significative de la teneur en protéines totales par rapport au témoin. Cet effet s'accroît en P4, puis devient très hautement significatif dans P5, P6 et P7 (***) ($p < 0,001$), indiquant un impact fort et durable du traitement à l'échelle de la parcelle.

2.2.2.5. Proline :

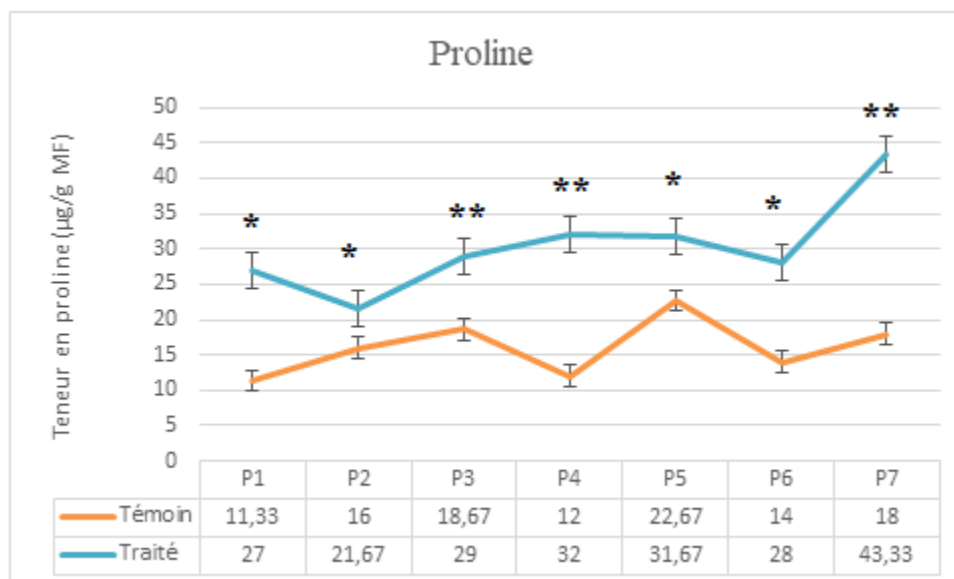


Figure 99 : Effet du traitement sur la teneur en proline au cours du stade floraison (2e campagne)

La comparaison entre les parcelles témoins et traitées montre une accumulation systématique de proline plus importante dans les parcelles traitées pour toutes les sections étudiées (P1 à P7). Dans P1 et P2, la concentration en proline est significativement plus élevée dans les parcelles traitées, ce qui indique une réponse précoce au traitement. Cette différence devient plus prononcée et hautement significative en P3 et P4, même si les valeurs restent élevées dans les parcelles traitées, l'écart avec les témoins restant significatif. En P5 et P6, l'écart, bien que toujours significatif, paraît légèrement réduit. Enfin, en P7, la différence s'amplifie fortement et devient hautement significative.

2.2.2.6. Sucres solubles :

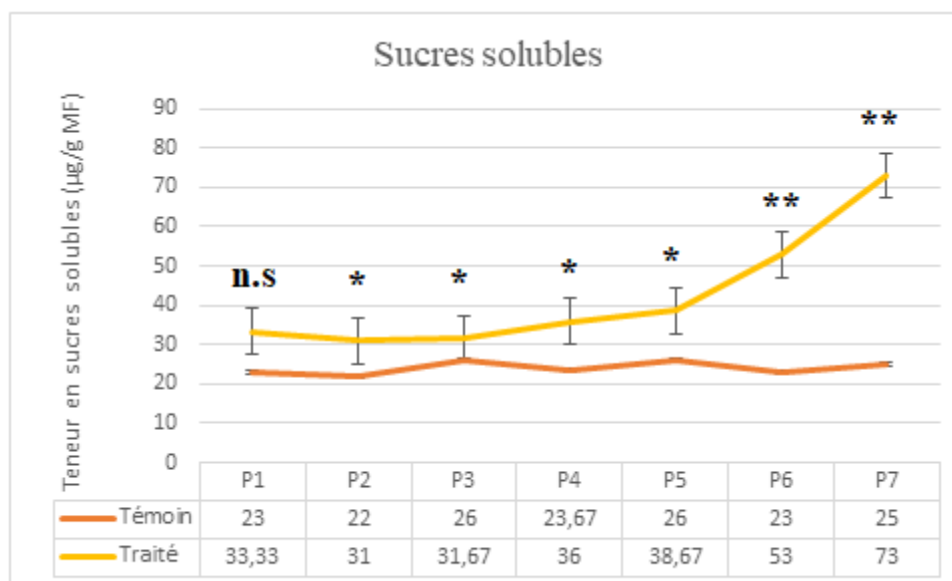


Figure 100 : Effet du traitement sur la teneur en sucre solubles au cours du stade floraison (2e campagne)

La comparaison entre les parcelles témoins et traitées révèle un effet progressif et marqué du traitement sur la teneur en sucres solubles. Sur toutes les parcelles étudiées (P1 à P7), les valeurs dans les parcelles traitées sont plus élevées que dans les témoins. En P1, bien que la teneur en sucres solubles soit supérieure dans les parcelles traitées, cette différence n'est pas statistiquement significative selon le test de Mann-Whitney. De P2 à P5, l'écart entre les deux groupes devient significatif. Cet écart s'accroît nettement dans P6 et P7, où les différences deviennent hautement significatives.

L'analyse regroupée des paramètres physiologiques et biochimiques montre une réponse cohérente et globale des plantes au traitement, traduisant une modification concertée de plusieurs fonctions métaboliques clés. La hausse de la chlorophylle totale dans les parcelles traitées, comparée aux témoins, pourrait indiquer une amélioration du système photosynthétique et une meilleure efficacité de la photosynthèse, comme le suggèrent des études antérieures (Camara et al., 2025 ; Saga et al., 2025 ; Cutolo et al., 2023). Parallèlement, l'augmentation des protéines totales pourrait refléter une stimulation du métabolisme azoté, impliqué dans la croissance, l'activité enzymatique et la défense. Leur accumulation progressive indique une assimilation azotée plus efficace et une incorporation accrue dans des composés fonctionnels, favorisant l'optimisation du métabolisme global (Sheikh et al., 2024 ; Zhang et al., 2024). La hausse notable de proline dans les parcelles traitées indique aussi l'activation de mécanismes physiologiques d'adaptation, puisqu'elle intervient dans l'osmorégulation, la stabilisation membranaire et la protection cellulaire. Cette observation est en accord avec les travaux de Hosseinifard et al. (2022) et Nguyen et al. (2021), qui considèrent la proline comme un marqueur essentiel des ajustements physiologiques face aux contraintes environnementales. De plus, l'augmentation des sucres solubles dans ces parcelles témoigne probablement d'un changement dans le métabolisme du carbone. Ces sucres, qui servent de source d'énergie, de réserve et de molécules osmotiques actives (Cui et al., 2024 ; Bozdar et al., 2025), pourraient indiquer une amélioration de l'activité photosynthétique et une redistribution plus efficace des assimilats, permettant aux plantes de répondre à des besoins énergétiques et physiologiques accrus. En résumé, la convergence de ces réponses reflète une amélioration globale du fonctionnement physiologique des plantes traitées, suggérant que ce traitement pourrait être un levier utile pour optimiser leurs performances métaboliques et leur capacité d'adaptation.

3. Paramètres agronomiques :

3.1. Nombre moyen de plantes/m² :

Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($p < 0,05$) ; les barres qui partagent la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test statistique de Mann-Whitney.

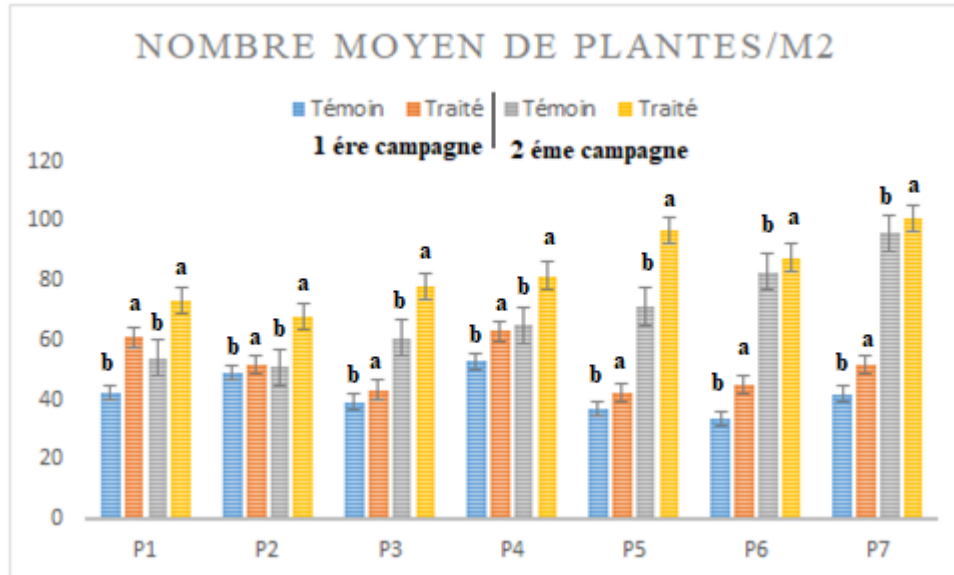


Figure 101 : effet du traitement sur le nombre moyen de plantes/m² durant la première et la seconde campagne d'étude

Lors de la première campagne, le nombre moyen de plantes par mètre carré varie entre 33 et 53 plantes/m² pour les variétés témoins, tandis que pour les variétés traitées, il se situe entre 42 et 63 plantes/m². Par contre, pendant la seconde campagne, on observe une fluctuation des valeurs entre 51 et 96 plantes par mètre carré chez les témoins, tandis que chez les traités, elles varient entre 68 et 101. D'après le test de Mann-Whitney, on constate un nombre moyen de plantes nettement supérieur pour les variétés traitées parmi toutes celles testées ($p < 0,05$), ce qui indique une influence positive du traitement sur l'installation de la culture.

3.2. Nombre de branches fructifères par plantes :

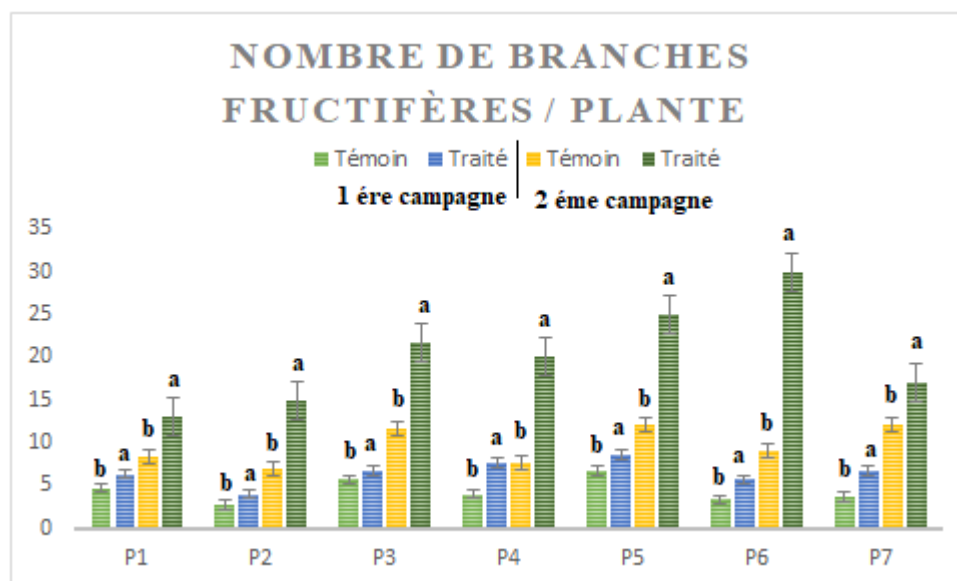


Figure 102 : effet du traitement sur le nombre de branches fructifiées durant la première et la seconde campagne d'étude

L'examen du nombre de branches productrices par plante en fonction du traitement montre une hausse générale de la fructification chez les variétés traitées comparativement à celles qui ont servi de témoins. On note cet effet dès la première campagne et il s'accroît lors de la seconde, ce qui laisse supposer un impact cumulatif du traitement. Les disparités entre les deux modalités sont statistiquement significatives pour toutes les variétés analysées ($p < 0,05$).

3.3. Nombre de branches non fructifères par plante :

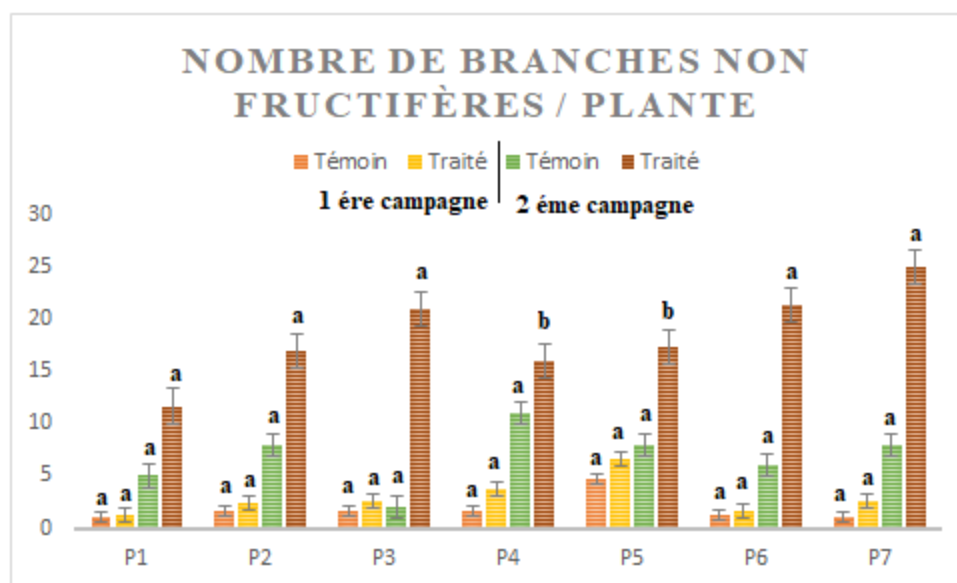


Figure 103 : effet du traitement sur le nombre de branches non fructifiées durant la première et la seconde campagne d'étude

Durant la première campagne, les témoins présentent entre 0,1 et 4 branches non fructifères par plante, tandis que les variétés traitées affichent entre 1 et 6 branches. Toutefois, la deuxième campagne met en évidence une augmentation notable du nombre de branches non porteuses, particulièrement au sein des variétés traitées. Les moyennes atteignent des niveaux beaucoup plus élevés et on note des valeurs allant de 2 à 11 branches chez les témoins, par rapport à 11 et 25 branches non fructifères par plante pour les variétés traitées. L'analyse statistique ne démontre aucune différence notable entre les groupes témoins et traités, quel que soit le lot examiné pour la plupart des variétés.

3.4. Taux d'avortement :

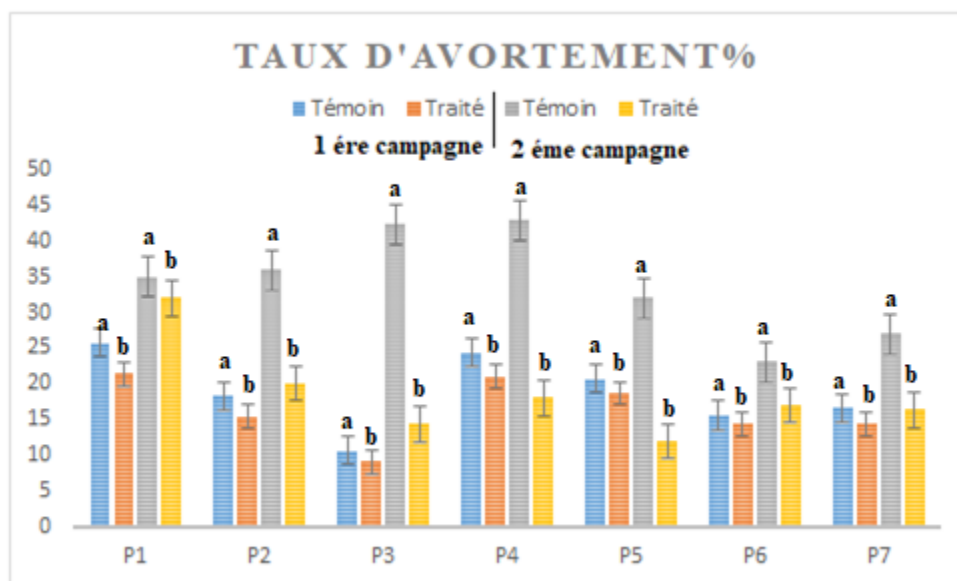


Figure 104 : effet du traitement sur le taux d'avortement durant la première et la seconde campagne d'étude

Durant la première campagne, pour la plupart des paramètres, les lots traités présentent des taux d'avortement soit inférieurs, soit proches de ceux des témoins. Cependant, lors de la seconde campagne, les lots témoins atteignent leurs sommets, notamment pour la variété P3 (RGT CUZZCO) et P4, la variété locale. Les échantillons analysés présentent constamment des taux inférieurs à ceux des témoins, ce qui confirme la continuité de l'impact positif du traitement. L'examen statistique confirme l'existence de disparités notables pour toutes les variétés, indépendamment des campagnes concernées.

3.5. Nombre de graines / silique :

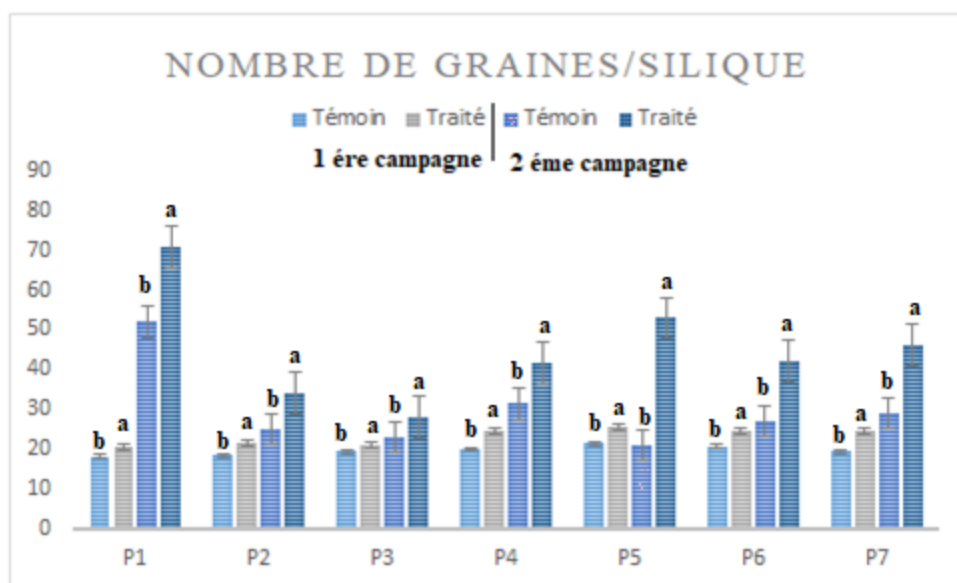


Figure 105 : effet du traitement sur le nombre de graines par silique durant la première et la seconde campagne d'étude

L'analyse du nombre de graines par silique lors de la première campagne révèle que le traitement induit une augmentation graduelle mais régulière du nombre de graines par rapport aux témoins pour toutes les variétés observées. Néanmoins, les écarts sont souvent négligeables, indiquant un effet bénéfique, bien que constant du traitement dans ces conditions. Cependant, lors de la deuxième campagne, l'impact du traitement se révèle beaucoup plus prononcé. Pour toutes les variétés, les plantes ayant bénéficié d'un traitement affichent des valeurs nettement supérieures à celles du groupe témoin, avec des augmentations particulièrement prononcées pour P1(RGT MUZZICAL), P4(LIGNEE), P5(SY MATTEO), P6(SY HARNAS) et P7(SY GLORIETTA). Selon le test de Mann-Whitney, les différences sont statistiquement significatives pour les deux campagnes examinées.

3.6. Poids de 1000 graines :

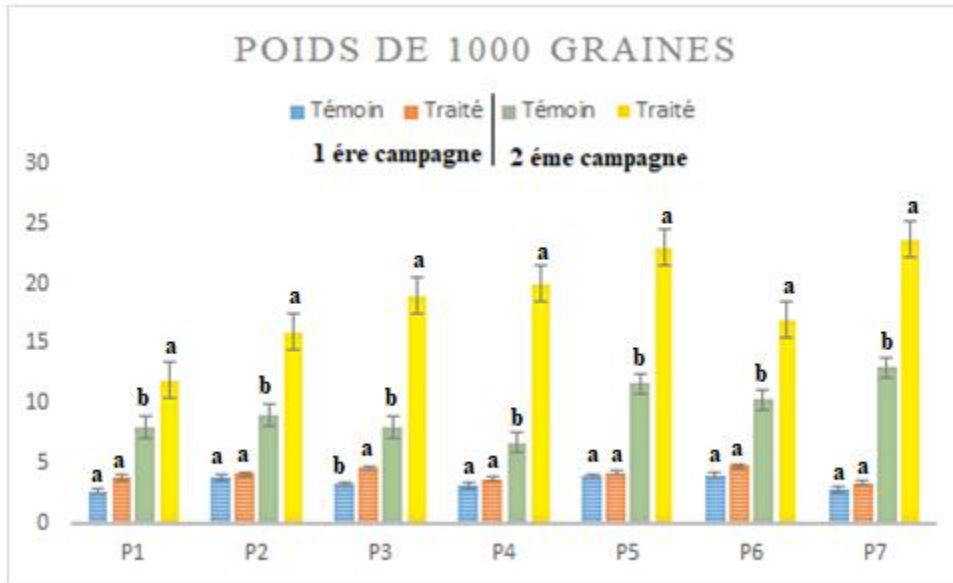


Figure 106 : effet du traitement sur le poids de 1000 graines par silique durant la première et la seconde campagne d'étude

La première campagne montre des valeurs généralement basses et à peu près équivalentes entre les groupes témoins et traités, sans écarts significatifs pour la plupart des variétés selon le test statistique. Cependant, le traitement provoque une légère hausse du poids de 1 000 graines pour toutes les variétés. Durant la seconde campagne, l'impact du traitement se manifeste nettement. Pour toutes les variétés, les lots soumis au traitement affichent des poids de 1000 graines nettement plus élevés que ceux des témoins. On note les hausses les plus significatives pour P3 (RGT CUZZCO), P4 (LIGNEE), P5 (SY MATTEO) et P7 (SY GLORIETTA), où les chiffres atteignent leurs maxima.

3.7. Rendement réel (Qx/ha) :

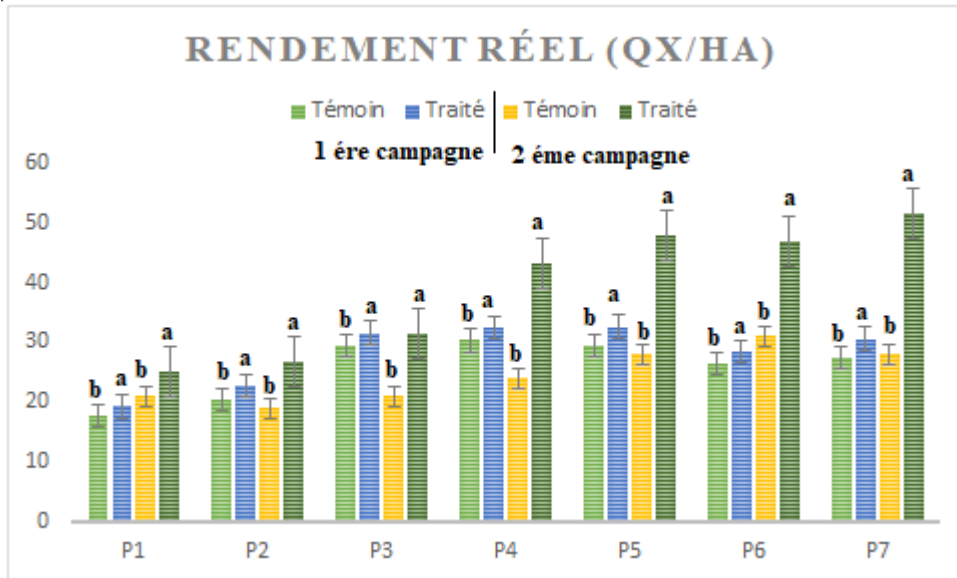


Figure 107 : effet du traitement sur le rendement réel durant la première et la seconde campagne d'étude

L'analyse comparative du rendement réel (qx/ha) entre les groupes témoin et traité, lors des deux campagnes agricoles, révèle un impact positif continu du traitement sur toutes les variétés étudiées. Durant la première campagne, les plantes traitées affichent des rendements significativement plus élevés que ceux des témoins, avec une variabilité modérée où les valeurs des témoins s'étendent de 17,6 à 30 qx/ha contre 19,22 à 32,5 qx/ha chez les variétés traitées. En revanche, la deuxième campagne se distingue par une hausse significative générale des rendements, particulièrement prononcée dans les variétés qui ont été traitées. Le rendement réel durant cette saison agricole se situe entre 19 et 31 qx/ha chez le groupe témoin alors qu'il atteint de 25 à 51,66 qx/ha pour les modalités traitées.

Chapitre IV. Résultats et discussion

Le nombre de plantes par mètre carré est un indicateur clé du succès de la mise en place de la culture (Manson et al., 2024). Les résultats montrent que, pour les deux campagnes, les variétés traitées présentent toujours des densités supérieures à celles du groupe témoin. Cette différence, confirmée statistiquement, suggère que le traitement favorise l'installation initiale, probablement en améliorant la germination, la vigueur des plantules ou leur tolérance aux stress abiotiques précoces. Ces résultats concordent avec ceux de (Noble et al., 2023 ; Lei et al., 2021 ; Cardarelli et al., 2022). Le traitement augmente significativement le nombre de branches porteuses dès la première récolte, avec une progression encore plus importante lors de la seconde. Cette augmentation de la ramification portée par des fruits reflète une meilleure attribution des ressources aux organes reproducteurs, renforçant ainsi le potentiel de production. Des études antérieures montrent aussi que l'augmentation du nombre de branches et de ramifications fructifères est un levier clé pour améliorer le rendement chez le colza (Wang et al., 2022). Cependant l'évolution du nombre de branches non fructifères varie davantage selon les campagnes. Lors de la première, ces valeurs restent basses, tandis que la seconde montre une augmentation plus importante, surtout chez les plantes traitées. Cependant, l'absence de différence significative entre témoins et traités suggère que ce paramètre dépend principalement des conditions de croissance et de la vigueur globale des plantes, plutôt que du traitement. Comme le soulignent plusieurs études (Dhami et al., 2020 ; Toca et al., 2022), une croissance végétative plus active, stimulée par un environnement favorable, peut entraîner la formation de branches non porteuses, sans nuire nécessairement au rendement final si les autres composantes de la production sont conservées.

Les taux d'avortement confirment un effet positif du traitement, surtout lors de la seconde campagne, où les plantes témoins présentent des valeurs plus élevées que les lots traités. Cette réduction de l'avortement traduit une meilleure réussite de la fécondation et du remplissage des siliques. Conformément à la littérature, ce phénomène est généralement associé à un meilleur état physiologique des plantes et à une plus grande tolérance aux stress durant la phase reproductive (Hauser et al., 2025 ; Chen et al., 2024)

L'augmentation du nombre de graines par silique observée chez les plantes traitées, particulièrement lors de la seconde campagne, suggère une amélioration de la réussite de la fécondation et du remplissage des siliques. La littérature indique que ces composantes du rendement sont fortement dépendantes de l'état physiologique de la plante et de sa capacité à mobiliser les assimilats pendant la phase reproductive (Wang et al., 2023 ; Ali et al., 2022)

Chapitre IV. Résultats et discussion

Lorsque les conditions de croissance sont favorables, ou lorsque la plante bénéficie d'un meilleur équilibre nutritionnel, le nombre de graines par silique tend à augmenter. Le poids de mille graines suit la même logique. Plusieurs études montrent que ce paramètre est relativement stable en conditions limitantes, mais qu'il augmente lorsque la photosynthèse et le transfert des réserves vers les graines sont optimisés (Vakulenko et al., 2025 ; Saroha et al., 2023). L'effet combiné de ces améliorations se reflète sur le rendement final, qui dépend de l'interaction entre la densité de plantes, la fructification et le remplissage des graines. Conformément à la littérature sur le colza, l'augmentation simultanée de plusieurs composantes du rendement explique les performances supérieures observées dans les parcelles traitées, confirmant un effet global et cohérent du traitement sur la productivité

4. Dosage des résidus de pesticides :

4.1 Première campagne :

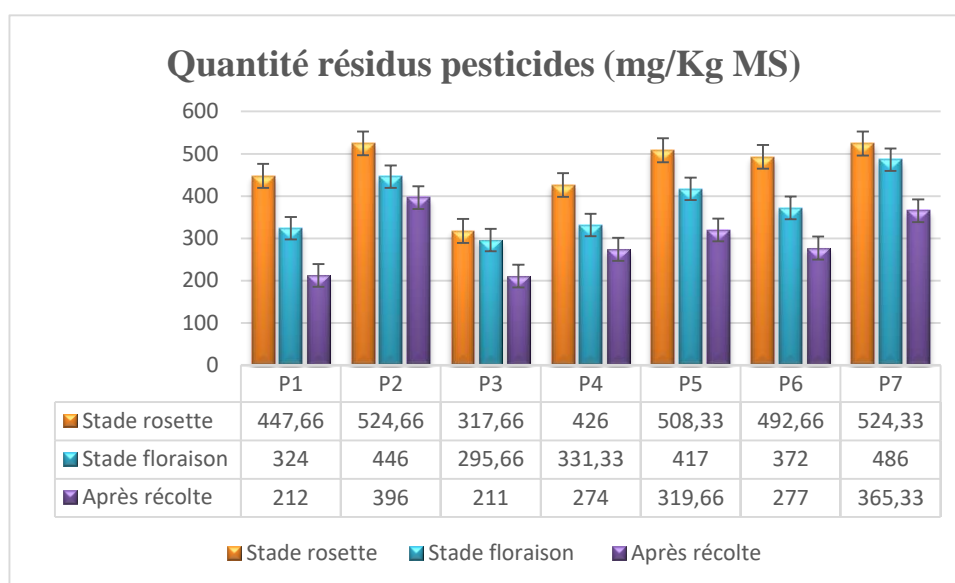


Figure 108 : Effet du traitement sur la quantité de pesticides durant stade rosette, stade floraison et après récolte (première campagne)

Tableau 69 : Synthèse des analyses statistiques : Friedman et Kruskal-Wallis (première campagne)

	Test statistique	Df	H	P
Résidu 1	Kruskal-Wallis	6	12.5263	0.013
Résidu 2		6	14.8002	0.021
Résidu 3		6	15.2348	0.018
Comparaison entre les stades				
Résidu 1 Résidu 2 Résidu 3	Friedman	2	14.36	0.1046

Résidu 1 : Résidu de pesticides au stade rosette

Résidu 2 : Résidu de pesticides à la floraison

Résidu 3 : Résidu de pesticides après récolte

On constate que, pour toutes les parcelles, la teneur en résidus est la plus élevée au stade de rosette, avec des valeurs de 317,66 mg/kg (P3) à 524,66 mg/kg (P2). Au stade de floraison, ces concentrations chutent de façon significative, témoignant d'une dégradation progressive des pesticides ou de leur transfert vers d'autres compartiments. Enfin, après récolte, les résidus atteignent leurs niveaux les plus faibles, entre 211 mg/kg (P3) et 396 mg/kg (P2), ce qui confirme que les traitements sont en partie éliminés au fil du temps (figure x). Les résultats montrent que la quantité de résidus varie significativement selon les parcelles et les stades végétatifs. Le test de Kruskal–Wallis indique que ces différences entre parcelles sont significatives, suggérant que le type de sol, les conditions locales ou les pratiques culturales jouent un rôle dans la quantité de résidus. De leur côté, les analyses par le test de Friedman révèlent que la concentration de résidus évolue au cours du cycle de la plante, avec une baisse notable après les stades de rosette et de floraison (Tableau x).

4.2 Seconde campagne :

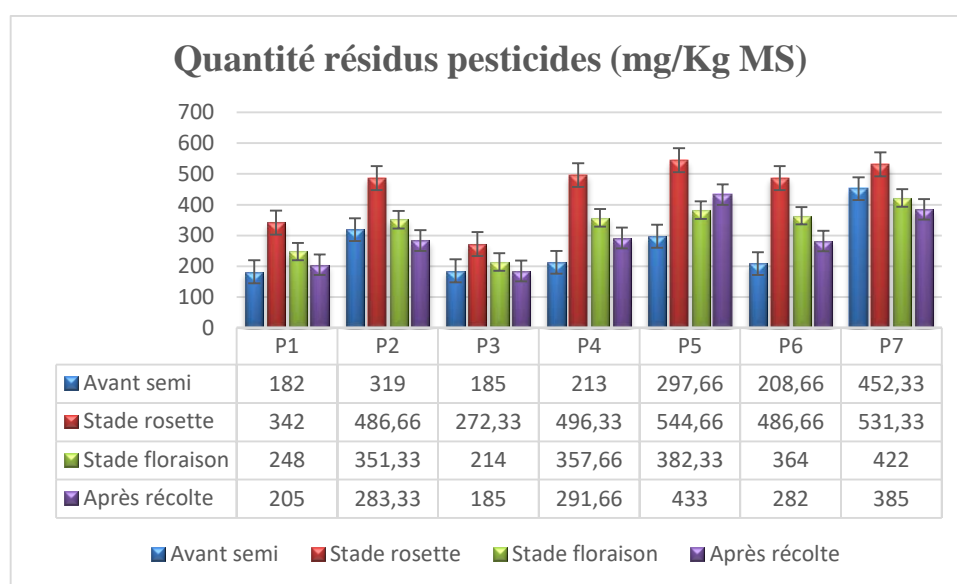


Figure 109 : Effet du traitement sur la quantité de pesticides avant semi, stade rosette, stade floraison et après récolte (seconde campagne)

Tableau 70 : Synthèse des analyses statistiques : Friedman et Kruskal-Wallis (seconde campagne)

	Test statistique	Df	H	P
Résidus 1	Kruskal-Wallis	6	10.4120	0.011
Résidus 2		6	14.8178	0.030
Résidus 3		6	14.2135	0.012
Comparaison entre les stades				
Résidus 1 Résidus 2 Résidus 3 Résidus 4	Friedman	3	11.82	0.008

Résidus 1 : Résidus de pesticides avant semi

Résidus 2 : Résidus de pesticides au stade rosette

Résidus 3 : Résidus de pesticides à la floraison

Résidus 4 : Résidus de pesticides après récolte

Les résultats montrent que la quantité de résidus de pesticides varie à la fois selon les parcelles et les stades de développement de la plante. Dans toutes les parcelles, on observe une augmentation nette des résidus au stade de rosette par rapport à la période avant semis. Cette accumulation semble atteindre un maximum dans certaines parcelles, comme P5 et P7, où les concentrations dépassent 500 mg/kg MS. Au stade de floraison, la quantité de résidus diminue dans la plupart des parcelles, indiquant une dégradation progressive ou un transfert partiel des pesticides. Après la récolte, on note une nouvelle diminution, bien que les valeurs restent relativement élevées dans certaines parcelles (notamment P5 et P7), suggérant une persistance des résidus dans le sol ou les tissus végétaux. Les résultats du test de Kruskal–Wallis confirment l’existence de différences significatives entre les parcelles, suggérant que les caractéristiques du sol, les conditions locales et les pratiques culturales exercent une influence déterminante sur les niveaux de résidus. En parallèle, le test de Friedman met en évidence une dynamique temporelle de ces résidus au cours du cycle de développement de la plante

Chapitre IV. Résultats et discussion

Les deux campagnes montrent une évolution similaire des résidus de pesticides, avec une accumulation maximale au stade de rosette, suivie d'une diminution à la floraison et après la récolte. Cette dynamique reflète à la fois l'absorption élevée des pesticides pendant la phase de forte croissance et leur dégradation progressive, leur dilution dans la biomasse ou leur transfert vers d'autres compartiments du système sol-plante (Li et al., 2022 ; Uyen et al., 2025). Les différences significatives observées entre parcelles s'expliquent non seulement par les caractéristiques du sol et les pratiques culturales, mais aussi par le fait que chaque parcelle correspond à une variété différente de colza. Les variétés peuvent en effet se distinguer par leur aptitude à absorber, stocker et métaboliser les pesticides, ce qui se répercute directement sur les niveaux de résidus observés. De nombreuses études montrent que le génotype à l'échelle de l'espèce comme de la variété exerce une influence majeure sur ces processus, à travers des différences de morphologie, de structure des tissus et d'activité des systèmes enzymatiques impliqués dans la détoxification (Namiki et al., 2022 ; Li, z., 2025 ; Michalko et al., 2024). La persistance de niveaux élevés de résidus dans certaines parcelles, y compris après la récolte, s'explique également par la nature des produits appliqués. Dans cette étude, les trois pesticides (Colzor Trio, Callisto et Toprex) ont été appliqués en mélange, alors que leurs comportements de dégradation dans le sol et les plantes sont très contrastés. En effet, Colzor Trio et Callisto présentent des demi-vies relativement courtes, de l'ordre de quelques semaines, tandis que Toprex est caractérisé par une demi-vie beaucoup plus longue, pouvant s'étendre sur plusieurs mois voire plusieurs années selon les conditions édaphiques et climatiques. Ainsi, les résidus mesurés lors de la deuxième campagne sont vraisemblablement dominés par les composés les plus persistants, en particulier Toprex, ce qui est cohérent avec les travaux montrant que les molécules à longue demi-vie tendent à s'accumuler d'une campagne culturale à l'autre (Wang et al., 2024 ; Neuwirthová et al., 2019).

Discussion générale :

Les résultats des deux campagnes révèlent une réponse systémique du sol – plante au traitement phytosanitaire, influencée par la dynamique temporelle de la culture, les caractéristiques du sol et la diversité variétale du colza. L'ensemble des paramètres physico-chimiques, physiologiques, biochimiques, agronomiques et résiduels indique que l'effet du traitement dépasse une simple action ponctuelle et provoque des ajustements progressifs et interconnectés qui affectent le fonctionnement global de l'agroécosystème. Cette vision intégrée est cohérente avec les travaux de Moulin-Rouyard et al. (2024) et de Lucas et al. (2023), qui montrent que les intrants phytosanitaires peuvent entraîner des réorganisations durables des systèmes sol–plante au-delà de leur fonction de protection des cultures. Sur le plan des sols, les deux campagnes révèlent que les modifications les plus marquantes interviennent durant les premières phases du cycle culturel, puis se stabilisent progressivement. Les ajustements du pH, du carbone organique et du phosphore assimilable observés avant semis et au stade rosette traduisent une réorganisation rapide de la chimie du sol sous l'effet combiné du traitement, de la minéralisation des résidus végétaux et de l'activité microbienne. Des tendances similaires ont été rapportées par Moni et al. (2025), Yasir et al. (2025) et Mabagala et al. (2022), qui indiquent que les pesticides et leurs coformulants peuvent stimuler temporairement la minéralisation de la matière organique et la libération du phosphore, augmentant ainsi la fertilité à court terme. Cette phase initiale constitue une période de forte sensibilité du sol, durant laquelle la disponibilité des nutriments et la structure des agrégats sont particulièrement réactives, comme l'ont également observé Vilček et al. (2025) dans des sols cultivés sous colza. La relative stabilité observée aux stades ultérieurs, notamment en floraison, suggère que le système sol atteint un nouvel état d'équilibre, dans lequel les processus biologiques et chimiques s'ajustent aux conditions induites par le traitement. Ce comportement est comparable à celui décrit par Sim et al. (2022) et Yasir et al. (2025), qui montrent que les sols soumis à des intrants chimiques présentent souvent une phase transitoire suivie d'une stabilisation fonctionnelle. Dans ce contexte, les caractéristiques physiques du sol du site expérimental jouent un rôle déterminant dans l'expression de ces dynamiques. La texture sableuse-argileuse, marquée par une prédominance du sable associée à une proportion notable d'argile, confère au sol à la fois une bonne perméabilité et une capacité modérée de rétention en eau et en nutriments, conditions favorables au développement du colza. La fraction argileuse contribue également à la rétention partielle des résidus de pesticides, limitant leur lessivage et modulant

leur dégradation au cours du cycle végétatif (Liu et al., 2024). Par ailleurs, l'homogénéité granulométrique du terrain renforce l'interprétation selon laquelle les différences observées entre parcelles traitées et témoins sont principalement attribuables aux traitements appliqués, plutôt qu'à des variations intrinsèques du sol. L'ensemble de ces observations est conforme aux effets attendus d'un sol sableux-argileux sur les cultures oléagineuses (Bhatt et al., 2025 ; Wang et al., 2025).

Après la récolte, l'augmentation du carbone organique, du phosphore assimilable et, dans plusieurs parcelles, du calcaire actif et de la porosité suggère que le traitement contribue à une amélioration durable de la fertilité chimique et de la structure physique du sol. Des résultats similaires ont été obtenus par Khan et al. (2023) et Yu et al. (2021), qui ont montré que la combinaison d'apports phytosanitaires et de résidus de cultures peut conduire à une accumulation de carbone stable et à une meilleure agrégation des sols. Toutefois, la forte variabilité entre parcelles observée dans cette étude confirme, comme l'ont souligné Zhang et al. (2022), que ces effets sont fortement dépendants des propriétés initiales du sol et de la dynamique racinaire des variétés cultivées. Ces effets sont particulièrement importants dans un contexte de production du colza, culture exigeante en nutriments, car ils favorisent à la fois la disponibilité des éléments majeurs et la stabilité du milieu édaphique. Toutefois, la variabilité observée entre parcelles indique que l'ampleur de ces améliorations dépend étroitement des propriétés initiales du sol et de l'interaction avec les variétés cultivées. Ces évolutions peuvent s'expliquer par plusieurs mécanismes agissant de manière complémentaire. La restitution des résidus de colza, en particulier les racines et les parties aériennes laissées après la récolte, enrichit le sol en matière organique fraîche, ce qui stimule l'activité microbienne et favorise la formation de fractions organiques plus stables. Cette activité biologique accrue contribue également à la mobilisation du phosphore sous des formes plus facilement assimilables. Par ailleurs, les modifications du pH ainsi que les cycles d'humectation et de dessèchement peuvent entraîner une redistribution des carbonates, augmentant la fraction de calcaire actif. L'action conjointe des racines, des microorganismes et des processus physico-chimiques améliore progressivement l'agrégation des particules, ce qui se traduit par une porosité plus élevée et un sol plus aéré et plus stable, favorable à la conservation de la matière organique et à la nutrition des cultures suivantes (Rötzer et al., 2023 ; Guhra et al., 2021 ; Li et al., 2023). Cette hétérogénéité spatiale est cohérente avec les réponses physiologiques et biochimiques mesurées chez les plantes. L'augmentation de la chlorophylle, des protéines, de la proline et des sucres

solubles dans les parcelles traitées traduit une stimulation globale du métabolisme végétal. Phénomène largement documenté dans la littérature. Par exemple, Ratajczak et al. (2023) et Yuan et al. (2025) ont montré que certains traitements phytosanitaires peuvent indirectement améliorer l'efficacité photosynthétique, tandis que Nadais et al. (2024) ont mis en évidence l'augmentation de la proline comme marqueur de l'activation des mécanismes de tolérance au stress. De même, l'accumulation de sucres solubles observée ici est cohérente avec les résultats de Cui et al. (2024), qui associent ces composés à une meilleure gestion énergétique et osmotique des plantes. Ces ajustements physiologiques se traduisent directement sur les performances agronomiques. La densité plus élevée des plantes dans les parcelles traitées, l'augmentation du nombre de branches fructifères et la réduction des taux d'avortement sont en accord avec les observations de Gill et al. (2023) et Wang et al. (2022), qui montrent que l'amélioration de l'état physiologique des plantes favorise l'installation, la floraison et la nouaison. L'augmentation du nombre et du poids des graines observée dans cette étude est également cohérente avec les travaux de Sun et al. (2025) et Szot et al. (2025). La dimension variétale constitue un élément central dans l'interprétation de ces résultats. Chaque parcelle étant associée à une variété distincte de colza, les différences observées entre parcelles reflètent non seulement l'effet du sol et du traitement, mais aussi les caractéristiques propres des génotypes. Cette observation rejoint les travaux de Haelterman et al. (2024) et Ahmad et al. (2023), qui montrent que les variétés de colza diffèrent fortement par leur architecture, leur activité racinaire et leur capacité métabolique, ce qui conditionne leur réponse aux intrants et leur interaction avec le sol.

Concernant les résidus de pesticides, les deux campagnes montrent une dynamique temporelle cohérente, caractérisée par une accumulation maximale au stade de rosette suivie d'une diminution progressive à la floraison et après la récolte. Cette évolution reflète la forte absorption pendant la phase de croissance active, puis la dégradation, la dilution dans la biomasse et les transferts vers le sol. Les différences significatives entre parcelles confirment que le comportement des résidus dépend étroitement de l'interaction entre les propriétés du sol et les caractéristiques des variétés, notamment leur capacité à absorber, stocker et métaboliser les molécules appliquées ces résultats sont en accord avec les modèles décrits par Li et al. (2022) et Jiménez-Ortega et al. (2025) pour de nombreuses cultures oléagineuses. Enfin, la persistance de résidus relativement élevés lors de la seconde campagne s'explique aussi par la nature des produits utilisés. Le mélange appliqué associe des substances à demi-vie courte,

comme Colzor Trio et Callisto, et un produit beaucoup plus persistant, Toprex. Il est donc probable que les résidus mesurés tardivement soient dominés par les molécules les plus stables, en particulier Toprex. De nombreuses études ont mis en évidence que l'utilisation répétée de fongicides à forte persistance conduit à leur accumulation progressive dans les sols agricoles. Même lorsqu'ils sont appliqués en mélange avec des substances plus rapidement dégradables, ces composés stables peuvent s'accumuler au fil du temps, comme l'ont notamment rapporté Riedo et al. (2023) et Wang et al. (2024).

Bien que les données collectées soient riches, certaines limites doivent être considérées pour l'interprétation des résultats. D'abord, chaque parcelle étant associée à une seule variété de colza, il existe une certaine confusion entre les effets liés à la variété et ceux liés aux propriétés du sol. Il est donc difficile de distinguer précisément la part de variabilité due au génotype par rapport à celle due aux caractéristiques édaphiques. Ensuite, l'étude couvre deux campagnes culturales consécutives, ce qui permet d'observer des tendances interannuelles, mais ne suffit pas pour évaluer les effets à long terme, notamment pour les pesticides à demi-vie longue. Des suivis sur plusieurs années seraient nécessaires pour mieux saisir l'accumulation, la dégradation et la stabilité des substances dans le sol. De plus, l'analyse des résidus se base sur des concentrations globales sans distinguer les différents métabolites ou produits de dégradation, dont certains peuvent avoir des comportements et des toxicités spécifiques. Une approche plus détaillée, intégrant l'identification des métabolites, permettrait une meilleure évaluation du risque environnemental réel. Malgré ces contraintes, cette étude offre une vision intégrée et fiable des interactions entre traitements phytosanitaires, sols, variétés de colza et performances agronomiques, constituant une base solide pour développer des stratégies de gestion plus durables et adaptées aux particularités locales.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives :

Cette étude a été réalisée à la station expérimentale de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Guelma, située au sud-est du chef-lieu de la wilaya, durant deux campagnes agricoles consécutives (2022/2023 et 2023/2024). Elle avait pour but d'analyser l'impact de trois produits phytosanitaires, Callisto, Colzor Trio et Toprex, appliqués en mélange, sur le fonctionnement du système sol-plante chez différentes variétés de colza. L'objectif n'était pas uniquement d'évaluer l'efficacité des traitements, mais aussi de comprendre leurs effets sur les propriétés du sol, le comportement physiologique des plantes, la production, et l'évolution des résidus de pesticides au cours du cycle cultural. Le site expérimental se caractérise par un sol de texture sableuse-argileuse, homogène sur l'ensemble des parcelles. Cette texture a permis d'assurer un compromis entre drainage et rétention en eau et en nutriments, offrant des conditions pédologiques stables pour le développement du colza. L'homogénéité granulométrique du sol renforce la fiabilité des résultats obtenus et confirme que les effets observés sont principalement liés aux traitements appliqués. Le traitement entraîne une réorganisation progressive des propriétés du sol, notamment du carbone organique, du phosphore assimilable, du pH et de certains paramètres structuraux, ce qui conduit à une amélioration de la fertilité fonctionnelle dans plusieurs parcelles. Cette amélioration du sol s'accompagne d'une stimulation du métabolisme des plantes, visible par l'augmentation de la chlorophylle, des protéines, de la proline et des sucres solubles, témoignant d'une photosynthèse plus efficace, d'un métabolisme azoté renforcé, et d'une meilleure capacité d'adaptation physiologique. Ces adaptations se traduisent par de meilleures performances agronomiques, notamment en termes de densité de peuplement, de ramification fructifère, de succès de reproduction et, en fin de compte, de rendement.

Toutefois, l'étude met également en évidence des différences marquées entre parcelles, liées à la fois aux propriétés initiales des sols et aux caractéristiques des variétés de colza. Cette variabilité souligne que la réponse au traitement n'est pas uniforme, mais dépend fortement de l'interaction entre le génotype, le milieu édaphique et les conditions climatiques. Par ailleurs, l'analyse des résidus de pesticides révèle une dynamique temporelle structurée, avec une accumulation précoce suivie d'une dissipation progressive, mais aussi une persistance interannuelle liée à l'utilisation de molécules à demi-vie longue, en particulier Toprex. Cette persistance pose la question de la durabilité environnementale des stratégies phytosanitaires lorsqu'elles reposent sur des substances fortement rémanentes.

Conclusion générale

Dans ce contexte, cette thèse montre que les traitements phytosanitaires peuvent constituer un levier efficace pour améliorer la productivité du colza, mais que leur utilisation doit être raisonnée et intégrée dans une approche systémique prenant en compte le sol, la plante, la variété et le devenir des molécules dans l'environnement.

Plusieurs axes de recherche peuvent être envisagés pour prolonger et approfondir ce travail.

- En premier lieu, des suivis pluriannuels sur un plus grand nombre de cycles culturaux permettraient de mieux caractériser l'accumulation, la dégradation et la stabilisation à long terme des pesticides, en particulier ceux à demi-vie longue, ainsi que leurs effets chroniques sur la qualité des sols.
- La mise en place d'un dispositif expérimental comparant plusieurs variétés de colza sur des sols de même nature permettrait de mieux distinguer ce qui relève de l'effet du génotype de ce qui dépend des conditions édaphiques. Une telle approche faciliterait l'identification de variétés capables de combiner de bonnes performances agronomiques avec une capacité plus faible à accumuler les résidus de pesticides. Le choix d'une variété réellement résistante et performante repose cependant sur une démarche plus large. Il est nécessaire de tester les mêmes génotypes dans différents contextes pédoclimatiques afin d'évaluer leur stabilité de comportement. L'appui d'analyses génétiques et moléculaires permettrait également de repérer des marqueurs liés à la tolérance au stress et aux mécanismes de détoxification des pesticides. Enfin, un suivi sur plusieurs années est indispensable pour vérifier la constance de ces performances et apprécier les effets cumulatifs des traitements au fil des cycles culturaux.
- Sur le plan analytique, l'intégration de méthodes de suivi des métabolites de pesticides, de la biomasse microbienne et de l'activité enzymatique du sol offrirait une compréhension plus complète des processus de détoxification, de minéralisation et d'interaction entre les intrants et la biologie du sol.

Enfin, ces résultats ouvrent la voie à des stratégies de gestion plus durables, combinant choix variétal, ajustement des doses et des calendriers d'application, et amélioration de la fertilité organique des sols. Une telle approche pourrait permettre de maintenir des niveaux élevés de productivité du colza tout en réduisant les risques environnementaux liés à la persistance et à l'accumulation des pesticides, contribuant ainsi à une agriculture plus résiliente et écologiquement responsable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abubakar, Y., Tijjani, H., Egbuna, C., Adetunji, C., Kala, S., Kryeziu, T., Ifemeje, J., & Patrick-Iwuanyanwu, K. (2020). Pesticides, History, and Classification. , 29-42. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819304-4.00003-8>.
- Adil, N., Ashraf, K., Munir, M., Mohiuddin, M., Abbasi, A., Riaz, U., Aslam, A., Marey, S., Hatamleh, A., & Zaman, Q. (2023). Pesticides, Heavy Metals and Plasticizers: Contamination and Risk Assessment of Drinking-Water Quality. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su151713263>.
- Ahmad, N., Ibrahim, S., Kuang, L., Ze, T., Wang, X., Wang, H., & Dun, X. (2023). Integrating genome-wide association study with transcriptomic data to predict candidate genes influencing Brassica napus root and biomass-related traits under low phosphorus conditions. *Biotechnology for Biofuels*
- Akashe, M., Pawade, U., & Nikam, A. (2018). CLASSIFICATION OF PESTICIDES: A REVIEW. *International Journal of Research in Ayurveda and Pharmacy*. <https://doi.org/10.7897/2277-4343.094131>.
- Ali, M., Brown, P., Thomas, J., Salmerón, M., & Kawashima, T. (2022). Effect of assimilate competition during early seed development on the pod and seed growth traits in soybean. *Plant Reproduction*, 35, 179 - 188. <https://doi.org/10.1007/s00497-022-00439-2>.
- Alvarez, R. (2024). A quantitative review of the effects of residue removing on soil organic carbon in croplands. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106098>.
- Anderson, A., Burras, C., Turk, J., Young, R., Jelinski, N., Moorberg, C., Presley, D., Osterloh, K., Dere, A., & Clark, K. (2024). An updated method for identifying the formative factors in soil structure. *Soil Science Society of America Journal*. <https://doi.org/10.1002/saj2.20771>.
- Arora, S. (2019). Pesticides.. Pesticide risk assessment. <https://doi.org/10.1079/9781780646336.0003>.
- Arwenyo, B., Varco, J., Dygert, A., Brown, S., Pittman, C., & Mlsna, T. (2023). Contribution of modified P-enriched biochar on pH buffering capacity of acidic soil.. *Journal of environmental management*, 339, 117863 . <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117863>.
- Awoonor, J., Amoako, E., Dogbey, B., & Wiredu, I. (2024). Quantitative analysis of soil degradation in response to land use change in the Guinea savanna zone of Ghana. *Geoderma Regional*. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00779>.
- Ayilara, M., Adeleke, B., Akinola, S., Fayose, C., Adeyemi, U., Gbadegesin, L., Omole, R., Johnson, R., Uthman, Q., & Babalola, O. (2023). Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. *Frontiers in Microbiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1040901>.
- Babii, V., & Hlavachek, D. (2023). Rodenticides as the basis of deratisation: general characteristics, classification, mechanisms of action, features of application and prospects (review of literature data). *Environment & Health*. <https://doi.org/10.32402/dovkil2023.04.046>.
- Balík, J., Suran, P., Černý, J., Sedlář, O., Kulhánek, M., & Procházková, S. (2025). Changes in soil organic matter content and quality after application of different

Références bibliographiques

- organic and mineral fertilisers in 27 years long-term field experiments on luvisol. *Frontiers in Soil Science*. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1540137>.
- Bañón, S., Álvarez, S., Bañón, D., Ortuño, M., & Sánchez-Blanco, M. (2021). Assessment of soil salinity indexes using electrical conductivity sensors. *Scientia Horticulturae*. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2021.110171>
 - Bar-On YM, Phillips R, Milo R. The biomass distribution on Earth. *Proc Natl Acad Sci* (2018); 115:6506–11. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
 - Beaumelle, L., Tison, L., Eisenhauer, N., Hines, J., Malladi, S., Pelosi, C., Thouvenot, L., & Phillips, H. (2023). Pesticide effects on soil fauna communities—A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14437>.
 - Bensa, A., Švob, M., Domínguez-Villar, D., Perica, D., & Krklec, K. (2021). PARENT MATERIAL AS A KEY DETERMINANT OF SOIL PROPERTIES IN SOUTHERN PART OF NATIONAL PARK KRKA, CROATIA. *AGROFOR*. <https://doi.org/10.7251/agreng2102116b>.
 - Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B., Munda, S., & Dari, B. (2022). A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481>.
 - Bhatt, R., Kunal, K., Garg, A., Majumder, D., Verma, K., & De Oliveir, M. (2025). Soil Texture: Unlocking Fertility and Productivity for Better Crops. *Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews*. <https://doi.org/10.21276/aatccreview.2025.13.03.396>.
 - Bonanomi, G., Sarker, T., Zotti, M., Cesarano, G., Allevato, E., & Mazzoleni, S. (2019). Predicting nitrogen mineralization from organic amendments: beyond C/N ratio by ¹³C-CPMAS NMR approach. *Plant and Soil*, 441, 129 - 146. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04099-6>.
 - Bozdar, B., Ahmed, N., Tu, P., & Li, Z. (2025). Beyond Energy: How Small-Molecule Sugars Fuel Seed Life and Shape Next-Generation Crop Technologies. *Journal of Agronomy and Crop Science*. <https://doi.org/10.1111/jac.70050>.
 - Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
 - Bravo, A., & Soberón, M. (2023). Can microbial-based insecticides replace chemical pesticides in agricultural production?. *Microbial Biotechnology*, 16, 2011 - 2014. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.14316>.
 - Brühl, C. A., Bakanov, N., Köthe, S., Eichler, L., Sorg, M., Hörren, T., Mühlethaler, R., Meinel, G., & Lehmann, G. U. C. (2021). Direct pesticide exposure of insects in nature conservation areas in Germany. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03366-w>
 - Camara, B., Diatta, A., Ndiaye, I., Ndiaye, L., Ndiaye, A., & Ngom, D. (2025). Efficacité agronomique de *Faidherbia albida* (Del) A. Chev. sur la croissance et le rendement du Sorgho (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) en plein champ en Basse Casamance (Senegal). *European Scientific Journal, ESJ*. <https://doi.org/10.19044/esj.2025.v21n9p211>.
 - Caracciolo, B., & Terenzi, V. (2021). Rhizosphere Microbial Communities and Heavy Metals. *Microorganisms*, 9. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071462>.

Références bibliographiques

- Cardarelli, M., Woo, S., Roupael, Y., & Colla, G. (2022). Seed Treatments with Microorganisms Can Have a Biostimulant Effect by Influencing Germination and Seedling Growth of Crops. *Plants*, 11. <https://doi.org/10.3390/plants11030259>.
- CARVALHO, F.P., (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, vol. 6, no. 2, pp. 48-60. <http://dx.doi.org/10.1002/fes3.108>.
- Chakraborty, R., Sharma, V., Das, D., Biswas, D., Mahapatra, P., Shahi, D., Barman, M., Chobhe, K., & Chakraborty, D. (2024). Change in phosphorus availability, fractions, and adsorption-desorption by 46-years of long-term nutrient management in an Alfisol of eastern India. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105940>.
- Chen, J., Zhang, J., Zhang, Y., Liu, Q., Wang, P., Sun, Y., & Dong, S. (2024). Physiological characteristics of pistil abortion in *Prunus sibirica*. *Trees*. <https://doi.org/10.1007/s00468-024-02504-x>.
- Cho, H., Choi, I., Shahzad, Z., Brandizzi, F., & Rouached, H. (2025). Nutrient cues control flowering time in plants.. *Trends in plant science*. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2025.05.010>.
- Ćirić, V., Prekop, N., Šeremešić, S., Vojnov, B., Pejić, B., Radovanović, D., & Marinković, D. (2023). THE IMPLICATION OF CATION EXCHANGE CAPACITY (CEC) ASSESSMENT FOR SOIL QUALITY MANAGEMENT AND IMPROVEMENT. *The Journal "Agriculture and Forestry"*. <https://doi.org/10.17707/agricultforest.69.4.08>.
- Coban, O., De Deyn, G., & Van Der Ploeg, M. (2022). Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands. *Science*, 375. <https://doi.org/10.1126/science.abe0725>.
- Cui, Y., Yan, S., Zhang, Y., Wang, R., Song, L., , Y., Guo, H., & Yang, P. (2024). Physiological, Metabolome and Gene Expression Analyses Reveal the Accumulation and Biosynthesis Pathways of Soluble Sugars and Amino Acids in Sweet Sorghum under Osmotic Stresses. *International Journal of Molecular Sciences*, 25. <https://doi.org/10.3390/ijms25168942>.
- Cutolo, E., Guardini, Z., Dall'Osto, L., & Bassi, R. (2023). A paler shade of green: engineering cellular chlorophyll content to enhance photosynthesis in crowded environments.. *The New phytologist*. <https://doi.org/10.1111/nph.19064>.
- Da Silva, L., De Souza, T., Laurindo, L., Freitas, H., & Campos, M. (2022). Decomposition Rate of Organic Residues and Soil Organisms' Abundance in a Subtropical *Pyrus pyrifolia* Field. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020263>.
- De Lima, R., Rolim, M., Toledo, M., Tormena, C., Da Silva, A., Silva, I., & Pedrosa, E. (2022). Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105215>.
- De Silva, S., Carson, P., Indrapala, D., Warwick, B., & Reichman, S. (2023). Land application of industrial wastes: impacts on soil quality, biota, and human health. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30, 67974 - 67996. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26893-7>.
- Dehkordi, M., Nodeh, Z., Dehkordi, K., Salmanvandi, H., Khorjestan, R., & Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial

Références bibliographiques

- activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102729>.
- Delgado-Baquerizo, M., Reich, P., Trivedi, C., Eldridge, D., Abades, S., Alfaro, F., Bastida, F., Berhe, A., Cutler, N., Gallardo, A., García-Velázquez, L., Hart, S., Hayes, P., He, J., Hseu, Z., Hu, H., Kirchmair, M., Neuhauser, S., Pérez, C., Reed, S., Santos, F., Sullivan, B., Trivedi, P., Wang, J., Weber-Grullon, L., Williams, M., & Singh, B. (2020). Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution*, 4, 210 - 220. <https://doi.org/10.1038/s41559-019-1084-y>.
 - Dembovetsky, A., Tyugai, Z., & Shein, E. (2024). Granulometric composition of soils: history, development of methods, current state and prospects. *Lomonosov Soil Science Journal*. <https://doi.org/10.55959/msu0137-0944-17-2024-79-4-7-13>.
 - Deng, A., Fang, Q., Geng, Q., Hong, H., Zhao, L., Liu, C., Cai, X., & Wang, Y. (2025). Clay mineralogical and geochemical responses to weathering of intrusive vs. extrusive rocks under a subtropical climate. *Applied Clay Science*. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2024.107644>.
 - Dhami, N., & Cazzonelli, C. (2020). Prolonged cold exposure to *Arabidopsis* juvenile seedlings extends vegetative growth and increases the number of shoot branches. *Plant Signaling & Behavior*, 15. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1789320>.
 - Ding, C., Du, S., , Y., Li, X., Zhang, T., & Wang, X. (2019). Changes in the pH of paddy soils after flooding and drainage: Modeling and validation. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2018.10.012>.
 - Ding, S., Zhang, X., Shang, K., Xiao, Q., Wang, W., & Rehman, A. (2024). Removal of environmental influences for estimating soil texture fractions based on ZY1 satellite hyperspectral images. *CATENA*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107713>.
 - Dong, L., Li, J., Zhang, Y., Bing, M., Liu, Y., Wu, J., Hai, X., Li, A., Wang, K., Wu, P., Shangguan, Z., & Deng, L. (2021). Effects of vegetation restoration types on soil nutrients and soil erodibility regulated by slope positions on the Loess Plateau. *Journal of environmental management*, 302 Pt A, 113985 . <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113985>.
 - El-Aswad, A., Fouad, M., Badawy, M., & Aly, M. (2022). Effect of Calcium Carbonate Content on Potential Pesticide Adsorption and Desorption in Calcareous Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54, 1379 - 1387. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2146131>.
 - Erktan, A., Blanchart, E., Pulleman, M., & Trap, J. (2024). Soil biodiversity and ecological intensification for sustainable agriculture. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06961-8>.
 - Evans, S., Allison, S., & Hawkes, C. (2022). Microbes, memory, and moisture: predicting microbial moisture responses and their impact on carbon cycling. *Functional Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14034>.
 - Fan, Y., Miguez-Macho, G., Jobbágy, E., Jackson, R., & Otero-Casal, C. (2017). Hydrologic regulation of plant rooting depth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114, 10572 - 10577. <https://doi.org/10.1073/pnas.1712381114>.
 - Fang, X., Zhou, G., Qu, C., Huang, W., Zhang, D., Li, Y., Yi, Z., & Liu, J. (2020). Translocating subtropical forest soils to a warmer region alters microbial communities

Références bibliographiques

- and increases the decomposition of mineral-associated organic carbon. *Soil Biology & Biochemistry*, 142, 107707. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107707>.
- Ferreira, C., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., & Kalantari, Z. (2021). Soil degradation in the European Mediterranean region: Processes, status and consequences.. *The Science of the total environment*, 805, 150106 . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106>.
 - Gajger, I., & Dar, S. (2021). Plant Allelochemicals as Sources of Insecticides. *Insects*, 12. <https://doi.org/10.3390/insects12030189>.
 - Gao, J., Zhao, Q., Chang, D., Ndayisenga, F., & Yu, Z. (2022). Assessing the Effect of Physicochemical Properties of Saline and Sodic Soil on Soil Microbial Communities. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture12060782>.
 - Garud, A., Pawar, S., Patil, M., Kale, S., & Patil, S. (2024). A Scientific Review of Pesticides: Classification, Toxicity, Health Effects, Sustainability, and Environmental Impact. *Cureus*, 16. <https://doi.org/10.7759/cureus.67945>.
 - Gill, K., Kumar, P., Negi, S., Sharma, R., Joshi, A., Suprun, I., & Al-Nakib, E. (2023). Physiological perspective of plant growth regulators in flowering, fruit setting and ripening process in citrus. *Scientia Horticulturae*. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111628>.
 - Greenlon, A., Sieradzki, E., Zablocki, O., Koch, B., Foley, M., Kimbrel, J., Hungate, B., Blazewicz, S., Nuccio, E., Sun, C., Chew, A., Mancilla, C., Sullivan, M., Firestone, M., Pett-Ridge, J., & Banfield, J. (2022). Quantitative Stable-Isotope Probing (qSIP) with Metagenomics Links Microbial Physiology and Activity to Soil Moisture in Mediterranean-Climate Grassland Ecosystems. *mSystems*, 7. <https://doi.org/10.1128/msystems.00417-22>.
 - Guhra, T., Stolze, K., & Totsche, K. (2021). Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108483>.
 - Gunstone, T., Cornelisse, T., Klein, K., Dubey, A., & Donley, N. (2021). Pesticides and Soil Invertebrates: A Hazard Assessment. , 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.643847>.
 - Gupta, I., Singh, R., Muthusamy, S., Sharma, M., Grewal, K., Singh, H., & Batish, D. (2023). Plant Essential Oils as Biopesticides: Applications, Mechanisms, Innovations, and Constraints. *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12162916>.
 - Gupta, S.K., Pratap, A., (2017). History, Origin, and Evolution, in: *Advances in Botanical Research, Rapeseed Breeding*. Academic Press, pp. 1–20. [https://doi.org/10.1016/S00652296\(07\)45001-7](https://doi.org/10.1016/S00652296(07)45001-7)
 - Haelterman, L., Louvieaux, J., Chiodi, C., Bouchet, A., Kupcsik, L., Stahl, A., Rousseau-Gueutin, M., Snowdon, R., Laperche, A., Nesi, N., & Hermans, C. (2024). Genetic control of root morphology in response to nitrogen across rapeseed diversity.. *Physiologia plantarum*, 176 3, e14315 . <https://doi.org/10.1111/ppl.14315>.
 - Hao, Y., Mao, J., Bachmann, C., Hoffman, F., Koren, G., Chen, H., Tian, H., Liu, J., Tao, J., Tang, J., Li, L., Liu, L., Apple, M., Shi, M., Jin, M., Zhu, Q., Kannenberg, S., Shi, X., Zhang, X., Wang, Y., Fang, Y., & Dai, Y. (2025). Soil moisture controls over carbon sequestration and greenhouse gas emissions: a review. *npj Climate and Atmospheric Science*. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00888-8>.

Références bibliographiques

- Harit, G. (2019). Organochlorine Pesticides. *Advances in Environmental Engineering and Green Technologies*. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-6111-8.CH003>.
- Hassaan, M., & Nemr, E. (2020). Pesticides pollution: Classifications, human health impact, extraction and treatment techniques. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2020.08.007>.
- Hauser, B., Wang, Y., Boote, K., Chaturvedi, P., McLamore, E., & Allen, L. (2025). Soybean Reproductive Traits Evaluated in Response to Temperature Stress and Elevated Oxygen; Three Peroxidase Transgenes Reduce Seed Abortion. *Oxygen*. <https://doi.org/10.3390/oxygen5020005>.
- Hodoșan, C., Gîrd, C., Ghica, M., Dinu-Pîrvu, C., Nistor, L., Bărbuică, I., Marin, Ș., Mihalache, A., & Popa, L. (2023). Pyrethrins and Pyrethroids: A Comprehensive Review of Natural Occurring Compounds and Their Synthetic Derivatives. *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12234022>.
- Hong, H., Ji, K., Hei, H., Wang, C., Liu, C., Zhao, L., Lanson, B., Zhao, C., Fang, Q., & Algeo, T. (2023). Clay mineral evolution and formation of intermediate phases during pedogenesis on picrite basalt bedrock under temperate conditions (Yunnan, southwestern China). *CATENA*. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106677>.
- Hosseini-fard, M., Stefaniak, S., Javid, M., Soltani, E., Wojtyła, Ł., & Garnczarska, M. (2022). Contribution of Exogenous Proline to Abiotic Stresses Tolerance in Plants: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23. <https://doi.org/10.3390/ijms23095186>.
- Hu, P., Zhang, W., Nottingham, A., Xiao, D., Kuzyakov, Y., Xu, L., Chen, H., Xiao, J., Duan, P., Tang, T., Zhao, J., & Wang, K. (2024). Lithological Controls on Soil Aggregates and Minerals Regulate Microbial Carbon Use Efficiency and Necromass Stability. *Environmental science & technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c07264>.
- Hu, W., Cichota, R., Beare, M., Müller, K., Drewry, J., & Eger, A. (2023). Soil structural vulnerability: Critical review and conceptual development. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116346>.
- Huang, X., Guo, J., Li, K., Wang, Z., & Wang, W. (2023). Predicting the thermal conductivity of unsaturated soils considering wetting behavior: A meso-scale study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123853>.
- Ismayilov, A., Mamedov, A., Fujimaki, H., Tsunekawa, A., & Levy, G. (2021). Soil Salinity Type Effects on the Relationship between the Electrical Conductivity and Salt Content for 1:5 Soil-to-Water Extract. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/SU13063395>.
- Iticha, B., Mosley, L., & Marschner, P. (2024). Combining lime and organic amendments based on titratable alkalinity for efficient amelioration of acidic soils. *SOIL*. <https://doi.org/10.5194/soil-10-33-2024>.
- Jansson, J.K., Hofmockel, K.S., (2019). Soil microbiomes and climate change. *Nat. Rev. Microbiol.* 1–12.
- Jeong, A., Dorn, R., Seong, Y., & Yu, B. (2021). Acceleration of Soil Erosion by Different Land Uses in Arid Lands above 10Be Natural Background Rates: Case Study in the Sonoran Desert, USA. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land10080834>.

Références bibliographiques

- Jiménez-Ortega, L., Villa-Bojórquez, J., Bastidas-Bastidas, P., Contreras-Martínez, R., Carrillo-Fasio, J., & Báez-Sañudo, M. (2025). Dynamics of the Dissipation of Acetamiprid, Azoxystrobin, and β -Cyfluthrin in Jalapeño Pepper (*Capsicum annum* L.) Produced Under Greenhouse and Open-Field Conditions. *Foods*, 14. <https://doi.org/10.3390/foods14061023>.and *Bioproducts*, 16. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02403-2>.
- Jakanović, M., Olekšák, P., & Kuča, K. (2022). Multiple neurological effects associated with exposure to organophosphorus pesticides in man.. *Toxicology*, 484, 153407 . <https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153407>.
- Kang, Y., Shen, L., Li, C., Huang, Y., & Chen, L. (2024). Effects of vegetation degradation on soil microbial communities and ecosystem multifunctionality in a karst region, southwest China.. *Journal of environmental management*, 363, 121395 . <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121395>.
- Kataria, P., Singh, J., Singh, G., Mavi, M., Sillanpää, M., & Al-Farraj, S. (2024). Residual phosphorus availability after soil application of different organic waste in varying soil P status soils. *Heliyon*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25732>.
- Katche, E., & Mason, A. (2023). Resynthesized Rapeseed (*Brassica napus*): Breeding and Genomics. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 42, 65 - 92. <https://doi.org/10.1080/07352689.2023.2186021>.
- Kaur, R., Choudhary, D., Bali, S., Bandral, S., Singh, V., Ahmad, M., Rani, N., Singh, T., & Chandrasekaran, B. (2024). Pesticides: An alarming detrimental to health and environment.. *The Science of the total environment*, 170113 . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170113>.
- Kaushal, J., Khatri, M., & Arya, S. (2020). A treatise on Organophosphate pesticide pollution: Current strategies and advancements in their environmental degradation and elimination.. *Ecotoxicology and environmental safety*, 207, 111483 . <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111483>.
- Keswani, C., Dilnashin, H., Birla, H., Roy, P., Tyagi, R., Singh, D., Rajput, V., Minkina, T., & Singh, S. (2021). Global footprints of organochlorine pesticides: a pan-global survey. *Environmental Geochemistry and Health*, 44, 149-177. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00946-7>.
- Khan, A., Guo, S., Wang, R., Zhang, S., Yang, X., He, B., & Li, T. (2023). An assessment of various pools of organic phosphorus distributed in soil aggregates as affected by long-term P fertilization regimes. *Soil Use and Management*, 39, 833 - 848. <https://doi.org/10.1111/sum.12901>.
- Kicińska, A., Pomykała, R., & Izquierdo, M. (2021). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73. <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>.
- Kim, K., Henkelman, G., Katz, L., & Werth, C. (2024). New Insights into Calcite Dissolution Mechanisms under Water, Proton, or Carbonic Acid-Dominated Conditions.. *Environmental science & technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00162>.
- Koop, A., Hirmas, D., Sullivan, P., & Mohammed, A. (2020). A generalizable index of soil development. *Geoderma*, 360, 113898. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113898>.

Références bibliographiques

- Kronnäs, V., Lucander, K., Zanchi, G., Stadlinger, N., Belyazid, S., & Akselsson, C. (2023). Effect of droughts and climate change on future soil weathering rates in Sweden. *Biogeosciences*. <https://doi.org/10.5194/bg-20-1879-2023>.
- Kumar, D., Purakayastha, T., Das, R., Yadav, R., Shivay, Y., Jha, P., Singh, S., Aditi, K., & Prasad, P. (2022). Long-Term Effects of Organic Amendments on Carbon Stability in Clay–Organic Complex and Its Role in Soil Aggregation. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010039>.
- Kumar, V., Pandita, S., Sharma, A., Bakshi, P., Sharma, P., Karaouzas, I., Bhardwaj, R., Thukral, A.K., Cerda, A., (2019). Ecological and Human Health Risks Appraisal of Metal (loid)s in Agricultural Soils: a Review, *Geology, Ecology, and Landscapes*.
- Kumar, S., Baggi, T., & Alzughairbi, T. (2022). Forensic toxicological and analytical aspects of carbamate poisoning - A review.. *Journal of forensic and legal medicine*, 92, 102450 . <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2022.102450>.
- Kuzmina, A., Pyatina, E., Zhukova, E., Gorbunova, E., & Sukhacheva, E. (2024). Trophic activity of pedofauna in two gardens of Saint-Petersburg (experience of using the express bait-lamina test method). *Dokuchaev Soil Bulletin*. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-spyc-105-125>.
- Lai, Y., & Wang, S. (2025). Effects of Biochar on the Temporal Dynamics and Vertical Distribution of Iron and Phosphorus Under Soil Submergence. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061394>.
- Landrigan, P.J., Fuller, R., Acosta, N.J.R., Adeyi, O., Arnold, R., Basu, N., Baldé, A.B., Bertollini, R., Bose-O'Reilly, S., Boufford, J.I., Breyse, P.N., Chiles, T., Mahidol, C., Coll Seck, A.M., Cropper, M.L., Fobil, J., Fuster, V., Greenstone, M., Ramesh, J., Rockström, J., Salinas, C., Stewart, R.B., Suk, W.A., van Schayck, O.C.P., Yadama, G.N., Yumkella, K., Zhong, M., (2017). The Lancet commission on pollution and health. *Lancet* 6736. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32345-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0).
- Lei, C., Bagavathiannan, M., Wang, H., Sharpe, S., Meng, W., & Yu, J. (2021). Osmopriming with Polyethylene Glycol (PEG) for Abiotic Stress Tolerance in Germinating Crop Seeds: A Review. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112194>.
- Li, H., Li, L., Liu, N., Chen, S., Shao, L., Sekiya, N., & Zhang, X. (2022). Root efficiency and water use regulation relating to rooting depth of winter wheat. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107710>.
- Li, S., Wang, B., Zhang, X., Wang, H., Yi, Y., Huang, X., Gao, X., Zhu, P., & Han, W. (2023). Soil particle aggregation and aggregate stability associated with ion specificity and organic matter content. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116285>.
- Li, X., Chen, D., Carrión, V., Revillini, D., Yin, S., Dong, Y., Zhang, T., Wang, X., & Delgado-Baquerizo, M. (2023). Acidification suppresses the natural capacity of soil microbiome to fight pathogenic *Fusarium* infections. *Nature Communications*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40810-z>.
- Li, Z., & Fantke, P. (2022). Considering degradation kinetics of pesticides in plant uptake models: proof of concept for potato. *Pest Management Science*, 79, 1154 - 1163. <https://doi.org/10.1002/ps.7288>.
- Li, Y., Bao, X., Tang, S., Xiao, K., Ge, C., Xie, H., He, H., Mueller, C., & Liang, C. (2024). Toward soil carbon storage: The influence of parent material and vegetation

Références bibliographiques

- on profile-scale microbial community structure and necromass accumulation. *Soil Biology and Biochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109399>.
- Li, Z. (2025). Plant Uptake Models of Pesticides: Advancing Integrated Pest Management, Food Safety, and Health Risk Assessment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 263. <https://doi.org/10.1007/s44169-024-00076-y>.
 - Liang, G., Stark, J., & Waring, B. (2023). Mineral reactivity determines root effects on soil organic carbon. *Nature Communications*, 14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40768-y>.
 - Liu, J., Fang, L., Qiu, T., Chen, J., Wang, H., Liu, M., Yi, J., Zhang, H., Wang, C., Sardans, J., Chen, L., Huang, M., & Peñuelas, J. (2023). Crop residue return achieves environmental mitigation and enhances grain yield: a global meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 43, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00928-2>.
 - Liu, D., Chen, T., Gong, Y., Chen, X., Zhang, W., Xiao, R., Yang, Y., & Zhang, T. (2024). Deciphering the key factors affecting pesticide residue risk in vegetable ecosystem.. *Environmental research*, 119452 . <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119452>.
 - Liu, H., Jin, M., Li, C., Wang, J., Wang, H., Xie, W., Cui, H., Li, Y., & Wang, Z. (2025). Ca²⁺ substitution synergises zeolite physisorption accelerated Na⁺ substitution to improve saline soils. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106461>.
 - Lucas, K., Ventura, M., Barizon, R., Folegatti-Matsuura, M., Ralisch, R., Mrtvi, P., & Possamai, E. (2023). Environmental performance of phytosanitary control techniques on soybean crop estimated by life cycle assessment (LCA). *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 58315-58329. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26633-x>.
 - Mabagala, F., & Mng'ong'o, M. (2022). On the tropical soils; The influence of organic matter (OM) on phosphate bioavailability. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, 3635 - 3641. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.056>.
 - Maja, M., & Ayano, S. (2021). The Impact of Population Growth on Natural Resources and Farmers' Capacity to Adapt to Climate Change in Low-Income Countries. *Earth Systems and Environment*, 5, 271 - 283. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00209-6>.
 - Manson, J., Denton, M., Lake, L., Brand, J., Taylor, J., & Sadras, V. (2024). Benchmarking the response of grain yield to plant population density across environments and management: A case study for faba bean. *European Journal of Agronomy*. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127106>.
 - Mao, X., Cao, Y., Ding, Z., Yang, J., & Zheng, J. (2022). Combining a saltation impact sensor and a wind tunnel to explore wind erosion processes—A case study in the Zhundong mining area, Xinjiang, China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 77, 389 - 402. <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.00071>.
 - Mdeni, N., Adeniji, A., Okoh, A., & Okoh, O. (2022). Analytical Evaluation of Carbamate and Organophosphate Pesticides in Human and Environmental Matrices: A Review. *Molecules*, 27. <https://doi.org/10.3390/molecules27030618>.
 - Meidl, P., Lehmann, A., Bi, M., Breitenreiter, C., Benkrama, J., Li, E., Riedo, J., & Rillig, M. (2024). Combined application of up to ten pesticides decreases key soil

Références bibliographiques

- processes. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31, 11995 - 12004. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31836-x>.
- Mergelov, N., Mueller, C., Prater, I., Shorkunov, I., Dolgikh, A., Zazovskaya, E., Shishkov, V., Krupskaya, V., Abrosimov, K., Cherkinsky, A., & Goryachkin, S. (2018). Alteration of rocks by endolithic organisms is one of the pathways for the beginning of soils on Earth. *Scientific Reports*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21682-6>.
 - Merouani, I., Ketif, A., Draïdi, K., Habbachi, W., & Roubal, A. (2025). EFFECT OF PESTICIDE MOLECULES ON THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SOIL CULTIVATED BY BRASSICA NAPUS RAPESEED (FLOWERING STAGE AND ROSETTE STAGE). *Applied Ecology and Environmental Research*. https://doi.org/10.15666/aeer/2302_35253539.
 - Messing, I., Soriano, A., Svensson, D., & Barron, J. (2024). Variability and compatibility in determining soil particle size distribution by sieving, sedimentation and laser diffraction methods. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105987>.
 - Mhadhbi, T., Mahmoudi, E., Karima NASRI, M., Catherine GONZALEZ, M., & Mines Alès Hamouda BEYREM, I. (2019). THÈSE DE DOCTORAT (Cotutelle) Spécialité SCIENCES BIOLOGIQUES Présentée par Dynamique des pesticides au sein d'un écosystème lagunaire (lagune de Bizerte, Tunisie) : Identification des sources de contaminations et processus de transformation des contaminants
 - Michalko, R., Purchart, L., Hofman, J., & Košulič, O. (2024). Distribution of pesticides in agroecosystem food webs differ among trophic groups and between annual and perennial crops. *Agronomy for Sustainable Development*, 44. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00950-y>.
 - Mishra, P., Rai, A., Abdelrahman, K., Rai, S., & Tiwari, A. (2022). Land Degradation, Overland Flow, Soil Erosion, and Nutrient Loss in the Eastern Himalayas, India. *Land*. <https://doi.org/10.3390/land11020179>.
 - Moni, C., Farkas, E., Coutris, C., Silvennoinen, H., Aas, A., Almvik, M., Wang, L., Lang, K., Liu, X., & Stenrød, M. (2025). Interactive Effects of Biochar and Pesticides on Native Soil Organic Matter Mineralisation. *European Journal of Soil Science*, 76. <https://doi.org/10.1111/ejss.70137>.
 - Mosley, L., Rengasamy, P., & Fitzpatrick, R. (2024). Soil pH: Techniques, challenges and insights from a global dataset. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/ejss.70021>.
 - Moulin-Rouyard, C., Vaillant, V., Angeon, V., Diman, J., Vaillant, J., & Loranger-Merciris, G. (2024). Soil Fauna and Ecosystem Services in Agroecological Cropping Systems: Focus on Experimental Open-Field Market Gardens. *Soil Systems*. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010026>.
 - Mu, W., Han, N., Qu, Z., Zheng, M., Shan, Y., Guo, X., Sun, Y., & Mu, Y. (2024). ECWS: Soil Salinity Measurement Method Based on Electrical Conductivity and Moisture Content. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071345>.
 - Muñoz-Bautista, J., Bernal-Mercado, A., Martínez-Cruz, O., Burgos-Hernández, A., López-Zavala, A., Ruíz-Cruz, S., Ornelas-Paz, J., Borboa-Flores, J., Ramos-Enríquez, J., & Del-Toro-Sánchez, C. (2025). Environmental and Health Impacts of Pesticides

Références bibliographiques

- and Nanotechnology as an Alternative in Agriculture. *Agronomy*.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15081878>.
- Nadais, P., Sousa, B., Martins, M., Pereira, C., Pereira, A., Fidalgo, F., & Soares, C. (2024). Unravelling the role of proline in glyphosate-mediated toxicity - tolerance mechanism or stress signal?. *Physiologia plantarum*, 176 5, e14532.
<https://doi.org/10.1111/ppl.14532>.
 - Namiki, S. (2022). Studies on the abilities of uptake and translocation from root to shoot of pesticides in soil. *Journal of Pesticide Science*, 47, 131 - 138.
<https://doi.org/10.1584/jpestics.j22-01>.
 - Naveedullah, Hashmi, Muhammad Zaffar, Yu, Chunna, Shen, Hui, Duan, Dechao, Shen, Chaofeng, Lou, Liping, Chen, Yingxu, (2013). Risk assessment of heavy metals pollution in agricultural soils of siling reservoir watershed in Zhejiang Province, China. *BioMed Res. Int.* 2013, 590306. In this issue.
 - Neuwirthová, N., Trojan, M., Svobodová, M., Vašíčková, J., Šimek, Z., Hofman, J., & Bielská, L. (2019). Pesticide residues remaining in soils from previous growing season(s) - Can they accumulate in non-target organisms and contaminate the food web?. *The Science of the total environment*, 646, 1056-1062 .
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.357>.
 - Ng, J., Ahmed, O., Jalloh, M., Omar, L., Kwan, Y., Musah, A., & Poong, K. (2022). Soil Nutrient Retention and pH Buffering Capacity Are Enhanced by Calciprill and Sodium Silicate. *Agronomy*. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010219>.
 - Nguyen, H., Bhowmik, S., Long, H., Cheng, Y., Mundree, S., & Hoang, L. (2021). Rapid Accumulation of Proline Enhances Salinity Tolerance in Australian Wild Rice *Oryza australiensis* Domin. *Plants*, 10. <https://doi.org/10.3390/plants10102044>.
 - Nimmo, J. (2013). POROSITY AND PORE-SIZE DISTRIBUTION. , 3, 295-303.
<https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00404-5>.
 - Noble, L., Dhankher, O., & Puthur, J. (2023). Seed priming can enhance and retain stress tolerance in ensuing generations by inducing epigenetic changes and trans-generational memory.. *Physiologia plantarum*, e13881 .
<https://doi.org/10.1111/ppl.13881>.
 - Noriega, J. A. et al. Research trends in ecosystem services provided by insects. *Basic Appl. Ecol.* 26, 8–23 (2018).
 - Obalum, S., Chibuike, G., Peth, S., & Ying, O. (2017). Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 1-19.
<https://doi.org/10.1007/s10661-017-5881-y>
 - Oliveira, J. M., Destro, A. L. F., Freitas, M. B., & Oliveira, L. L. (2021). How do pesticides
 - Orgiazzi A, Bardgett RD, Barrios E, Behan-Pelletier V, Briones MJI, Chotte J-L, et al. Global soil biodiversity atlas. European Commission; 2016. <https://doi.org/10.2788/799182>.
 - Parameswari, E., Davamani, V., Arulmani, S., & Raj, V. P. (2020). Impact of Pesticides on Environment. 2:5, 4.
 - Pathak, V., Verma, V., Rawat, B., Kaur, B., Babu, N., Sharma, A., Dewali, S., Yadav, M., Kumari, R., Singh, S., Mohapatra, A., Pandey, V., Rana, N., & Cunill, J. (2022). Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly

Références bibliographiques

- management as bioremediation: A comprehensive review. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.962619>.
- Patra, A., Sharma, V., Nath, D., Ghosh, A., Purakayastha, T., Barman, M., Kumar, S., Chobhe, K., Anil, A., & Rekwar, R. (2021). Impact of Soil Acidity Influenced by Long-term Integrated Use of Enriched Compost, Biofertilizers, and Fertilizer on Soil Microbial Activity and Biomass in Rice Under Acidic Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21, 756-767. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00398-5>.
 - Pedrinho, A., Mendes, L., De Araújo Pereira, A., Araujo, A., Vaishnav, A., Karpouzas, D., & Singh, B. (2024). Soil microbial diversity plays an important role in resisting and restoring degraded ecosystems. *Plant and Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06489-x>.
 - Philippot L, Raaijmakers JM, Lemanceau P, van der Putten WH. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere. *Nat Rev Microbiol* (2013); 11:789–99. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>.
 - Philippot, L., Chenu, C., Kappler, A., Rillig, M., & Fierer, N. (2023). The interplay between microbial communities and soil properties.. *Nature reviews. Microbiology*. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00980-5>.
 - Pierce, A., Milewski, E., & Wozniak, C. (2022). Federal regulation of plant-incorporated protectants in the United States: implications for use of bioengineered pesticides in forest restoration. *New Forests*, 54, 739-749. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09926-w>.
 - Pihlap, E., Steffens, M., & Kögel-Knabner, I. (2021). Initial soil aggregate formation and stabilisation in soils developed from calcareous loess. *Geoderma*, 385, 114854. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114854>.
 - Prescott, C., & Vesterdal, L. (2021). Decomposition and transformations along the continuum from litter to soil organic matter in forest soils. *Forest Ecology and Management*, 498, 119522. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2021.119522>.
 - Qiao, L., Wang, X., Smith, P., Fan, J., Lu, Y., Emmett, B., Li, R., Dorling, S., Chen, H., Liu, S., Benton, T., Wang, Y., Y., Jiang, R., Zhang, F., Piao, S., Möller, C., Yang, H., Hao, Y., Li, W., & Fan, M. (2022). Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. *Nature Climate Change*, 12, 574 - 580. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01376-8>.
 - Raffa, C. M., & Chiampo, F. (2021). Bioremediation of Agricultural Soils Polluted with
 - Raguét, P., Houot, S., Montenach, D., Mollier, A., Ziadi, N., Karam, A., & Morel, C. (2024). Soil organic phosphorus mineralisation rate in cropped fields receiving various P sources. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. <https://doi.org/10.1007/s10705-024-10377-2>.
 - Raj, J. (2023). Rock - soil transition during weathering of rhyolite. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*. <https://doi.org/10.7186/bgsm76202305>.
 - Ratajczak, K., Sulewska, H., Panasiewicz, K., Faligowska, A., & Szymańska, G. (2023). Phytostimulator Application after Cold Stress for Better Maize (*Zea mays* L.) Plant Recovery. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030569>.
 - Reif, J. & Vermouzek, Z. Collapse of farmland bird populations in an Eastern European country following its EU accession. *Conserv. Lett.* 12, 1–8 (2019).

Impact de l'utilisation des herbicides appliquée a une culture de colza sur les propriétés physico-chimiques des sols

Références bibliographiques

- Ridwan, R., & Ismail, M. (2025). Population Growth Has an Impact on The Economy and Food Availability. *Journal of Posthumanism*.
<https://doi.org/10.63332/joph.v5i6.2400>.
- Riedo, J., Wettstein, F., Rösch, A., Herzog, C., Banerjee, S., Büchi, L., Charles, R., Wächter, D., Martin-Laurent, F., Bucheli, T., Walder, F., & Van Der Heijden, M. (2021). Widespread Occurrence of Pesticides in Organically Managed Agricultural Soils-the Ghost of a Conventional Agricultural Past?. *Environmental science & technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405>.
- Riedo, J., Wächter, D., Gubler, A., Wettstein, F., Meuli, R., & Bucheli, T. (2023). Pesticide residues in agricultural soils in light of their on-farm application history.. *Environmental pollution*, 121892 . <https://doi.org/10.2139/ssrn.4389453>.
- Ripley, B., & Chau, A. (2020). Carbamate Pesticides. *Analysis of Pesticides in Water*. <https://doi.org/10.1201/9780429292774-1>.
- Robinson, D., Thomas, A., Reinsch, S., Lebron, I., Feeney, C., Maskell, L., Wood, C., Seaton, F., Emmett, B., & Cosby, B. (2022). Analytical modelling of soil porosity and bulk density across the soil organic matter and land-use continuum. *Scientific Reports*, 12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11099-7>.
- Roca-Couso, R., Flores-Félix, J., & Rivas, R. (2021). Mechanisms of Action of Microbial Biocontrol Agents against *Botrytis cinerea*. *Journal of Fungi*, 7. <https://doi.org/10.3390/jof7121045>.
- Romero-Ruiz, A., Monaghan, R., Milne, A., Coleman, K., Cardenas, L., Segura, C., & Whitmore, A. (2023). Modelling changes in soil structure caused by livestock treading. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116331>.
- Rötzer, M., Prechtel, A., & Ray, N. (2023). Pore scale modeling of the mutual influence of roots and soil aggregation in the rhizosphere. *Frontiers in Soil Science*. <https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1155889>.
- Sabzevari, S., & Hofman, J. (2021). A worldwide review of currently used pesticides' monitoring in agricultural soils.. *The Science of the total environment*, 152344. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152344>.
- Saga, Y., Kawato, S., & Harada, J. (2025). Chlorophyll Reconstitution of Photosynthetic Light-Harvesting Complexes.. *Plant & cell physiology*. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcf084>.
- Santos, M. (2024). SOIL FERTILITY ANALYSIS" REFERS TO THE ASSESSMENT OF SOIL'S CAPACITY TO PROVIDE ESSENTIAL NUTRIENTS FOR PLANT GROWTH. *Proceedings of the Second Southern Science Conference. Book B*. https://doi.org/10.48141/sscon_66_2024.pdf.
- Saprykin, O., & Sokolova, N. (2022). Agrogenic transformation of texture-differentiated soil profiles in micro-depressions. *Почвы и окружающая среда*. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i1.171>.
- Saroha, A., Gomashe, S., Kaur, V., Pal, D., Ujjainwal, S., Aravind, J., Singh, M., Rajkumar, S., Singh, K., Kumar, A., & Wankhede, D. (2023). Genetic dissection of thousand-seed weight in linseed (*Linum usitatissimum* L.) using multi-locus genome-wide association study. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1166728>.

Références bibliographiques

- Schadosin, J., Saab, S., Brinatti, A., & Pires, L. (2023). QUANTITATIVE AND QUALITATIVE CHARACTERIZATION OF THE GRANULOMETRY OF AN INCEPTISOL. *Química Nova*. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230018>.
- Schlüter, S., Sammartino, S., & Koestel, J. (2020). Exploring the relationship between soil structure and soil functions via pore-scale imaging. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114370>.
- Sharma, P., Sharma, P., & Thakur, N. (2024). Sustainable farming practices and soil health: a pathway to achieving SDGs and future prospects. *Discover Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00447-4>.
- Shattuck, A., Werner, M., Mempel, F., Dunivin, Z., & Galt, R. (2023). Global pesticide use and trade database (GloPUT): New estimates show pesticide use trends in low-income countries substantially underestimated. *Global Environmental Change*. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102693>.
- Sheikh, A., Zacharia, I., Tabassum, N., Hirt, H., & Ntoukakis, V. (2024). 14-3-3 proteins as a major hub for plant immunity.. *Trends in plant science*. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.06.001>.
- Sim, J., Drigo, B., Doolette, C., Vasileiadis, S., Karpouzas, D., & Lombi, E. (2022). Impact of twenty pesticides on soil carbon microbial functions and community composition.. *Chemosphere*, 135820 . <https://doi.org/10.2139/ssrn.4124958>.
- Šimkovic, I., Hrabovský, A., Hamerníková, A., Ihnačáková, S., & Dlapa, P. (2025). Thermogravimetric data suggest synergy between different organic fractions and clay in soil structure formation. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117166>.
- Singh, A., Singh, A., Singh, P., Chakravarty, A., Singh, A., Singh, P., Mishra, M., Singh, V., Srivastava, A., Aggarwal, H., & Sagadevan, S. (2022). Insecticidal Activity, Toxicity, Resistance and Metabolism of Pyrethroids: a Review. *Science and Technology Indonesia*. <https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.2.238-250>.
- Singh, C., Singh, V., Pal, A., Shekhar, S., Kumar, M., & Singh, R. (2025). The Role of Soil Microbiome in Enhancing Plant Nutrition and Promoting Soil Health. *International Journal of Plant & Soil Science*. <https://doi.org/10.9734/ijpss/2025/v37i25302>.
- Skaarup, C., Wodschow, K., Voutchkova, D. D., Schullehner, J., Raaschou-Nielsen, O., Andersen, H. R., Hansen, B., & Ersbøll, A. K. (2022). Geographical Distribution and Pattern of Pesticides in Danish Drinking Water 2002–2018 : Reducing Data Complexity.
- Sofo, A., Zanella, A., & Pongé, J. (2021). Soil quality and fertility in sustainable agriculture, with a contribution to the biological classification of agricultural soils. *Soil Use and Management*, 38, 1085 - 1112. <https://doi.org/10.1111/sum.12702>.
- Sonsri, K., & Watanabe, A. (2023). Insights into the formation and stability of soil aggregates in relation to the structural properties of dissolved organic matter from various organic amendments. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105774>.
- Stępień, M., Bodecka, E., Gozdowski, D., Wijata, M., Groszyk, J., Studnicki, M., Sobczyński, G., Rozbicki, J., & Samborski, S. (2018). Compatibility of granulometric groups determined based on standard BN-78/9180-11 and granulometric groups

Références bibliographiques

- according to PTG 2008 and USDA texture classes. *Soil Science Annual*, 69, 223 - 233. <https://doi.org/10.2478/ssa-2018-0023>.
- Stocker, B., Tumber-Dávila, S., Konings, A., Anderson, M., Hain, C., & Jackson, R. (2023). Global patterns of water storage in the rooting zones of vegetation. *Nature Geoscience*, 16, 250 - 256. <https://doi.org/10.1038/s41561-023-01125-2>.
 - Sun, D., Hu, C., Yang, Y., Wang, H., Yan, T., Wu, C., Hu, Z., Lu, X., & Zhou, B. (2025). Synergistic Effects of Supplemental Lighting and Foliar Phosphorus Application on Flowering in Passion Fruit (*Passiflora edulis*). *Horticulturae*. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050478>.
 - Szot, I., & Łysiak, G. (2025). Factors Influencing the Formation, Development of Buds, and Flowering of Temperate Fruit Trees. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121304>.
 - Tan, J., , M., Shen, X., Xia, Y., & Qin, W. (2024). Potential lethality of organochlorine pesticides: Inducing fatality through inflammatory responses in the organism.. *Ecotoxicology and environmental safety*, 279, 116508 . <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116508>.
 - Tang, F., & Maggi, F. (2021). Pesticide mixtures in soil: a global outlook. *Environmental Research Letters*, 16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abe5d6>.
 - Tang, L., Li, G., Luo, T., Jin, L., Yu, Y., Sun, Q., & Li, G. (2022). Mechanism of shear strength deterioration of soil-rock mixture after freeze–thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103585>.
 - Tardieu, L., Hamel, P., Viguié, V., Coste, L., & Levrel, H. (2021). Are soil sealing indicators sufficient to guide urban planning? Insights from an ecosystem services assessment in the Paris metropolitan area. *Environmental Research Letters*, 16. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac24d0>.
 - Tisdall, J. (2020). Formation of Soil Aggregates and Accumulation of Soil Organic Matter. *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. <https://doi.org/10.1201/9781003075561-5>.
 - Tewari, A. (2024). Respiratory system: Highly exposed yet under-reported organ in pyrethrin and pyrethroid toxicity. *Toxicology and Industrial Health*, 40, 622 - 635. <https://doi.org/10.1177/07482337241273808.499-507>. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.225330>.
 - Tiwari, A., Hasan, W., Ishar, A., & Hazarika, S. (2024). Understanding the Physicochemical Dynamics of Pesticides: Implications for Environmental Management and Sustainable Agriculture. *Agriculture Archives: an international Journal*. <https://doi.org/10.51470/agri.2024.3.1.12>.
 - Toca, A., Moler, E., Nelson, A., & Jacobs, D. (2022). Environmental conditions in the nursery regulate root system development and architecture of forest tree seedlings: a systematic review. *New Forests*, 53, 1113 - 1143. <https://doi.org/10.1007/s11056-022-09944-8>.
 - Țopa, D., Căpșună, S., Calistru, A., & Ailincăi, C. (2025). Sustainable Practices for Enhancing Soil Health and Crop Quality in Modern Agriculture: A Review. *Agriculture*. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090998>.
 - Totsche, K. (2020). Formation of Microaggregates and organo-mineral composite building units: Novel pathways in the soil-parent rock continuum. , 10220. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10220>.

Références bibliographiques

- Totsche, K., Ray, N., & Kögel-Knabner, I. (2024). Structure–function co-evolution during pedogenesis—Microaggregate development and turnover in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. <https://doi.org/10.1002/jpln.202400012>.
- Toxanbayeva, S., Ramazanova, N., & Musabayeva, M. (2025). LANDSCAPE FACTORS FORMING THE STEPPE ZONE OF THE ZHAYIK RIVER BASIN OF THE WEST KAZAKHSTAN REGION. *Hydrometeorology and Ecology*. <https://doi.org/10.54668/2789-6323-2024-115-4-75-90>.
- Turniški, R., Zupančič, N., & Grčman, H. (2023). Geochemical evidence of illuvial processes in clay-rich soils on limestones in a humid temperate climate. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116266>.
- Uyen, N., Toan, N., Truong, N., Tu, L., & Le, P. (2025). Plasmonic Au–TiO₂ nanowire/nanotube heterostructures for multifunctional photocatalysis: dye and pesticide degradation, water splitting, and antibacterial activity. *Nanoscale Advances*, 7, 7317 - 7332. <https://doi.org/10.1039/d5na00765h>.
- Vakulenko, V., Kryvenko, A., Dzham, M., & Marchenko, T. (2025). Influence of varieties and technology of cultivation of winter wheat varieties on the weight of 1000 seeds in the conditions of the Forest-Steppe of Ukraine. *Taurian Scientific Herald*. <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.1.3>.
- Van Der Sloot, M., Kleijn, D., De Deyn, G., & Limpens, J. (2022). Carbon (C) to nitrogen (N) ratio and quantity of organic amendment interactively affect crop growth and soil mineral N retention. *Crop and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.crope.2022.08.001>.
- Van der Sluijs, J. P. Insect decline, an emerging global environmental risk. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 46, 39–42 (2020).
- Verma, F., Singh, S., Dhaliwal, S. S., Kumar, V., Kumar, R., Singh, J., & Parkash, C. (2021). Appraisal of pollution of potentially toxic elements in different soils collected around the industrial area. *Heliyon*, 7(10), +011e08122. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08122>.
- Vieira-Filho, L., Silveira, M., Kohmann, M., Sales, C., Sollenberger, L., Bhadha, J., Strauss, S., & Moriel, P. (2023). Water table effect on phosphorus solubility in biosolids-amended soils. *Soil Science Society of America Journal*. <https://doi.org/10.1002/saj2.20568>.
- Vilček, J., Torma, S., Koco, Š., & Halas, J. (2025). Suitability of soil and landscape for rapeseed (*Brassica napus* subsp. *napus* L.) growing. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15958-x>.
- Virk, A., Shakoor, A., Ahmad, N., Du, H., Chang, S., & Cai, Y. (2025). Organic amendments restore soil biological properties under pesticides application.. *Pesticide biochemistry and physiology*, 210, 106394 . <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2025.106394>.
- Voltr, V., Menšík, L., Hlisnikovský, L., Hruška, M., Pokorný, E., & Pospíšilová, E. (2021). The Soil Organic Matter in Connection with Soil Properties and Soil Inputs. *Agronomy*, 11, 779. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040779>.
- Wan, N., Fu, L., Dainese, M., Kiær, L., Hu, Y., Xin, F., Goulson, D., Woodcock, B., Vanbergen, A., Spurgeon, D., Shen, S., & Scherber, C. (2025). Pesticides have negative effects on non-target organisms. *Nature Communications*, 16. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56732-x>.

Impact de l'utilisation des herbicides appliquée a une culture de colza sur les propriétés physico-chimiques des sols

Références bibliographiques

- Wang, G., Liu, T., Shrestha, S., Xue, B., & Tan, Z. (2019). Vertical variations of soil water and its controlling factors based on the structural equation model in a semi-arid grassland. *The Science of the total environment*, 691, 1016-1026 .
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.181>.
- Wang, H Y. Yin, Analysis and strategy for oil crop industry in China, *Chin. J. Oil Crop Sci.* 36 (2014) 414 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Li, Q., Ge, F., Li, F., Liu, Y., Deng, S., Zhang, D., & Tian, J. (2022). Correlation of bacterial community with phosphorus fraction drives discovery of Actinobacteria involved soil phosphorus transformation during the trichlorfon degradation. *Environmental pollution*, 119043 .
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119043>.
- Wang, C., Yang, J., Chen, W., Zhao, X., & Wang, Z. (2023). Contribution of the leaf and silique photosynthesis to the seeds yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) in reproductive stage. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31872-6>.
- Wang, S., Yang, Y., Li, D., Xie, L., Wu, Y., & Li, G. (2024). Current Research Status, Opportunities, and Future Challenges of Nine Representative Persistent Herbicides. *Journal of agricultural and food chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c04537>.
- Wang, Y., Wang, K., An, T., Tian, Z., Dun, X., Shi, J., Wang, X., Deng, J., & Wang, H. (2022). Genetic dissection of branch architecture in oilseed rape (*Brassica napus* L.) germplasm. *Frontiers in Plant Science*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1053459>.
- Wang, X., Zhou, G., Wang, J., Gao, Y., & Fan, J. (2025). Synergistic Effects of Organic Materials and Clay on Maize Yield and Water Use Efficiency in Sandy Soil. *Land Degradation & Development*. <https://doi.org/10.1002/ldr.70180>.
- Wei, H., Yang, J., Liu, Z., & Zhang, J. (2022). Data Integration Analysis Indicates That Soil Texture and pH Greatly Influence the Acid Buffering Capacity of Global Surface Soils. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su14053017>.
- Wei, H., Yang, Y., Wang, J., Meng, Q., & Deng, Y. (2024). A comparison of preferential flow characteristics and influencing factors between two soils developed in the karst region of Southwest China. *Soil and Tillage Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106132>.
- Wisnujati, N. (2023). Unveiling the Epoch: Exploring Pesticide Utilization and Trade Trends Globally and Regionally from 1990 to 2020. *SCIENTIA: Journal of Multi Disciplinary Science*. <https://doi.org/10.62394/scientia.v2i2.16>.
- Woldeyohannis, Y., Hiremath, S., Tola, S., & Wako, A. (2024). Influence of soil physical and chemical characteristics on soil compaction in farm field. *Heliyon*, 10.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25140>.
- Wu, X., Dang, F., & Li, J. (2025). The Parameter of Soil Structural Properties and Their Relationship to Grain Size, Density, and Moisture Content. *Applied Sciences*.
<https://doi.org/10.3390/app15041872>.
- Wu, Z., Sun, X., Sun, Y., Yan, J., Zhao, Y., & Chen, J. (2022). Soil acidification and factors controlling topsoil pH shift of cropland in central China from 2008 to 2018. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115586>.
- Xia, Y., Peñuelas, J., Sardans, J., Zhong, X., Xu, L., Yang, Z., Yang, Y., Yang, L., Yue, K., & Fan, Y. (2024). Phosphorus addition accelerates soil organic carbon

Impact de l'utilisation des herbicides appliquée a une culture de colza sur les propriétés physico-chimiques des sols

Références bibliographiques

- mineralization by desorbing organic carbon and increasing microbial activity in subtropical forest soils. *Applied Soil Ecology*.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105166>.
- Xie, J., Gao, J., Cao, H., Li, J., Wang, X., Zhang, J., Meng, H., Hong, J., Li, T., & Xu, M. (2023). Calcium carbonate promotes the formation and stability of soil macroaggregates in mining areas of China. *Journal of Integrative Agriculture*.
<https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.09.015>.
 - Xiong, R., He, X., Gao, N., Li, Q., Qiu, Z., Hou, Y., & Shen, W. (2024). Soil pH amendment alters the abundance, diversity, and composition of microbial communities in two contrasting agricultural soils. *Microbiology Spectrum*, 12.
<https://doi.org/10.1128/spectrum.04165-23>.
 - Yang, T., Sun, G., Sun, M., Du, H., Luo, Z., Feng, Q., Zheng, Y., Zhou, J., & Long, Z. (2025). Effects of Lime, Magnesia and Silicon on Soil Acid-Neutralizing Capacity and Rice Yield in Acidic Paddy Fields. *Agriculture*.
<https://doi.org/10.3390/agriculture15101042>.
 - Yasir, M., Hossain, A., & Pratap-Singh, A. (2025). Pesticide Degradation: Impacts on Soil Fertility and Nutrient Cycling. *Environments*.
<https://doi.org/10.3390/environments12080272>.
 - Yazıcı, S. (2020). Metaphorical perceptions of the secondary school students regarding the concept of soil. *African Educational Research Journal*.
<https://doi.org/10.30918/aerj.83.20.127>.
 - Yu, Q., Wang, M., Tian, Y., Shi, X., Li, X., Xu, L., Xie, X., Shi, Y., & Zhu, Y. (2021). Effects of porous clay ceramic rates on aeration porosity characteristics in a structurally degraded soil under greenhouse vegetable production. *Pedosphere*, 31, 606-614. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(21\)60006-1](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(21)60006-1).
 - Yuan, Z., Shen, Q., Yu, K., Liu, Y., Zheng, H., Yao, Y., & Jia, B. (2025). Half-Century Scientometric Analysis: Unveiling the Excellence of Fungi as Biocontrol Agents and Biofertilisers. *Journal of Fungi*, 11. <https://doi.org/10.3390/jof11020117>.
 - Yudina, A., & Kuzyakov, Y. (2023). Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478>.
 - Zhang, B., Jia, Y., Fan, H., Guo, C., Fu, J., Li, S., Li, M., Liu, B., & , R. (2024). Soil compaction due to agricultural machinery impact: A systematic review. *Land Degradation & Development*, 35, 3256 - 3273. <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>.
 - Zhang, F., Wang, Q., Zhang, Y., Yao, S., Wang, Q., Ndzana, G., Hamer, U., Kuzyakov, Y., & Zhang, B. (2024). Soil organic carbon increase via microbial assimilation or soil protection against the priming effect is mediated by the availability of soil N relative to input C. *Geoderma*.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116861>.
 - Zhang, S., Zhu, Q., De Vries, W., Ros, G., Chen, X., Muneer, M., Zhang, F., & Wu, L. (2023). Effects of soil amendments on soil acidity and crop yields in acidic soils: A world-wide meta-analysis. *Journal of environmental management*, 345, 118531 .
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118531>.
 - Zhang, X., Zhang, S., Zhang, F., Li, H., Shi, J., & Chen, J. (2025). Quantifying the effects of the soil erosion factors on water-eroded slopes. *CATENA*.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108678>.

Références bibliographiques

- Zhang, Y., Ge, S., Dong, L., Liu, N., Shao, Y., Fan, Z., Yang, L., Si, Q., Ye, Y., Ren, D., Zhang, S., & Xu, J. (2024). Chemical-sensitized MITOGEN-ACTIVATED PROTEIN KINASE 4 provides insights into its functions in plant growth and immunity.. *Plant physiology*. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae574>.
- Zhang, Z., Kaye, J., Bradley, B., Amsili, J., & Suseela, V. (2022). Cover crop functional types differentially alter the content and composition of soil organic carbon in particulate and mineral-associated fractions. *Global Change Biology*, 28, 5831 - 5848. <https://doi.org/10.1111/gcb.16296>.
- Zhao, J., Xie, X., Jiang, Y., Li, J., Fu, Q., Qiu, Y., Fu, X., Yao, Z., Dai, Z., Qiu, Y., & Chen, H. (2023). Effects of simulated warming on soil microbial community diversity and composition across diverse ecosystems.. *The Science of the total environment*, 168793 . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168793>.
- Zhao, L., Liu, Q., Jia, Y., Lin, H., Yu, Y., Chen, X., Liu, Z., Li, W., Fang, T., Jiang, W., Zhang, J., Cui, H., Li, P., Li, H., Hou, S., & Guo, L. (2023). The Associations between Organophosphate Pesticides (OPs) and Respiratory Disease, Diabetes Mellitus, and Cardiovascular Disease: A Review and Meta-Analysis of Observational Studies. *Toxics*, 11. <https://doi.org/10.3390/toxics11090741>.
- Zhao, X., Wu, Y., Huang, Y., Yang, Y., Jiang, N., Du, S., & Cheng, H. (2025). Temporal and spatial evolution of vegetation cover in the wind erosion field on the Qinghai–Xizang Plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50. <https://doi.org/10.1002/esp.70021>.
- Zhao, Y., Hu, X., & Li, X. (2020). Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography. *Catena*, 193, 104622. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104622>.
- Zhuo, Z., Cai, W., Zhu, C., Tang, C., & Roksana, K. (2024). Morphology characterization of unsaturated soils under drying-wetting cycles: crack opening and closure. *Acta Geotechnica*. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02347-3>.