

THÈSE

en vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Centre des Sciences de Matériaux

Structure de Recherche : Laboratoire des matériaux, nanotechnologies et environnements.

Discipline : Chimie-Physique

Spécialité : Sciences des sol et environnement

Présentée et Soutenue le : 21 / 12 / 2024

Par :

Hassnae MAHER

Impact des pratiques agricoles sur les propriétés physico-chimiques des sols et sur la productivité du blé en zone semi-aride : Comparaison de l'effet du travail du sol, de la fertilisation azotée et de l'efficacité d'utilisation de l'azote dans un contexte d'agriculture de conservation

Devant le JURY :

Abdelkbir BELLAOUCHOU	PES	Faculté des sciences, Université Mohammed V Rabat	Président
Saïd CHAKIRI	PES	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail Kénitra	Rapporteur/Examinateur
Abdelhak BOUABDLI	PES	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail Kénitra	Rapporteur/Examinateur
Ratiba BOUSSEN	PES	Faculté des sciences, Université Mohammed V Rabat	Rapporteur/Examinateur
Abdelmajid ZOUAHRI	Expert	INRA - Rabat	Examinateur
Ahmed DOUAIK	Expert	INRA - Rabat	Examinateur
Rachid MOUSSADAK	Dr. Expert	INRA / ICARDA - Rabat	Co-Directeur de thèse
Ahmed GHANIMI	MCH	Faculté des sciences, Université Mohammed V Rabat	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2023 - 24

Dédicace

Je dédie ce travail :

A Celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui a toute sacrifiée pour mon Bonheur et ma Réussite, Ma Mère FaTima.

A mon père Messaoud, école de mon enfance, qui a été mon Ombre durant toutes les années d'Etudes, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me Protéger. Que dieu les gardes et les protège, En témoignage de mon profond Amour, de ma grande Reconnaissance et pour tous les Sacrifices que vous avez Consentis pour mon Education et mon Bonheur.

À mes frères (Ayoub, Mohammed et Hassan) et sœurs (Souad et Asmae), pour leur compréhension, leurs encouragements et leurs mots de soutien. Votre présence à mes côtés m'a donné la force de persévérer même dans les moments les plus difficiles et pour les mots réconfortants dans les moments de doute. Votre bienveillance m'a été précieuse.

À mon neveu Ilyas, l'amour de ma vie, mon bébé.

Je tiens également à dédier ce travail à mes amis proches (Fadwa, Fatiha, Manal, Fatima-zahra, Zaynab et Rajae) et à tous ceux qui ont cru en moi, m'ont soutenu de près ou de loin, et ont partagé cette aventure académique avec moi.

Enfin, à tous les enseignants et chercheurs qui ont nourri mon esprit et ont éveillé en moi la passion pour le savoir, je vous suis infiniment reconnaissant.

A toute personne qui m'aime je vous dis Merci.

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma profonde gratitude à Allah, le Tout-Puissant, pour m'avoir accordé la santé, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail de recherche.

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance au Laboratoire des Matériaux, Nanotechnologies et Environnement (LMNE) de la Faculté des Sciences – Rabat, sous la direction de Monsieur le Pr. **Abdelkbir BELLAOUCHOU** (PES), pour m'avoir accueillie et accompagnée tout au long de ces années de doctorat. Intégrer cette structure de recherche a été une réelle opportunité pour moi, tant sur le plan scientifique que personnel.

Ce travail est le fruit d'une coopération multilatérale entre la Faculté des Sciences – Rabat, l'INRA-Rabat, l'ICARDA et le CNESTEN. Les recherches ont été menées conjointement au Laboratoire des Matériaux, Nanotechnologies et Environnement (LMNE), à l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles (INRA-Rabat) et au CNESTEN, sous l'encadrement du Pr. **Ahmed GHANIMI** (Faculté des Sciences – Rabat) et du Dr. **Rachid MOUSSADEK** (INRA / ICARDA).

Un remerciement particulier à l'ICARDA pour son grand soutien et l'octroi d'une bourse de thèse, qui m'a permis de mener à bien cette recherche dans les meilleures conditions.

Ma profonde gratitude va à Monsieur le Pr. **Abdelkbir BELLAOUCHOU** (PES), Président du jury et Directeur du Laboratoire des Matériaux, Nanotechnologies et Environnement (LMNE), Université Mohammed V, Faculté des Sciences – Rabat. Je le remercie chaleureusement pour l'opportunité qui m'a été donnée d'intégrer le laboratoire, pour toutes les facilités accordées ainsi que pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury de soutenance.

Mes remerciements les plus respectueux s'adressent à Monsieur le Pr. **Ahmed GHANIMI** (MCH), Directeur de cette thèse, Université Mohammed V, Faculté des Sciences – Rabat. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée, son encadrement attentif, ses conseils éclairés et son soutien indéfectible tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique, sa disponibilité et son expertise ont été des sources d'inspiration constantes qui ont grandement contribué à la réussite de cette recherche.

Je suis profondément reconnaissante à Monsieur Dr. **Rachid MOUSSADEK**, expert chercheur à l'INRA/ICARDA – Rabat et co-directeur de cette thèse, pour son accompagnement rigoureux, son expertise et sa bienveillance. Malgré un emploi du temps chargé, il a toujours fait preuve de disponibilité et m'a guidée avec des conseils scientifiques précieux et des remarques judicieuses qui ont permis la bonne progression de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur le Pr. **Saïd CHAKIRI** (PES), Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences – Kénitra, pour avoir accepté d'évaluer cette thèse en tant que rapporteur et examinateur. Je lui suis reconnaissante pour la qualité de ses remarques et son regard critique, qui ont contribué à enrichir ce travail.

Je remercie également Monsieur le Pr. **Abdelhak BOUABDLI** (PES), Université Ibn Tofail, Faculté des Sciences – Kénitra, pour son rôle en tant que rapporteur et examinateur. Ses observations pertinentes ont été d'une grande utilité pour affiner les analyses présentées.

Ma gratitude va à Madame la Pr. **Rabia BOUSSEN** (PES), Université Mohammed V, Faculté des Sciences – Rabat, rapporteur et examinatrice, pour son engagement et ses suggestions constructives qui ont contribué à l'amélioration du manuscrit.

Je remercie vivement Monsieur Dr. **Abdelmajid ZOUAHRI**, expert à l'INRA – Rabat, coordinateur de l'Unité de Recherche Environnement et Conservation des Ressources Naturelles, pour son soutien, ses recommandations et son attention, qui ont été essentiels à la conduite de ce travail. Malgré ses diverses responsabilités, il m'a consacré du temps précieux, pour lequel je lui suis profondément reconnaissante. Je le remercie également d'avoir accepté de faire partie du jury. Son expertise et ses remarques ont apporté une perspective très enrichissante à cette recherche.

Mes remerciements vont également à Monsieur Dr. **Ahmed DOUAIK**, chercheur à l'INRA – Rabat, pour son soutien indéfectible. Son engagement constant à faire progresser ma recherche, ses conseils méthodologiques et son expertise ont fortement contribué à la rigueur scientifique de ce travail. Je le remercie également pour sa disponibilité et la pertinence de ses commentaires lors de l'évaluation.

Mes sincères remerciements vont également à Madame Dr. **Houria DAKAK**, chercheur à l'INRA, dont les conseils avisés, l'encouragement constant et la patience remarquable ont été d'une grande aide. Je la remercie pour sa disponibilité, ses compétences scientifiques, ainsi que pour ses qualités humaines, qui ont joué un rôle crucial dans l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Dr. **Noureddine AMENZOU**, chercheur au CNESTEN, pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ce travail. Sa disponibilité et son engagement constant à faire progresser ma recherche m'ont poussée à donner le meilleur de moi-même. Son soutien et ses conseils avisés ont grandement contribué à l'amélioration de ma recherche. Son suivi rigoureux de l'expérimentation et sa contribution inestimable ont été déterminants dans la réussite de ce travail.

J'aimerais également adresser mes vifs remerciements à Monsieur le Dr. **Moncef BENMANSOUR**, Directeur scientifique du CNESTEN, pour toutes les facilités offertes, ses recommandations, sa patience et ses qualités humaines. Je lui en suis très reconnaissante.

Je remercie l'ensemble des doctorants du Laboratoire des Matériaux, Nanotechnologies et Environnement (LMNE) pour la bonne ambiance qu'ils ont fait régner au laboratoire, leur coopération et leur soutien.

Je souhaite également remercier les institutions partenaires et les laboratoires de collaboration qui ont soutenu ce travail, en particulier l'INRA, l'ICARDA et le CNESTEN, pour leur appui technique, scientifique et logistique. Leur contribution a été essentielle à la réalisation de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à mes collègues doctorants de l'équipe INRA, en particulier Mbarek, Najib, Malika, Kenza, Habiba, Houda et Kamal, pour leur camaraderie, leur soutien et les moments agréables partagés durant ces années. Enfin, je remercie l'équipe technique de l'INRA (Hafid, Said, Khalid, Bouazza, Jallal, Ouzzine et Yassin) pour leur aide précieuse dans l'élaboration des protocoles, la collecte des données sur le terrain et pour leur amabilité. Leur assistance et leur disponibilité ont été fondamentales pour la conduite des expérimentations. Je n'oublie pas de remercier tout le personnel scientifique et technique de l'INRA et du laboratoire LMNE pour leur contribution et leur soutien.

Mes remerciements chaleureux et ma reconnaissance s'adressent à tous mes professeurs de la Faculté des Sciences de Rabat pour les savoirs et les valeurs transmis, ainsi qu'au personnel administratif et technique de la faculté pour les services rendus. Et pour n'oublier personne, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

A tous Merci.

*"Always remember: if you have a share in something
God will turn all the scales to get it".*

Résumé :

L'agriculture représente une part essentielle de l'économie marocaine, contribuant à 15-20 % du PIB, mais elle fait face à des défis structurels majeurs tels que l'érosion des sols liée au labour intensif et les effets du changement climatique. Le semis conventionnel (SC), en perturbant les sols, accélère leur dégradation et réduit la stabilité des agrégats, exacerbant l'érosion hydrique. Face à ces enjeux, le défi de l'agriculture marocaine est d'augmenter la production tout en préservant les ressources naturelles. Cette étude examine l'impact du semis direct (SD) et de la fertilisation azotée sur les propriétés du sol et les rendements du blé dur. Les résultats montrent que le SD améliore la structure du sol, l'accumulation de matière organique, la rétention d'eau et l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE), surpassant le SC. Les variétés Nachit, Faraj et Luiza ont obtenu des rendements plus élevés sous SD, même avec de faibles doses d'azote. De plus, l'utilisation de la technique isotopique stable ^{15}N a permis de mieux comprendre la dynamique de l'azote, démontrant que le SD réduit les pertes d'azote et améliore l'efficacité des ressources. Ces résultats soulignent l'importance des pratiques agricoles durables pour améliorer la productivité tout en limitant les impacts environnementaux.

Mots-clés : *Efficacité d'utilisation d'azote NUE, Fertilité azotée, Isotope stable ^{15}N , Semis conventionnel, Semis direct.*

Abstract:

Agriculture is an essential part of the Moroccan economy, contributing 15-20% of GDP, but it faces major structural challenges such as soil erosion linked to intensive ploughing and the effects of climate change. Conventional tillage (CT), by disturbing soils, accelerates their degradation and reduces the stability of aggregates, exacerbating water erosion. Faced with these challenges, Moroccan agriculture aims to increase production while preserving natural resources. This study examines the impact of no tillage (NT) and nitrogen fertilization on soil properties and durum wheat yields. Results show that SD improves soil structure, organic matter accumulation, water retention and nitrogen use efficiency (NUE), outperforming CT. The varieties Nachit, Faraj and Luiza achieved higher yields under NT, even at low nitrogen rates. In addition, the use of the ^{15}N stable isotope technique enabled a better understanding of nitrogen dynamics, demonstrating that NT reduces nitrogen losses and improves resource efficiency. These results underline the importance of sustainable agricultural practices to improve productivity while limiting environmental impacts.

Keywords: *Conventional tillage, Nitrogen fertility, Nitrogen use efficiency NUE, No tillage, Stable isotope ^{15}N .*

تعد الزراعة جزءاً مهماً من الاقتصاد المغربي، حيث تساهم بنسبة 15-20% من الناتج المحلي الإجمالي. ومع ذلك، يواجه هذا القطاع الحيوي عدداً من التحديات الهيكلية، بما في ذلك تآكل التربة الناجم عن الحرث المكثف والآثار المتفاقمة لتغير المناخ. ويساهم الحرث التقليدي الذي يؤدي إلى إفساد التربة وتسريع تدهورها في فقدان المادة العضوية وانخفاض ثبات الركام مما يؤدي إلى تفاقم التعرية المائية. ويزيد هذا الوضع من صعوبة إدارة التربة والمياه، لا سيما في المناطق القاحلة وشبه القاحلة في المغرب. وفي مواجهة هذه التحديات، يتمثل الهدف الرئيسي للزراعة المغربية في زيادة الإنتاج مع الحفاظ على الموارد الطبيعية، ومن هنا تأتي الحاجة إلى اعتماد ممارسات زراعية أكثر استدامة مثل البذر المباشر. تستكشف هذه الدراسة تأثير البذر المباشر والتسميد بالنيتروجين على خواص التربة وإنتاجية العديد من أصناف القمح الصلب. أجريت التجارب في مزرعة تجريبية تابعة للمعهد الوطني للبحث الزراعي. أظهرت النتائج أن البذر المباشر يحسن من بنية التربة وتراكم المواد العضوية واحتباس المياه وكفاءة استخدام النيتروجين متفوقاً بذلك على البذر التقليدي. وأظهرت أصناف ناشيت وفرج ولويزا غلة أعلى في ظل التسميد المعزز، حتى بمعدلات منخفضة من النيتروجين. وبالإضافة إلى ذلك، مكّن استخدام تقنية النظائر المستقرة من فهم أفضل لديناميات النيتروجين، مما يدل على أن التسميد المعزز يحد من خسائر النيتروجين في التربة مع تحسين كفاءة الموارد الزراعية وتؤكد هذه النتائج أهمية الحفاظ على التربة واعتماد ممارسات الزراعة المستدامة لتحسين إنتاجية الحبوب في مواجهة التحديات المناخية. وبالإضافة إلى ذلك، لا تعزز التنمية المستدامة تحسين بنية التربة وزيادة تراكم المواد العضوية فحسب، بل تساهم أيضاً في زيادة كفاءة استخدام موارد المياه والنيتروجين. ويمكن أن يوفر اعتماد التنمية المستدامة على نطاق واسع، إلى جانب الإدارة الدقيقة لمدخلات النيتروجين، حلاً مستداماً لزيادة إنتاجية محاصيل الحبوب مع الحد من التأثير السلبي على البيئة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام أدوات متطورة مثل النظير المستقر يوفر فهماً أكثر تفصيلاً لديناميات المغذيات، مما يمهد الطريق لزراعة أكثر مرونة وكفاءة في استخدام الموارد في المناطق القاحلة وشبه القاحلة في المغرب

الكلمات المفتاحية: البذر المباشر، البذر التقليدي، خصوبة النيتروجين، النظير المستقر، كفاءة استخدام النيتروجين في الزراعة

Productions Scientifiques

Publications scientifiques

1. Maher, H.; Moussadek, R.; Zouahri, A.; Douaik, A.; Dakak, H.; El Moudane, M.; Ghanimi, A. 2020. Effect of no tillage on the physico-chemical properties of soils of the El Koudia region, Rabat (Morocco). E3S Web Conf., 150, 03010.
2. Maher, H.; Moussadek, R.; Ghanimi, A.; Zouidi, O.; Douaik, A.; Dakak, H.; Amenzou, N.E.; Zouahri, A. (2022). Effect of tillage and nitrogen fertilization on soil properties and yield of five durum wheat germplasms in a dry area of Morocco. Appl. Sci.,13, 910.
3. Maher, H. ; Moussadek, R. ; Zouahri, A. ; Douaik, A. ; Amenzou, N.E. ; Benmansour, M. ; Iaaich, H. ; Dakak, H. ; El Mouridi, Z. ; Bellaouchou, A. ; et al. (2023). Nitrogen Use Efficiency Using the ¹⁵N Dilution Technique for Wheat Yield under Conservation Agriculture and Nitrogen Fertilizer. Nitrogen, 4, 369–381. <https://doi.org/10.3390/nitrogen4040026>.
4. Kadiri Hassani, K., Moussadek, R., Baghdad, B., Zouahri, A., dakak, H., Maher, H. et Bouabdli, A., (2024). Effect of No Tillage and Conventional Tillage on Wheat Grain Yield Variability: A Review. Journal of Environmental & Earth Sciences. 6(1): 57–70. DOI: <https://doi.org/10.30564/jees.v6i1.6172>

Communications Scientifiques

1. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H et Ghanimi A. (2022). Effect of no tillage and nitrogen fertilization on the yield of five durum wheat varieties in dry area of Morocco. Communication orale, 2ème Congrès International sur la Valorisation des Ressources Naturelles, Faculté des Sciences de Rabat, Rabat, Maroc, 30 juin au 2 Juillet 2022.
2. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Ghanimi A (2023). Comparative study of the effect of tillage and nitrogen fertilization on soil properties and durum wheat productivity under semi-arid conditions. Communication orale, 3rd Africa Congress on Conservation Agriculture –Rabat, 5-8 June, 2023.
3. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Ghanimi A (2023). Evaluation of the yield of five durum wheat varieties under the effect of two tillage types and different doses of nitrogen in a semi-arid zone of morocco. Communication par affichée, the African

- Plant Breeders Association Conference 3rd Edition –UM6P- Benguerir October 23rd – 26th, 2023.
4. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Ghanimi A (2022). Réponse des deux variétés du blé dur au semis direct et la fertilisation azotée (région de rabat-merchouch). Communication par affichée, Journées doctoriales de la Faculté des sciences de Rabat du 15 au 20 Mai 2023.
 5. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Ghanimi A (2023). Effet du mode de semis et des doses d'azote sur le rendement du blé dur sous semis direct dans le site de Marchouch. Communication orale, Journées doctoriales de la Faculté des sciences de Rabat du 19 au 21 Juillet 2023.
 6. Maher H, Moussadek R, Ghanimi A, Zouahri A, Dakak H, El Moudane M, Tabiyaoui M, Sabbar A (ENSET-Rabat, 12-14 juin 2019). La 1ere édition des journées doctoriales CERNE2D-2019. Effet du Semis direct sur les propriétés physico-chimiques des sols du Maroc (région de Rabat- El Koudia).
 7. Maher H, Moussadek R, Ghanimi A, Zouahri A, Douaik A, Dakak H. 1st EU/north-African Conference on Organic Agriculture EU-NACOA (Marrakech, 11-12 novembre 2019). Effet of direct seeding on the physiochemical properties of morrocan soil (region of Rabat- El Koudia).
 8. Maher H, Moussadek R, Ghanimi A, Zouahri A, Dakak H, El Moudane M, Tabiyaoui M, Sabbar A. The international Congress-VARENA 2019- Valorization of Natural Resources From Scientific Research to Socio-Economic Feasibility (Faculté des sciences Rabat, 26-28 juillet 2019). Etude de l'impact des eaux usées traitées sur la mobilité des herbicides au niveau d'un sol conduit en semis direct pour la culture du blé.
 9. Maher H, Ghanimi A, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Elarnabi F, Moussadek R. The 2nd Edition of the International Congress on Water and Environment studies (FPN Selouane - Nador, 14 - 15 novembre, 2019). Comparative study of the effect of the addition of wastewater on the mobility of the two herbicides (Fusilade and Derby) in soil conducted in direct seeding and conventional seeding under laboratory conditions.
 10. Maher H, Ghanimi A, Bentata F, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A et El Makhoukhi F. 2 ème conférence of the plan african society for Agricultural Engineering (PASAE-AfroAgEng on Role of agricultural engineering in meeting the challenge of global food

security ANAFIDE (Fondation mohammed VI Rabat, 10-13 septembre 2019). Etude de l'effet du semis direct et l'impact de l'ajoute des eaux usées sur la mobilité de certains herbicides.

11. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Lahmar M, Dakak H, Ghanimi A. The 6th international symposium « environment and sustainable development AMEED» (Faculté des sciences Rabat, 2-3 Octobre 2019). Study of the physicochemical quality of morrocan soil under no tillage compared to conventional tillage (region of Rabat- El Koudia).
12. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H et Ghanimi A. (2022). Effect of no tillage and nitrogen fertilization on the yield of five durum wheat varieties in dry area of Morocco. Communication orale, 2ème Congrès International sur la Valorisation des Ressources Naturelles, Faculté des Sciences de Rabat, Rabat, Maroc, 30 juin au 2 Juillet 2022.
13. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Ghanimi A (2023). Comparative study of the effect of tillage and nitrogen fertilization on soil properties and durum wheat productivity under semi-arid conditions. Communication orale, 3rd Africa Congress on Conservation Agriculture –Rabat, 5-8 June, 2023.
14. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Ghanimi A (2023). Evaluation of the yield of five durum wheat varieties under the effect of two tillage types and different doses of nitrogen in a semi-arid zone of morocco. Communication par affichée, the African Plant Breeders Association Conference 3rd Edition –UM6P- Benguerir October 23rd – 26th, 2023.
15. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Ghanimi A (2022). Réponse des deux variétés du blé dur au semis direct et la fertilisation azotée (région de rabat-merchouch). Communication par affichée, Journées doctoriales de la Faculté des sciences de Rabat du 15 au 20 Mai 2023.
16. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Dakak H, Ghanimi A (2023). Effet du mode de semis et des doses d'azote sur le rendement du blé dur sous semis direct dans le site de Marchouch. Communication orale, Journées doctoriales de la Faculté des sciences de Rabat du 19 au 21 Juillet 2023.

17. Maher H, Moussadek R, Ghanimi A, Zouahri A, Dakak H, El Moudane M, Tabiyaoui M, Sabbar A (ENSET-Rabat, 12-14 Juin 2019). La 1ere édition des journées doctoriales CERNE2D-2019. Effet du Semis direct sur les propriétés physico-chimiques des sols du Maroc (région de Rabat- El Koudia).
18. Maher H, Moussadek R, Ghanimi A, Zouahri A, Douaik A, Dakkak H. 1st EU/north-African Conference on Organic Agriculture EU-NACOA (Marrakech, 11-12 Novembre 2019). Effet of direct seeding on the physiochemical properties of morrocan soil (region of Rabat- El Koudia).
19. Maher H, Moussadek R, Ghanimi A, Zouahri A, Dakak H, El Moudane M, Tabiyaoui M, Sabbar A. The international Congress-VARENA2019- Valorization of Natural Resources From Scientific Research to Socio-Economic Feasibility (Faculté des sciences Rabat, 26-28 juillet 2019). Etude de l'impact des eaux usées traitées sur la mobilité des herbicides au niveau d'un sol conduit en semis direct pour la culture du blé.
20. Maher H, Ghanimi A, Zouahri A, Douaik A, Dakkak H, Elarnabi F, Moussadek R. The 2nd Edition of the International Congress on Water and Environment studies (FPN Selouane - Nador, 14 - 15 novembre, 2019). Comparative study of the effect of the addition of wastewater on the mobility of the two herbicides (Fusilade and Derby) in soil conducted in direct seeding and conventional seeding under laboratory conditions.
21. Maher H, Ghanimi A, Bentata F, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A et El Makhoukhi F. 2 ème conférence of the plan african society for Agicultural Engineering (PASAE-AfroAgEng on Role of agricultural engineering in meeting the challenge of global food security ANAFIDE (Fondation mohammed VI Rabat, 10-13 septembre 2019). Etude de l'effet du semis direct et l'impact de l'ajoute des eaux usées sur la mobilité de certains herbicides.
22. Maher H, Moussadek R, Zouahri A, Douaik A, Lahmar M, Dakak H, Ghanimi A. The 6 th international symposium « environment and sustainable development AMEED » (Faculté des sciences Rabat, 2-3 Octobre 2019). Study of the physicochemical quality of morrocan soil under no tillage compared to conventional tillage (region of Rabat- El Koudia).

Table des matières :

Dédicace.....	i
Remerciements	ii
Résumé	iv
Abstract.....	v
Productions Scientifiques.....	vii
Table des matières	xi
Liste des tableaux	xiv
Liste des figures.....	xv
Liste des abréviations.....	xvi
Introduction générale	1
Etude bibliographique.....	5
I. Introduction	6
1. A l'échelle mondiale	8
2. A l'échelle nationale	9
II. Semis direct	11
1. Impact socioéconomique et environnemental de l'agriculture	13
a. A l'échelle mondiale.....	13
b. A l'échelle nationale.....	15
2. Effets du semis direct sur les propriétés physiques du sol	17
a. Structure du sol	17
b. Densité apparente	18
c. Porosité du sol.....	18
d. Humidité du sol	19
3. Effets du semis direct sur les propriétés chimiques du sol.....	20
a. pH du sol.....	20
b. Carbone organique.....	20
c. Azote	21
d. Phosphore	23
e. Potassium.....	24
4. Dynamique de l'azote dans le sol.....	25
a. Fixation de l'azote.....	26
b. Minéralisation.....	29
c. Nitrification	33
d. Assimilation par les plantes.....	35

e.	Dénitrification.....	36
f.	Volatilisation	37
g.	Immobilisation.....	38
III.	L'étude de la dynamique de l'azote à l'aide de la méthode d'isotope stable ¹⁵ N	41
Matériels et méthodes		46
I.	Sites d'étude	47
1.	Domaine expérimental d'El Koudia	47
a.	Échantillonnage	48
b.	Préparation des échantillons.....	48
2.	Domaine expérimental de Merchouch.....	49
a.	Échantillonnage et analyse du sol.....	50
b.	Protocole expérimental.....	50
c.	Données climatiques.....	52
II.	Analyses physiques du sol :.....	53
1.	Texture du sol	53
2.	Densité apparente	53
3.	Stabilité structurelle	54
4.	La granulométrie :.....	55
III.	Les analyses chimiques du sol.....	56
1.	Conductivité électrique	56
2.	pH du sol	57
3.	Matière organique.....	58
4.	Capacité d'échange cationique.....	59
5.	Macroéléments.....	60
a.	Phosphore	60
b.	Potassium.....	61
c.	Calcium et magnésium	61
6.	Oligo-éléments	62
7.	Azote total	63
8.	Ammonium et nitrates.....	63
9.	Analyse des isotopes stables	63
IV.	Analyse statistique	64
1.	La première étude	64
2.	La deuxième étude	64
3.	La troisième étude.....	65
Résultats et discussions		66
Chapitre 1 : Effet du semis direct du sol sur les propriétés physico-chimiques des sols de la région d'El Koudia, Rabat (Maroc).....		67

1. Texture du sol	69
2. Densité apparente	69
3. Stabilité structurelle	70
4. Propriétés chimiques du sol	70
5. Comparaison entre SD et SC	71
a. Variables à distribution normale : ANOVA	73
b. Variables à distribution non normale : test non paramétrique.....	74
Chapitre II : Effet du travail du sol et de la fertilisation azotée sur les propriétés du sol et le rendement de cinq germoplasmes de blé dur dans une zone semi-aride du Maroc	76
I. Sol.....	78
2. Azote total	81
3. Ammonium.....	82
4. Nitrates	84
II. Rendement du blé	85
Chapitre III : Efficacité d'utilisation de l'azote à l'aide de la technique de de traçage isotopique ¹⁵N pour le rendement du blé dans l'agriculture de conservation.....	90
I. Rendements en grains et en paille	92
II. Teneur en azote total des plantes.....	93
III. Azote dérivé de l'engrais.....	94
IV. Efficacité de l'utilisation de l'azote	96
Conclusion générale.....	101
Annexes	104
Références Bibliographiques	118
Publications scientifiques.....	141

Liste des tableaux

Tableau 1. Propriétés chimiques du sol.....	50
Tableau 2 : Principales caractéristiques des trois variétés.....	51
Tableau 3 : Echelle granulométrique du sol.....	53
Tableau 4 : Classes de stabilité, battance et érosion hydrique en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation (DMP).....	56
Tableau 5 : Echelle de salinité des sols (Durant J.H,1983).....	57
Tableau 6: Répartition des classes des pH des sols étudiés du périmètre d'Issen selon les normes DIAEA /DRHA /SEEN (2008).....	58
Tableau 7: Les normes de matière organique des sols selon DIAEA /DRHA /SEEN (2008).....	59
Tableau 8 : Les normes d'interprétation de la C.E.C (Doucet, 2006).....	60
Tableau 9: Répartition des classes de phosphore assimilable (P_2O_5) des sols selon les normes Delaunois (2008).....	60
Tableau 10: Les normes d'interprétation potassium échangeable (K) selon les normes Delaunois (2008).....	61
Tableau 11. Texture du sol pour le non-travail du sol (SD) et le travail du sol conventionnel (SC).....	69
Tableau 12 : Résultats des tests de stabilité structurale.....	70
Tableau 13 : Paramètres statistiques descriptifs des différentes propriétés du sol.....	71
Tableau 14 : Résultats de l'ANOVA pour la comparaison des moyennes des variables normales. Les moyennes avec des lettres différentes indiquent des différences significatives à un niveau de probabilité de 0,05.....	74
Tableau 15 : Résultats du test non paramétrique (test de Mann-Whitney) avec les médianes pour les variables non normales.....	75
Tableau 16 : Texture du sol mesurée avant le début de l'expérience pour le non-travail du sol (SD) et le travail du sol conventionnel (SC) à une profondeur de 15 cm.....	78
Tableau 17. Propriétés chimiques mesurées avant le début de l'expérience pour le non-travail du sol (SD) et le travail conventionnel du sol (SC) à chaque profondeur de sol.....	79
Tableau 18. Résultats de l'ANOVA pour les propriétés du sol mesurées avant le début de l'expérience.....	79
Tableau 19. Teneur en azote total ($mg\ kg^{-1}$) mesurée à la fin de l'expérience pour chaque dose d'azote ($kg\ N /ha$), type de travail du sol et profondeur du sol (cm).....	81
Tableau 20 : Résultats de l'ANOVA pour les propriétés du sol mesurées à la fin de l'expérience.....	81
Tableau 21. Teneur en ammonium ($mg\ kg^{-1}$) mesurée à la fin de l'expérience pour chaque dose d'azote ($kg\ N /ha$), type de travail du sol et profondeur du sol (cm).....	83
Tableau 22 : Teneur en nitrates ($mg\ kg^{-1}$) mesurée à la fin de l'expérience pour chaque dose d'azote ($kg\ N\ ha^{-1}$), type de travail du sol et profondeur du sol (cm).....	84
Tableau 23. Rendement en grains de blé (t/ha) mesuré à la fin de l'expérience pendant la saison culturale 2020-2021 pour tous les types de travail du sol, les doses d'azote ($kg\ N /ha$) et les variétés.....	86
Tableau 24. Rendement de la paille de blé (t /ha) mesuré à la fin de l'expérience au cours de la saison culturale 2020-2021 pour tous les types de travail du sol, les doses d'azote ($kg\ N /ha$) et les variétés.....	87
Tableau 25 : Résultats de l'ANOVA pour le rendement en grains et en paille de blé ($t\ ha^{-1}$) mesuré à la fin de l'expérience au cours de la saison culturale 2020-2021.....	87
Tableau 26. Résultats de l'ANOVA pour les rendements en grains de blé et en paille et pour l'azote total : moyennes, écarts types, valeurs p et tailles d'effet.....	93
Tableau 27 : Résultats de l'ANOVA pour l'azote dérivé des engrais (NDFE) et l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE) : moyennes, écarts-types, valeurs p et tailles d'effet.....	94
Tableau 28. Efficacité d'utilisation de l'azote (NUE, %) pour les types de travail du sol SD et SC pour les rendements en grains et en paille pour les trois doses d'azote.....	99

Liste des figures

Figure 1. Illustration des trois grands principes de l'agriculture de conservation.....	7
Figure 2. Axes de la stratégie « Génération Green 2020-2030 (GG).....	9
Figure 3. Technique de labour en semis direct (INRA).....	11
Figure 4 : Evolution de valeur ajoutée (% du PIB) de l'agriculture dans le monde entre 1981 et 2023	14
Figure 5. Présentation du site d'étude dans le domaine expérimental d'El Koudia.	47
Figure 6. Schéma du site d'essai avec les deux systèmes (SD et SC) et les points d'échantillonnage.	48
Figure 7. Plan de localisation du domaine expérimental de Marchouch.	49
Figure 8. Précipitations et températures contrastées dans la Région du Zaër : saison 2020-2021 par rapport à la moyenne décennale (2013-2022) au domaine expérimental de Marchouch.	53
Figure 9 : Diagramme de classification détaillée des textures (US Taxonomy 1976 et clés de la Taxonomie des sols, 1986)	53
Figure 10. Densité volumique (g/cm^3) à la profondeur de 0 à 10 cm pour SD et SC.	69
Figure 11. Boîte à moustaches de certaines propriétés du sol : pH_{eau} (en haut à gauche), $\log(\text{CE})$ (en haut à droite), Zn (en bas à gauche) et Fe (en bas à droite).	72
Figure 12. NDFP de la paille de blé (%).	95
Figure 13. NUE du grain de blé (%).	98
Figure 14. NUE de la paille de blé (%).	98

Liste des abréviations

AC : Agriculture de conservation

ANOVA : Analyse de la variance

CE : Conductivité électrique

CEC : Capacité d'échange cationique

CO : Carbone organique

CV : Coefficient de variation

K₂O : Potassium

MO : Matière organique

N : Azote

NDF : Azote dérivé des engrais

NH₄⁺ : Ammonium

N₂O : Protoxyde d'azote

NO₃⁻ : Nitrate

NUE : Efficacité de l'utilisation de l'azote

P₂O₅ : Phosphore

SC : Semis conventionnel

SD : Semis direct

T : Travail du sol

N_i : Azote atmosphérique

V : Variété

Introduction générale

Le semis direct est une pratique agricole durable qui consiste à semer les cultures sans perturber mécaniquement le sol, préservant ainsi les ressources naturelles, en particulier dans les zones arides et semi-arides. Contrairement au semis conventionnel, cette méthode maintient les résidus de culture en surface, réduisant l'érosion et favorisant la rétention de l'humidité, tout en renforçant la structure naturelle du sol (**Derpsch et al., 2014**). Cette approche a suscité un intérêt croissant au Maroc, où les conditions climatiques difficiles et les sols fragiles requièrent des solutions innovantes, notamment pour améliorer la productivité agricole (**Bessam et Mrabet, 2003**). Dans ce contexte, le semis direct présente des avantages notables pour optimiser l'utilisation de l'azote dans le sol. En réduisant la perturbation du sol, il conserve l'humidité, améliorant ainsi l'absorption des nutriments par les plantes (**Rusinamhodzi et al., 2011**). De plus, les résidus organiques enrichissent le sol, facilitant la minéralisation de l'azote et augmentant sa disponibilité pour les cultures (**Sisti et al., 2004**). Cependant, les interactions entre le semis direct et la fertilité azotée sont complexes et dépendent des conditions climatiques, des types de sols et des variétés cultivées. Une gestion optimisée de l'azote est donc nécessaire pour maximiser les rendements tout en limitant les impacts environnementaux négatifs (**Ladha et al., 2016**). Bien que crucial pour le rendement, une gestion inadéquate de l'azote peut entraîner des pertes par volatilisation ou lixiviation, réduisant ainsi son efficacité et nuisant à l'environnement (**Raun et Johnson, 1999**). Pour mieux comprendre et améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE) dans les systèmes de semis direct, les chercheurs ont recours à des techniques avancées, comme l'utilisation de l'isotope stable ^{15}N comme traceur pour décrire l'évolution des polluants organo-nitrés. Grâce à cet outil, il devient possible d'analyser précisément l'absorption de l'azote par les cultures et d'adapter les pratiques agricoles, telles que le semis direct ou la fertilisation azotée, afin d'optimiser l'utilisation de cet élément (**Shearer et Kohl, 1986**) et de maximiser l'efficacité et la rationalisation des ressources (**Houlton et al., 2015**).

Le blé dur (*Triticum durum*), une culture stratégique au Maroc, occupe une place importante dans l'économie agricole et l'alimentation du pays. Cependant, sa productivité est fortement influencée par des facteurs environnementaux tels que la fertilité des sols et la gestion des nutriments, notamment l'azote, élément clé pour la croissance des plantes et la synthèse des protéines (**Benlhabib et al., 2016**). Au Maroc, où les ressources en eau et en sols fertiles sont limitées, l'utilisation de l'isotope ^{15}N dans les recherches sur le semis direct et la fertilité azotée ouvre des perspectives prometteuses pour améliorer la productivité du blé dur (**Fahmi et al., 2018**) et renforcer la durabilité et la productivité de l'agriculture au Maroc, tout en préservant les ressources naturelles (**Oweis et al., 2000**). Des études ont montré que le semis direct, associé à une gestion appropriée de l'azote, permet de stabiliser les rendements en cas de stress hydrique, de réduire les pertes d'azote et d'améliorer la résilience des systèmes agricoles (**Mrabet et al., 2012**). **Govaerts**

et al., (2009) ont recommandé qu'une meilleure compréhension de la dynamique de l'azote dans les sols pourrait aboutir à des pratiques agricoles plus durables et des rendements accrus, tout en minimisant les impacts environnementaux.

À notre connaissance, bien que la recherche sur le semis direct ait débuté au Maroc dans les années 1980, aucune étude n'a encore été menée dans ce domaine en utilisant la technique du marquage isotopique ^{15}N . Nous proposons d'utiliser un engrais marqué au ^{15}N pour étudier les effets des doses d'azote et de deux méthodes de travail du sol sur le rendement en grains et en paille du blé, la part d'azote dérivée de l'engrais, ainsi que l'efficacité de l'utilisation de l'azote dans des conditions de culture pluviale.

Les objectifs de cette étude s'articulent autour de trois axes de recherche complémentaires, faisant l'objet de trois chapitres, chacun étant défini par des questions précises et des objectifs spécifiques.

Axe 1 : Effet du semis direct sur les propriétés physico-chimiques des sols dans la région d'El Koudia, Rabat (Maroc)

Question 1 : Comment le semis direct influence-t-il les propriétés physico-chimiques des sols dans la région et dans quelle mesure cette pratique contribue-t-elle à l'amélioration de la qualité des sols ?

Objectif : Analyser l'impact du semis direct sur la structure du sol, en étudiant des paramètres du sol, tels que la densité apparente, la stabilité structurale, la matière organique, la conductivité électrique, la capacité d'échange cationique, ainsi que les concentrations en macroéléments (phosphore, potassium, magnésium, calcium) et oligo-éléments (zinc, fer, cuivre, manganèse).

Cette étude a permis d'évaluer les effets du semis direct sur les propriétés physico-chimiques du sol dans le champ expérimental d'El Koudia, à 30 km de Rabat. Le site se compose de deux parcelles : l'une consacrée au semis direct et l'autre au semis conventionnel, avec la culture du blé dur (variété Arrehane). L'objectif est de comprendre l'impact des techniques de conservation adaptées à une agriculture durable et respectueuse des sols et de leur environnement.

Axe 2 : Effet du travail du sol et de la fertilisation azotée sur les propriétés du sol et le rendement de cinq variétés de blé dur dans une zone semi-aride du Maroc

Question 2 : Dans quelle mesure le travail du sol et la fertilisation azotée influencent-ils les propriétés physico-chimiques du sol et le rendement de cinq variétés de blé dur dans un environnement semi-aride ?

Objectif : Étudier l'effet des techniques sans labour et de la fertilisation azotée sur la fertilité du sol et le rendement de cinq variétés de blé dur récemment développées au Maroc, dont trois nouvelles variétés (Louiza, Faraj et Nachit) et deux germoplasmes (M.G et I.C), dans le cadre d'un essai de semis direct de longue durée (18 ans) à la station expérimentale de l'INRA de Merchouch-Région de Rabat. L'interaction entre les facteurs étudiés permettra de formuler des

recommandations aux agriculteurs concernant la combinaison optimale du travail du sol, des doses d'azote et des variétés.

Axe 3 : Efficacité d'utilisation de l'azote à l'aide de la technique de traçage isotopique ^{15}N pour le rendement du blé dans le cadre de l'agriculture de conservation

Question 3 : Comment la technique du ^{15}N permet-elle de mieux comprendre l'efficacité d'utilisation de l'azote dans l'agriculture de conservation, et quels sont ses effets sur le rendement du blé ?

Objectif : Utiliser la technique du marquage isotopique ^{15}N pour suivre et quantifier la dynamique de l'azote dans les systèmes de culture en agriculture de conservation.

Cette étude vise à évaluer l'impact du travail du sol et de la fertilisation azotée sur la distribution de l'azote dans le sol et dans le blé dur (variété Louiza). Deux systèmes de travail du sol ont été comparés : semis direct (SD) et semis conventionnel (SC), en utilisant trois doses d'azote (82, 115 et 149 kg N ha⁻¹). La teneur en azote du sol a été mesurée à l'aide de la méthode des isotopes stables de l'azote (^{15}N).

Etude bibliographique

I. Introduction

L'agriculture conventionnelle repose sur les méthodes de travail du sol telles que le labour pour favoriser l'enracinement et les travaux du sol en surface en vue de préparer le lit de semences. Le labour, le bêchage, le binage, l'hersage en sont des exemples des travaux du sol (Sissoko et al., 2013). La pratique du labour profond consiste à découper et retourner des bandes de terre à l'aide d'outils comme des charrues à socs ou à disque, pouvant atteindre des profondeurs de 25 à 35 cm. Les outils utilisés pour la préparation du sol nécessitent un effort substantiel qui dépend de la teneur en eau et de la texture du sol, du pourcentage de la matière organique du sol et la présence de mauvaises herbes (Sissoko et al., 2013).

L'agriculture de conservation représente une véritable transformation silencieuse dans le monde agricole, cherchant à concilier la production alimentaire avec la préservation de l'environnement. L'agriculture de conservation repose sur trois grands principes (FAO, 2021d) : la couverture permanente du sol, la réduction du travail du sol et la rotation des cultures.

- La **réduction du travail du sol**, ou non-labour, permet d'économiser le temps et les ressources, de préserver la structure naturelle du sol, de réduire l'érosion et de minimiser les perturbations des habitats naturels des organismes du sol. Par ailleurs, l'agriculture de conservation réduit la nécessité de labourer les champs, ce qui diminue la consommation de carburant et l'usure des équipements agricoles. Cette réduction de l'utilisation de machines lourdes non seulement diminue les coûts pour les agriculteurs, mais contribue également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, alignant ainsi cette méthode avec les objectifs de lutte contre le changement climatique.
- Une **couverture permanente** du sol consiste à maintenir le sol constamment protégé par des résidus de culture ou des plantes de couverture. Cette pratique aide à réduire l'érosion du sol, à améliorer la structure du sol et à favoriser la biodiversité du sol, en maintenant un habitat pour les organismes bénéfiques. Cette pratique limite le ruissellement de l'eau et empêche la perte de précieuses couches arables. De plus, elle améliore la capacité des sols à retenir l'eau, augmentant ainsi leur résilience face aux sécheresses et réduisant le besoin d'irrigation intensive.
- La **Rotation des cultures**, en alternant les types de plantes cultivées, contribue à briser les cycles de maladies et de ravageurs, et à améliorer la santé globale du sol. En diversifiant les cultures, les agriculteurs peuvent mieux utiliser les ressources disponibles, comme les nutriments et l'eau, diminuer l'utilisation des pesticides et favorisant un environnement agricole plus équilibré et augmenter la résilience de leurs systèmes agricoles face aux changements climatiques.

1. Réduction
du travail du



2. Couverture
permanente



3. Rotation
des cultures



Figure 1. Illustration des trois grands principes de l'agriculture de conservation

Dans ce qui suit, nous allons présenter les effets du semis direct sur les propriétés physicochimiques du sol ainsi que l'importance économique et sociale de l'agriculture de conservation l'impact du semis direct sur les systèmes agricoles à l'échelle mondiale et à l'échelle nationale.

L'agriculture de conservation vise à améliorer la santé des sols, optimiser l'utilisation de l'eau et renforcer la biodiversité (FAO, 2021c). L'un des avantages les plus significatifs de cette approche est sa capacité à restaurer et maintenir la qualité des sols. En réduisant le labour et en maintenant une couverture végétale permanente, les pratiques de conservation limitent l'érosion du sol, augmentent sa teneur en matière organique et favorisent une meilleure rétention de l'eau (Kassam et al., 2009b). Ces bénéfices sont essentiels dans un contexte de changement climatique, où la gestion durable des sols devient cruciale pour assurer la productivité agricole à long terme (Lal, 2020a). De plus, l'agriculture de conservation joue un rôle important dans la séquestration du carbone, capturant le dioxyde de carbone de l'atmosphère et le stockant dans la matière organique du sol, ce qui est vital pour atténuer le changement climatique (Lal, 2020b). Cette approche est soutenue par de nombreuses organisations internationales, telles que la FAO, qui en souligne les avantages pour la sécurité alimentaire et la durabilité environnementale (FAO, 2021c). Cependant, la transition vers cette méthode peut être complexe, avec des défis comme le coût initial et la nécessité de formation. Il est donc crucial de fournir un soutien adéquat aux agriculteurs pour qu'ils puissent adopter ces pratiques et devenir des gardiens de la terre, assurant une production durable tout en respectant l'écologie (Pretty, 2008 ; Banque Mondiale, 2020c). En fin de compte,

l'agriculture de conservation illustre une vision humaniste de l'agriculture où la prospérité humaine et la santé des écosystèmes vont de pair, offrant une voie vers une coexistence harmonieuse et durable entre l'homme et la nature (FAO, 2021c).

1. A l'échelle mondiale

L'agriculture de conservation représente une approche prometteuse pour répondre aux défis de l'agriculture mondiale, en mettant l'accent sur la durabilité et la résilience des systèmes agricoles. Cette méthode cherche à réconcilier la nécessité de produire suffisamment de nourriture avec l'impératif de préserver les ressources naturelles. À l'échelle internationale, l'agriculture de conservation a montré des résultats prometteurs. Par exemple, en Amérique du Sud, l'adoption de ces pratiques a permis d'améliorer la santé des sols et de réduire les coûts de production pour les agriculteurs tout en augmentant les rendements de certaines cultures (Altieri, 2018). En Afrique, des projets soutenus par le Fonds International de Développement Agricole (FIDA) ont démontré que les techniques de conservation peuvent aider à restaurer les terres dégradées et à améliorer la sécurité alimentaire dans les communautés rurales (FIDA, 2021). Cependant, la transition vers l'agriculture de conservation n'est pas sans défis. Elle nécessite un changement de mentalité parmi les agriculteurs, une formation adéquate, et un accès à des ressources appropriées. A ce titre, les politiques publiques jouent un rôle crucial dans ce processus en fournissant des incitations économiques et en soutenant la recherche et l'innovation dans ce domaine (Pretty, 2008). Les initiatives telles que les subventions pour la mise en œuvre de pratiques de conservation et les programmes de formation sont essentielles pour faciliter cette transition et garantir que les agriculteurs peuvent adopter ces techniques de manière efficace (Banque Mondiale, 2020c). En fin de compte, l'agriculture de conservation représente une vision humaniste de l'agriculture, qui cherche à équilibrer la production alimentaire avec la préservation de notre planète. En favorisant des pratiques qui respectent les cycles naturels et soutiennent les écosystèmes, cette approche offre un chemin vers une agriculture plus durable, capable de nourrir les générations futures tout en protégeant les ressources essentielles de notre environnement (Altieri, 2018 ; FAO, 2021c). La clé du succès réside dans l'engagement collectif pour adopter et promouvoir ces pratiques, reconnaissant la nécessité de préserver notre terre pour le bien-être des communautés et des générations à venir.

L'agriculture de conservation est apparue comme une alternative à l'agriculture conventionnelle pour le but d'assurer une régularité aux rendements et protéger la ressource en sol contre l'érosion et celle en eau contre l'évapotranspiration, en particulier dans des zones où les précipitations sont irrégulières ou très rares (Kassam et al., 2009a). L'agriculture de conservation AC présente de nombreux avantages qui en font une approche précieuse pour l'avenir de l'agriculture durable. C'est une approche agricole qui vise la préservation, l'amélioration et l'optimisation des ressources

naturelles essentielles, telles que les sols, l'eau et la biodiversité (**Derpschr, 2001**), la protection de l'environnement et le soutien de la durabilité des exploitations agricoles. Ce n'est pas une fin en soi, mais plutôt une approche holistique pour une production agricole durable (**FAO, 2001c**). Ainsi, l'AC promeut des pratiques agricoles qui respectent la nature tout en assurant la viabilité économique des exploitations. En intégrant ces principes, les agriculteurs peuvent contribuer à un avenir plus durable, où la production agricole est en harmonie avec les écosystèmes naturels, garantissant ainsi des bénéfices à long terme pour la société et l'environnement.

2. A l'échelle nationale

L'agriculture de conservation au Maroc constitue une réponse stratégique face aux défis accrus de la dégradation des sols, de la désertification et du changement climatique. Le Maroc, avec son climat aride à semi-aride, est particulièrement vulnérable à ces problématiques environnementales, ce qui rend l'adoption de pratiques d'agriculture de conservation essentielle pour garantir la durabilité et la résilience des systèmes agricoles marocains (**FAO, 2021b**).

La recherche sur le semis direct a débuté au Maroc dans les années 1980. La réduction du travail du sol, notamment par le semis direct, commence à se répandre dans plusieurs régions du Maroc.

Les initiatives pour promouvoir l'agriculture de conservation sont soutenues par des politiques nationales telles que le Plan Maroc Vert, lancé en 2008 et la stratégie GG (2020-2030).



Figure 2. Axes de la stratégie « Génération Green 2020-2030 (GG)

(Source : Ministère de l'Agriculture)

En effet, la mise en œuvre du semis direct pour faire face aux problèmes de sécheresse et de santé du sol a été lancée, dans le cadre de la stratégie Génération Green (2020-2030) avec succès depuis

2020 pour couvrir 1Mha d'ici 2030 (**Bekkaoui et al., 2024**). Cette technique permet de préserver la structure naturelle du sol et réduit les perturbations des communautés microbiennes, essentielles à la fertilité et à la santé du sol (**INRA, 2020**). En outre, elle diminue les coûts énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre associées au labour traditionnel. Les agriculteurs marocains, soutenus par des programmes gouvernementaux et des initiatives internationales, découvrent les avantages économiques et environnementaux de cette méthode malgré les défis initiaux d'adaptation et les besoins en équipements spécifiques (**Banque Mondiale, 2020c**).

La rotation des cultures est également un pilier de l'agriculture de conservation au Maroc. En diversifiant les types de cultures, les agriculteurs peuvent améliorer la santé du sol et réduire les infestations de ravageurs. Par exemple, l'introduction de légumineuses dans les rotations contribue à l'enrichissement du sol en azote, diminuant ainsi la dépendance aux engrais chimiques et favorisant une meilleure structure et fertilité du sol (**Kassam et al., 2009b**).

Le plan stratégique GG (2020-2030) vise à moderniser l'agriculture marocaine en intégrant des volets importants pour la durabilité et la résilience climatique (**MAPMDREF, 2019**). Des programmes de financement et de soutien technique sont également mis en place pour aider les agriculteurs à adopter ces pratiques, en particulier dans les contextes où l'accès à l'équipement et les connaissances techniques sont limités (**Banque Mondiale, 2020c**). La FAO, en partenariat avec le gouvernement marocain, a lancé plusieurs projets visant à améliorer la gestion durable des terres et à promouvoir les techniques d'agriculture de conservation (**FAO, 2021b**).

Cependant, l'adoption de l'agriculture de conservation au Maroc n'est pas sans défis. Les petits agriculteurs, qui constituent une grande partie de la population agricole, peuvent rencontrer des obstacles tels que l'accès limité à l'équipement de semis direct, le manque de connaissances techniques et les coûts initiaux élevés (**Lal, 2020c**). Pour surmonter ces défis, il est crucial de renforcer les capacités des agriculteurs par des formations continues, des démonstrations pratiques, et des incitations financières. Le soutien communautaire et les réseaux de partage de connaissances jouent également un rôle vital dans la diffusion et l'adoption de ces pratiques (**Hobbs et al., 2008**).

En définitive, l'agriculture de conservation au Maroc ne se limite pas à une simple série de techniques agricoles, mais reflète une approche holistique qui reconnaît l'interconnexion entre l'homme et la nature. Cette démarche humaniste met en lumière la nécessité de protéger l'environnement tout en assurant la durabilité des systèmes agricoles pour les générations futures. Elle témoigne d'un engagement profond envers la préservation de la planète et le bien-être des communautés rurales, illustrant comment l'agriculture durable peut concilier prospérité humaine et santé écologique (**Banque Mondiale, 2020c**).

Ainsi, l'agriculture de conservation au Maroc s'impose comme une alternative viable pour contrer les effets négatifs des pratiques traditionnelles tout en répondant aux exigences de durabilité et de résilience. En adoptant ces techniques, les agriculteurs deviennent des gardiens de leur environnement, assurant la pérennité de leurs terres pour les générations futures (**World Bank, 2020**). Cette démarche témoigne d'une vision où l'agriculture durable n'est pas seulement une nécessité économique, mais aussi un engagement envers la préservation de la planète et le bien-être des communautés rurales (**MAPMDREF, 2019**).

II. Semis direct

Le semis direct, également connu sous le nom de semis sans labour, est une technique agricole qui consiste à semer les graines directement dans le sol sans effectuer de labour préalable. C'est une technique agricole qui gagne progressivement en popularité au Maroc en raison de ses nombreux avantages environnementaux et économiques. Dans un contexte marqué par une vulnérabilité accrue aux défis environnementaux tels que la dégradation des sols, la désertification et le changement climatique, cette pratique apparaît comme une solution innovante et durable pour les agriculteurs marocains. Le principe fondamental du semis direct est de minimiser la perturbation du sol en semant directement dans les résidus de culture précédents sans labour préalable. Cette approche permet de préserver la structure du sol, de maintenir sa couverture végétale et de favoriser la santé des écosystèmes agricoles (**INRA, 2020**).



Figure 3. Technique de labour en semis direct (INRA)

L'adoption du semis direct au Maroc a montré des résultats prometteurs en termes de conservation des ressources en eau, de réduction de l'érosion et d'amélioration de la fertilité des sols. En réduisant la fréquence et l'intensité du labour, le semis direct contribue à maintenir l'humidité du sol, ce qui est particulièrement crucial dans les zones arides et semi-arides du pays. Cette technique permet également de réduire les pertes de sol par érosion, un problème majeur dans les régions sujettes à des pluies torrentielles ou à des vents forts. De plus, en préservant la structure du sol, le

semis direct favorise l'activité biologique et microbienne, améliorant ainsi la fertilité naturelle du sol sans recours excessif aux engrais chimiques (**Mrabet, 2001**).

L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) du Maroc a mené plusieurs études pour évaluer l'impact du semis direct sur les systèmes agricoles du pays. Les recherches montrent que cette technique peut augmenter la matière organique du sol, essentielle pour maintenir la productivité agricole à long terme. De plus, le semis direct permet de séquestrer davantage de carbone dans le sol, contribuant ainsi à atténuer les effets du changement climatique (**INRA, 2020**). Des améliorations dans la structure du sol et une réduction de l'érosion ont également été observées, renforçant la résilience des terres agricoles face aux conditions climatiques extrêmes (**Mrabet, 2001 ; Moussadek et al., 2014a ; Laghrour et al., 2016**). Face aux défis urgents du changement climatique et à la rareté croissante des précipitations, le Maroc se tourne vers des solutions innovantes pour transformer son secteur agricole. Au cœur de cette révolution se trouve le semis direct, une méthode novatrice sans labour présentant un potentiel immense pour l'agriculture marocaine. Al Moutmir, en partenariat avec le MAPMDREF et l'INRA, a lancé un programme ambitieux en octobre 2019, avec le soutien de l'OCP et de l'UM6P. L'objectif est de promouvoir l'adaptation de l'agriculture marocaine aux changements climatiques et de mettre en œuvre le plan national de promotion du semis direct, visant à atteindre un million d'hectares de semis direct d'ici 2030. La superficie sous semis direct a atteint près de 85.000 hectares durant la campagne agricole 2022-2023, contre 15.000 hectares en 2019-2020, soit une augmentation de plus de 450% (**INRA, 2023**).

Le gouvernement marocain, conscient des bénéfices du semis direct, a inclus cette pratique dans ses stratégies nationales de développement agricole (Plan Maroc Vert et « Green Generation 2030 »), des stratégies visant à moderniser et à rendre plus durable le secteur agricole du pays. Cependant, l'adoption du semis direct n'est pas sans défis. Les agriculteurs marocains, notamment les petits exploitants, peuvent rencontrer des difficultés liées à l'accès limité aux équipements spécifiques nécessaires pour cette pratique. Le coût élevé des semoirs directs et le manque de services de maintenance et de pièces de rechange peuvent constituer des obstacles significatifs. De plus, l'adaptation au semis direct nécessite un changement de mentalité et de pratiques agricoles établies de longue date, ce qui peut prendre du temps et nécessiter un soutien continu en matière de formation et de sensibilisation (**Lal, 2020c**).

Des programmes de subventions et de formations sont mis en place pour encourager les agriculteurs à adopter le semis direct ; comme par exemple, des initiatives soutenues par la FAO et la Banque Mondiale visant à fournir aux agriculteurs les équipements nécessaires et à les former

aux techniques de semis direct. Ces efforts ont pour objectif de surmonter les obstacles tels que le coût initial élevé de l'équipement et le manque de connaissances techniques (**FAO, 2021b ; Banque Mondiale, 2020d**).

Malgré ces défis, les bénéfices à long terme du semis direct sont significatifs. Outre les avantages environnementaux, cette technique permet également de réduire les coûts de production en diminuant la consommation de carburant et l'usure des machines agricoles. Les économies réalisées peuvent être réinvesties dans d'autres aspects de l'exploitation agricole, améliorant ainsi la viabilité économique des fermes. En outre, le semis direct contribue à une meilleure gestion des ressources en eau, un atout précieux dans un pays où la disponibilité de l'eau est une préoccupation majeure (**Kassam et al., 2009a**).

En conclusion, le semis direct représente une innovation clé pour l'agriculture marocaine, offrant une solution durable aux défis environnementaux et économiques auxquels sont confrontés les agriculteurs. En favorisant la santé des sols, en réduisant l'érosion et en améliorant l'efficacité de l'utilisation de l'eau, cette technique joue un rôle crucial dans la promotion d'une agriculture résiliente et durable au Maroc. Les efforts combinés du gouvernement, des institutions de recherche et des partenaires internationaux sont essentiels pour surmonter les obstacles à l'adoption et maximiser les bénéfices du semis direct pour les agriculteurs marocains et l'environnement.

1. Impact socioéconomique et environnemental de l'agriculture

a. A l'échelle mondiale

D'une manière ou d'une autre, l'agriculture fait partie intégrante du survie physique et économique de chaque être humain. Les Nations Unies prévoient que la population mondiale atteindra plus de 9 milliards d'ici 2050. Pour nourrir tout le monde, la production alimentaire devra augmenter de 70%. Aider les agriculteurs du monde entier à atteindre cet objectif est un défi en soi, mais au-delà de fournir de la nourriture, l'agriculture soutient les économies de la plupart des pays du monde de manière significative, en particulier dans les pays en développement (**OCDE 2009**).

En Afrique subsaharienne, par exemple, l'agriculture représente les trois quarts de l'emploi et un tiers du PIB ; 75% des pauvres du monde vivent en milieu rural et ont un lien économique avec l'agriculture. Ces circonstances contribuent à expliquer pourquoi le développement agricole est un outil si puissant pour réduire la pauvreté mondiale et susciter le développement économique (**OCDE 2009**).

En 2023, la valeur ajoutée (% du PIB) de l'agriculture dans le Monde est de 4,1% en moyenne. Elle est de 32% en Afrique (64,4% au Sierra Leone, 37,2% aux Comores, 35,8% en Éthiopie), 6,6% en Amérique latine et Caraïbes, 4,9% en Afrique du Nord et Moyen-Orient (12,0% au Maroc,

9,5% en Tunisie) et 1,7% dans l'Union Européenne (7,4% en Ukraine, 2,3% en Espagne, 2% en France et Portugal).

La figure 4 montre l'évolution de valeur ajoutée (% du PIB) de l'agriculture dans le monde entre 1981 et 2023 (Banque Mondiale).

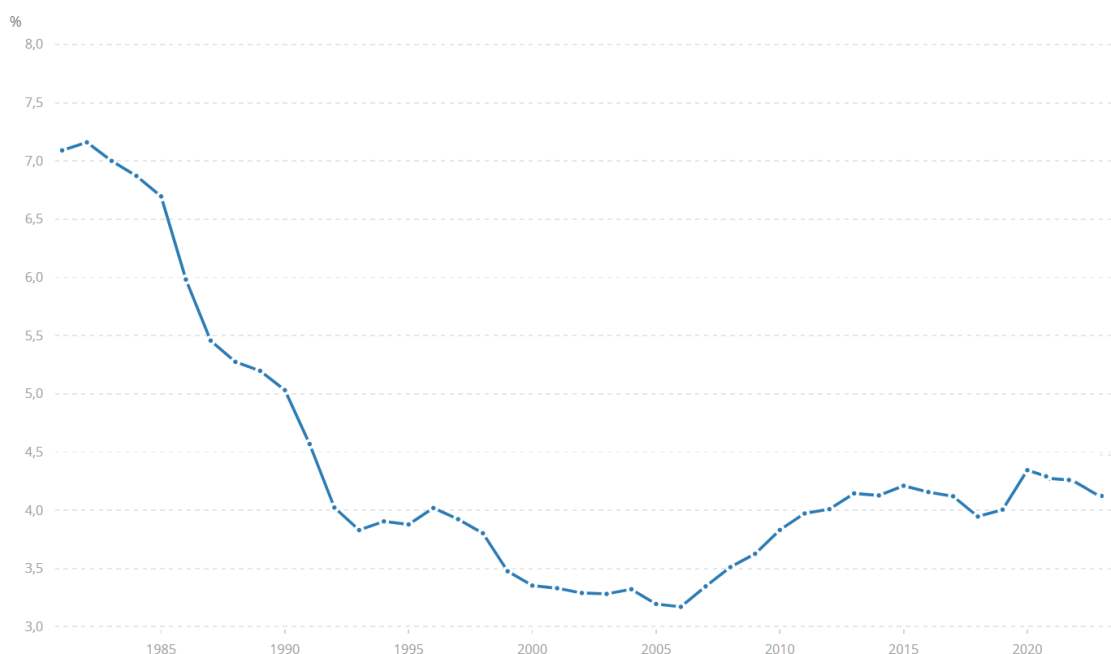


Figure 4 : Evolution de valeur ajoutée (% du PIB) de l'agriculture dans le monde entre 1981 et 2023

(Source : Banque Mondiale)

À l'échelle mondiale, l'agriculture est cruciale pour la production alimentaire, nourrissant une population croissante et réduisant les taux de pauvreté grâce à des techniques intensives comme le labour profond, l'utilisation massive d'engrais chimiques et de pesticides ainsi que la monoculture de plantes à haut rendement (FAO, 2021a ; Banque Mondiale, 2020a).

Cependant, ces pratiques ont engendré des problèmes environnementaux et sociaux importants, notamment la dégradation des sols, l'érosion, la perte de matière organique, la réduction de la biodiversité et la pollution des eaux (Kassam et al., 2009a ; Lal, 2020a ; FAO, 2021a). En outre, l'utilisation intensive de pesticides présente des risques pour la santé humaine, tels que des maladies respiratoires, des cancers et des troubles neurologiques, surtout chez les travailleurs agricoles dans les pays en développement (Horrigan et al., 2002).

Malgré ces défis, l'agriculture conventionnelle demeure prédominante en raison de son efficacité à court terme et de sa capacité à produire des rendements élevés.

Les principales pratiques de l'agriculture conventionnelle incluent :

- **Labour profond** : Retourner le sol pour améliorer sa structure et faciliter l'implantation des cultures, bien que cela puisse entraîner une perte de matière organique et favoriser l'érosion (**Lal, 2004**).
- **Utilisation d'engrais chimiques** : Enrichir le sol en nutriments pour augmenter les rendements, mais cela peut provoquer une accumulation excessive de nitrates, entraînant des problèmes de pollution et des risques pour la santé humaine (**Smith et al., 2023**).
- **Utilisation de pesticides** : Protéger les cultures des maladies et des ravageurs, bien que leur usage intensif puisse favoriser la résistance des parasites, réduire la biodiversité et affecter négativement les écosystèmes environnants (**Khan et al., 2023**).

Le développement agricole exige et dépend de l'innovation et les systèmes d'innovation. L'innovation est largement reconnue comme une source majeure d'amélioration de la productivité, la compétitivité et la croissance économique aussi bien dans les économies avancées et qu'émergentes. L'innovation joue aussi un rôle important dans la création d'emplois, la génération de revenus, la réduction de la pauvreté, la stimulation du développement social et la croissance durable.

Pour transformer les systèmes agricoles vers une durabilité accrue, il est essentiel d'adopter une approche holistique prenant en compte les besoins des agriculteurs, les impératifs économiques et les limites écologiques. Les politiques publiques jouent un rôle crucial en soutenant la recherche et le développement de pratiques agricoles durables, en fournissant des incitations économiques et en promouvant l'éducation à l'environnement (**Pretty, 2008**). L'avenir de l'agriculture dépendra de notre capacité à réinventer les systèmes de production pour respecter les limites planétaires tout en répondant aux besoins alimentaires mondiaux, nécessitant une vision humaniste qui reconnaît l'interdépendance de l'humanité et de la nature (**Altieri, 2018**).

b. A l'échelle nationale

L'agriculture conventionnelle au Maroc est un pilier vital de l'économie nationale, jouant un rôle crucial dans la sécurité alimentaire et l'emploi rural. Cette approche, fondée sur des méthodes intensives comme le labour profond, l'utilisation de variétés à haut rendement, et l'application généralisée d'engrais et de pesticides, a favorisé une augmentation substantielle de la production agricole, contribuant à la croissance économique et à l'amélioration des revenus des agriculteurs, et réduisant ainsi la pauvreté dans les zones rurales (**Banque Mondiale, 2020b**). Cependant, ces pratiques, bien qu'efficaces à court terme, ont également généré des défis environnementaux majeurs, tels que la dégradation des sols, la diminution de la biodiversité et la pollution des ressources en eau (**INRA, 2020 ; FAO, 2021b**).

Le labour intensif, utilisé depuis des décennies, a entraîné l'érosion des sols et une perte de leur fertilité naturelle. L'utilisation accrue d'engrais chimiques, bien qu'ayant amélioré les rendements, a conduit à une dégradation de la structure des sols et à une réduction de leur capacité à retenir l'eau et les nutriments (INRA, 2020). Par ailleurs, l'excès de pesticides a eu des impacts négatifs sur la santé humaine et l'environnement, contaminant les eaux souterraines et menaçant la faune locale (FAO, 2021b). Les petits agriculteurs, souvent les plus vulnérables, font face à ces défis avec des ressources limitées pour adopter des pratiques plus durables (Altieri et Koohafkan, 2008).

Conscient des enjeux, le Maroc a initié plusieurs efforts pour rendre l'agriculture plus durable. Le Plan Maroc Vert, lancé en 2008, et la stratégie Génération Green (2020-2030), cherchent à transformer le secteur agricole avec des initiatives telles que la gestion intégrée des cultures et la promotion de l'agriculture biologique (MAPMDREF, 2019). Des programmes pour optimiser l'utilisation de l'eau, comme l'irrigation au goutte-à-goutte, sont également mis en place pour faire face à la rareté de cette ressource (HCP, 2021 ; Banque Mondiale, 2020c).

La stratégie "Génération Green 2020-2030" du Maroc, lancée par le Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, vise à transformer le secteur agricole en renforçant sa durabilité et en améliorant les conditions de vie des populations rurales. Cette stratégie repose sur deux piliers fondamentaux : d'une part, la valorisation de l'élément humain à travers l'amélioration des revenus des agriculteurs, la création d'emplois pour les jeunes et l'inclusion des femmes rurales ; et d'autre part, la pérennisation du développement agricole via l'adoption de pratiques plus durables et résilientes (MAPMDREF, 2020a).

L'agriculture de conservation est un élément clé de cette stratégie, visant à protéger les sols, à améliorer leur fertilité et à favoriser la durabilité des systèmes de production. Cette approche repose sur trois principes essentiels : (1) la réduction du travail du sol (ou non-labour), permettant de limiter la perturbation du sol et de préserver sa structure naturelle ; (2) la couverture permanente du sol, soit par des résidus de cultures, soit par des plantes de couverture, ce qui aide à protéger le sol contre l'érosion, à conserver l'humidité et à enrichir le sol en matière organique; et (3) la rotation des cultures, qui diversifie les productions, limite les maladies et parasites et contribue à la fertilité des sols (FAO, 2020c).

L'adoption de l'agriculture de conservation est particulièrement pertinente pour le Maroc, où les défis liés au changement climatique, à la désertification et à la gestion des ressources en eau sont cruciaux. En favorisant une meilleure gestion des ressources naturelles, cette approche contribue non seulement à l'amélioration de la productivité agricole, mais aussi à la résilience des exploitations agricoles face aux aléas climatiques. Elle s'inscrit dans la volonté de faire du secteur

agricole un moteur de développement économique durable, en lien avec les Objectifs de Développement Durable (ODD) des Nations Unies (**Banque Mondiale, 2021**).

Toutefois, cette transition est complexe et nécessite un soutien continu. Les agriculteurs doivent être formés aux nouvelles techniques et avoir accès aux ressources nécessaires. Les recherches par des institutions comme l'INRA sont cruciales pour guider cette transformation (**INRA, 2020**). Il est également essentiel de créer des réseaux de soutien communautaire et de favoriser la coopération entre les agriculteurs pour partager les meilleures pratiques et surmonter ensemble les défis (**Haddadi, 2022**).

En fin de compte, l'agriculture conventionnelle au Maroc est à un carrefour. Les bénéfices économiques qu'elle apporte doivent être équilibrés avec une conscience accrue des impacts environnementaux et des besoins d'une agriculture durable. Trouver cet équilibre exige une vision humaniste qui valorise les efforts des agriculteurs tout en cherchant à protéger et préserver les ressources naturelles pour les générations futures (**Lal, 2020a ; FAO, 2021c**). Les pratiques telles que le labour profond, couramment utilisées dans les zones fertiles comme le Gharb et le Souss-Massa, illustrent les limites de cette approche face aux défis environnementaux, soulignant la nécessité d'une transition vers des méthodes plus durables pour garantir la santé des sols et des écosystèmes (**Moussadek et al., 2011**).

2. Effets du semis direct sur les propriétés physiques du sol

a. Structure du sol

Le semis direct a démontré son impact significatif sur l'amélioration de la structure du sol, ce qui est crucial pour la durabilité des systèmes agricoles. Cette technique agricole permet de préserver la structure naturelle du sol en évitant le retournement et la perturbation des couches superficielles. Depuis longtemps, des études ont montré que le semis direct augmente la stabilité des agrégats du sol, réduisant ainsi l'érosion et améliorant la rétention de l'eau (**Bouzza, 1990 ; Mrabet, 2002**). De plus, le semis direct favorise l'activité biologique dans le sol, en particulier celle des vers de terre et des micro-organismes bénéfiques, ce qui contribue à une meilleure porosité et à une aération accrue du sol (**Pimentel, 2005**). En augmentant la matière organique et en stimulant l'activité microbienne, cette pratique contribue également à la séquestration du carbone, un élément clé dans la lutte contre le changement climatique (**INRA, 2020**). D'autres recherches ont montré que le semis direct améliore les propriétés physiques du sol, telles que la stabilité structurale, ce qui renforce la résilience des terres agricoles face aux conditions climatiques extrêmes (**Franzluebbbers, 2002**). En outre, les études à long terme ont révélé des bénéfices durables, avec des améliorations significatives de la matière organique et de la structure du sol, et une meilleure gestion de l'eau (**González-Sánchez et al, 2012**). Globalement, le semis direct apparaît comme

une technique prometteuse pour améliorer la structure du sol et assurer une agriculture plus durable au Maroc (**Moussadek et al, 2011, 2014b ; Gharous et al, 2014**).

b. Densité apparente

Le semis direct a un impact significatif sur la densité apparente du sol, une caractéristique essentielle qui influence la porosité, la capacité de rétention d'eau et la croissance des racines des plantes. Contrairement au labour traditionnel, le semis direct minimise la perturbation du sol, ce qui contribue à une densité apparente plus basse et à une meilleure structure du sol (**Aziz et al., 2013**). Selon une étude menée par **Kachanoski et Van Keulen (2014)**, le semis direct réduit la densité apparente en préservant les agrégats du sol et en améliorant la porosité globale, ce qui favorise une meilleure circulation de l'eau et de l'air dans le sol.

Les bénéfices du semis direct sur la densité apparente du sol sont également soutenus par des travaux internationaux. Une étude de **Huggins et Reganold (2013)** a révélé que le semis direct entraîne une diminution notable de la densité apparente par rapport aux méthodes de labour, ce qui améliore les propriétés physiques du sol sur le long terme. De même, une recherche de **López-Fando et García-Torres (2009)** a souligné que le semis direct permet une meilleure préservation des structures de sol et une réduction de la compaction, contribuant ainsi à une densité apparente plus faible.

Des recherches spécifiques au Maroc ont également confirmé ces effets bénéfiques. Par exemple, **Mrabet et Bouza (2008)** ont observé que les systèmes de semis direct entraînent une diminution significative de la densité apparente dans les sols arides marocains, améliorant ainsi la capacité de rétention d'eau et la structure du sol. De plus, plusieurs études ont démontré que le semis direct contribue à la réduction de la compaction du sol, un problème fréquent dans les pratiques agricoles conventionnelles (**Moussadek et al., 2011, 2014b ; Karrou et al., 2016**).

c. Porosité du sol

Le semis direct impact considérablement la porosité du sol, élément essentiel pour la gestion de l'eau, l'aération et le développement des racines. En évitant le retournement du sol, cette technique préserve la structure naturelle du sol, favorise la formation de pores stables et améliore la porosité en réduisant la compaction (**Sayre et Hobbs, 2004 ; Govaerts et al., 2007**). Cette amélioration de la porosité permet une meilleure infiltration de l'eau et une meilleure aération, essentielles pour la santé des cultures.

Ces observations locales sont renforcées par des études internationales. Une recherche menée par **Six et al. (2004)** a révélé que le semis direct améliore la porosité en préservant la structure agrégée

du sol et en augmentant la stabilité des agrégats. De plus, une étude de **Mora et al. (2019)** a démontré que le semis direct favorise le développement de pores fins et grossiers, ce qui est crucial pour une gestion efficace de l'eau et une aération optimale.

Des recherches menées au Maroc corroborent ces effets positifs. Une étude menée par **Mrabet et El Mourid (2016)** a montré que le semis direct améliore la porosité du sol dans les zones arides marocaines, facilitant une gestion plus efficace de l'eau et une meilleure stabilité de la structure du sol. **Mrabet et al. (2000)** ont également constaté que le semis direct contribue à une augmentation de la porosité en réduisant la compaction et en favorisant la formation d'une structure agrégée du sol.

d. Humidité du sol

Le semis direct a un effet substantiel sur la conservation de l'humidité du sol, un facteur crucial pour l'efficacité de l'utilisation de l'eau et la productivité des cultures. En éliminant le besoin de labourage, cette technique aide à conserver l'humidité en réduisant l'évaporation et en augmentant la capacité de rétention d'eau du sol (**Liu et al., 2019**). Les recherches indiquent que le semis direct favorise une meilleure conservation de l'humidité en maintenant une couverture constante et en limitant les perturbations du profil du sol (**Scopel et al., 2018**).

Des études montrent que le semis direct améliore la rétention d'humidité en augmentant la matière organique du sol et en diminuant les pertes par évaporation. Une recherche menée par **Tullberg et Gault (2014)** a révélé que le semis direct améliore la gestion de l'eau en réduisant l'évaporation et en facilitant l'infiltration de l'eau. De même, une étude de **Liang et al. (2021)** a démontré que cette technique contribue à une meilleure conservation de l'humidité, surtout dans les régions arides et semi-arides, en réduisant les pertes d'eau par évaporation et en améliorant la structure du sol.

D'autres études ont montré que le semis direct permet une meilleure conservation de l'humidité en améliorant la structure du sol, maintenant une couverture de sol et en réduisant les pertes d'eau (**Hammad et al. (2021) ; Zhang et al. (2022)**)

Au niveau national, les recherches soutiennent ces résultats. **Mrabet et El Mourid (2016)** ont constaté que le semis direct améliore la conservation de l'humidité dans les zones arides marocaines, optimisant l'utilisation de l'eau disponible et réduisant les pertes par évaporation. **Mrabet (2002)** a également trouvé que cette technique améliore la capacité de rétention d'eau du sol, ce qui est crucial pour la gestion durable des ressources en eau dans le contexte marocain. Aussi, **Moussadek et al. (2011)** ont montré que le semis direct permet une meilleure conservation de l'humidité dans les sols. Cette technique, en limitant le travail du sol, réduit l'évaporation et permet à une plus grande quantité d'eau de rester disponible pour les plantes.

3. Effets du semis direct sur les propriétés chimiques du sol

a. pH du sol

Le pH joue un rôle important dans la stabilité du sol, sa fertilité, la disponibilité des éléments minéraux ainsi que sur le développement de la plante. Le semis direct a un impact notable sur le pH du sol, un paramètre crucial pour la santé des sols et la croissance des cultures. Le retournement du sol, influence la distribution des nutriments et la disponibilité des éléments nécessaires aux plantes. En général, le semis direct tend à stabiliser ou légèrement augmenter le pH du sol, en comparaison avec les méthodes de labour conventionnelles (**Govaerts et al., 2007**). Il est donc primordial de bien contrôler l'acidité du sol et son ajustement.

Les études montrent que le semis direct peut influencer le pH du sol de plusieurs façons. Une recherche menée par **Huggins et Reganold (2008a)** a montré que le semis direct contribue à une meilleure conservation du pH en limitant l'acidification du sol qui est souvent exacerbée par le labour et l'utilisation d'engrais acides. De plus, les techniques de semis direct favorisent une accumulation plus uniforme de la matière organique, ce qui peut atténuer les variations de pH du sol (**Blanco-Canqui et Lal., 2008**).

Une autre recherche menée par **Silva et al. (2020)** a montré que le semis direct réduit les variations du pH du sol en maintenant une couverture végétale permanente qui limite l'acidification. De plus, une étude de **Blanco-Canqui et Lal (2010)** a révélé que le semis direct peut améliorer le pH du sol en favorisant une meilleure répartition de la matière organique et en réduisant l'impact des engrais acides.

Au niveau national, les études confirment ces effets. Une recherche de **Mrabet et El Mourid (2016)** indique que le semis direct tend à stabiliser le pH du sol, en réduisant l'acidification souvent observée avec les méthodes de labour intensif. Cette stabilisation est bénéfique pour les cultures, car elle améliore la disponibilité des nutriments et favorise une meilleure croissance des plantes. **Maher et al. (2020)** ont également observé que le semis direct contribue à maintenir un pH du sol plus stable, ce qui est crucial pour la gestion des sols dans les conditions semi-arides du Maroc.

b. Carbone organique

Les recherches ont montré que le semis direct a un impact significatif sur le carbone organique du sol, un élément crucial pour la fertilité et la santé des sols, ainsi que pour la gestion du carbone dans la lutte contre le changement climatique. En évitant le retournement du sol, cette technique favorise l'accumulation de carbone organique en minimisant les perturbations du sol et en augmentant l'apport de matière organique en surface (**Blanco-Canqui et al., 2008 ; Govaerts et al., 2009a**).

Des recherches ont également montré que le semis direct peut entraîner une augmentation substantielle du carbone organique du sol. Par exemple, une étude de **Huggins et Reganold (2008b)** a révélé que le semis direct favorise une augmentation du stock de carbone organique par rapport aux systèmes de labour conventionnels, en réduisant l'oxydation du carbone et en conservant mieux la matière organique. Une analyse de **Six et al. (2004)** a également montré que le semis direct contribue à une stabilisation accrue du carbone organique, favorisant la formation de structures de sol qui piègent le carbone plus efficacement.

D'autres études renforcent ces observations. **Andrade et al. (2016)** ont trouvé que le semis direct favorise une augmentation continue des stocks de carbone organique du sol dans divers environnements agro écologiques. De plus, **Minasny et al. (2017)** ont confirmé que cette technique est associée à une augmentation des niveaux de carbone organique dans les sols, contribuant à des bénéfices environnementaux importants en matière de séquestration du carbone.

Au niveau national, plusieurs études ont été menées et qui confirment ces résultats. Une recherche menée par **Mrabet et Bouchaoua (2021)** a démontré que le semis direct augmente significativement le carbone organique du sol dans les régions semi-arides marocaines, ce qui permet d'améliorer la fertilité du sol et optimiser la gestion des ressources. De même, **Khoury et al. (2022)** ont observé des gains importants dans le stock de carbone organique du sol dans les systèmes de semis direct par rapport aux méthodes traditionnelles, soulignant les avantages de cette technique pour la gestion durable des sols au Maroc. Par ailleurs, l'étude de **Moussadek et al. (2011)** révèle que l'absence de labour favorise une augmentation significative du carbone organique, contribuant ainsi à la conservation de la structure du sol. **Moussadek et al. (2014)** ont également démontré que les systèmes de semis direct améliorent le stockage du carbone organique et la qualité du sol comparativement aux méthodes de labour conventionnelles, dans une région semi-aride du Maroc.

c. Azote

L'azote est un élément nutritif essentiel pour les plantes, jouant un rôle déterminant dans la fertilité des sols. Il se présente sous différentes formes chimiques qui influencent sa disponibilité et son efficacité. Dans les sols, l'azote se trouve principalement sous trois formes : l'azote organique, l'azote ammoniacal et l'azote nitrique. L'azote organique, présent dans les résidus de culture, la matière organique et les excréments animaux, constitue une réserve importante et est progressivement transformé en azote minéral par les micro-organismes du sol (**Schimel et Bennett, 2004a**). L'azote ammoniacal (NH_4^+) est directement assimilable par les plantes, mais il peut se volatiliser dans certaines conditions (**Stevens et al., 2012**). L'azote nitrique (NO_3^-), également disponible pour les plantes, est souvent le produit de la nitrification de l'azote

ammoniacal, mais il est susceptible de se perdre par lessivage et dénitrification, en particulier dans les sols sableux et les environnements humides (**Keeney et Nelson, 1982**).

Des recherches récentes soulignent l'importance d'une gestion efficace de ces différentes formes d'azote pour optimiser la fertilité des sols. **Guo et al. (2019)** ont démontré que la gestion de l'azote dans les systèmes de culture doit intégrer à la fois les cycles de l'azote organique et minéral afin de maximiser sa disponibilité pour les cultures tout en minimisant les pertes. Par ailleurs, **Owlson et al (2012)** ont montré l'impact des pratiques de gestion du sol, telles que le semis direct et la couverture végétale, sur la répartition et la disponibilité de l'azote, en suggérant que ces pratiques peuvent avoir un effet positif sur les formes d'azote dans le sol. De plus, **Liu et Wang (2020)** ont montré que l'application d'engrais azotés et les pratiques de gestion du sol influencent la dynamique du nitrate, avec des implications importantes pour la qualité de l'eau et les risques environnementaux liés au lessivage. D'autres études, comme celles de **Raun et Johnson (2000)**, ont exploré les effets des différentes sources d'azote et des techniques de gestion sur l'équilibre entre les formes ammoniacales et nitriques, soulignant leur impact sur la santé des sols et la productivité des cultures. Ensemble, ces recherches mettent en évidence la complexité de la gestion de l'azote et l'importance de stratégies adaptées pour en optimiser l'utilisation tout en minimisant les impacts environnementaux.

En plantant les cultures sans labourer le sol, le semis direct a un impact significatif sur la gestion et la disponibilité de l'azote dans les sols agricoles. Cette méthode réduit les perturbations du sol, ce qui permet une meilleure conservation de l'azote et limite les pertes par lessivage et volatilisation. En limitant le travail du sol, le semis direct aide à préserver la matière organique en surface, essentielle pour le cycle de l'azote (**Govaerts et al., 2009a**). Les études montrent que cette approche améliore la rétention d'azote dans les couches supérieures du sol, favorisant ainsi une meilleure structuration du sol, ce qui optimise la disponibilité de cet élément pour les cultures (**Powlson et al., 2012a**) et son utilisation rationnelle.

Les recherches internationales soutiennent largement les avantages du semis direct en matière de gestion de l'azote. **Scopel et al. (2005)** ont révélé que cette technique favorise la rétention de l'azote en réduisant les perturbations du sol, ce qui permet une meilleure conservation de la matière organique et une disponibilité accrue de l'azote. **Zhao et al. (2021)** ont montré que le semis direct optimise l'utilisation des engrais azotés en limitant les pertes par volatilisation et en augmentant l'efficacité de l'azote pour les cultures. **Silva et al. (2018f)** ont mis en évidence que le semis direct permet une gestion durable de l'azote en améliorant la structure du sol, facilitant ainsi sa conservation et sa disponibilité. **Powlson et al. (2012a)** ont également observé que le semis direct renforce la rétention de l'azote et diminue les pertes par dénitrification, favorisant ainsi une gestion

plus efficace. **Hossain et al. (2020a)** ont confirmé ces observations à travers une méta-analyse, validant les effets positifs globaux du semis direct sur les dynamiques de l'azote et les rendements des cultures. **Govaerts et al. (2009a)** ont souligné les avantages de l'agriculture de conservation, notamment le semis direct, pour la gestion de l'azote. D'un autre côté, **O'Brien et al. (2018)** ont documenté des améliorations dans les pratiques agricoles liées à la gestion de l'azote, tandis que **Lal (2020c)** a exploré l'interaction entre la séquestration du carbone et la gestion de l'azote, suggérant des bénéfices indirects du semis direct. Enfin, **Alvarez et al (2017)** ont fourni un aperçu des mécanismes par lesquels le semis direct améliore les propriétés physiques du sol et les dynamiques de l'azote. L'ensemble de ces recherches montrent que le semis direct est une approche efficace pour améliorer la gestion de l'azote, apportant des bénéfices significatifs à la fertilité des sols et à la productivité agricole.

Au Maroc, des recherches ont montré que le semis direct contribue à une gestion plus efficace de l'azote. Les études récentes sur l'impact du semis direct sur l'azote du sol au Maroc révèlent des avantages significatifs pour la gestion agricole. **Maher et al. (2022)** ont trouvé que le semis direct améliore la conservation de l'azote dans les sols marocains en réduisant les pertes par érosion et en augmentant l'efficacité des engrais azotés. **Powlson et al. (2012a)** ont montré que cette pratique améliore la conservation de l'azote et la fertilité du sol, optimisant ainsi l'utilisation de cet élément essentiel pour les cultures. Les recherches de **Govaerts et al. (2005)** mettent en lumière les bénéfices du semis direct en termes de dynamique de l'azote et de qualité du sol, confirmant que cette méthode contribue à une gestion plus efficace de l'azote. **Govaerts et al. (2006)** ont également constaté des améliorations notables dans les cycles de l'azote et la productivité des sols grâce au semis direct. Ces études montrent clairement que le semis direct peut transformer la gestion de l'azote, rendant l'agriculture marocaine plus durable et résiliente.

d. Phosphore

Le semis direct exerce un impact considérable sur la gestion du phosphore du sol, un nutriment clé pour les cultures. En évitant le retournement du sol, cette méthode modifie la dynamique du phosphore en réduisant le lessivage et en améliorant l'efficacité des engrais phosphatés.

Les recherches indiquent que le semis direct peut accroître la disponibilité du phosphore en surface. Selon **Powlson et al. (2012b)**, cette technique aide à mieux conserver le phosphore en surface, en minimisant les pertes par lixiviation et en concentrant le phosphore où il est le plus nécessaire. **Govaerts et al. (2009a)** confirment que le semis direct optimise l'utilisation des engrais phosphatés en limitant les pertes dues à l'érosion et en améliorant la distribution du phosphore dans le sol.

Des études récentes au Maroc renforcent ces observations. En effet, **Moussadek et al. (2022)** ont trouvé que le semis direct améliore la concentration de phosphore dans les couches superficielles des sols marocains, un facteur crucial pour les cultures dans les environnements semi-arides. **Rguibi Idrissi et al. (2021)** ont observé une augmentation de l'efficacité des engrais phosphatés et une gestion plus efficace du phosphore grâce au semis direct, contribuant ainsi à une meilleure fertilité des sols.

Des recherches internationales soutiennent ces résultats dans divers contextes. **Andrade et al. (2003)** ont montré que le semis direct améliore la gestion du phosphore dans divers systèmes agricoles en réduisant les pertes par lessivage et en augmentant la disponibilité du phosphore pour les plantes. **Silva et Lima (2020)** ont confirmé que le semis direct favorise la rétention du phosphore dans le sol, réduisant les perturbations et améliorant l'utilisation des engrais phosphatés. De plus, une étude par **Dzvene et al. (2022)** a révélé que le semis direct contribue à une meilleure efficacité des engrais phosphatés en augmentant la capacité de rétention du phosphore dans le sol.

e. Potassium

Le semis direct, en minimisant le travail du sol, a un impact notable sur le niveau de potassium dans les sols agricoles. Cette technique aide à maintenir ou améliorer la disponibilité du potassium, essentiel pour la croissance des cultures. Le semis direct peut contribuer à une meilleure conservation du potassium dans les couches superficielles du sol, en limitant les pertes par érosion et en préservant la matière organique qui libère du potassium de manière plus efficace (**Govaerts et al., 2009a**). Les recherches montrent également que cette méthode optimise l'utilisation des engrais potassiques, réduisant ainsi les besoins en fertilisants supplémentaires et les coûts associés (**Powlson et al., 2012c**).

Ces conclusions ont été corrodées par les études de **Silva et al. (2018d)** qui ont trouvé que le semis direct contribue à une meilleure rétention du potassium dans le sol, ce qui améliore sa disponibilité pour les cultures. **Kasper et al. (2021)** ont révélé que cette méthode favorise une conservation accrue du potassium, particulièrement dans les systèmes agricoles intensifs. D'autres recherches de **Tony et al. (2020)** ont montré que le semis direct peut améliorer la gestion du potassium en réduisant les perturbations du sol et en augmentant l'efficacité des fertilisants. De plus, **Zhao et al. (2021)** ont observé que le semis direct aide à maintenir des niveaux adéquats de potassium dans le sol, ce qui est bénéfique pour les rendements agricoles à long terme.

Des études menées au Maroc confirment ces avantages. Les travaux de **Bouarfa et al. (2020)** indiquent que le semis direct améliore la conservation du potassium et la fertilité du sol dans les régions semi-arides du pays, contribuant à une gestion plus durable des ressources nutritives. Selon

Idrissi et al. (2022), le semis direct aide également à une meilleure gestion des engrais potassiques, en augmentant leur efficacité et en réduisant les pertes par lessivage.

4. Dynamique de l'azote dans le sol

La dynamique de l'azote dans le sol est un processus complexe et multidimensionnel qui joue un rôle central dans la fertilité des sols, la productivité des cultures et les cycles biogéochimiques globaux. L'azote dans le sol existe sous différentes formes, dont l'azote organique, l'ammonium (NH_4^+) et le nitrate (NO_3^-), chacune ayant des implications distinctes pour les plantes et l'environnement. L'azote organique, présent principalement dans la matière organique du sol et les résidus de plantes, est converti en ammonium par le processus de minéralisation, une étape clé de la décomposition réalisée par les micro-organismes du sol (**Schimel et Bennett, 2004b**). Cet ammonium peut ensuite être absorbé par les plantes ou transformé en nitrate par nitrification, un processus aérobie effectué par des bactéries nitrifiantes telles que *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* (**Leininger et al., 2006**).

Le nitrate, bien que facilement assimilable par les plantes, est également très mobile dans le sol, ce qui le rend sujet à des pertes par lessivage, particulièrement dans les sols légers et sous des conditions de fortes précipitations (**Keeney et Nelson, 1982**). Ces pertes peuvent non seulement réduire l'efficacité de l'azote pour les cultures, mais aussi entraîner la pollution des eaux souterraines et de surface, contribuant à des problèmes environnementaux tels que l'eutrophisation (**Vitousek et al., 2009**). De plus, dans des conditions anaérobies, telles que celles trouvées dans les sols saturés d'eau, le nitrate peut être transformé en gaz d'azote (N_2) ou en oxydes d'azote (N_2O) par dénitrification, un processus réalisé par des bactéries dénitrifiantes (**Knowles, 1982**). Le N_2O est un gaz à effet de serre puissant, et sa production par dénitrification est une préoccupation majeure dans le contexte du changement climatique (Davidson et Kanter, 2014).

Les pratiques de gestion du sol, telles que l'application d'engrais azotés, le semis direct, et la rotation des cultures, influencent fortement la dynamique de l'azote dans le sol. Des recherches récentes montrent que l'application excessive d'engrais azotés peut entraîner des pertes importantes d'azote par volatilisation de l'ammoniac et par lessivage des nitrates, tout en augmentant les émissions de N_2O (**Zhang et al., 2019**). Des pratiques agricoles durables, comme le semis direct et l'utilisation de cultures de couverture, ont démontré leur capacité à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote en augmentant la rétention de l'azote dans le sol et en réduisant les pertes (**Zhao et al., 2021**). Ces pratiques favorisent également la séquestration de carbone dans le sol, ce qui peut indirectement influencer les cycles de l'azote en modifiant la structure du sol et l'activité microbienne (**Lal, 2020e**).

Enfin, la compréhension des interactions complexes entre les différentes formes d'azote, les microorganismes du sol, et les pratiques de gestion est cruciale pour développer des stratégies agricoles qui optimisent la disponibilité de l'azote pour les cultures tout en minimisant les impacts environnementaux. Les modèles biogéochimiques avancés, comme ceux utilisés par **Guo et al. (2019)**, intègrent ces dynamiques complexes pour prédire les flux d'azote dans différents scénarios de gestion, fournissant des outils essentiels pour les agriculteurs et les décideurs politiques. La gestion de l'azote dans le sol reste un défi central pour l'agriculture durable, nécessitant une approche intégrée qui considère à la fois les besoins des plantes et la protection de l'environnement (**Powlson et al., 2012c**).

La dynamique de l'azote dans le sol est un processus complexe qui implique plusieurs transformations et mouvements de l'azote, un élément crucial pour la croissance des plantes et la fertilité des sols. Cette dynamique comprend plusieurs phases clés :

a. Fixation de l'azote

La fixation de l'azote dans le sol est un processus biologique essentiel qui joue un rôle central dans le maintien de la fertilité des sols et la productivité agricole. Ce processus permet de convertir l'azote atmosphérique (N_2), qui est inerte et non directement assimilable par les plantes, en ammonium (NH_4^+), une forme utilisable par les végétaux. Ce phénomène est principalement réalisé par des microorganismes fixateurs d'azote, parmi lesquels les bactéries des genres *Rhizobium* et *Bradyrhizobium* sont particulièrement notables en raison de leur symbiose avec les légumineuses. Ces bactéries colonisent les racines des légumineuses et forment des nodules où l'enzyme nitrogénase catalyse la réduction de l'azote moléculaire en ammonium (**Postgate, 1998**). La fixation symbiotique de l'azote par ces bactéries représente une source majeure d'azote pour les cultures de légumineuses, permettant de réduire le recours aux engrais azotés synthétiques, ce qui contribue à la durabilité des systèmes agricoles (**Peoples et al., 2009**).

Outre les légumineuses, certains organismes non symbiotiques, tels que les bactéries du genre *Azotobacter* et les cyanobactéries comme *Anabaena*, participent également à la fixation de l'azote. Bien que leur contribution soit généralement inférieure à celle des bactéries symbiotiques, ces microorganismes peuvent fixer l'azote de manière libre dans le sol, notamment dans des environnements où la matière organique est abondante et où les conditions sont propices à leur activité, comme les sols tropicaux ou inondés (**Zehr et al., 2003 ; Galloway et al., 2004**).

La fixation de l'azote dans le sol est un processus complexe qui est influencé par une multitude de facteurs environnementaux. Par exemple, la disponibilité en phosphore, le pH du sol, et la concentration d'oxygène sont des paramètres clés qui peuvent affecter l'efficacité de la symbiose entre les légumineuses et les bactéries fixatrices d'azote. Un sol acide ou pauvre en phosphore peut

inhiber cette symbiose, réduisant ainsi la quantité d'azote fixé et, par conséquent, la fertilité du sol (**Hungria et Vargas, 2000**). De plus, un excès d'azote disponible dans le sol, souvent résultant d'une fertilisation excessive, peut diminuer l'activité de fixation d'azote, car les plantes n'ont alors plus besoin de former des associations symbiotiques pour satisfaire leurs besoins en azote (**Vitousek et al., 2013**). Cela souligne l'importance de gérer les apports d'engrais de manière à optimiser la fixation de l'azote tout en minimisant les impacts environnementaux négatifs.

Les bénéfices de la fixation biologique de l'azote vont au-delà de la simple fourniture d'azote aux plantes. Ce processus contribue également à l'amélioration de la structure du sol, à l'augmentation de la matière organique, et à la stimulation de l'activité microbienne, tous ces facteurs étant essentiels pour la santé à long terme des sols agricoles (**Van Groenigen et al., 2010**). En intégrant des légumineuses dans les rotations de cultures ou en les utilisant comme cultures de couverture, les agriculteurs peuvent améliorer durablement la fertilité des sols et réduire leur dépendance aux engrais azotés industriels, ce qui est crucial dans le contexte actuel de hausse des coûts des intrants agricoles et de nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre associées à la production et à l'application d'engrais azotés (**Jensen et al., 2010**).

Dans ce contexte, le semis direct, une pratique agricole consistant à semer les cultures sans labourer le sol, a un impact significatif sur la fixation de l'azote et la gestion globale de cet élément dans le sol. Le semis direct, en réduisant les perturbations du sol, favorise la conservation de la matière organique, qui est un facteur clé pour maintenir et améliorer la fertilité du sol (**Govaerts et al., 2009a**). Le maintien de la matière organique en surface crée un environnement favorable pour les microorganismes fixateurs d'azote, notamment ceux associés aux légumineuses, permettant ainsi une fixation plus efficace de l'azote atmosphérique (**Alvarez et Steinbach, 2009**). De plus, en limitant l'érosion et le compactage du sol, le semis direct améliore la structure du sol, ce qui favorise une aération optimale, essentielle pour l'activité des bactéries fixatrices d'azote symbiotiques et non symbiotiques (**Powlson et al., 2012c**).

Les recherches récentes montrent que le semis direct peut également augmenter la disponibilité de l'azote dans le sol en favorisant une plus grande biodiversité microbienne. Cela stimule les processus de décomposition et de minéralisation de la matière organique, qui libèrent des formes d'azote accessibles aux plantes (**Six et al., 2006**). Par exemple, une étude de **Silva et al. (2018e)** a démontré que le semis direct, combiné avec des rotations de cultures incluant des légumineuses, a conduit à une augmentation significative de la fixation de l'azote et à une meilleure rétention de cet élément dans les couches supérieures du sol. Cette pratique permet non seulement d'améliorer la fertilité du sol à long terme, mais aussi de réduire la dépendance aux engrais azotés synthétiques, ce qui est bénéfique tant sur le plan économique qu'environnemental.

En outre, le semis direct peut jouer un rôle dans l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre associées aux pratiques agricoles conventionnelles, notamment les émissions de protoxyde d'azote (N₂O), un puissant gaz à effet de serre produit lors de la nitrification et de la dénitrification dans les sols perturbés (**Six et al., 2004**). En réduisant la fréquence du labour, le semis direct limite ces processus, contribuant ainsi à une gestion plus durable de l'azote. Les bénéfices du semis direct pour la fixation de l'azote sont particulièrement évidents dans les systèmes agricoles où la préservation de la matière organique et la biodiversité microbienne sont essentielles pour maintenir la productivité à long terme, notamment dans les zones semi-arides ou sujettes à l'érosion (**Hossain et al., 2020b**).

Les recherches récentes confirment que le semis direct, lorsqu'il est bien intégré dans un système de gestion agricole durable, peut jouer un rôle crucial dans l'amélioration de la fixation de l'azote et de la santé globale des sols. Cela souligne l'importance de cette pratique pour les agriculteurs cherchant à améliorer la résilience de leurs sols tout en réduisant les intrants chimiques et en minimisant les impacts environnementaux négatifs (**Zhao et al., 2021**).

Ainsi, les innovations actuelles, telles que la sélection de variétés de légumineuses plus efficaces et l'utilisation de biofertilisants contenant des souches bactériennes optimisées pour la fixation de l'azote, cherchent à maximiser le potentiel de ce processus dans les systèmes agricoles modernes. Ces approches, combinées avec des pratiques de gestion durable comme le semis direct, sont essentielles pour répondre aux défis posés par le changement climatique, la sécurité alimentaire, et la préservation des ressources naturelles, contribuant ainsi à une agriculture plus résiliente et respectueuse de l'environnement (**Ladha et al., 2016**).

Dans la culture des céréales, la fixation de l'azote joue un rôle essentiel, bien que les céréales elles-mêmes ne soient pas des plantes fixatrices d'azote comme les légumineuses. Toutefois, l'intégration de pratiques agricoles qui favorisent la fixation de l'azote peut considérablement améliorer la fertilité des sols et la productivité des cultures céréalières. Par exemple, l'incorporation de légumineuses dans les rotations de cultures avec les céréales, ou leur utilisation comme cultures de couverture, permet d'enrichir le sol en azote grâce à la fixation biologique réalisée par les bactéries symbiotiques telles que *Rhizobium* et *Bradyrhizobium*. Cette approche réduit la nécessité d'apports en engrais azotés synthétiques pour les cultures de céréales suivantes, tout en améliorant la structure et la santé globale du sol (**Peoples et al., 2009**).

Le semis direct, une technique de conservation agricole, a également un impact significatif sur la fixation de l'azote dans les systèmes de culture des céréales. En limitant le labour, le semis direct préserve la matière organique en surface et améliore les conditions pour les microorganismes fixateurs d'azote. Cette pratique crée un environnement plus stable et favorable pour les bactéries

non symbiotiques comme *Azotobacter*, qui peuvent fixer l'azote librement dans le sol, même en l'absence de légumineuses (**Govaerts et al., 2009b ; Powlson et al., 2012c**). De plus, le semis direct favorise une meilleure rétention de l'humidité et une structure du sol qui réduit l'érosion, créant ainsi des conditions propices à l'activité microbienne, essentielle pour la minéralisation de la matière organique et la libération d'azote assimilable pour les céréales (**Six et al., 2006**).

Des recherches ont montré que l'association du semis direct avec des rotations de cultures incluant des légumineuses peut augmenter significativement la disponibilité de l'azote dans les sols cultivés en céréales. Par exemple, **Silva et al. (2018a)** ont démontré que cette combinaison conduit à une meilleure fixation de l'azote et à une rétention accrue de cet élément dans les couches supérieures du sol, ce qui est crucial pour la nutrition des céréales et pour réduire la dépendance aux engrais azotés de synthèse. Cette approche est particulièrement bénéfique dans les zones où les sols sont pauvres en matière organique ou sujets à l'érosion, car elle contribue à améliorer la structure du sol et à stabiliser les rendements des céréales (**Silva et al., 2018a ; Hossain et al., 2020c**).

En outre, le semis direct dans les cultures céréalières peut jouer un rôle dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, notamment le protoxyde d'azote (N_2O), en limitant les perturbations du sol qui exacerbent les processus de nitrification et de dénitrification (**Baggs et al., 2006**). Par conséquent, cette pratique contribue à une gestion plus durable de l'azote, permettant aux agriculteurs de maintenir la fertilité des sols tout en minimisant les impacts environnementaux négatifs. **Zhao et al. (2021)** soulignent que, dans les systèmes céréaliers, le semis direct, intégré dans un cadre de gestion durable, peut améliorer la fixation de l'azote, augmenter l'efficacité des engrais, et renforcer la résilience des sols face aux défis environnementaux.

Les innovations récentes dans la gestion de la fixation de l'azote, telles que le développement de biofertilisants contenant des souches bactériennes spécifiques et l'amélioration des rotations culturales avec des légumineuses, visent à maximiser les bénéfices de ce processus dans les cultures céréalières. En intégrant ces stratégies dans les systèmes de culture des céréales, les agriculteurs peuvent non seulement améliorer la productivité et la santé des sols, mais aussi contribuer à une agriculture plus durable et résiliente face aux défis du changement climatique et de la sécurité alimentaire (**Ladha et al., 2016**).

b. Minéralisation

La minéralisation de l'azote dans le sol est un processus crucial pour la fertilité des sols et la nutrition des plantes, puisqu'il transforme l'azote organique, contenu dans la matière organique du sol, en formes inorganiques, principalement l'ammonium (NH_4^+) et le nitrate (NO_3^-), que les plantes peuvent assimiler. Ce processus est principalement médié par l'activité microbienne, où les décomposeurs, tels que les bactéries et les champignons, jouent un rôle central en dégradant les

composés organiques complexes en substances plus simples. La minéralisation de l'azote est donc étroitement liée à la décomposition de la matière organique et dépend de plusieurs facteurs environnementaux, tels que la température, l'humidité, le pH du sol, et la disponibilité en carbone et en azote (**Sierra et al., 2018**).

Dans les systèmes agricoles, la gestion des résidus de culture et l'application de composts ou d'engrais organiques influencent fortement la dynamique de la minéralisation. Par exemple, l'incorporation de résidus de culture riches en azote, comme ceux des légumineuses, peut accélérer la minéralisation en fournissant aux microorganismes une source facilement disponible d'azote organique. En revanche, les résidus à haute teneur en carbone, tels que ceux des céréales, peuvent ralentir ce processus en augmentant le rapport C/N, ce qui peut provoquer une immobilisation temporaire de l'azote (**Kirkby et al., 2016**). La qualité de la matière organique, ainsi que les pratiques de gestion telles que le semis direct ou le labour, modifient également les conditions du sol, affectant ainsi la minéralisation.

Les interactions entre la minéralisation de l'azote et d'autres processus biogéochimiques, comme l'immobilisation et la dénitrification, sont également cruciales pour comprendre la disponibilité nette de l'azote pour les plantes. Par exemple, l'ammonium produit par la minéralisation peut être rapidement nitrifié en nitrate par des bactéries nitrifiantes, ce qui rend l'azote plus susceptible d'être lessivé ou dénitrifié en gaz azotés, tels que le protoxyde d'azote (N_2O), un puissant gaz à effet de serre (**Butterbach-Bahl et al., 2013**). Ainsi, la gestion de la minéralisation de l'azote dans les sols agricoles doit être équilibrée pour maximiser la disponibilité de l'azote pour les cultures tout en minimisant les pertes environnementales.

Des études récentes mettent en lumière l'importance des pratiques agricoles adaptées pour réguler la minéralisation de l'azote. Par exemple, la rotation des cultures et l'inclusion de cultures de couverture ont été montrées pour moduler la minéralisation de l'azote, améliorant la synchronisation entre la libération de l'azote minéralisé et les besoins nutritionnels des cultures (**Drinkwater et Snapp, 2007**). De plus, des approches innovantes, telles que l'utilisation de biofertilisants enrichis en microorganismes spécialisés dans la décomposition de la matière organique, sont explorées pour optimiser la minéralisation de l'azote dans divers contextes agroécologiques (**Meena et al., 2020**). Ces stratégies visent à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote, à réduire la dépendance aux engrais chimiques, et à promouvoir une agriculture plus durable.

En somme, la minéralisation de l'azote est un processus dynamique et multifactoriel qui joue un rôle central dans la nutrition des plantes et la fertilité des sols. Sa gestion efficace est essentielle pour optimiser la productivité agricole tout en minimisant les impacts environnementaux négatifs,

en particulier dans un contexte de changement climatique et de pression accrue sur les ressources naturelles.

La minéralisation de l'azote dans le sol est un processus clé pour la fertilité et la gestion des cultures céréalières, et les pratiques telles que le semis direct ont des impacts significatifs sur cette dynamique. La minéralisation est la transformation de l'azote organique en formes minérales assimilables par les plantes, principalement l'ammonium (NH_4^+) et le nitrate (NO_3^-). Cette transformation est largement influencée par l'activité microbienne dans le sol, qui dépend de nombreux facteurs, notamment la température, l'humidité, le pH, et la qualité de la matière organique (**Sierra et al., 2018**).

Le semis direct, qui consiste à semer les cultures sans labourer le sol, modifie la dynamique de la minéralisation de l'azote de plusieurs façons. Tout d'abord, le semis direct conserve la matière organique en surface, créant un environnement propice aux microorganismes qui facilitent la minéralisation. L'absence de labour réduit les perturbations du sol, préservant ainsi la structure du sol et les communautés microbiennes bénéfiques. Cette pratique favorise une minéralisation plus stable et progressive, en comparaison avec les systèmes de labour où la matière organique est souvent rapidement exposée à la décomposition (**Govaerts et al., 2009b ; Silva et al., 2018b**).

Les recherches montrent que le semis direct peut influencer la disponibilité de l'azote par son effet sur la température et l'humidité du sol. En conservant une couverture végétale, le semis direct aide à maintenir une humidité plus constante et limite les variations extrêmes de température, conditions favorables à une minéralisation uniforme de l'azote (**Powlson et al., 2012c**). En outre, le semis direct contribue à une meilleure rétention de l'azote dans les couches supérieures du sol, réduisant ainsi les pertes par lessivage et favorisant une utilisation plus efficace de l'azote par les cultures (**Meurer et al., 2018**).

Les céréales, en particulier, bénéficient de la gestion de l'azote dans un système de semis direct. Les résidus de culture de céréales, lorsqu'ils sont conservés en surface, apportent de la matière organique supplémentaire qui peut se décomposer lentement, contribuant ainsi à une minéralisation graduelle de l'azote. Cela est particulièrement avantageux pour les cultures céréalières qui ont des besoins en azote élevés et étalés sur la saison de croissance. Une étude de **Hossain et al. (2020c)** a révélé que le semis direct améliore la répartition de l'azote dans le sol, ce qui peut augmenter la disponibilité de l'azote pour les céréales et optimiser les rendements.

En somme, le semis direct influence positivement la minéralisation de l'azote en réduisant les perturbations du sol, en conservant la matière organique et en favorisant une gestion plus stable de l'azote. Ces effets contribuent à une meilleure fertilité du sol et à une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'azote, ce qui est particulièrement bénéfique pour la culture des céréales. Les

pratiques de semis direct offrent ainsi une voie prometteuse pour une gestion durable de l'azote dans les systèmes agricoles modernes.

La minéralisation de l'azote dans le sol est un processus vital pour la fertilité et la productivité des sols agricoles, transformant l'azote organique présent dans les résidus végétaux et les matières organiques en formes minérales telles que l'ammonium (NH_4^+) et le nitrate (NO_3^-) qui sont directement assimilables par les plantes. Ce processus biologique est principalement réalisé par les microorganismes du sol, notamment les bactéries et les champignons, qui décomposent la matière organique et libèrent les nutriments disponibles pour les cultures. La minéralisation de l'azote est influencée par plusieurs facteurs, dont la température, l'humidité, le pH du sol et la qualité de la matière organique (**Davidson, 1993 ; Wang et al., 2017**).

Les conditions environnementales jouent un rôle crucial dans la régulation de la minéralisation de l'azote. Par exemple, une température optimale et une humidité adéquate favorisent une activité microbienne accrue, ce qui accélère le processus de minéralisation (**Fierer et al., 2003**). Les sols bien aérés permettent également une meilleure diffusion de l'oxygène, essentiel pour les processus microbiens de décomposition. En revanche, les sols trop secs ou trop saturés peuvent ralentir ou inhiber la minéralisation en affectant l'activité microbienne et la disponibilité de l'azote (**Schimel, 1986 ; Xu et al., 2016**).

Une autre dimension importante est la qualité de la matière organique. Les résidus de culture riches en carbone, tels que les paille et les déchets lignocellulosiques, se décomposent plus lentement et libèrent l'azote de manière graduelle, ce qui peut prolonger la disponibilité de l'azote dans le sol (**Bardgett et al., 2003**).

Le semis direct, une méthode de culture sans labour, influence également la minéralisation de l'azote. En conservant la matière organique en surface et en réduisant les perturbations du sol, le semis direct peut stabiliser la minéralisation de l'azote en maintenant une structure du sol plus intacte et une humidité constante (**Govaerts et al., 2009b**). Cette approche peut aussi réduire les pertes d'azote par lessivage et érosion, améliorant ainsi la disponibilité de l'azote pour les cultures (**Powlson et al., 2012c**). De plus, le semis direct favorise la formation de microhabitats propices à l'activité microbienne, ce qui peut améliorer l'efficacité de la minéralisation de l'azote (**Six et al., 2006**).

Les recherches récentes montrent que la gestion des apports de matière organique et l'utilisation de pratiques agricoles telles que le semis direct peuvent optimiser la minéralisation de l'azote et améliorer la fertilité des sols à long terme. Par exemple, des études ont révélé que la combinaison de semis direct avec des rotations de cultures incluant des légumineuses peut augmenter la minéralisation de l'azote et réduire la dépendance aux engrais azotés synthétiques (**Silva et al.,**

2018b). En somme, la minéralisation de l'azote est un processus complexe influencé par des facteurs biologiques et environnementaux, et une gestion appropriée peut avoir des effets significatifs sur la santé du sol et la productivité agricole.

c. Nitrification

La nitrification est un processus biologique clé dans le cycle de l'azote du sol, au cours duquel l'ammonium (NH_4^+) est converti en nitrate (NO_3^-) par des microorganismes nitrifiants. Ce processus se déroule en deux étapes principales : l'oxydation de l'ammonium en nitrite (NO_2^-) par les bactéries du genre *Nitrosomonas* et *Nitrosococcus*, suivie de l'oxydation du nitrite en nitrate par les bactéries du genre *Nitrobacter* et *Nitrospira* (Stein, 2016 ; Hayatsu et al., 2018). La nitrification est cruciale pour la disponibilité de l'azote pour les plantes, car le nitrate est la forme d'azote la plus facilement absorbée par les racines des végétaux (Gäth et al., 2020).

La vitesse de nitrification est influencée par plusieurs facteurs environnementaux. La température du sol est un déterminant majeur, avec une activité nitrifiante optimale généralement observée entre 20°C et 30°C, bien que cela puisse varier selon les conditions spécifiques du sol (Luo et al., 2022). L'humidité du sol joue également un rôle important ; des sols trop secs peuvent limiter l'activité des microorganismes nitrifiants, tandis que des sols saturés en eau peuvent entraîner une anoxie, inhibant ainsi le processus de nitrification (Snyder et al., 2020). De plus, le pH du sol influence fortement la nitrification. Les sols acides ($\text{pH} < 5.5$) peuvent ralentir la nitrification en réduisant l'activité des microorganismes nitrifiants, tandis que des conditions alcalines peuvent favoriser leur activité (Hsu et al., 2016).

Les pratiques agricoles ont un impact significatif sur la nitrification. L'application excessive d'engrais azotés peut augmenter la concentration d'ammonium dans le sol, favorisant ainsi une activité nitrifiante accrue et une potentialisation des pertes de nitrate par lessivage (Bouwman et al., 2013).

Le semis direct, une technique agricole qui évite le labourage, a également des effets notables sur la nitrification. En conservant les résidus de culture à la surface du sol, le semis direct peut modifier les conditions du sol, influençant ainsi la nitrification. Cette méthode aide à maintenir une couverture végétale qui peut modérer les fluctuations de température et d'humidité, créant un environnement plus stable pour les microorganismes nitrifiants (Govaerts et al., 2009b). Des études ont montré que le semis direct peut améliorer la rétention de l'azote et minimiser les pertes de nitrate par lessivage, contribuant ainsi à une gestion plus durable de l'azote (Powlson et al., 2012c). De plus, le semis direct favorise l'amélioration de la structure du sol, ce qui peut faciliter l'aération et les conditions propices à la nitrification (Lal, 2004).

En conclusion, la nitrification est un processus complexe influencé par des facteurs biologiques et environnementaux. Une gestion appropriée de l'azote, intégrant des pratiques agricoles adaptées comme le semis direct, est essentielle pour optimiser ce processus tout en réduisant les impacts environnementaux négatifs tels que les pertes de nitrate et les émissions de gaz à effet de serre.

La nitrification, processus par lequel l'ammonium (NH_4^+) est transformé en nitrate (NO_3^-) dans le sol, joue un rôle essentiel dans la gestion de l'azote, particulièrement dans les systèmes de culture des céréales et sous l'approche du semis direct. Ce processus se déroule en deux étapes clés : l'oxydation de l'ammonium en nitrite (NO_2^-) par des bactéries telles que *Nitrosomonas* et *Nitrosococcus*, suivie de l'oxydation du nitrite en nitrate par des bactéries du genre *Nitrobacter* et *Nitrospira* (Stein, 2016 ; Hayatsu et al., 2018). Le nitrate, forme d'azote facilement absorbable par les racines des plantes, est crucial pour la nutrition des céréales, car il favorise leur croissance et leur rendement (Gäth et al., 2020).

Dans les systèmes de culture des céréales, la nitrification est influencée par plusieurs facteurs liés aux pratiques agricoles. L'application d'engrais azotés, courante dans la culture des céréales, peut augmenter la concentration d'ammonium dans le sol et stimuler la nitrification. Cependant, un excès d'engrais peut aussi entraîner une perte de nitrate par lessivage, ce qui nécessite une gestion prudente pour optimiser l'utilisation de l'azote et minimiser les impacts environnementaux (Bouwman et al., 2013). Les pratiques de gestion telles que l'application fractionnée d'engrais et l'utilisation de produits inhibiteurs de la nitrification sont des stratégies employées pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote et réduire les pertes de nitrate (Mosier et al., 2006).

Le semis direct, une technique qui consiste à semer les cultures sans labourer le sol, impacte significativement la nitrification dans les cultures de céréales. En conservant les résidus de culture à la surface du sol, le semis direct améliore la rétention de l'humidité et modifie les conditions thermiques du sol, créant un environnement plus stable pour les microorganismes nitrifiants. Cette approche favorise également la conservation de la matière organique en surface, qui peut contribuer à une meilleure aération du sol et soutenir une activité nitrifiante plus efficace (Govaerts et al., 2009b ; Powlson et al., 2012c). En réduisant la perturbation du sol, le semis direct limite également les risques de compactage et d'érosion, ce qui améliore les conditions pour la nitrification et la disponibilité de l'azote pour les cultures de céréales (Lal, 2004).

Des études montrent que le semis direct peut améliorer la rétention du nitrate et diminuer les pertes par lessivage, contribuant ainsi à une gestion plus durable de l'azote dans les systèmes de culture des céréales (Silva et al., 2018c). De plus, cette pratique peut aider à atténuer les émissions de gaz à effet de serre, telles que le protoxyde d'azote (N_2O), en réduisant les perturbations du sol qui favorisent les processus de nitrification et de dénitrification (Van kessel et al., 2013). En

conclusion, la nitrification est un processus clé dans la gestion de l'azote, et les pratiques comme le semis direct offrent des avantages significatifs pour optimiser la disponibilité de l'azote et promouvoir une agriculture durable.

d. Assimilation par les plantes

L'assimilation de l'azote par les plantes est un processus essentiel pour leur croissance et leur développement, jouant un rôle central dans la production agricole, notamment dans les cultures de céréales. L'azote est absorbé par les plantes principalement sous forme de nitrate (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+), les deux formes minérales de l'azote qui résultent de la minéralisation de la matière organique et des fertilisants appliqués au sol. Une fois dans la plante, le nitrate est transporté vers les racines, où il est réduit en nitrite (NO_2^-) par l'enzyme nitrate réductase, puis en ammonium par l'enzyme nitrite réductase. L'ammonium est ensuite incorporé dans les acides aminés, les protéines, et d'autres molécules essentielles par des processus biochimiques comme la glutamine synthétase-glutamate synthase (GS-GOGAT) et la voie de la glutamate déshydrogénase (**Masclaux-Daubresse et al., 2010 ; Nunes-Nesi et al., 2010**).

Dans les cultures de céréales, telles que le blé, le maïs et le riz, l'efficacité de l'assimilation de l'azote est cruciale pour maximiser les rendements. Les plantes céréalières présentent une forte demande en azote, particulièrement durant les phases de croissance rapide comme le tallage et la floraison. Une absorption et une assimilation efficaces de l'azote sont donc essentielles pour soutenir la photosynthèse, la synthèse des protéines et, finalement, la production de grains (**Fageria et al., 2011**). La gestion de l'azote dans ces cultures est un défi constant pour les agriculteurs, car une fertilisation azotée inefficace peut non seulement réduire les rendements, mais aussi entraîner des pertes environnementales importantes, telles que la volatilisation de l'ammoniac, le lessivage du nitrate, et l'émission de gaz à effet de serre comme le protoxyde d'azote (N_2O) (**Ladha et al., 2005**).

Le semis direct, une pratique qui consiste à semer les cultures sans labourer le sol, peut influencer l'assimilation de l'azote en modifiant les conditions du sol. Cette technique favorise la conservation de la matière organique en surface, ce qui améliore la rétention de l'humidité et la disponibilité de l'azote dans les couches superficielles du sol, là où les racines des céréales sont les plus actives (**Six et al., 2004**). En outre, le semis direct réduit la perturbation du sol, préservant ainsi les structures du sol et la population microbienne, ce qui peut soutenir la transformation de l'azote minéral en formes directement assimilables par les plantes (**Luo et al., 2010**). Les études montrent que dans les systèmes de semis direct, les plantes peuvent bénéficier d'une disponibilité en azote plus constante, réduisant le besoin de fertilisation fréquente et intensive, et contribuant ainsi à une gestion plus durable de l'azote (**Halvorson et al., 2000 ; Alvarez et Steinbach, 2009**).

De plus, la combinaison du semis direct avec des pratiques telles que la rotation des cultures avec des légumineuses peut augmenter la fixation biologique de l'azote, enrichissant le sol en azote disponible pour les céréales. Cette approche intégrée non seulement améliore l'efficacité de l'assimilation de l'azote, mais contribue également à la santé globale du sol en augmentant la teneur en matière organique et en stimulant l'activité microbienne (Giller, 2001). En résumé, l'assimilation de l'azote par les plantes est un processus complexe et influencé par de nombreux facteurs environnementaux et pratiques agricoles. L'adoption de techniques telles que le semis direct et la gestion rationnelle des fertilisants peut améliorer cette assimilation, offrant ainsi des bénéfices significatifs en termes de productivité des cultures et de durabilité environnementale.

e. Dénitrification

La dénitrification est un processus microbiologique crucial dans le cycle de l'azote, jouant un rôle clé dans la régulation de la disponibilité de l'azote dans le sol et dans la réduction des impacts environnementaux liés à l'excès d'azote. Ce processus se déroule dans des conditions anaérobies, lorsque les bactéries dénitrifiantes, comme celles appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Paracoccus* et *Bacillus*, utilisent les nitrates (NO_3^-) ou les nitrites (NO_2^-) comme accepteurs d'électrons pour la respiration, transformant ces ions en gaz d'azote (N_2) ou en oxyde nitreux (N_2O), un puissant gaz à effet de serre (Zumft, 1997). La dénitrification permet ainsi la réduction des concentrations de nitrates dans le sol, ce qui peut limiter le lessivage de ces composés vers les nappes phréatiques et prévenir la pollution des eaux souterraines (Rivett et al., 2008).

Dans le contexte des systèmes agricoles, et plus particulièrement dans les pratiques de semis direct et les cultures de céréales, la dénitrification prend une importance particulière. Le semis direct, qui réduit la perturbation du sol, peut influencer la dynamique de l'azote en modifiant les conditions hydriques et la distribution de l'oxygène dans le sol. En favorisant la conservation de la matière organique et en réduisant le compactage du sol, le semis direct peut créer des micro-environnements propices à l'activité des bactéries dénitrifiantes, surtout dans les zones où l'eau est susceptible de s'accumuler temporairement, créant des conditions hypoxiques (Six et al., 2006). Toutefois, la réduction du labour peut aussi limiter l'aération du sol, augmentant ainsi les zones anoxiques où la dénitrification peut se produire, ce qui, dans certaines conditions, pourrait conduire à une augmentation des émissions de N_2O (Baggs et al., 2003).

Dans les cultures de céréales, où l'azote est souvent appliqué en quantités importantes pour maximiser les rendements, la gestion de la dénitrification est essentielle pour minimiser les pertes d'azote et les impacts environnementaux. Une fertilisation azotée inefficace peut augmenter les concentrations de nitrates dans le sol, exacerbant le risque de dénitrification excessive et d'émissions de N_2O . Pour pallier ces effets, il est recommandé d'adopter des pratiques de gestion

intégrée de l'azote, telles que l'application de fertilisants en doses fractionnées, la rotation des cultures avec des légumineuses fixatrices d'azote, et l'incorporation de cultures de couverture, qui peuvent améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'azote et réduire les pertes par dénitrification (**Ladha et al., 2005 ; Snyder et al., 2009**).

L'adaptation des pratiques agricoles à ces conditions spécifiques peut aider à limiter les pertes d'azote par dénitrification tout en maximisant la disponibilité de cet élément pour les cultures, contribuant ainsi à une gestion plus efficace de l'azote dans les systèmes de semis direct et les cultures de céréales.

f. Volatilisation

La volatilisation de l'azote est un processus par lequel l'azote sous forme d'ammoniac (NH_3) est perdu du sol vers l'atmosphère. Ce phénomène se produit principalement lorsque des engrais azotés contenant de l'urée ou de l'ammonium sont appliqués à la surface du sol. Une fois appliquée, l'urée subit une hydrolyse par l'enzyme uréase, produisant du carbonate d'ammonium, qui peut se décomposer en ammoniac (NH_3) et en dioxyde de carbone (CO_2) gazeux ainsi formé peut s'échapper dans l'atmosphère, entraînant des pertes d'azote qui peuvent réduire considérablement l'efficacité des engrais azotés et augmenter les coûts pour les agriculteurs (**Bouwman et al., 2002**).

Le processus de volatilisation est influencé par plusieurs facteurs, dont la température du sol, le pH, l'humidité, la texture du sol, et la gestion des engrais. Les sols à pH élevé favorisent la formation de NH_3 , augmentant ainsi les risques de volatilisation. De plus, les températures élevées et les conditions sèches accélèrent l'évaporation de l'ammoniac, exacerbant les pertes (**Sommer et Hutchings, 2001**). Par ailleurs, la texture du sol joue un rôle crucial : les sols sableux, avec leur capacité limitée de rétention d'eau, peuvent favoriser des taux plus élevés de volatilisation par rapport aux sols argileux (**Watson et al., 1994**).

Dans le cadre du semis direct, qui consiste à planter des cultures sans labourer le sol, la volatilisation de l'azote peut être plus ou moins influencée selon la gestion des résidus de culture et l'application des engrais. Le semis direct conserve une couverture de résidus organiques à la surface du sol, ce qui peut réduire l'exposition de l'urée à l'air libre et ainsi limiter les pertes par volatilisation (**Govaerts et al., 2009b**). Cependant, l'accumulation de matière organique en surface peut également créer des zones de pH élevé, ce qui pourrait potentiellement augmenter la volatilisation si les engrais ne sont pas bien incorporés dans le sol (**Luo et al., 2016**). Dans les cultures de céréales, où l'azote est un élément crucial pour le rendement, la volatilisation peut entraîner des pertes importantes si les conditions ne sont pas optimisées pour minimiser ce phénomène.

Pour atténuer les pertes par volatilisation dans les systèmes de semis direct et les cultures de céréales, plusieurs stratégies peuvent être adoptées. L'incorporation d'engrais azotés directement dans le sol, plutôt que de les appliquer en surface, est l'une des méthodes les plus efficaces pour réduire la volatilisation (**Sanz-Cobena et al., 2014**). L'utilisation de stabilisants d'azote, qui inhibent l'activité de l'uréase et ralentissent la conversion de l'urée en ammoniac, peut également être bénéfique (**Zaman et al., 2009**). De plus, l'application d'engrais dans des conditions météorologiques favorables, telles que des températures plus fraîches et un sol humide, peut aider à minimiser les pertes.

En somme, la volatilisation de l'azote représente un défi majeur pour la gestion efficace de l'azote dans les systèmes agricoles, notamment dans les pratiques de semis direct et les cultures de céréales. La compréhension des facteurs influençant ce processus et la mise en œuvre de pratiques agronomiques adaptées sont essentielles pour maximiser l'efficacité des engrais azotés et réduire l'impact environnemental lié à la perte d'ammoniac dans l'atmosphère.

g. Immobilisation

L'immobilisation de l'azote dans le sol est un processus clé au sein du cycle de l'azote, dans lequel l'azote minéral disponible pour les plantes, tel que l'ammonium (NH_4^+) ou le nitrate (NO_3^-), est assimilé par les microorganismes du sol et incorporé dans la matière organique microbienne. Cette transformation rend l'azote temporairement indisponible pour les plantes, car il est séquestré dans les biomasses microbienne et organique. L'immobilisation se produit principalement dans les sols riches en matière organique et lorsque le rapport carbone/azote (C/N) est élevé, ce qui pousse les microorganismes à utiliser l'azote minéral pour équilibrer leur propre rapport C/N lors de la décomposition de la matière organique (**Mary et al., 1996**).

L'équilibre entre l'immobilisation et la minéralisation de l'azote détermine la disponibilité de l'azote pour les plantes. Lorsque la matière organique décomposée a un rapport C/N élevé (supérieur à 20 :1), l'immobilisation tend à dominer, réduisant ainsi la quantité d'azote minéral dans le sol. Cela peut limiter la croissance des plantes, surtout dans les systèmes agricoles où l'apport d'azote minéral est déjà faible (**Recous et al., 1995**). Cependant, cette immobilisation n'est pas une perte définitive d'azote ; elle permet de stabiliser l'azote dans la biomasse microbienne, qui peut être progressivement libéré par la minéralisation à mesure que les conditions environnementales changent, comme une augmentation de la température ou de l'humidité du sol (**Paustian et al., 1992**).

Dans les systèmes de semis direct, où les résidus de culture sont laissés à la surface du sol, l'immobilisation de l'azote peut être accentuée en raison de l'augmentation de la matière organique en décomposition. Les résidus de céréales, qui ont souvent un rapport C/N élevé, sont

particulièrement susceptibles d'induire une immobilisation accrue de l'azote. Par exemple, des études ont montré que l'incorporation de résidus de maïs dans le sol peut conduire à une forte immobilisation de l'azote, réduisant ainsi la disponibilité de cet élément pour la culture suivante, comme le blé (**Van Kessel et al., 2000**). Néanmoins, cette immobilisation temporaire peut également avoir des effets positifs à long terme en contribuant à l'accumulation de matière organique dans le sol, améliorant ainsi la structure du sol et la capacité de rétention des nutriments.

L'immobilisation de l'azote est également influencée par les pratiques de fertilisation. Dans les systèmes de semis direct, l'application d'engrais azotés doit être gérée avec soin pour compenser les effets de l'immobilisation. Des doses excessives d'engrais azotés peuvent saturer le sol en azote minéral, réduisant ainsi l'effet de l'immobilisation, tandis que des doses insuffisantes peuvent limiter la croissance des cultures. Une approche équilibrée consiste à synchroniser l'application des engrais azotés avec les besoins des cultures et le taux de décomposition des résidus, afin de maximiser l'efficacité de l'utilisation de l'azote (**Drinkwater et Snapp, 2007**).

En somme, l'immobilisation de l'azote est un processus complexe qui joue un rôle crucial dans la dynamique de l'azote dans le sol, en particulier dans les systèmes de semis direct et les cultures de céréales. Comprendre ce processus et les facteurs qui l'influencent est essentiel pour optimiser la gestion de l'azote dans les sols agricoles, en minimisant les pertes de nutriments et en soutenant la productivité des cultures à long terme.

L'immobilisation de l'azote dans le sol est un processus essentiel dans les systèmes de semis direct, particulièrement en ce qui concerne la culture des céréales. Dans le semis direct, les résidus de culture sont laissés à la surface du sol, ce qui favorise l'accumulation de matière organique. Cette matière organique, souvent riche en carbone, entraîne une immobilisation accrue de l'azote, car les microorganismes du sol utilisent cet azote minéral pour décomposer les résidus végétaux. Ce processus est crucial dans les sols sous semis direct, où les résidus de céréales, tels que le blé et le maïs, possèdent un rapport carbone/azote (C/N) élevé, ce qui intensifie l'immobilisation de l'azote (**Van Kessel et al., 2000**).

L'immobilisation de l'azote dans ces systèmes a des implications importantes pour la gestion des nutriments. En effet, l'azote ainsi immobilisé devient temporairement indisponible pour les cultures, ce qui peut limiter la croissance des plantes, surtout lors des premières phases de leur développement. Cependant, cette immobilisation n'est pas simplement une perte d'azote ; elle contribue à la formation et au maintien de la matière organique du sol, un facteur clé pour la santé des sols à long terme (**Mary et al., 1996**). Dans les systèmes de semis direct, cette dynamique peut être particulièrement bénéfique, car elle aide à maintenir la fertilité du sol en réduisant les pertes d'azote par lessivage ou volatilisation.

Dans la culture des céréales, la gestion de l'immobilisation de l'azote est cruciale pour optimiser la productivité. L'application d'engrais azotés doit être soigneusement planifiée pour éviter les déséquilibres nutritionnels. Par exemple, une étude a montré que l'application d'engrais azotés trop tôt peut entraîner une concurrence entre les microorganismes du sol et les cultures pour l'azote disponible, ce qui peut réduire l'efficacité de l'utilisation de l'engrais (**Drinkwater et Snapp, 2007**). À l'inverse, un apport d'azote mal synchronisé peut ne pas suffire à compenser l'azote immobilisé, entraînant une carence en azote pour les céréales pendant des périodes critiques de leur développement.

En outre, la pratique du semis direct améliore la structure du sol, favorisant une meilleure aération et infiltration de l'eau. Ces conditions sont favorables à l'activité des microorganismes du sol, ce qui peut intensifier le processus d'immobilisation de l'azote. Cependant, la rétention de matière organique en surface permet également une minéralisation lente et régulière de l'azote, qui peut être bénéfique pour les cultures à long terme, en fournissant un flux constant de nutriments au fur et à mesure que les besoins des plantes évoluent au cours de la saison de croissance (**Paustian et al., 1992**).

Finalement, dans les systèmes agricoles durables, l'immobilisation de l'azote sous semis direct, en particulier dans les cultures de céréales, est un élément clé pour maintenir un équilibre entre la disponibilité immédiate des nutriments et la préservation de la fertilité du sol à long terme. Cette gestion intégrée de l'azote permet de réduire la dépendance aux engrais chimiques tout en soutenant la productivité agricole, ce qui est particulièrement pertinent dans le contexte des défis environnementaux actuels.

L'immobilisation de l'azote dans le sol est un processus clé dans les systèmes de semis direct, surtout en ce qui concerne la culture des céréales. Ce processus se produit lorsque l'azote minéral, principalement sous forme de nitrate (NO_3^-) ou d'ammonium (NH_4^+), est absorbé par les microorganismes du sol pour décomposer la matière organique, principalement les résidus de culture. Dans le cadre du semis direct, où les résidus de céréales comme le blé ou le maïs sont laissés en surface, l'immobilisation de l'azote est particulièrement accentuée en raison du rapport élevé carbone/azote (C/N) de ces résidus. Les microorganismes utilisent l'azote disponible pour décomposer ces résidus riches en carbone, ce qui diminue temporairement la disponibilité de l'azote pour les plantes (**Recous et al., 1995 ; Van Kessel et al., 2000**).

Cependant, cette immobilisation n'est pas synonyme de perte d'azote. Au contraire, elle joue un rôle crucial dans la formation de la matière organique du sol, contribuant ainsi à la fertilité à long terme des sols sous semis direct. En réduisant les perturbations du sol, cette pratique permet une meilleure conservation de la matière organique, créant un environnement favorable à la

biodiversité microbienne, y compris les microorganismes impliqués dans l'immobilisation de l'azote (**Franzluebbers, 2002 ; Robertson et Groffman, 2015**). Ce processus aide également à réduire les pertes d'azote par lessivage ou volatilisation, des pertes qui sont souvent exacerbées dans les systèmes de culture conventionnels où le sol est régulièrement perturbé par le labour (**Six et al., 2006**).

Dans la culture des céréales, la gestion de l'immobilisation de l'azote est essentielle pour maintenir une productivité optimale. Par exemple, dans les systèmes de semis direct, il est crucial de synchroniser l'application d'engrais azotés avec les besoins des plantes pour éviter que l'azote ne soit immobilisé par les microorganismes du sol avant d'être disponible pour les cultures (**Drinkwater et Snapp, 2007**). Une gestion inadéquate peut entraîner des carences en azote, limitant la croissance des céréales pendant les phases critiques de leur développement. Cependant, à long terme, la minéralisation lente de l'azote immobilisé permet un apport progressif de nutriments, soutenant ainsi la croissance continue des plantes (**Robertson et al., 2013**).

En outre, le semis direct favorise la structure du sol, ce qui améliore l'aération et la rétention d'eau, deux facteurs essentiels pour l'activité des microorganismes du sol. Ces conditions optimales augmentent l'efficacité des processus biologiques, y compris l'immobilisation et la minéralisation de l'azote. Les recherches montrent que, dans les sols sous semis direct, la combinaison d'une bonne structure du sol et d'une riche biodiversité microbienne contribue à une gestion plus durable de l'azote, réduisant la nécessité de recourir à des engrais azotés synthétiques (**Powlson et al., 2012c ; Silva et al., 2018d**).

Finalement, l'immobilisation de l'azote dans les systèmes de semis direct représente un élément clé pour maintenir la fertilité du sol et la durabilité des systèmes de culture des céréales. Ce processus contribue non seulement à la santé du sol en préservant la matière organique et en améliorant la structure du sol, mais il permet également de modérer l'impact environnemental en réduisant la dépendance aux engrais chimiques. Les agriculteurs qui adoptent le semis direct dans les cultures de céréales bénéficient ainsi d'une gestion plus efficace de l'azote, essentielle pour une agriculture durable à long terme (**Cavigelli et al., 2013 ; Zhao et al., 2021**).

III. L'étude de la dynamique de l'azote à l'aide de la méthode d'isotope stable ^{15}N

L'utilisation de l'azote ^{15}N et des méthodes de traçage isotopique dans les études sur le sol est une méthode puissante et précise pour analyser les dynamiques de l'azote et ses interactions avec les plantes et les sols et modéliser les principaux processus du cycle de l'azote dans le sol. L'azote ^{15}N , un isotope stable, permet de tracer l'azote de manière spécifique dans les systèmes écologiques

sans les effets perturbateurs des isotopes radioactifs. En incorporant l'azote ^{15}N dans les sols ou les engrais, on peut suivre le cheminement de cet azote, évaluer sa répartition dans le sol, sa volatilisation et sa transformation en différentes formes chimiques. Cette technique offre des informations précieuses sur la rétention d'azote, la dénitrification et l'efficacité des pratiques agricoles, telles que le semis direct. Des études ont montré que l'azote ^{15}N est crucial pour évaluer l'impact des techniques de gestion des sols sur la disponibilité et la conservation de l'azote, en offrant des perspectives sur les flux de cet élément vital dans les écosystèmes agricoles (**Figueiredo et al., 2019 ; Zhao et al., 2021**). En appliquant l'azote ^{15}N , On peut également mesurer avec précision la quantité d'azote assimilé par les cultures et déterminer l'efficacité des engrais, ce qui est essentiel pour optimiser la gestion de l'azote et minimiser les impacts environnementaux négatifs (**Powlson et al., 2012c**). Cette méthode contribue ainsi à une meilleure compréhension des processus de l'azote dans les sols et aide à développer des pratiques agricoles plus durables.

L'étude de la dynamique de l'azote dans le sol et les plantes à l'aide de la méthode d'isotope stable ^{15}N est une technique puissante qui permet de suivre précisément le cheminement de l'azote à travers les différents compartiments de l'écosystème agricole. L'isotope stable ^{15}N est une forme non radioactive de l'azote qui, en raison de sa rareté naturelle (0,366% de l'azote total), peut être utilisé comme traceur pour suivre les transformations et les flux d'azote dans le sol, les plantes, et l'environnement. Cette méthode est particulièrement utile pour comprendre les processus complexes tels que la minéralisation, la nitrification, la dénitrification, et l'assimilation de l'azote par les plantes.

La méthode ^{15}N est largement utilisée pour quantifier la fixation biologique de l'azote par les légumineuses et d'autres plantes associées à des bactéries fixatrices d'azote. Elle permet également de mesurer l'efficacité de l'utilisation des engrais azotés, en distinguant l'azote provenant de sources naturelles de celui apporté par les fertilisants. Cette distinction est cruciale pour évaluer l'impact environnemental des pratiques agricoles et optimiser les stratégies de fertilisation (**Boddey et al., 2001**). Par exemple, grâce à l'utilisation de ^{15}N , des études ont montré que les pertes d'azote par volatilisation et lessivage peuvent être significativement réduites en adaptant les pratiques de gestion, comme l'application synchronisée des engrais azotés avec les besoins des plantes (**Murphy et al., 2003**).

En outre, la méthode ^{15}N permet de mieux comprendre les processus de transformation de l'azote dans le sol, tels que la minéralisation, où l'azote organique est converti en formes minérales assimilables par les plantes, et la nitrification, où l'ammonium est oxydé en nitrate par les bactéries nitrifiantes (**Burger et Venterea, 2008**). En utilisant ^{15}N comme traceur, les chercheurs peuvent quantifier les taux de ces processus et leur contribution à la disponibilité en azote dans le sol, ce

qui est essentiel pour améliorer la fertilité des sols et la productivité agricole (**Davidson et al., 1991**).

La méthode ^{15}N est également essentielle pour étudier les interactions complexes entre le sol, les plantes, et l'atmosphère. Par exemple, elle a été utilisée pour mesurer les émissions de protoxyde d'azote (N_2O), un puissant gaz à effet de serre, issues des processus de nitrification et de dénitrification dans les sols agricoles. Les résultats de ces études aident à concevoir des pratiques agricoles qui réduisent les émissions de N_2O tout en maintenant une fertilité optimale des sols (**Kool et al., 2011**).

Dans le contexte du semis direct et des cultures de céréales, l'utilisation de ^{15}N a permis de démontrer que cette pratique favorise une meilleure conservation de l'azote dans le sol. Par exemple, l'utilisation de ^{15}N a montré que le semis direct, en comparaison avec le labour conventionnel, réduit les pertes d'azote par lessivage et volatilisation en maintenant la matière organique à la surface du sol, ce qui améliore la disponibilité de l'azote pour les cultures (**Clough et al., 2003**). Ces résultats soulignent l'importance du semis direct pour la gestion durable de l'azote dans les systèmes agricoles, en particulier pour les cultures de céréales, où l'efficacité de l'utilisation de l'azote est cruciale pour la productivité et la durabilité environnementale.

L'étude de la dynamique de l'azote dans les sols et les plantes à l'aide de la méthode d'isotope stable ^{15}N constitue une approche essentielle pour comprendre les transformations de l'azote dans les écosystèmes agricoles. L'azote est un nutriment clé pour la croissance des plantes, et sa gestion efficace est cruciale pour la durabilité agricole. Le traçage de l'azote à l'aide de ^{15}N permet de distinguer et de suivre précisément les différentes formes d'azote, de la fixation biologique à l'assimilation par les plantes, en passant par la minéralisation, la nitrification, la dénitrification, et les pertes par volatilisation.

Le ^{15}N est un isotope stable, non radioactif, qui existe naturellement en faible proportion (environ 0,366%) par rapport à l'isotope majoritaire ^{14}N . Lorsqu'il est introduit dans un système agricole, sous forme d'engrais ou de composé organique marqué, le ^{15}N permet aux chercheurs de tracer les flux d'azote au sein du système. Cette méthode a l'avantage de ne pas perturber les processus naturels, tout en fournissant des données précises sur le devenir de l'azote appliqué ou fixé dans le sol.

L'une des applications les plus courantes de la méthode ^{15}N est l'évaluation de la fixation biologique de l'azote (FBN) par les légumineuses et d'autres plantes. Par exemple, dans des systèmes de cultures où les légumineuses sont intégrées comme cultures de couverture ou en rotation avec des céréales, la méthode ^{15}N permet de quantifier la contribution de la FBN à l'apport total d'azote dans le sol. Cela est particulièrement pertinent pour les systèmes de semis direct, où

la matière organique est maintenue en surface, créant des conditions favorables à la symbiose entre les légumineuses et les bactéries fixatrices d'azote, telles que *Rhizobium* et *Bradyrhizobium* (Unkovich et al., 2008).

En outre, la méthode ^{15}N permet d'étudier la dynamique de l'azote après son application sous forme d'engrais dans des systèmes agricoles tels que les cultures de céréales. Les chercheurs peuvent ainsi déterminer l'efficacité de l'utilisation des engrais azotés en mesurant la proportion de ^{15}N récupérée dans les plantes par rapport à celle qui reste dans le sol ou qui est perdue dans l'environnement. Ces données sont essentielles pour optimiser les pratiques de fertilisation et réduire les pertes d'azote par volatilisation ou lessivage, qui peuvent avoir des impacts environnementaux significatifs (Friedrich et al., 2009).

Le traçage du ^{15}N est également utilisé pour comprendre les processus de transformation de l'azote dans le sol, tels que la minéralisation (conversion de l'azote organique en azote minéral), la nitrification (oxydation de l'ammonium en nitrate), et la dénitrification (réduction du nitrate en gaz nitreux ou en azote gazeux). Par exemple, en suivant le sort de l'azote marqué au ^{15}N , les chercheurs ont pu montrer que les systèmes de semis direct, en maintenant une plus grande biomasse microbienne dans les couches superficielles du sol, favorisent des taux plus élevés de minéralisation et de nitrification, ce qui améliore la disponibilité de l'azote pour les cultures de céréales (Powlson et al., 2011).

De plus, le ^{15}N est utilisé pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre, telles que le protoxyde d'azote (N_2O), qui est produit lors des processus de nitrification et de dénitrification dans les sols agricoles. En utilisant du ^{15}N marqué, les chercheurs peuvent quantifier les émissions de N_2O et identifier les pratiques agricoles qui minimisent ces pertes, comme l'adoption du semis direct, qui réduit les perturbations du sol et les conditions favorables à la production de N_2O (Halvorson et al., 2008).

Dans le contexte des cultures de céréales, la méthode ^{15}N est particulièrement utile pour étudier l'interaction entre les engrais azotés et la gestion du sol. Par exemple, des études ont montré que dans les systèmes de semis direct, la disponibilité de l'azote pour les cultures est améliorée non seulement par la réduction des pertes d'azote, mais aussi par une meilleure synchronisation entre la minéralisation de l'azote organique et les besoins des plantes. Cela conduit à une utilisation plus efficace de l'azote et à une réduction des besoins en engrais supplémentaires (Alvarez et Steinbach, 2009).

L'utilisation de la méthode ^{15}N pour étudier la dynamique de l'azote est donc un outil indispensable pour améliorer la compréhension des processus qui régissent la fertilité des sols et l'efficacité des pratiques agricoles. Elle permet aux agriculteurs et aux chercheurs de développer des stratégies de

gestion de l'azote plus durables, réduisant la dépendance aux engrais chimiques tout en maximisant la productivité des cultures et en minimisant les impacts environnementaux.

Matériels et méthodes

I. Sites d'étude

1. Domaine expérimental d'El Koudia

Le site d'étude (Figure 5) est situé au domaine expérimental d'El Koudia du Centre Régional de la Recherche Agronomique de Rabat sur la route secondaire 208 (Sidi Yahia Zaërs - Sidi Bettache, Maroc) à 5 km de Sidi Yahia Zaërs, dans la région de Rabat-Salé-Kénitra avec les coordonnées suivantes : X : 356 325 m ; Y : 355 189 m ; Z : 193 m.

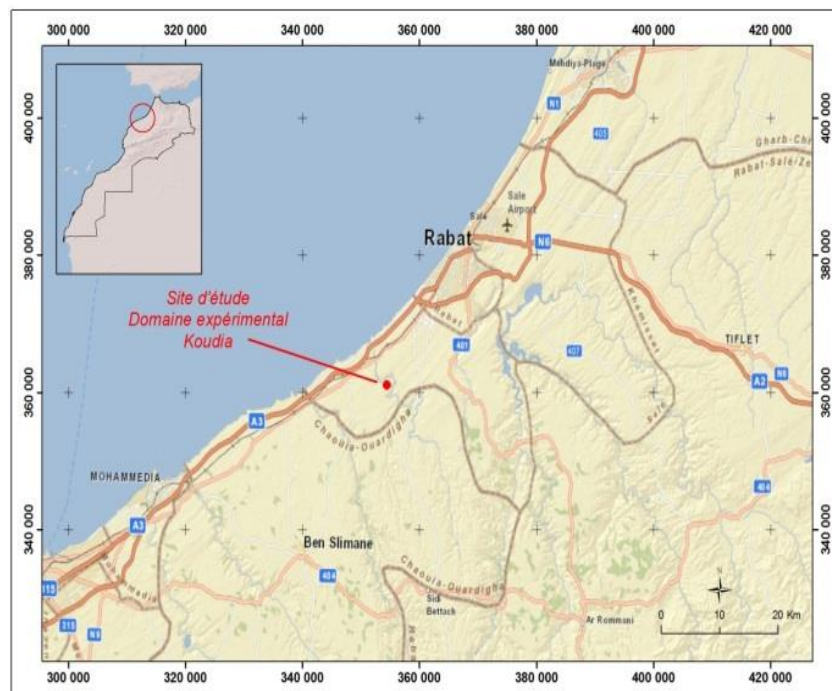
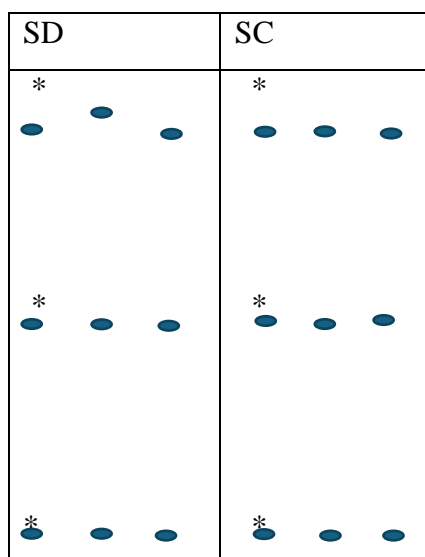


Figure 5. Présentation du site d'étude dans le domaine expérimental d'El Koudia.

La région est influencée par des climats semi-arides et sub-humides avec des hivers chauds et tempérés. Les précipitations annuelles moyennes sont d'environ 460 mm et les températures annuelles moyennes sont d'environ 18°C. Le site d'étude (figure 5) est une parcelle de 1,5 ha divisée en deux sous-parcelles qui ont été soumises à deux systèmes de gestion agricole différents pendant deux ans : l'une a été cultivée sans labour (SD), tandis que l'autre a fait l'objet d'un labour conventionnel (SC), dans le cadre d'une rotation céréales-légumineuses. La culture précédente est constituée de lentilles/pois chiches en tant que légumineuses, tandis que la deuxième culture est constituée de blé tendre (variété Arrehane) en tant que céréales.



* Point d'échantillonnage pour les autres paramètres physico-chimiques.

- Point d'échantillonnage pour la densité apparente.

Figure 6. Schéma du site d'essai avec les deux systèmes (SD et SC) et les points d'échantillonnage.

a. Échantillonnage

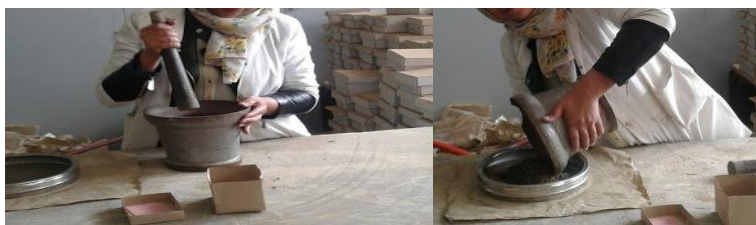
L'échantillonnage du sol a été réalisé en avril 2017, dans les parcelles SD et SC, à l'aide d'une tarière manuelle. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque parcelle, avec cinq profondeurs par point (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 et 20-40 cm). Un échantillon sous forme de mottes superficielles représentant chaque parcelle a été sélectionné pour le test de stabilité structurelle. Trois échantillons de l'horizon 0-10 cm de chaque parcelle ont été placés dans des cylindres pour le test de densité en vrac. Les échantillons ont été prélevés à raison de 3 répétitions par parcelle.

b. Préparation des échantillons

Après la collecte, les échantillons de sol ont été séchés à l'air, broyés à la main et tamisés à 2 mm pour éliminer les débris végétaux et les pierres de plus de 2 mm. Une aliquote du sol tamisé à 0,2 mm est conservée pour l'analyse de la matière organique.



Séchage



Séparation (cailloux)



Broyage et tamisage (2mm et 0.2mm)

2. Domaine expérimental de Merchouch

Le site d'étude (**Figure 7**) est situé dans le domaine expérimental de Marchouch de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) dans la région du Zaer (60 km au sud de Rabat ; 33°37 N, 6°43 W). Il se caractérise par un climat méditerranéen à influence océanique, avec une température moyenne de 28 °C et une pluviométrie moyenne de 400 mm. Le site était en semis direct depuis 2004, avec une rotation céréales-légumineuses.

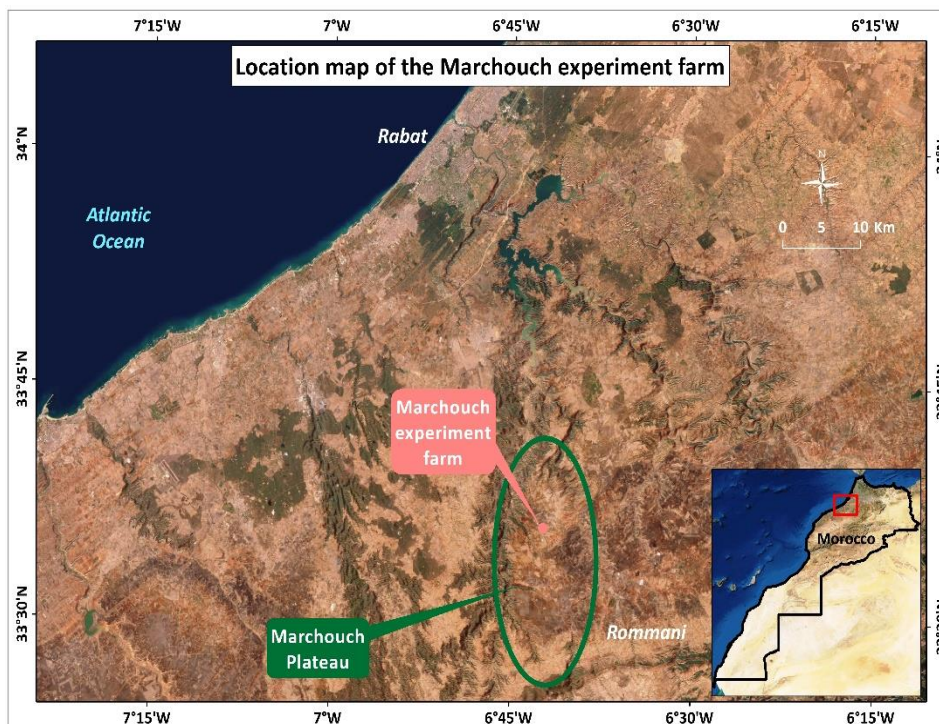


Figure 7. Plan de localisation du domaine expérimental de Marchouch.

Le sol est classé comme vertisol avec une texture d'argile limoneuse (47% d'argile, 42% de limon et 11% de sable). Certaines caractéristiques chimiques sont indiquées dans le tableau 17. Le sol du site d'étude a un pH neutre et se caractérise par une faible teneur en matière organique,

des conditions non salines, une capacité d'échange cationique de 42 meq/100 g, 0,132 % d'azote, 114 mg kg⁻¹ de phosphore et 88 mg kg⁻¹ de potassium.

Tableau 1. Propriétés chimiques du sol.

pH	CO (g kg ⁻¹)	Potassium (mg kg ⁻¹)	Phosphore (mg kg ⁻¹)	CEC (meq/100 g)	CE (dS/m)	Ca (meq/100 g)	Mg (meq/100 g)	N (%)
7,4	8,6	88,2	114,2	42,2	1,7	7	4,3	0,132

CO : carbone organique, CEC : capacité d'échange cationique, CE : conductivité électrique.

a. Échantillonnage et analyse du sol

Des échantillons de sol ont été prélevés en septembre 2020 à l'aide d'une tarière manuelle dans les parcelles de non-travail du sol (SD) et de travail du sol conventionnel (SC). Trois répétitions ont été considérées pour chaque type de travail du sol à cinq profondeurs (0-5, 5-10, 10-20, 20-40 et 40-60 cm) et pour chacune des trois doses d'azote. Après le prélèvement, les échantillons de sol ont été séchés à l'air, broyés à la main et tamisés à 0,2 mm pour l'analyse en laboratoire. La texture a été déterminée en utilisant seulement deux échantillons (un par type de travail du sol) à une profondeur de 0-15 cm.

b. Protocole expérimental

Le premier dispositif expérimental comprend soit dix traitements (deux types de travail du sol x cinq profondeurs) pour les propriétés du sol évaluées avant l'expérience, soit trente traitements (deux types de travail du sol x trois doses d'azote x cinq profondeurs) pour les propriétés du sol évaluées à la fin de l'expérience, soit deux types de travail du sol x trois doses d'azote x cinq variétés pour le rendement du blé. Le plan d'expérience était un bloc aléatoire complet avec trois répétitions. Par conséquent, les plans expérimentaux correspondants étaient soit un split-plot pour les propriétés du sol déterminées avant le début de l'expérience (type de travail du sol dans les grandes parcelles et profondeur dans les petites parcelles), soit un split-split-plot pour celles déterminées à la fin de l'expérience et pour le rendement du blé. Dans le premier cas, les types de travail du sol ont été attribués aux grandes parcelles, les doses d'azote aux parcelles moyennes et les profondeurs aux petites parcelles. Il en va de même pour le rendement du blé, à l'exception des variétés qui ont été attribuées aux petites parcelles. Les deux types de travail du sol étaient le travail conventionnel (SC) et le non-travail du sol (SD). Les trois doses d'azote étaient de 20, 40 et 60 kg N ha⁻¹. Le 21 décembre 2020, l'engrais de base NPK 10-20-20 a été appliqué à raison de 150 kg ha⁻¹, le 20 janvier 2021 et le 8 février 2021, l'ammonitrate 33,5% a été apporté à raison de 100 kg ha⁻¹. Les cinq variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf).

(Tableau 2) étaient Louiza (INRA-Maroc, 2011), Faraj (INRA-Maroc, 2007), et Nachit, ainsi que deux germplasmes (M.G et I.C).

Tableau 2 : Principales caractéristiques des trois variétés.

Variété de blé		Faraj	Nachit	Louiza
Année d'inscription officielle		2007	2018	2011
Qualité	Protéine (%)	15,3	15	14,8
	Indice de jaune	29	27	33
Rendement (t/ha)	Surfaces favorables	5,9	5,9	5,5
	Zones semi-arides	3,8	4,1	3,1
	Potentiel	6,8	7,1	6

Source : INRA : INRA. (2022). *Nouvelles obtentions variétales INRA*. INRA éditions : Rabat, Maroc.

La deuxième expérimentation prend en compte deux facteurs : le type de travail du sol avec deux niveaux (travail du sol conventionnel, SC et semis direct, SD) et la dose d'azote avec trois niveaux (82, 115 et 149 kg/ha). Un dispositif en blocs aléatoires complets a été utilisé avec trois répétitions. Le travail du sol conventionnel a été effectué à l'aide d'un déchaumeur à disques à une profondeur de 10 à 15 cm pour préparer les lits de semences et enfouir les résidus, suivi d'une charrue à chisel. Dans le cas du semis direct, le sol a été ameubli de 2 à 3 cm pour planter les graines à une profondeur de 5 cm, à l'aide d'un semoir spécial pour le semis direct. Deux engrais azotés ont été utilisés. Tout d'abord, l'engrais de base NPK 10-20-20 a été appliqué à raison de 150 kg/ha le 21 décembre 2020. Un mois plus tard, l'ammonitrate 33,5% a été fourni à raison de 100 kg N /ha le 20 janvier 2021. Le 8 février 2021 et le 10 mars 2021, 7,998, 6,337 et 4,541 g de ¹⁵N ont été appliqués pour les trois doses d'azote correspondant à 82, 115 et 149 kg/ha, respectivement. Ces doses d'azote ont été choisies de manière à considérer la dose recommandée (115 kg/ha) et celle utilisée par les agriculteurs de la région (149 kg/ha). La plus petite dose (82 kg/ha) a été choisie comme une dose moins qu'optimale pour avoir une différence constante entre deux doses consécutives (progression ou séquence arithmétique), comme recommandé pour optimiser les facteurs quantitatifs lors de l'analyse statistique.



L'expérience a utilisé 18 unités expérimentales, chacune ayant 10 m × 8 m = 80 m². Autour de chaque unité expérimentale, il y avait des rangées de bordure de 50 cm de chaque côté ;

l'ensemble de l'expérience couvrait donc environ 1500 m². Pour suivre le devenir de l'engrais N, du ¹⁵N marqué (10,16 %) a été appliqué dans chaque micro-parcelle de 2 m × 2 m = 4 m². La culture utilisée dans le travail expérimental était le blé dur (*Triticum durum* Desf.), en particulier la variété Louiza (INRA-Maroc, 2011). La rotation céréales-légumineuses est pratiquée sur le site d'étude avec des lentilles/pois chiches comme culture précédente. Des herbicides contre les dicotylédones et les graminées ont été utilisés pour la gestion des adventices. Deux parcelles d'un mètre sur un mètre ont été sélectionnées et des quadrats carrés à tige métallique ont été placés directement sur la végétation afin de déterminer les rendements en grains et en paille pour chacune des 18 unités expérimentales. Les échantillons de plantes ont été hachés et séchés à 65 °C avant d'être broyés. Les échantillons de sol ont été tamisés à 2 mm puis séchés à 40 °C.

c. Données climatiques

Les précipitations totales et la température moyenne pour la saison de croissance 2020-2021 ainsi que pour les 10 dernières années (2013-2022) sont présentées dans la figure 8. Le schéma de la température moyenne est presque le même pour les deux périodes, sauf pour les mois d'août et d'octobre, où la température moyenne était légèrement inférieure pour 2020-2021 par rapport à 2013-2022. En revanche, il y a une différence radicale dans les schémas de précipitations avec des niveaux très bas pour 2020-2021 par rapport à la période 2013-2022, mais il n'a plu que 6 mois en 2020-2021 contre 10 mois pour la période 2013-2022. Ces faibles précipitations auront un impact sur le rendement en grains et en paille du blé.

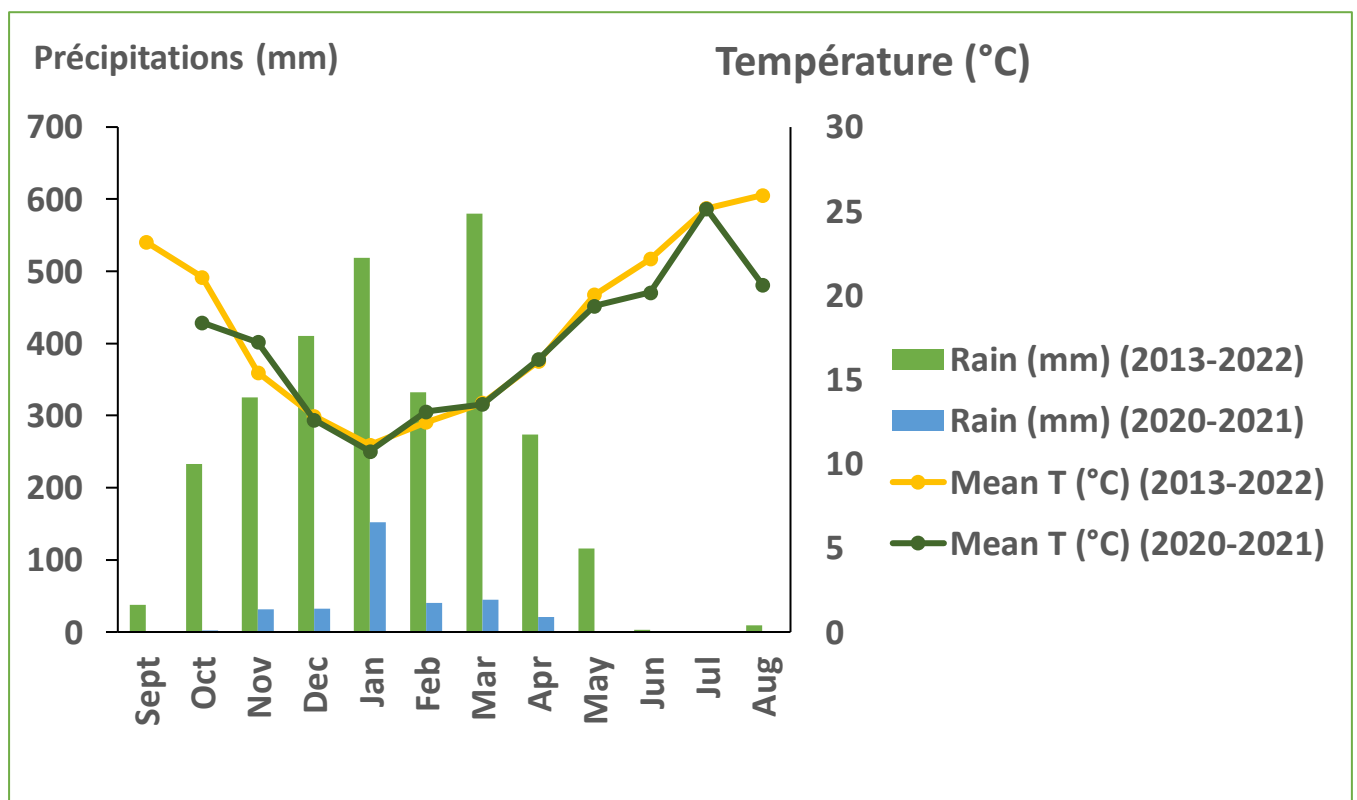


Figure 8. Précipitations et températures contrastées dans la Région du Zaër : saison 2020-2021 par rapport à la moyenne décennale (2013-2022) au domaine expérimental de Marchouch.

II. Analyses physiques du sol :

1. Texture du sol

La texture du sol (Richer de Forges et al, 2008), partie minérale du sol, est un mélange hétérogène de particules de dimensions très variables. On distingue traditionnellement les sols fins (< 2 mm) et les éléments grossiers (> 2 mm) et récapitulée dans le tableau suivant :

Tableau 3 : Echelle granulométrique du sol

Terre fine					Eléments grossiers	
< 2µm	2µm- 20µm	20µm- 50µm	50µm- 200µm	200µm- 2mm	2mm- 2cm	> 2cm
Argiles	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	graviers	Cailloux

Les pourcentages obtenus des particules définissent les classes texturales et seront représentées sur des triangles de texture, en utilisant le triangle USDA qui est imposé comme norme internationale.

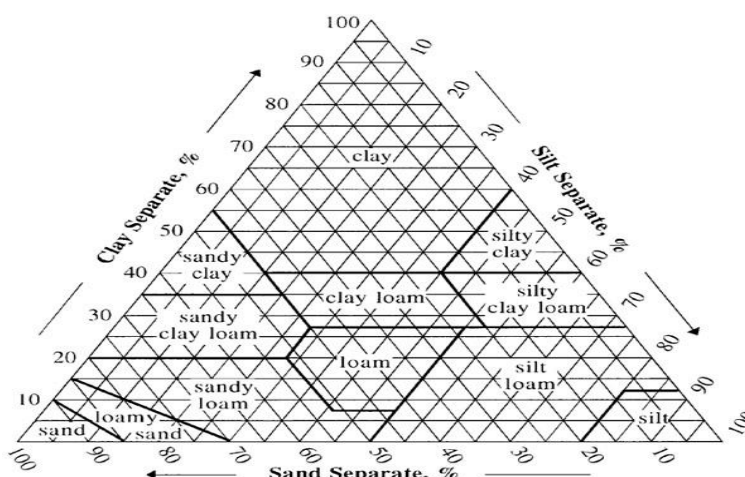


Figure 9 : Diagramme de classification détaillée des textures (US Taxonomy 1976 et clés de la Taxonomie des sols, 1986)

2. Densité apparente

La densité apparente correspond au poids sec d'un volume de sol dont la structure n'a pas été perturbée. C'est également la masse d'une unité de volume de sol séchée à 105°C. Ce volume

comprend à la fois les solides et les pores. Il est mesuré par la méthode du cylindre (Blake et Hartage, 1986).

3. Stabilité structurale

La stabilité structurale (SS) c'est l'aptitude aux agrégats du sol à résister à l'action de l'érosion, c'est une analyse spécifique des propriétés physiques du sol. C'est un bon indicateur de sa sensibilité à l'imperméabilisation du sol et à l'érosion hydrique. Elle est mesurée par des tests appliqués en laboratoire selon la méthode de **Le Bissonais (1996)**. Les résultats sont exprimés en mm sous forme de diamètre moyen pondéral (DMP) :

$$\text{DMP} = \left(\sum (\text{diamètre moyen entre deux tamis} \times \% \text{ en poids des particules retenues sur le tamis}) \right) / 100 \quad (1)$$



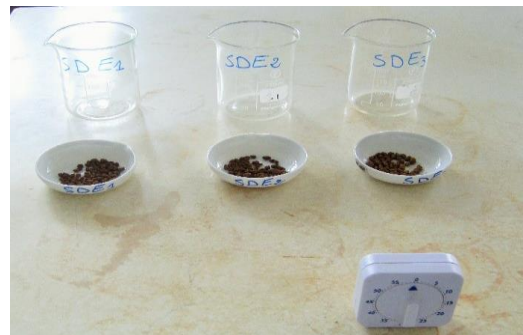
Mottes



Cylindres utilisées



Frittage du motte



Teste à l'eau 10min



Test de capillarité 60min



Teste d'alcool 30 min



Sol sec passera par la série des six tamis

4. La granulométrie :

La granulométrie des produits de la désagrégation est ensuite déterminée par tamisage ou par granulométrie laser. Elle est basée sur la densimétrie s'applique à l'étude granulométrique des particules de taille inférieure à 50mm (limons-argiles).



Destruction de la matière organique



Filtration des échantillons de sol



Tamissage sous l'eau



Récupération du sable sec

Les résultats sont exprimés sous la forme de Diamètre Moyen Pondéré (MWD)

exprimé en mm).

Tableau 4 : Classes de stabilité, battance et érosion hydrique en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéral après désagrégation (DMP)

DMPmoyen (mm)	<0,4	0,4 - 0,8	0,8 - 1,3	1,3-2	>2mm
Stabilité des agrégats du sol	Très instable	Instable	Moyennement Stable	Stable	Très stable
Battance	Systematique	Très fréquente	Fréquente	Occasionnelle	Très rare
Ruissellement et érosion diffuse	Risque important et permanent en toutes conditions topographiques	Risque fréquent en toutes situations	Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques	Risque limité	Risque très faible

III. Les analyses chimiques du sol

Pour sa croissance, en plus de lumière et de chaleur, d'eau, et d'air, la plante a essentiellement besoin des substances minérales, qui sont mis à sa disposition en fonction des propriétés chimiques des sols. Ces derniers ont le pouvoir de retenir divers éléments : macroéléments (P, K, Ca, Mg, Na) et oligo-éléments (Zn, Fe, Cu, Mn) grâce au complexe argilo-humique (CAH), qui se compose d'argile et d'humus étant tous deux chargés négativement. Donc, des échanges de cations ont lieu entre le CAH et la solution du sol, les ions y seront retenus sous forme échangeable, ce qu'on appelle la capacité d'échange cationique.

En d'autres termes, si on traite un sol par une solution contenant des ions différents de ceux retenus par le sol, il aura échange entre les ions du complexe absorbant et ceux de la solution :



I. Conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) est un indice de la teneur en sels solubles dans la solution du sol, c'est-à-dire de son degré de salinité (**Montori, 1997**). On distingue deux méthodes pour la détermination de la CE :

- ✓ L'extrait dilué : le rapport entre la quantité de sol et la quantité d'eau nécessaire à la préparation de l'extrait est la même pour tous les échantillons. Ce rapport peut varier, mais il est en général de 1 /5, la masse d'eau ajoutée est égale à 5 fois la masse de sol (50ml d'eau pour 10g du sol).
- ✓ L'extrait saturé : la méthode nécessite la fabrication d'une pate saturée en eau qui doit présenter des caractéristiques physiques particulières (consistance, brillance...).



Conductimètre G. BOYER

Tableau 5 : Echelle de salinité des sols (Durant J.H,1983)

Degré de salinité	Non salin	Légèrement salin	Salin	Très salin	Extrêmement salin
Conductivité électrique en $\mu\text{s}/\text{cm}$ à 25°C	0-500	500-1000	1000-2000	2000-4000	>4000

2. pH du sol

Le pH est un paramètre important de la dynamique du sol, c'est une clé en agronomie car leur degré d'acidité ou de basicité joue un rôle très important sur l'assimilation des éléments nutritifs par la plante, il a une influence sur trois composantes importantes de la fertilité d'un sol : la biodisponibilité des nutriments, l'activité biologique et la stabilité structurale. La variation de pH dépend aux variations saisonnières et le pouvoir tampon de sol (le nombre d'ions en réserve sur le complexe argilo-humique), l'état hydrique du sol, sa température et la présence ou non d'une culture en période de croissance active.



pH-mètre et ses étalons

Tableau 6: Répartition des classes des pH des sols étudiés du périmètre d'Issen selon les normes DIAEA /DRHA /SEEN (2008)

Classe du sol	Acide	Faiblement acide	Neutre	Faiblement neutre	Moyennement basique	Tendance alcaline	Très alcaline
pH	<6	6-6,5	6,5-7,3	7,3-7,8	7,8-8,5	8,5-9	>9

3. Matière organique

La matière organique (MO) joue un rôle essentiel dans le maintien de la qualité du sol, notamment en termes de rétention d'eau et de restitution des éléments nutritifs aux plantes (azote, phosphore, calcium, magnésium, etc.) (Allaerts et al, 1982). La teneur en MO du sol est déterminée par la méthode de **Walkley et Black (1934)**. La détermination du carbone est réalisée par voie humide, elle consiste en l'oxydation à froid du carbone de la matière organique par un mélange de bichromate de potassium 1N ($K_2Cr_2O_7$) et d'acide sulfurique (H_2SO_4) jusqu'à libération du CO_2 . Le %MO est donc obtenu en multipliant le %C déterminé par le facteur de Van Bemmlen (1890) :

$$\%MO = \%C \times 1,724 \quad (2)$$



Récupération du surnageant

Les résultats préalablement obtenus seront interprétés selon les normes de la matière organique enregistrés par DIAEA/DRHA/SEEN.

Tableau 7: Les normes de matière organique des sols selon DIAEA /DRHA /SEEN (2008)

Classe du sol	MO%
Très pauvre	<0,7
Pauvre	0,7-1,5
Moyennement pauvre	1,5-3
Riche	3-6
Très riche	>6

4. Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) est une mesure de la taille du réservoir de nutriments qui peut facilement passer à travers la solution du sol. Elle représente la somme de l'acidité échangeable (ions H^+ et Al^{3+}) et des cations basiques échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ et NH_4^+). La CEC du sol doit être mesurée au pH de la solution du sol pour éviter de modifier les charges variables (**Charlet et Schlegel 1999**). Dans les méthodes conventionnelles, la CEC est mesurée soit à un pH de 7 (méthode Metson) (**Baize, 2000**) pour les sols faiblement acides à neutres, soit à un pH de 8,2 (méthode Bower) (**Bower et al, 1952**) pour les sols alcalins ; cette dernière a été utilisée dans notre travail.



Tubes (du sol + acétate d'ammonium)



Agitation va et vient 5 min

Tableau 8 : Les normes d'interprétation de la C.E.C (Doucet, 2006)

Catégories de sol	CEC (meq/100g.sol)				
	Très faible	Faible	Moyen	Elevée	Très élevée
Sols légers pH>6	<4	4-6	6-8	8-10	>10
Sols limoneux	<10	10-15	15-20	20-25	>25
Sols lourds	<25	25-30	30-35	35-40	>40
Sols organiques	<50	50-100	100-150	150-200	>200

5. Macroéléments

a. Phosphore

Le phosphore est un élément majeur dans la formation des acides nucléiques, de l'ATP et de la photosynthèse (**Benjamin et al, 2005**). Selon la méthode d'Olsen, le phosphore assimilable est extrait par un réactif de bicarbonate de sodium (HCO_3Na), tamponné à pH 8,5 par de l'hydroxyde de sodium (NaOH) (Olsen et al, 1954).



Spectro-colorimètre

Les normes de la disposition du phosphore dans le sol d'après Delaunois:

Tableau 9: Répartition des classes de phosphore assimilable (P_2O_5) des sols selon les normes Delaunois (2008)

Classe du sol	P_2O_5 (ppm)
Très pauvre	<15
Pauvre	15-30
Moyennement riche	30-45
Riche	45-100
Très riche	>100

b. Potassium

Le potassium, comme le phosphore, est l'un des éléments majeurs indispensables à la croissance et au développement des plantes. Il joue un rôle multiple dans la plante : échanges ioniques dans la cellule, activation de la photosynthèse, synthèse des protéines (Gracia et Zimmerman, 2014). La méthode la plus simple et la plus couramment utilisée pour la détermination du potassium est la normale « K échangeable avec l'acétate d'ammonium » à pH = 7 (Schvartz et al, 2005), c'est une méthode simple et robuste (Mhiri, 2002).



Photomètre à flamme

Tableau 10: Les normes d'interprétation potassium échangeable (K) selon les normes Delaunois (2008)

Classe du sol	K ₂ O(ppm)
Très pauvre	<60
Pauvre	60-100
Moyennement riche	100-180
Riche	180-300
Très riche	>300

c. Calcium et magnésium

Le calcium et le magnésium sont adsorbés comme d'autres cations à la surface des colloïdes minéraux et organiques ; ils s'y fixent en neutralisant les charges négatives. Le calcium et le magnésium forment généralement entre 70 et 95 % des bases dites échangeables dans les sols (Boyer, 1978). La méthode basée sur l'extraction par l'acétate d'ammonium neutre et normal est la plus utilisée pour la détermination du calcium et du magnésium échangeables. Trois conditions sont essentielles pour l'obtention de bons dosages complexométriques (Pelloux et al, 1971).

Chacun de ces éléments joue un rôle important dans l'alimentation des plantes :

-Le calcium entre dans la formation des parois cellulaires, le déplacement des sucres, la formation des poils absorbants sur leurs racines, la neutralité des poisons qu'elles pourraient produire, l'amélioration de leur vigueur en général et la qualité des tissus végétaux [73]. Il est indispensable pour la croissance des racines et tant que constituant des matériaux de la membrane cellulaires.

-Le magnésium est le constituant central de la chlorophylle. Il participe aussi à des réactions enzymatiques liées au transfert d'énergie. La concentration de magnésium dans le sol peut varier de 0,05 % à 1,34 %. En effet une fois la concentration de magnésium décroît dans la solution du sol, le magnésium qui est attaché aux sites d'échange des particules de sol est libéré pour rétablir cet équilibre entre la solution du sol et les sites d'échange du sol.

La méthode basée sur l'extraction par l'acétate d'ammonium neutre et normal, est la méthode la plus utilisée pour la détermination du calcium et magnésium échangeables.



Les solutions d'extraction avant et après le titrage par EDTA

6. Oligo-éléments

Les oligo-éléments jouent un rôle essentiel dans le cycle physiologique des plantes. Plusieurs auteurs ont résumé leur rôle (**Kabata-Pendias, 2001**). Le fer joue un rôle majeur dans la synthèse de la chlorophylle et des protéines, le transport de l'oxygène, le métabolisme des nitrates et les fonctions enzymatiques. Le manganèse est lié au fer dans son action sur la formation de la chlorophylle et dans le métabolisme des nitrates. Il est impliqué dans la photosynthèse, les processus enzymatiques et le métabolisme des protéines. Le zinc participe au métabolisme des auxines, à la synthèse des acides nucléiques et des protéines. Le cuivre entre dans la composition

de nombreuses enzymes d'oxydation ; c'est un activateur d'enzymes. Il participe à la synthèse de la lignine. Grâce à cet élément, les plantes gardent plus longtemps un aspect vert et jeune, ce qui est nécessaire tout au long de la saison de croissance. La méthode d'extraction DTPA (DiethyleneTriaminePentaAcetic Acid) développée par **Lindsay et Norvell (1978)** a été adoptée dans de nombreux pays. Il s'agit probablement de la technique d'extraction la plus utilisée pour évaluer la teneur en Zn assimilable des sols, car le DTPA s'est avéré être un bon agent d'extraction pour plusieurs cultures sur des sols très différents (**Katyal et Randhawa, 1986**). C'est pourquoi nous avons utilisé cette méthode dans notre travail, qui est basée sur l'extraction des oligo-éléments par le DTPA, décrite par **Mathieu et Pieltain (2003)**.

7. Azote total

L'azote total a été déterminé par la méthode Kjeldahl (**Bremner, 1996**). Cette procédure implique la digestion d'un échantillon de sol, la distillation du NH_3 produit et sa quantification par titrage (ou colorimétrie). Le sol est digéré dans de l'acide sulfurique concentré, en présence d'un mélange de catalyseurs permettant de réguler la température d'ébullition, jusqu'à dissolution et oxydation complète. L'azote organique contenu dans l'échantillon est oxydé en ammonium (sous forme de sulfate d'ammonium). Le NH_4^+ -N du digest est quantifié par collecte du NH_3 libéré par la distillation à la vapeur du digest avec un alcali et titré avec une solution acide volumétrique. Si la quantification des nitrates est requise, il est possible d'inclure certaines modifications permettant la réduction et la transformation de cet anion en ammonium, par exemple, avec l'ajout d'acide salicylique (non inclus dans cette SOP).

8. Ammonium et nitrates

L'ammonium et les nitrates ont été extraits par une solution de KCl, puis distillés (**Maynard et al, 2008**).

9. Analyse des isotopes stables

Les analyses de ^{15}N et l'azote total ont été réalisées au CNESTEN. L'abondance des isotopes $\delta^{15}\text{N}$ du grain et de la paille de blé (environ 5 à 6 mg d'échantillons) a été déterminée par l'analyse élémentaire EA-IRMS à l'aide d'un spectromètre de masse à rapport isotopique (Delta V Thermo Scientific, Allemagne) couplé à un analyseur d'éléments (Thermo Scientific FLASH HT Plus) en suivant la procédure décrite par Mariotti (**Mariotti, 1991**). Les grains et la paille ont été séchés au four à 70 °C pendant 24 heures et broyés séparément et ont été transférés dans de petites capsules d'étain dans un plateau d'analyse d'éléments. Les rapports isotopiques stables sont exprimés en delta (δ) ‰ et en notation permil (‰) par rapport à un étalon international (Brand et al, 2014).

$$\delta X(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{échantillon}}}{R_{\text{étalon}}} - 1 \right) * 1000 \quad (1)$$

$R_{\text{échantillon}}$ et $R_{\text{étalon}}$ sont les rapports $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ de l'échantillon et de l'étalon d'échantillon pour $\delta^{15}\text{N}$.

Les valeurs de $\delta^{15}\text{N}$ sont rapportées par rapport au N_2 dans l'air atmosphérique (AIR).

Les valeurs isotopiques $\delta^{15}\text{N}\text{‰}$ des échantillons ont été calibrées par rapport aux matériaux de référence certifiés suivants : Leucine ($\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = 10,40 \pm 0,5\text{‰}$) et Caféine IAEA-600 ($\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = 1 \pm 0,2\text{‰}$). L'incertitude par lot (7 répétitions du matériau de référence isotopique secondaire) était $\leq 1,5\text{‰}$ pour $\delta^{15}\text{N}$.

Le pourcentage de N dérivé des engrais (% NDFF), l'azote dérivé des engrais (NDFF kg/ha) et l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE) ont été calculés comme suit (Ismaili et al., 2015) :

$$\%NDFF = \frac{\text{Atom \% } 15 \text{ N access in crop}}{\text{Atom \% } 15 \text{ N access in fertilizer}} * 100 \quad (2)$$

$$NDFF(\text{kgha}^{-1}) = \frac{\%NDFF}{100} * \text{total N}(\text{kgha}^{-1}) \quad (3)$$

$$NUE\% = \left(\frac{\text{amount of N derived from fertilizer}}{\text{amount of N applied as fertilizer}} \right) * 100 \quad (4)$$

NDFF : Azote dérivé d'engrais.

NDFF (kg/ha) : quantité d'azote dérivée de l'engrais.

NUE% : Efficacité d'utilisation de l'azote.

IV. Analyse statistique

1. La première étude

Une analyse statistique descriptive (moyenne, écart-type, minimum, maximum et coefficient de variation, CV) des différentes caractéristiques a été réalisée pour l'ensemble des données puis pour chaque type de semis. Ensuite, deux conditions ont été vérifiées : la normalité (à l'aide du test de Shapiro-Wilk) et l'égalité des variances (à l'aide du test de Levene). Si les deux conditions sont vérifiées, l'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour comparer les moyennes des caractéristiques du sol correspondant aux deux types de semis ou aux cinq profondeurs. En revanche, si l'une ou l'autre des conditions n'est pas vérifiée, il faut d'abord procéder à une transformation des variables ; sinon, il faut utiliser une méthode non paramétrique comme le test de Mann-Whitney. Les tests ont été appliqués à un niveau de probabilité $p = 0,05$.

2. La deuxième étude

Les paramètres statistiques descriptifs (moyenne, écart-type, minimum, maximum et coefficient de variation, CV) des différentes caractéristiques du sol et des cultures ont été

calculés. Ensuite, deux conditions ont été vérifiées : la normalité (à l'aide du test de Shapiro-Wilk) et l'égalité des variances (à l'aide du test de Levene). Les deux conditions étant remplies, une analyse de variance (ANOVA) à 3 ou 4 facteurs a été utilisée pour comparer les moyennes correspondant aux deux types de travail du sol, aux trois doses d'azote et aux cinq profondeurs ou variétés, ainsi qu'à leurs interactions. Tous les facteurs ont été considérés comme fixes, à l'exception du bloc (répétitions), qui a été considéré comme aléatoire, ce qui a donné lieu à des modèles ANOVA mixtes. Tous les tests ont été appliqués à un niveau de signification de 0,05. Si des différences significatives ont été constatées, le test post-hoc de Duncan a été utilisé pour les comparaisons par paires. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel SPSS, version 25 (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

3. La troisième étude

La moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum ont été calculés pour les rendements en grains et en paille de blé, l'azote total de la plante, l'azote dérivé de l'engrais (NDFF) et l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE). Les données étant conformes à la normalité (vérifiée par le test de Shapiro-Wilk) et ayant des variances égales (vérifiée par le test de Levene), l'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée pour comparer les moyennes correspondant aux effets principaux des deux facteurs (les deux types de travail du sol et les trois doses d'azote) et, éventuellement, à leurs interactions. En cas d'effets significatifs des facteurs, le test post-hoc de Tukey HSD a été utilisé pour comparer chaque paire de niveaux des deux facteurs. Un niveau de signification de 5% a été adopté pour tous les tests statistiques. Les tailles d'effet (η^2 carré partiel), qui donnent l'ampleur des effets ou leur importance pratique ou leur pertinence biologique, ont également été rapportées (**Richardson, 2011 ; Lakens, 2013**), ce qui peut être utilisé ultérieurement dans les méta-analyses (**Koricheva et Gurevitch, 2014 ; Liu et al, 2016 ; Gardner et Drinkwater, 2019**). Le logiciel SPSS, version 25 (IBM Corp., Armonk, NY, USA), a été utilisé pour toutes les analyses statistiques.

Résultats et discussions

Chapitre 1 : Effet du semis direct du sol sur les propriétés physico-chimiques des sols de la région d'El Koudia, Rabat (Maroc)

L'agriculture de conservation a été initiée au Maroc au début des années 1980. En 1983, l'INRA a entamé des recherches sur cette technique. Une diffusion plus large du système sans labour a été réalisée par les institutions de développement en collaboration avec l'INRA et les établissements d'enseignement supérieur agricole (**Mrabet et al, 2011**). Ce système agricole est de plus en plus nécessaire pour lutter contre l'érosion hydrique et éolienne, la destruction de la matière organique et de la structure des sols (**Zaghuane et al, 2006**), et pour faire face à la faible productivité des sols, aux faibles rendements, à la dégradation des ressources naturelles et à la diminution du taux de satisfaction des besoins par la production locale. Le non-labour ou semis direct (SD), qui fait partie intégrante de l'agriculture de conservation, est un système conservatoire de gestion des sols et des cultures, dans lequel les semences sont placées directement dans le sol qui n'est jamais labouré (**Mrabet, 2001**). Il est présenté comme une solution pour surmonter les défis auxquels l'agriculture est confrontée aujourd'hui, en particulier ceux liés au changement climatique, à la mondialisation, aux fluctuations des prix et aux coûts élevés des intrants (**El Aissaoui et al, 2009 ; Moussadek et al, 2011 ; Laghrour et al, 2015**). L'objectif principal du système SD est d'assurer une production durable ; l'absence de travail du sol pourrait contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique en réduisant les dépenses énergétiques et donc les émissions de carbone et la capacité de stockage via la matière organique dans le sol (**Guedez, 2002**), et en augmentant sa stabilité structurale après une période d'adaptation de quelques années (**Guerif, 1994**). De plus, il augmente la productivité des cultures avec moins d'engrais et augmente le potentiel du sol. En effet, **Mrabet et Moussadek (2012)** ont constaté que les niveaux de phosphore, d'azote et de potassium s'améliorent dans le cas du non-travail du sol par rapport au travail du sol conventionnel. Au Maroc, les recherches menées au cours des 30 dernières années ont montré la nécessité d'utiliser des systèmes agricoles sans labour pour améliorer la qualité du sol et stabiliser les rendements à long terme (**Moussadek et al, 2011**). Ce chapitre contribue à cet effort de recherche en se concentrant sur les changements qui ont affecté les propriétés d'un sol soumis à un système de SD pendant 2 ans. L'accent sera mis sur les propriétés physiques (texture du sol, densité apparente et stabilité structurale) et chimiques (matière organique, conductivité électrique, capacité d'échange cationique, macroéléments tels que le phosphore, le potassium, le magnésium et le calcium, et oligo-éléments tels que le zinc, le fer, le cuivre et le manganèse).

1. Texture du sol

D'après le tableau 11, les résultats des analyses granulométriques des échantillons de sol des deux parcelles étudiées montrent que le sol étudié a une texture identique de limon sableux.

Tableau 11. Texture du sol pour le non-travail du sol (SD) et le travail du sol conventionnel (SC).

Type de semis	% sur la terre fine sèche					% sur la partie minérale			
	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)	Calcaire (%)	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)
SD	16,2	5,4	47,3	23,8	6,6	0,6	16,3	53,2	30,5
SC	16,2	5,4	46,9	24	6,9	0,5	17,3	52,4	30,3

A : Argile ; LF : Limon fin ; LG : Limon grossier ; SF : Sable fin ; SG : Sable grossier.

2. Densité apparente

La figure 10 montre une densité apparente plus élevée pour le non-travail du sol ($1,53 \text{ g/cm}^3$) que pour le travail du sol conventionnel ($1,31 \text{ g/cm}^3$). Ce résultat est cohérent avec de nombreuses études menées dans différentes conditions de sol et de climat qui concluent que la densité apparente en l'absence de travail du sol augmente dans les 5 à 10 premiers centimètres du sol (Lampurlanés et Cantero-Martinez, 2003 ; Basic et al, 2004). Les résultats obtenus peuvent s'expliquer par le fait que le sol n'est pas perturbé et reste donc relativement compact, contrairement au labourage conventionnel. Le non-retournement des couches de sol par les techniques de labour ou de travail superficiel du sol, en particulier les techniques de non-travail du sol, et la présence de biopores contribuent donc à réduire les effets de ces techniques sur la densité apparente du sol à long terme (au-delà de 10 ans d'adoption de ces techniques) (Dinon et Gerstamans, 2008 ; Franc-Xavier, 2016).

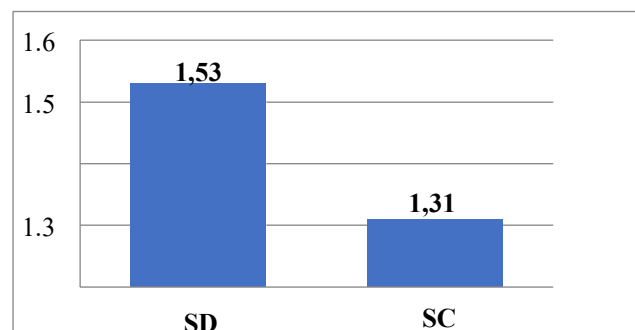


Figure 10. Densité volumique (g/cm^3) à la profondeur de 0 à 10 cm pour SD et SC.

3. Stabilité structurelle

L'analyse statistique montre une différence significative entre les trois tests qui correspondent à des conditions spécifiques en termes de conditions hydriques, pour les deux parcelles (tableau 12). Les résultats ont montré que les valeurs DMP pour SD et SC sont très similaires avec une légère augmentation pour SD. Ce résultat est dû au fait que la technique conservatrice appliquée à ce sol est encore nouvelle (2^{ème} année d'essai).

Les résultats montrent que les trois tests sont souvent corrélés entre eux, le test à l'eau est souvent le plus destructif suivi par la désintégration mécanique, la réhumidification lente, il permet de distinguer les sols à très faible stabilité car il est moins nocif pour les sols. Le cadre méthodologique de la méthode **Le Bissonnais (1996)** prend en compte trois traitements complémentaires avec des mécanismes de désagrégation différents, ce qui fournit une référence de base sur le comportement des sols dans des conditions spécifiques en termes d'état hydrique, de taux d'humectant et d'énergie appliquée. Les résultats représentent la moyenne des trois tests (eau, éthanol et ré-humidification) pour la stabilité structurelle au niveau des deux parcelles et indiquent un DMP= 0.94 mm en SD supérieur à la valeur SC (0.83 mm).

Ce sol est moyennement stable selon les normes de Le Bissonnais, ce qui entraîne des battements fréquents et des risques de ruissellement variables selon les paramètres climatiques et topographiques.

Tableau 12 : Résultats des tests de stabilité structurelle.

Type de semis	TE	HR	RL	Moyenne
SD	0,42	0,09	1,99	0,83
SC	0,48	0,20	2,13	0,94
Moyenne	0,45b	0,15c	2,06a	0,88

TE : Désintégration mécanique (test à l'éthanol) ; HR : Humectation rapide ; RL : Réhumectation lente. Les moyennes avec des lettres différentes indiquent des différences significatives à un niveau de probabilité de 0,05.

4. Propriétés chimiques du sol

Les principales statistiques descriptives concernant le pH, la profondeur, la CE, la MO, la CEC, les macroéléments, les bases échangeables et les oligo-éléments sont présentées dans le tableau 13.

Tableau 13 : Paramètres statistiques descriptifs des différentes propriétés du sol.

Propriétés du sol	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type	CV (%)
pH _{eau}	5,8	6,8	6,3	0,3	5,3
pH _{KCl}	5,3	6,2	5,9	0,3	4,3
CE (mS/cm)	0,04	0,13	0,07	0,03	45,2
MO (%)	1,15	1,59	1,37	0,15	10,7
CEC (meq/100g)	4,6	12,9	8,5	2,3	26,9
P ₂ O ₅ (ppm)	51,5	123,4	72,4	21,5	29,7
K ₂ O (ppm)	197,0	990,0	296,3	244,8	82,6
Ca ²⁺ (meq/100g)	4,3	7,7	6,1	1,0	16,9
Mg ²⁺ (meq/100g)	1,3	5,7	3,2	1,6	50,8
Zn (ppm)	0,03	0,35	0,10	0,09	93,1
Fe (ppm)	0,67	1,53	0,95	0,25	26,7
Mn (ppm)	0,6	15,1	4,0	5,4	136,4
Cu (ppm)	0,01	0,07	0,04	0,02	39,0

Le tableau 13 montre que les constituants du sol sont très variables. Cependant, cette variabilité dépend des constituants. L'élément le plus variable est le Mn avec un coefficient de variation (CV) de 136,4 %, une valeur moyenne de 4,0 et des valeurs comprises entre 0,6 et 15,1 ppm. Le deuxième élément le plus variable est le Zn avec un CV de 93,1%, une valeur moyenne de 0,09 et des valeurs comprises entre 0,03 et 0,35 ppm, suivi par le K₂O avec un CV de 82,6%, une valeur moyenne de 296,3 et des valeurs comprises entre 197 et 990 ppm. De nombreux autres composants ont une variabilité similaire de 26,7 à 50,8 % : Fe, CEC, P₂O₅, Cu, CE et Mg²⁺. Les composantes les moins variables sont pH_{KCl}, pH_{eau}, OM et Ca²⁺ avec un CV allant de 4,3 à 16,9%.

5. Comparaison entre SD et SC

Le test de normalité de Shapiro-Wilk indique que seules les variables pH_{eau}, pH_{KCl}, CE, MO, CEC, Mg²⁺, Mn et Cu suivent une distribution normale. Parmi ces variables, le test d'égalité des variances de Levene indique que cette dernière hypothèse n'est pas vérifiée pour CE et Mn. La transformation logarithmique de ces deux variables a permis d'obtenir des variances égales. Par conséquent, l'ANOVA sera appliquée aux variables pH_{eau}, pH_{KCl}, OM, CEC, Mg²⁺, et Cu à leur échelle originale alors qu'elle sera appliquée à CE et Mn à leur échelle transformée

(logarithmique). Pour les autres variables qui ne suivent pas une distribution normale (P_2O_5 , K_2O , Ca^{2+} , Zn et Fe), le test non paramétrique de Mann-Whitney sera appliqué.

Outre le test formel de normalité de Shapiro-Wilk, il est possible de se faire une idée visuelle en examinant le diagramme en boîte des variables. Ainsi, le graphique en haut à gauche de la figure 11 montre que pour pH eau, les deux boîtes correspondant aux deux types de travail du sol sont plus ou moins symétriques avec l'absence de valeurs atypiques. Le graphique en haut à droite, correspondant au log (CE) montre moins de symétrie avec une valeur atypique. La distribution de ces deux variables est normale. En revanche, les deux graphiques du bas (Zn et Fe) indiquent l'absence totale de symétrie des cases ainsi que la présence de valeurs extrêmes. Ce sont des indicateurs de la non-normalité de leur distribution.

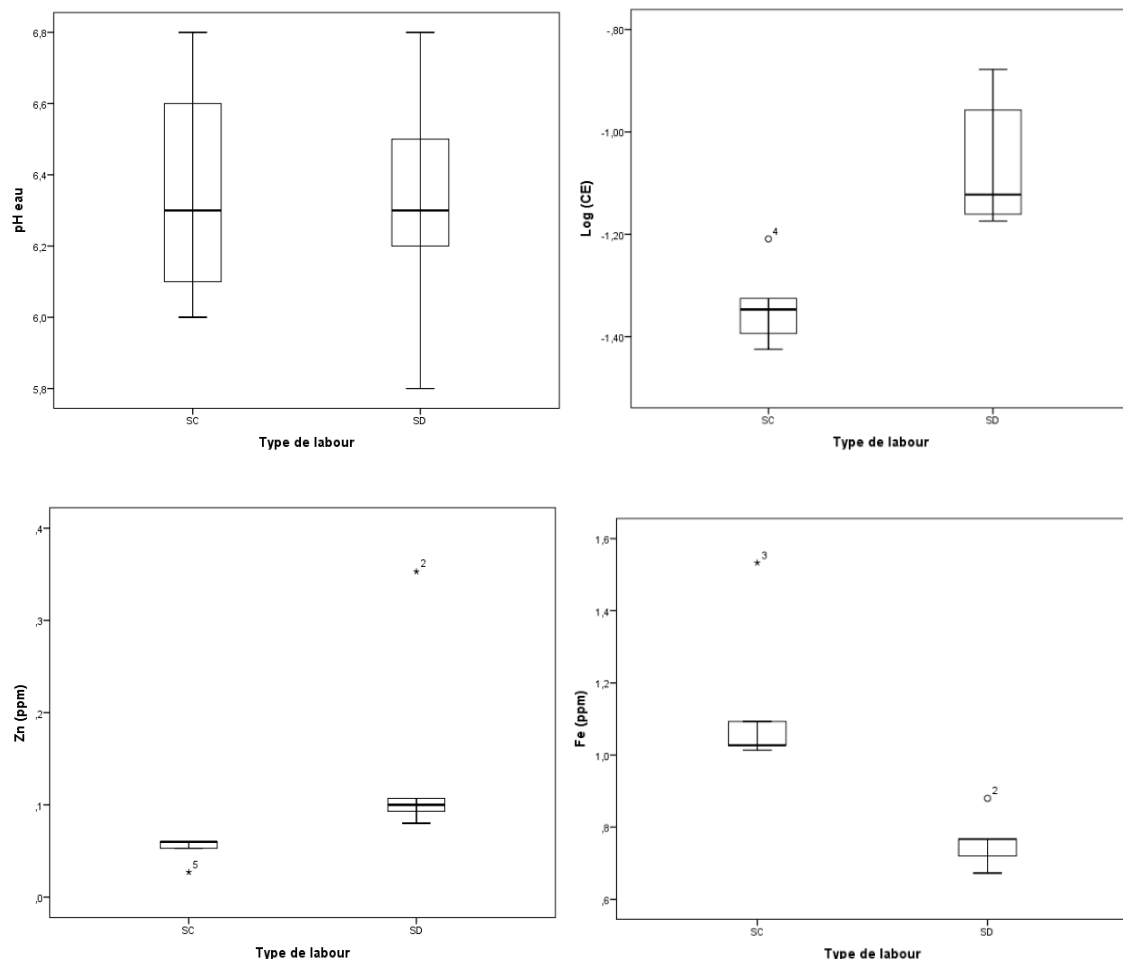


Figure 11. Boîte à moustaches de certaines propriétés du sol : pH_{eau} (en haut à gauche), log (CE) (en haut à droite), Zn (en bas à gauche) et Fe (en bas à droite).

a. Variables à distribution normale : ANOVA

Les résultats obtenus à partir des analyses effectuées sur nos échantillons de sol (tableau 14) montrent une dominance totale des sols faiblement acides, selon les normes DIAEA/DRHA/SEEN 2008. Ceci s'explique par la faible teneur en calcaire du sol qui se caractérise par un pH inférieur à 7. Plusieurs études (**Floate et Enright, 1991**) ont mis en évidence une relation très significative entre la teneur en calcaire et le pH. On constate qu'il n'y a pas de variation du pH_{eau} ni entre les deux systèmes SD et SC, ni en fonction de la profondeur. D'après l'ANOVA, on peut observer que la valeur moyenne de la CE diffère significativement entre les deux types de travail du sol, avec une valeur plus élevée dans le système SD que dans le système SC pour toutes les profondeurs. Cela peut s'expliquer par le fait que dans le système SD, les engrais restent concentrés au niveau de la surface alors que dans le système SC, le travail du sol distribue les engrais le long du profil, ce qui dilue la concentration de sels et réduit donc la conductivité électrique.

L'analyse de la matière organique sur le site d'El Koudia a montré que le sol contient une teneur modérément faible. En comparant les teneurs en matière organique entre SD et SC, on constate une valeur plus élevée dans le premier système que dans le second à l'horizon 0-5 cm et une valeur plus faible à l'horizon 10-40 cm. Ce résultat est cohérent avec les recherches de **Balesdent et al. (2000)** sur les stocks de carbone organique dans les systèmes de conservation, qui sont plus élevés en surface que dans les systèmes labourés (**D'Haene et al., 2008**), mais peu de différences apparaissent en profondeur. D'autres études ont montré que les concentrations de carbone organique dans les systèmes de conservation sont généralement plus élevées dans les 10 premiers cm du sol que dans les sols labourés et qu'elles diminuent fortement dans les horizons sous-jacents (**Al Kaisi et Yin, 2005 ; Gal et al, 2007**). Nos résultats peuvent s'expliquer par la courte période d'application du système SD dans l'essai (2 ans). D'autre part, d'autres auteurs montrent que les techniques de travail du sol ont peu d'effet sur ces stocks (**Keith et al, 2006**).

La CEC dans le SD a enregistré une valeur remarquablement plus élevée que dans le SC. La capacité d'un sol à stocker les nutriments (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , K^+ , etc.) et les ions H^+ dépend de la teneur en argile et en matière organique du sol. Il a été mesuré dans le nord de la Bretagne qu'environ 50 % de la CEC est directement attribuée à la MO du sol (**Decoopman et al, 2013**). La CEC d'un sol varie très peu dans le temps. Ceci explique la faible teneur en CEC de notre sol étudié de texture limon-sableuse.

On constate que le système SD a un avantage sur le système SC pour le magnésium, qui a une valeur SD élevée dans les 5 profondeurs avec un potentiel décroissant en profondeur.

Les résultats obtenus pour Cu et Mn montrent que la valeur de ces éléments est plus importante dans SD que dans SC à la surface (0-10 cm). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les propriétés colloïdales de la MO, c'est-à-dire son caractère de liant des éléments et son pouvoir chélateur, est susceptible de concentrer ces teneurs en surface (Sillanpaa, 1972), la matière organique étant plus importante en non-labour en surface (D'Haene et al., 2008 ; Koch et Stockfisch, 2006).

Tableau 14 : Résultats de l'ANOVA pour la comparaison des moyennes des variables normales. Les moyennes avec des lettres différentes indiquent des différences significatives à un niveau de probabilité de 0,05.

Type de semis	pH _{eau}	pH _{KCl}	CE	MO	CEC	Mg ²⁺	Mn	Cu
SD	6,36	5,96	0,046b	1,42	7,19	1,93	1,53	0,047
SC	6,32	5,76	0,091a	1,32	9,75	4,53	6,42	0,040
Moyenne	6,34	5,86	0,069	1,37	8,47	3,23	3,98	0,043

b. Variables à distribution non normale : test non paramétrique

Les échantillons de sol étudiés dans le tableau 15 sont caractérisés par une concentration élevée de phosphore assimilable avec une médiane de 67,5 ppm pour SD et 61,2 ppm pour SC, ce qui présente un sol riche en P₂O₅, selon les normes d'interprétation, alors qu'il diminue avec la profondeur. Les résultats obtenus dans la littérature montrent que les techniques de travail du sol influencent principalement la répartition du phosphore dans le sol. Quelles que soient les techniques utilisées, elles n'ont pas d'effet significatif sur les teneurs en phosphore, généralement très faibles, des couches de sol situées sous la plus grande profondeur de travail. Une autre étude dans l'horizon de surface a montré que les opérations culturales qui retournent ou mélangent le sol ont tendance à homogénéiser le phosphore dans le volume travaillé. En revanche, celles qui ne génèrent pas de mélange des couches travaillées, conduisent à l'introduction d'un gradient de teneurs décroissantes avec la profondeur (Sharpley, 2003), c'est ce que nous constatons effectivement dans nos résultats.

La teneur médiane en potassium sous SD (206 ppm) est plus faible que sous SC (244 ppm), ces valeurs montrent que notre sol est riche en potassium selon les normes. Il convient de noter qu'à

l'horizon 0-10 cm, le SD l'emporte sur le SC, ce qui est cohérent avec les études sur la teneur en potassium du sol.

SD l'emporte sur le SC, ce qui est cohérent avec les études sur l'effet du non-travail du sol sur le potassium (Edwards et al, 1992), ainsi qu'avec l'étude qui a montré que dans le non-travail du sol, la quantité de potassium peut être réduite en profondeur (Pekrun et al, 2003).

Le système SD présente un avantage par rapport au système SC en ce qui concerne le calcium. D'après la comparaison de ces résultats avec les normes, le sol est modérément riche en éléments mineurs.

D'après l'analyse statistique, on peut observer que les médianes du zinc et du fer diffèrent significativement entre les deux types de travail du sol. Le zinc a un avantage dans le SD par rapport au SC, l'inverse est vrai pour le fer : Il a une valeur faible pour le SD par rapport au SC. Cela peut s'expliquer par l'existence d'une relation antagoniste entre le Fe et le Mn : lorsque l'un augmente, l'autre diminue (Estevez, 2006). De plus, dans le cas des sols compactés (densité apparente élevée), le fer a tendance à être moins présent que dans les sols plus aérés. En tenant compte de la densité apparente, de la présence de fer et de la relation antagoniste Fe/Mn, le Mn est plus présent dans les SD et beaucoup moins dans les SC et inversement pour le Fe. Cependant, la toxicité ne peut être déterminée qu'en tenant compte de la CEC et de la teneur en MO.

Tableau 15 : Résultats du test non paramétrique (test de Mann-Whitney) avec les médianes pour les variables non normales.

Les médianes avec des lettres différentes indiquent des différences significatives à un niveau de probabilité de 0,05.

Type de semis	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Zn	Fe
SC	61,2	244	6,0	0,06b	1,03a
SD	67,5	206	6,7	0,10a	0,77b
Moyenne	64,4	225	6,3	0,08	0,90

Chapitre II : Effet du travail du sol et de la fertilisation azotée sur les propriétés du sol et le rendement de cinq germoplasmes de blé dur dans une zone semi-aride du Maroc

Le sol est le principal environnement pour le développement des cultures, garantissant une grande partie des rendements élevés. Ces dernières années, on a assisté à une transition progressive du travail du sol conventionnel vers de nouvelles techniques sans labour. Comparées à d'autres pratiques de travail du sol, les techniques de semis direct présentent plusieurs avantages économiques, environnementaux et agronomiques. Il s'agit d'une technique qui a eu des effets généralement positifs sur le sol (Moussadek et al, 2001 ; Laghrour et al, 2015 ; Maher et al, 2020) en améliorant les niveaux d'azote (Mrabet et Moussadek, 2012), en plus d'augmenter les rendements en céréales. Au cours de la campagne 2020-2021, la superficie des céréales d'automne au Maroc a atteint 4,3 millions d'hectares (ONICL, 2020). Les céréales sont cultivées dans plusieurs zones agro-climatiques du pays en rotation avec d'autres cultures annuelles (MAPMDREF, 2020). Les importations de blé du Maroc au cours de la campagne agricole 2020/2021 ont été estimées à 6,2 millions de tonnes, soit environ 35 % de plus que les importations de 2019/2020. Cette augmentation significative est principalement due à la faiblesse de la production nationale et à la suspension des droits d'importation (ONICL, 2020). Un Marocain moyen consomme 200 kg de blé par an, soit trois fois plus que la moyenne mondiale. Comme dans les autres pays du Maghreb, cette céréale, notamment à travers le pain, est un élément de base de l'alimentation. Par ailleurs, le blé dur est la matière première de nombreux produits dérivés (pains, semoule, pâtes, pâtisseries, biscuits,...) et a fait l'objet d'une grande attention en raison de son adaptation aux milieux semi-arides (Nazco et al, 2012). Le grain de blé est un aliment énergétique contenant en moyenne 70% d'amidon, 12% de protéines, 9% de pentosane et de cellulose, et moins de 5% de sucres libres, de lipides et de minéraux (Doré, 2006). Composant des protéines, d'enzymes, des acides nucléiques et de la chlorophylle, l'azote est un élément indispensable à la croissance des plantes et reste l'un des éléments les plus importants pour la production céréalière (Rayan et al, 2009). L'utilisation efficace de l'azote est décisive pour l'amélioration de la production en termes de quantité et de qualité (Fageria et Baligar, 2005 ; Garrido-Lestache et al, 2005 ; Akhter et al, 2016). La fertilisation azotée des céréales doit tenir compte de la nature et de la dose à appliquer. Les besoins en azote des céréales varient en fonction de la phase de croissance (Tranavicienne et al, 2008 ; Biljana et Aca, 2009). L'objectif de notre étude est d'examiner l'effet des techniques sans labour et de la fertilisation azotée sur la fertilité du sol et le rendement de cinq variétés de blé dur récemment développées au Maroc - trois nouvelles variétés (Louiza, Faraj et Nachit) et deux germplasmes (M.G et I.C) - dans le cadre d'un essai SD de longue durée (18 ans) au domaine expérimental de Merchouch de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA). Les interactions entre plusieurs facteurs peuvent permettre de formuler des recommandations à l'intention des

agriculteurs quant à la combinaison optimale du type de travail du sol, de la dose d'azote et de la variété.

I. Sol

1. Texture

Les résultats de l'analyse granulométrique des échantillons de sol des deux parcelles (SC et SD) montrent que le sol a une texture argileuse (tableau 16) avec près de 50% d'argile et moins de 10% de sable.

Tableau 16 : Texture du sol mesurée avant le début de l'expérience pour le non-travail du sol (SD) et le travail du sol conventionnel (SC) à une profondeur de 15 cm.

	Argile (%)	Limon fin (%)	Limon grossier (%)	Sable fin (%)	Sable grossier (%)	CaCO ₃ (%)
SD	46,6	6,4	36,2	6,8	3,7	0,3
SC	46,5	5,6	37,2	6,3	4	0,4

a. Propriétés chimiques

Les valeurs moyennes du matière organique (MO), du potassium, du phosphore et de la capacité d'échange cationique (CEC) pour les deux types de travail du sol et aux cinq profondeurs sont présentées dans le tableau 17.

En ce qui concerne les teneurs en matière organique (MO), l'ANOVA (tableau 18) a montré une différence très significative (valeur F = 143,06 et valeur p = 0,007) entre SD et SC, avec une valeur moyenne légèrement plus élevée pour SD (8,8 g kg⁻¹) que pour SC (8,4 g kg⁻¹). Il y avait également une différence très significative entre les profondeurs (valeur F = 71,42 et valeur p < 0,001), avec les valeurs moyennes les plus élevées à la surface du sol (11,1 et 10,5 g kg⁻¹ aux profondeurs 0-5 et 5-10 cm, respectivement), par opposition à la profondeur 40-60 cm (6,0 g kg⁻¹). Le test post-hoc de Duncan a montré que seules les profondeurs de 10-20 et 20-40 cm ne présentaient pas de différences significatives, avec des valeurs moyennes de MO de 7,9 et 7,5 g kg⁻¹, respectivement. Ce résultat est en accord avec les recherches sur les stocks de matière organique dans les systèmes de conservation, qui sont plus élevés en surface que dans les systèmes labourés (D'Haene et al, 2008 ; Moussadek et al, 2014 ; Laghrour et al, 2016), avec de faibles différences dans les horizons plus profonds (Balesdent et al, 2000). D'autres études ont montré que les niveaux de MO dans les systèmes de conservation sont généralement plus élevés dans les 10 cm supérieurs du sol par rapport au sol travaillé, diminuant fortement dans les horizons sous-jacents (Gal et al, 2007). Il n'y a pas eu d'interaction significative entre les deux facteurs (valeur F = 2,36 et valeur p = 0,060), ce qui indique que le classement des types

de travail du sol en termes de teneur en MO était le même pour les cinq profondeurs et qu'il était plus élevé pour le SD que pour le SC.

Tableau 17. Propriétés chimiques mesurées avant le début de l'expérience pour le non-travail du sol (SD) et le travail conventionnel du sol (SC) à chaque profondeur de sol.

Profondeur (cm)	Type de semis	MO (g kg ⁻¹)	Potassium (mg kg ⁻¹)	Phosphore (mg kg ⁻¹)	CEC (meq/100 g)
0-5	SD	11,6 (0,6)	117 (5)	198 (6)	64 (8)
	SC	10,6 (0,5)	103 (7)	155 (9)	51 (5)
5-10	SD	10,8 (1,8)	100 (11)	179 (16)	57 (7)
	SC	10,2 (1,4)	94 (8)	136 (8)	43 (4)
10-20	SD	7,9 (0,8)	95 (8)	100 (8)	46 (7)
	SC	7,8 (0,8)	95 (6)	120 (10)	38 (8)
20-40	SD	7,6 (1,1)	83 (10)	60 (9)	40 (9)
	SC	7,4 (0,9)	83 (6)	94 (9)	21 (5)
40-60	SD	6,1 (0,7)	65 (5)	40 (8)	35 (6)
	SC	5,9 (1,0)	47 (7)	60 (9)	27 (6)
0-5		11,1 (0,9) a	110 (13) a	177 (20) a	58 (11) a
5-10		10,5 (1,6) b	97 (11) b	158 (18) b	50 (11) b
10-20		7,9 (0,8) c	95 (7) b	110 (15) c	42 (8) c
20-40		7,5 (1,0) c	83 (9) c	77 (20) d	31 (10) d
40-60		6,0 (0,9) d	56 (11) d	50 (13) e	31 (7) d

Les moyennes (les écarts types avec $n = 3$) suivies d'une même lettre ne sont pas statistiquement différentes au niveau de signification de 0,05 selon le test post-hoc de Duncan.

MO : matière organique ; CEC : capacité d'échange cationique.

Tableau 18. Résultats de l'ANOVA pour les propriétés du sol mesurées avant le début de l'expérience.

Source de Variation	Valeur F	Valeur p	Valeur F	Valeur p	Valeur F	Valeur p	Valeur F	Valeur p
Type de semis (T)	143,06	0,007 **	11,66	0,076 ns	12,57	0,071 ns	74,23	0,013 *
Profondeur (P)	71,42	<0,001 ***	117,07	<0,001 ***	536,17	<0,001 ***	51,55	<0,001 ***
T × P	2,36	0,060 ns	7,23	<0,001 ***	48,87	<0,001 ***	2,42	0,056 ns

ns : non significatif ; * , ** et *** : significatif aux niveaux 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement.

L'analyse de la variance à l'aide du modèle statistique ANOVA (tableau 18) n'a pas montré de différences significatives entre SD et SC en termes de phosphore disponible (valeur $F = 12,57$ et valeur $p = 0,071$), avec des valeurs moyennes de 115 mg kg^{-1} pour SD et 113 mg kg^{-1} pour SC. Ceci qualifie le sol comme riche en P_2O_5 selon les normes d'interprétation. Les teneurs en phosphore diminuent significativement avec la profondeur, tant pour le SD que pour le SC (valeur $F = 536,17$ et valeur $p < 0,001$), avec la teneur la plus élevée à la surface du sol (177 mg kg^{-1} à la profondeur de 0-5 cm) et la teneur la plus faible dans la couche la plus profonde (50 mg kg^{-1} à la profondeur de 40-60 cm). Il y a une interaction très significative entre les deux facteurs (valeur $F = 48,87$ et valeur $p < 0,001$), indiquant que le classement des types de travail du sol changeait avec les profondeurs. Par exemple, à la profondeur de 0-5 cm, la teneur sous SD (196 mg kg^{-1}) était plus élevée que la teneur sous SC (161 mg kg^{-1}), alors qu'à la profondeur de 20-40 cm, la tendance était inversée (57 mg kg^{-1} pour SD contre 93 mg kg^{-1} pour SC).

Selon l'analyse de la variance ANOVA, la teneur en potassium échangeable n'était pas significativement différente entre SD et SC (valeur $F = 11,66$ et valeur $p = 0,076$), avec une valeur moyenne légèrement plus élevée pour SD (92 mg kg^{-1}) par rapport à SC (84 mg kg^{-1}). Ces valeurs montrent que le sol est modérément riche en potassium selon les normes. L'ANOVA a également révélé des différences très significatives entre les profondeurs (valeur $F = 117,07$ et valeur $p < 0,001$), avec les valeurs moyennes les plus élevées à la surface du sol (110 mg kg^{-1} à la profondeur 0-5 cm) et les plus faibles dans la couche la plus profonde (56 mg kg^{-1} à la profondeur 40-60 cm). Le test post-hoc de Duncan a montré que chaque profondeur a une teneur en potassium significativement différente de toutes les autres profondeurs, à l'exception des profondeurs 5-10 et 10-20 cm (97 et 95 mg kg^{-1}). A l'horizon 0-10 cm, le sol sous SD a une teneur en potassium plus élevée que celui sous SC, en accord avec les résultats des études sur l'effet du semis direct sur la teneur en potassium (Maher et al, 2020). Des études antérieures ont montré que dans des conditions de non-travail du sol, la quantité de potassium peut être réduite avec la profondeur (Pekrun et al, 2003). L'interaction entre les deux facteurs (valeur $F = 7,23$ et valeur $p < 0,001$) est très significative.

Pour ce qui est de la CEC, l'analyse de la variance ANOVA a indiqué une différence significative entre SD et SC (valeur $F = 74,23$ et valeur $p = 0,013$), avec une valeur moyenne plus élevée pour SD ($48 \text{ m}_{\text{eq}}/100 \text{ g}$) que pour SC ($36 \text{ m}_{\text{eq}}/100 \text{ g}$), ce qui peut s'expliquer par l'augmentation de la matière organique sous SD par rapport à SC. En outre, des différences très significatives de la CEC ont été observées en fonction de la profondeur (valeur $F = 51,55$ et valeur $p < 0,001$), avec une valeur moyenne la plus élevée à la surface du sol ($58 \text{ m}_{\text{eq}}/100 \text{ g}$ à la profondeur de 0-

5 cm) et la plus faible dans les couches les plus profondes (31 meq/100 g aux profondeurs de 20-40 et 40-60 cm). Le test post-hoc de Duncan a révélé des différences significatives entre toutes les profondeurs, à l'exception des deux niveaux les plus profonds. En revanche, il n'y a pas eu d'interaction significative entre les deux facteurs (valeur F = 2,42 et valeur p = 0,056).

2. Azote total

Le tableau 19 présente les valeurs moyennes de l'azote total pour les cinq profondeurs de sol (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, et 40-60 cm) avec les trois doses d'azote (20, 40, et 60 kg N ha⁻¹) pour chaque type de travail du sol (SD et SC), et les résultats de l'ANOVA sont présentés dans le tableau 20.

Tableau 19. Teneur en azote total (mg kg⁻¹) mesurée à la fin de l'expérience pour chaque dose d'azote (kg N/ha), type de travail du sol et profondeur du sol (cm).

Azote mis	Type de semis	0-5	5-10	10-20	20-40	40-60	Moyenne	Moyenne générale
20	SD	700 (50)	770 (90)	280 (30)	560 (40)	840 (80)	630 (197)	585 (166)
	SC	420 (20)	520 (50)	490 (70)	590 (40)	680 (110)	540 (127)	
40	SD	870 (120)	560 (80)	280 (50)	350 (60)	700 (50)	552 (215)	539 (189)
	SC	770 (60)	490 (60)	420 (60)	350 (80)	600 (60)	526 (165)	
60	SD	560 (50)	630 (90)	490(130)	420 (40)	570 (80)	534 (109)	626 (186)
	SC	930 (90)	910 (60)	560 (40)	350 (70)	840 (40)	718 (213)	
Moyenne	SD	710 (105)	653 (122)	350(113)	443(138)	703 (141)	572 (183)	
	SC	707 (204)	640 (197)	590 (88)	430(165)	707 (133)	595 (190)	

Les moyennes (les écarts types avec n = 3) suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au niveau de signification de 0,05 selon le test post-hoc de Duncan. SD= pas de travail du sol, SC= travail du sol conventionnel.

Tableau 20 : Résultats de l'ANOVA pour les propriétés du sol mesurées à la fin de l'expérience.

Propriétés du sol	Azote total		Ammonium		Nitrates	
	Value F	Value p	Value F	Value p	Value F	Value p
Type de semis(T)	16,94	0,054 ns	325,14	0,003 **	50,1	0,019 *
Azote (N)	33,55	<0,001 ***	0,6	0,573 ns	30,74	<0,001 ***
Profondeur (P)	80,76	<0,001 ***	5,94	0,001 **	11,81	<0,001 ***
T* N	32,62	<0,001 ***	9,25	0,008 **	3,65	0,075 ns
T*P	3,4	0,016 *	15,05	<0,001 ***	7,83	<0,001 ***
N*P	19,91	<0,001 ***	7,62	<0,001 ***	3,76	0,002 **
T*N*P	9,01	<0,001 ***	4,88	<0,001 ***	6,7	<0,001 ***

ns : non significatif ; * , ** et *** : significatif aux niveaux 0,05, 0,01 et 0,001, respectivement.

L'analyse de la variance ANOVA n'a pas indiqué de différence significative entre les deux types de travail du sol (valeur $F = 16,94$ et valeur $p = 0,054$), avec des valeurs moyennes de 595 et 572 mg kg^{-1} pour SC et SD, respectivement. En revanche, des différences très significatives ont été observées entre les trois doses d'azote (valeur $F = 33,55$ et valeur $p < 0,001$) et les cinq profondeurs (valeur $F = 80,76$ et valeur $p < 0,001$). Le test post-hoc de Duncan n'a pas montré de différence significative entre 20 et 60 kg N ha^{-1} avec une teneur en azote total plus élevée (585 et 626 mg kg^{-1} , respectivement) par rapport à 40 kg N ha^{-1} avec une teneur plus faible (539 mg kg^{-1}). En ce qui concerne les profondeurs du sol, il y avait trois groupes : 0-5 et 40-60 cm, qui ne différaient pas de manière significative (708 et 705 mg kg^{-1}) ; 5-10 cm (647 mg kg^{-1}) ; et 10-20 et 20-40 cm, qui ne différaient pas non plus de manière significative (420 et 437 mg kg^{-1} , respectivement). Pour 20 et 40 kg N ha^{-1} , la teneur totale en azote de surface était plus élevée dans SD que dans SC, tandis que pour 60 kg N ha^{-1} , SC était plus élevé que SD.

Toutes les interactions étaient statistiquement significatives, ce qui indique que l'effet de chacun des trois facteurs dépend des niveaux des deux autres facteurs. Par conséquent, il n'y a pas de dose d'azote et de variété de blé optimales uniques pour les deux types de travail du sol. Dans le SD, l'engrais est resté concentré à la surface (0-10 cm), principalement sous des doses d'azote de 20 et 40 kg N ha^{-1} , alors que sous le labour conventionnel, l'engrais a été distribué le long du profil. Ce résultat est conforme aux études qui ont signalé que l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE) dans le blé variait en fonction des conditions environnementales et qu'elle était plus élevée lorsque l'apport d'azote était faible et qu'elle diminuait lorsque l'apport d'azote augmentait (Karrou, 1996 ; Mosseddaq et Moughli, 1999).

3. Ammonium

Les mesures d'ammonium dans les échantillons de sol pour les cinq profondeurs de sol (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, et 40-60 cm) avec les trois doses d'azote (20, 40, et 60 kg N ha^{-1}) pour chaque type de travail du sol (SD et SC) sont présentées dans le tableau 21, et les résultats de l'ANOVA sont rapportés dans le tableau 20.

Tableau 21. Teneur en ammonium (mg kg^{-1}) mesurée à la fin de l'expérience pour chaque dose d'azote (kg N/ha), type de travail du sol et profondeur du sol (cm).

Azote mis	Type de semis	0–5	5–10	10–20	20–40	40–60	Moyenne	Moyenne générale
20	SD	17,8(5,1)	9,1 (0,4)	7,1 (0,4)	9,6 (0,9)	13,6(0,9)	11,4(3,5)	8,7(3,0) A
	SC	5,0 (0,8)	6,6 (1,0)	5,5 (0,9)	8,0 (0,8)	5,0 (1,1)	6,0 (1,6)	
40	SD	19,6(3,6)	10,1(1,8)	12,1(2,5)	9,8 (0,3)	5,0 (0,9)	11,3(3,7)	8,3(4,1) A
	SC	6,0 (0,8)	5,2 (0,8)	4,0 (0,7)	5,1 (0,6)	6,0 (0,7)	5,3 (1,2)	
60	SD	7,4 (0,9)	11,1(1,7)	10,6(0,6)	9,6 (1,0)	7,1 (1,0)	9,2 (1,7)	8,0(2,0) A
	SC	5,0 (0,9)	7,5 (0,8)	8,1 (0,5)	6,6 (0,6)	6,8 (0,6)	6,8 (1,1)	
Moyenne	SD	14,9(5,1)	10,1(1,6)	9,9 (2,8)	9,7 (0,9)	8,6 (1,3)	10,6(3,3)	
	SC	5,3 (0,9)	6,4 (1,3)	5,9 (1,7)	6,6 (1,6)	5,9 (1,3)	6,0 (1,4)	
Moyenne		10,1 (5,1)	8,3 (2,8)	7,9 (3,1)	8,1 (1,8)	7,3 (1,3)	8,3(3,1)	

Les moyennes (les écarts types avec $n = 3$) suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au niveau de signification de 0,05 selon le test post-hoc de Duncan. SD= pas de travail du sol, SC= travail du sol conventionnel.

L'analyse ANOVA (tableau 20) n'a pas montré de différence significative entre les trois doses d'azote (valeur $F = 0,60$ et valeur $p = 0,573$), avec des valeurs moyennes de 8,7, 8,3 et 8 mg kg^{-1} pour les doses de 20, 40 et 60 kg N/ha , respectivement. Le type de travail du sol (valeur $F = 325,14$ et valeur $p = 0,003$) et la profondeur du sol (valeur $F = 5,94$ et valeur $p = 0,001$) étaient significativement différents. La teneur moyenne en ammonium était beaucoup plus élevée sous SD (10,6 mg kg^{-1}) que sous SC (6,0 mg kg^{-1}). Le test post-hoc de Duncan a permis d'identifier trois groupes de profondeurs : 0-5 cm, avec une valeur moyenne de 10,1 mg kg^{-1} ; 5-10, 10-20 et 20-40 cm, qui ne différaient pas significativement entre elles, avec des valeurs moyennes de 8,3, 7,9 et 8,1 mg kg^{-1} , respectivement ; et 40-60 cm, avec une valeur moyenne de 7,3 mg kg^{-1} . La teneur en ammonium à la surface du sol était plus élevée dans le SD que dans le SC, avec un avantage sous le traitement de 40 kg N ha^{-1} , en accord avec les études évaluant l'effet de la dose de N (Hemissi et al, 2018) ou de la forme de N (Baha Eddine et al, 2019, 2020). En ce qui concerne l'azote total, toutes les interactions entre les trois facteurs étaient statistiquement significatives.

4. Nitrates

Les teneurs moyennes en nitrates du sol pour chaque type de travail du sol, chaque dose d'azote et chaque profondeur de sol sont présentées dans le tableau 22, et les résultats de l'analyse de la variance ANOVA sont rapportés dans le tableau 20. Le tableau 22 montre que les teneurs en nitrates pour chaque dose d'azote sont plus élevées en conditions conventionnelles qu'en conditions de non-travail du sol.

Tableau 22 : Teneur en nitrates (mg kg^{-1}) mesurée à la fin de l'expérience pour chaque dose d'azote (kg N ha^{-1}), type de travail du sol et profondeur du sol (cm).

Azote mis	Type de semis	0–5	5–10	10–20	20–40	40–60	Moyenne	Moyenne générale
20	SD	5,5 (0,7)	12,2 (1,2)	8,7 (0,9)	5,2 (0,9)	5,2 (1,2)	7,4 (2,4)	8,4 (3,1)
	SC	6,9 (0,8)	6,1 (0,8)	10,8(1,0)	10,4 (0,6)	12,6 (4,0)	9,4 (3,2)	
40	SD	6,9 (1,0)	13,0 (1,8)	8,7 (1,1)	13,4 (1,3)	15,1 (2,9)	11,4(2,8)	13,9 (3,8)
	SC	17,8 (1,8)	14,7 (1,9)	19,9(1,3)	12,1 (0,9)	17,8 (1,9)	16,5(2,8)	
60	SD	11,2 (0,8)	19,5 (3,7)	19,9(4,3)	19,0 (5,0)	10,4 (0,9)	16,0(4,2)	15,8 (3,9)
	SC	10,8 (0,5)	16,0 (2,3)	19,5(2,1)	14,7 (2,9)	17,3 (4,5)	15,7(3,6)	
Moyenne	SD	7,9 (2,4)	14,9 (3,4)	12,4(4,9)	12,5 (4,6)	10,2 (3,3)	11,6(4,1)	13,8(4,0)
	SC	11,8 (3,9)	12,3 (4,7)	16,7(4,4)	12,4 (2,4)	15,9 (3,3)	13,8(4,0)	
Moyenne		9,9 (3,7)	13,6(4,0)A	14,6(5,0)	12,5(3,7) A	13,1(4,4) A	12,7(4,3)	

Les moyennes (les écarts types avec $n = 3$) suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au niveau de signification de 0,05 selon le test post-hoc de Duncan. SD= pas de travail du sol, SC= travail du sol conventionnel.

L'ANOVA (tableau 20) a révélé des différences très significatives pour les trois facteurs : Valeur $F = 50,10$ et valeur $p = 0,019$ pour le type de travail du sol, valeur $F = 30,74$ et valeur $p < 0,001$ pour la dose d'azote, et valeur $F = 11,81$ et valeur $p < 0,001$ pour la profondeur du sol. Les valeurs moyennes étaient plus élevées pour SC (13,8 mg kg^{-1}) que pour SD (11,6 mg kg^{-1}). Le test post-hoc de Duncan a montré que les trois doses d'azote différaient significativement, avec des valeurs moyennes de 8,4, 13,9 et 15,8 mg kg^{-1} correspondant à 20, 40 et 60 kg N/ha , respectivement. En ce qui concerne la profondeur du sol, trois groupes ont été identifiés : 10-20 cm, avec une valeur moyenne de 14,6 mg kg^{-1} ; 5-10, 20-40 et 40-60 cm, qui ne différaient pas significativement entre elles, avec des valeurs moyennes de 13,6, 12,5 et 13,1 mg kg^{-1} , respectivement ; et 0-5 cm, avec une valeur moyenne de 9,9 mg kg^{-1} . Toutes les interactions, à l'exception du type de travail du sol x dose d'azote, étaient statistiquement significatives.

Les niveaux d'azote total et d'ammonium dans SD étaient plus élevés que dans SC, contrairement à la teneur en nitrates, ce qui peut s'expliquer par l'utilisation d'engrais azotés en excès ou par l'utilisation de produits phytopharmaceutiques. En outre, la teneur en nitrate pour chaque traitement azoté était plus élevée sous SC que sous SD, bien que le nitrate ait une plus grande mobilité que l'ammonium, ce qui pourrait être influencé par le lessivage.

II. Rendement du blé

Les rendements en grains et en paille des cinq variétés pour chaque type de travail du sol sont présentés dans les tableaux 23 et 24 pour les trois doses d'azote.

Globalement, les résultats de l'ANOVA (tableau 25) montrent que seule la variété a un effet très significatif sur les rendements en grains et en paille (valeurs $F = 14,62$ et $6,41$, respectivement, et valeur $p < 0,001$), alors qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les deux types de travail du sol (valeurs $F = 4,40$ et $1,20$ et valeurs $p = 0,171$ et $0,388$, respectivement) et les trois doses d'azote (valeurs $F = 3,95$ et $2,06$ et valeurs $p = 0,064$ et $0,190$, respectivement). Aucune des interactions n'était significative.

Le test post-hoc de Duncan a montré que la variété Louiza avait le rendement en grain le plus faible ($3,18$ t/ha), suivie par I.C et M.G avec des rendements en grain intermédiaires ($4,05$ et $3,72$ t/ha, respectivement) et enfin Faraj et Nachit avec le rendement en grain le plus élevé ($4,13$ et $4,46$ t/ha) (Tableau 23). Une comparaison des valeurs présentées dans le tableau 23 avec celles présentées dans le tableau 24 montre que les rendements en grains pour les trois variétés correspondent à des rendements considérablement accrus dans les zones semi-arides, bien que le site d'étude se trouve dans une zone favorable. En outre, les valeurs de rendement observées sont bien inférieures à celles correspondant au potentiel de rendement qui peut être atteint si toutes les conditions de culture (sol, climat et pratiques de gestion des cultures) sont optimales. Ces faibles valeurs de rendement en grains sont principalement la conséquence du stress hydrique qui s'est produit au cours des trois dernières années. Le rendement en grains a été légèrement plus élevé sous SD ($4,07$ t/ha) que sous SC ($3,75$ t/ha). L'effet du type de travail du sol sur le rendement n'était pas significatif, bien qu'il y ait eu des différences significatives dans les propriétés du sol (en particulier MO, CEC, ammonium et nitrates) correspondant aux deux types de travail du sol, ce qui pourrait également s'expliquer par le stress hydrique qui a empêché ces variétés d'utiliser tout l'azote disponible. En ce qui concerne les doses d'azote, les rendements moyens en grains étaient de $4,09$, $3,92$ et $3,72$ t/ha sous 20 , 40 et 60 kg N/ha,

respectivement. Le stress hydrique est probablement la cause de l'absence d'effet de la dose d'azote, réduisant l'efficacité de l'utilisation de l'azote.

Tableau 23. Rendement en grains de blé (t/ha) mesuré à la fin de l'expérience pendant la saison culturale 2020-2021 pour tous les types de travail du sol, les doses d'azote (kg N/ha) et les variétés.

Azote (kg N/ha)	Type de semis	Variété					Moyenne	Moyenne générale
		Faraj	I.C	Louiza	M.G	Nachit		
20	SD	4,31(0,34)	4,74(0,42)	3,42(0,49)	4,52(0,96)	4,47(0,83)	4,29(0,73)	4,09(0,75)A
	SC	4,46(0,34)	3,87 (0,70)	3,21(0,55)	3,40(0,41)	4,52(0,74)	3,89(0,73)	
40	SD	4,32(0,17)	3,88 (0,66)	2,93(0,66)	3,97(0,48)	5,14(1,03)	4,05(0,93)	3,92(0,81)A
	SC	3,77 (0,35)	4,24 (0,19)	3,34(0,55)	3,05(0,13)	4,48(0,76)	3,78(0,67)	
60	SD	4,04 (0,59)	3,93 (0,44)	3,17(0,47)	3,95(0,13)	4,24(0,03)	3,86(0,51)	3,72(0,56)A
	SC	3,86 (0,20)	3,63 (0,89)	3,01(0,15)	3,43(0,73)	3,90(0,50)	3,57(0,59)	
Moyenne	SD	4,22 (0,38)	4,18 (0,61)	3,17(0,52)	4,15(0,61)	4,62(0,78)	4,07(0,75)	
	SC	4,03 (0,42)	3,91 (0,63)	3,19(0,42)	3,29(0,46)	4,30(0,66)	3,75(0,67)	
Moyenne		4,13(0,40a	4,05(0,62)b	3,18(0,46c	3,72(0,68)b	4,46(0,72)a	3,91(0,72)	

Les moyennes (les écarts-types avec n = 3) suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au niveau de signification de 0,05 selon le test post-hoc de Duncan. SD= pas de travail du sol, SC= travail du sol conventionnel.

Tableau 24. Rendement de la paille de blé (t /ha) mesuré à la fin de l'expérience au cours de la saison culturale 2020-2021 pour tous les types de travail du sol, les doses d'azote (kg N/ha) et les variétés.

Azote (kg N /ha)	Type de semis	Variété					Moyenne	Moyenne générale
		Faraj	I, C	Louiza	M, G	Nachit		
20	SD	7,85 (1,74)	10,25 (1,69)	6,60 (1,31)	9,21 (1,87)	9,95 (1,55)	8,77 (1,98)	8,54 (2,03) A
	SC	10,76 (3,12)	7,38 (1,13)	6,34 (1,30)	8,34 (0,31)	8,75 (1,51)	8,31 (2,12)	
40	SD	8,17 (1,80)	9,04 (1,93)	5,48 (2,13)	9,24 (1,25)	9,00 (3,11)	8,18 (2,31)	8,01 (1,91) A
	SC	9,01 (1,12)	7,54 (1,29)	6,79 (2,07)	7,48 (0,94)	8,32 (1,48)	7,83 (1,45)	
60	SD	7,90 (1,73)	7,88 (2,29)	7,37 (0,38)	8,95 (1,39)	8,60 (0,35)	8,14 (1,35)	7,77 (1,50) A
	SC	8,93 (0,25)	7,43 (2,12)	5,69 (0,91)	7,13 (1,72)	7,81 (1,10)	7,40 (1,59)	
Moyenne	SD	7,97 (1,53)	9,06 (2,00)	6,48 (1, 51)	9,13 (1,33)	9,18 (1,85)	8,37 (1,90)	
	SC	9,57 (1,89)	7,45 (1,37)	6,27 (1,39)	7,65 (1,13)	8,29 (1,26)	7,85 (1,75)	
Moyenne		8,77(1,86) a	8,25(1,86) a	6,38 (1,41) b	8,39(1,42) a	8,74(1,60) a	8,11(1,83)	

Les moyennes (les écarts-types avec $n = 3$) suivies de la même lettre ne sont pas statistiquement différentes au niveau de signification de 0,05 selon le test post-hoc de Duncan. SD= pas de travail du sol, SC= travail du sol conventionnel.

Tableau 25 : Résultats de l'ANOVA pour le rendement en grains et en paille de blé (t ha⁻¹) mesuré à la fin de l'expérience au cours de la saison culturale 2020-2021.

Rendement du blé	Grain		Paille	
	Value F	Value p	Value F	Value p
Type de semis (T)	4,4	0,171 ns	1,2	0,388 ns
Azote (N)	3,95	0,064 ns	2,06	0,190 ns
Variété (V)	14,62	<0,001 ***	6,41	<0,001 ***
T × N	0,14	0,876 ns	0,13	0,880 ns
T × V	1,6	0,189 ns	2,12	0,093 ns
N × V	0,76	0,637 ns	0,16	0,996 ns
T × N × V	1,07	0,398 ns	0,7	0,690 ns

En ce qui concerne le rendement en paille, le test post-hoc de Duncan a permis d'identifier deux groupes de variétés : le premier groupe, Louiza, avec le rendement moyen le plus faible (6,38 t/ha), et le second groupe, regroupant les quatre autres variétés, avec des rendements moyens compris entre 8,25 et 8,77 t/ha. En ce qui concerne le type de travail du sol, les rendements moyens en paille étaient de 7,85 t/ha pour SC et de 8,37 t/ha pour SD. Pour les doses d'azote, les rendements en paille ont varié entre 7,77 et 8,54 t/ha avec 60 et 20 kg N /ha, respectivement.

Si l'on compare le SD au SC, le premier a donné des rendements en grains et en paille plus élevés avec la plupart des combinaisons (11 sur 15) de doses d'azote et de variétés (tableaux 24 et 25). En termes de rendement en grains, SC a dépassé SD uniquement pour les variétés Faraj et Nachit sous 20 kg N /ha et les variétés I.C et Louisa sous 40 kg N /ha, tandis qu'en termes de rendement en paille, SC a obtenu de meilleurs résultats que SD uniquement pour la variété Faraj sous les trois doses d'azote et la variété Louisa sous 40 kg N /ha.

Si l'on ne tient pas compte des variétés et que l'on compare les deux types de travail du sol pour les trois doses d'azote, les rendements en grains et en paille ont toujours été plus élevés pour SD que pour SC, indépendamment de la dose d'azote (tableaux 23 et 24). En outre, en combinant la dose d'azote et en comparant les types de travail du sol pour les différentes variétés, le classement des variétés était le même pour les deux types de travail du sol en termes de rendement en grains, avec Nachit identifiée comme la meilleure variété (4,30 t/ha sous SC et 4,62 t/ha sous SD) et Louiza identifiée comme la variété fournissant le rendement le plus faible (3,19 t/ha sous SC et 3,17 t/ha sous SD). Le comportement des variétés était très différent en termes de rendement en paille. Bien que la variété Louiza ait eu le rendement le plus bas sous SD et SC, le classement de la variété Nachit a changé radicalement, passant de la meilleure variété sous SC (9,57 t/ha) à l'avant-dernier rendement sous SD (7,97 t/ha).

Les résultats des rendements en grains montrent que les trois doses d'azote ont conduit à des rendements plus élevés dans le SD que dans le SC (tableau 23), avec des valeurs moyennes de 4,3, 4,1 et 3,9 t/ha contre 3,9, 3,8 et 3,6 t/ha correspondant à 20, 40 et 60 kg N /ha, respectivement. Il en va de même pour le rendement en paille, avec des valeurs moyennes de 8,8, 8,2 et 8,1 t/ha contre 8,3, 7,8 et 7,4 t/ha correspondant à 20, 40 et 60 kg N /ha, respectivement.

Avec les variétés Louisa, M.G, et I.C, les rendements en grains ont été plus élevés (3.42, 4.52, et 4.74 t/ha) sous SD que sous SC avec la dose minimale d'azote (20 kg N /ha) (Tableau 23). D'autre part, les variétés Faraj et, en particulier, Nachit nécessitent plus d'azote sous SD que sous SC (40 kg N /ha) pour obtenir un rendement en grain accru (4,32 et 5,14 t/ha, respectivement) (tableau 23).

**Chapitre III : Efficacité d'utilisation de l'azote à
l'aide de la technique de de traçage isotopique ^{15}N
pour le rendement du blé dans l'agriculture de
conservation**

L'importance de l'azote (N) réside dans son rôle crucial dans l'amélioration de la productivité et de la durabilité des terres agricoles, forestières et pastorales (Zhang et al, 2013 ; Rutting et al, 2018 ; Liao et al 2020). En tant qu'élément nutritif indispensable à toutes les plantes cultivées, les céréales en particulier ont besoin d'un apport adéquat d'azote pour garantir une croissance, un rendement et une qualité optimaux (Drury et Tan, 1995). Ce n'est pas seulement la quantité d'azote qui est cruciale, mais aussi le moment où elle est fournie aux cultures (Fischer, 1993, Melaj et al, 2003 ; Kostic et al, 2021) et son fractionnement (Khan et al, 2022 ; Allart et al, 2023 ; Parent et Deslauriers, 2023) qui sont très importants, car ces trois facteurs ont un impact considérable sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE) (Ding et al, 2020 ; De Jesus et al, 2023 ; Govindasamy et al, 2023).

L'utilisation excessive d'engrais azotés dans l'agriculture aurait un impact significatif sur l'environnement, notamment sur la qualité de l'eau et la biodiversité, en particulier la pollution des eaux souterraines par les nitrates (Tilman et al, 2011 ; Xue et al, 2016 ; Fernandez-Lopez et al, 2023), et pourrait contribuer au changement climatique par l'émission d'oxyde nitreux (Ussiri et Lal, 2013 ; Griffis et al, 2017 ; Kanter et al, 2020). Pour minimiser l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement, de nouvelles méthodes de gestion des cultures ont été mises au point. Il s'agit notamment du non-labour, qui consiste à semer des cultures dans un sol non perturbé, sans labourer ni retourner le sol, en laissant les résidus de culture dans le champ et en adoptant la rotation des cultures (Castellini et al, 2019 ; Keil et al, 2020 ; Williams et Wuest, 2021). En outre, cette technique agricole présente un certain nombre d'avantages, tels que la réduction des coûts et de la consommation de carburant, ainsi que la préservation de la qualité du sol (Aziz et al, 2013 ; Laghrour et al, 2015 ; Maher et al, 2020 ; Moussadek et al, 2001 ; Mrabet et al, 2012 ; Saber et Mrabet, 2022), l'amélioration des niveaux d'azote (Omara et al, 2019 ; Francisco et al, 2021; Huang et al, 2022) et l'augmentation des rendements des cultures céréalières (Lundy et al, 2015 ; Maher et al, 2022 ; Liu et al, 2024).

Les isotopes d'éléments chimiques sont largement utilisés dans la gestion des terres et la production agricole. Les radionucléides des retombées (^{137}Cs , ^7Be et ^{210}Pb) sont utilisés pour évaluer le niveau et l'intensité de l'érosion des sols (Bhat et Faisal-ur-Rasool Bhat, 2010 ; Feland et Quideau, 2020 ; Iaaich et al, 2023). L'isotope stable ^{13}C peut être utilisé pour surveiller la dégradation des sols (Schaub et Alewell, 2009), ainsi que la disponibilité de l'eau (Flohr et al, 2019 ; Wallace et al, 2013) et le carbone organique du sol (Menichetti et al, 2015 ; Park et al, 2023 ; Giumbelli et al, 2020).

En ce qui concerne le ^{15}N , il s'agit d'un isotope naturel de l'azote qui n'est pas radioactif et qui est présent en quantités variables dans les différents types d'engrais azotés utilisés en agriculture. L'isotope stable de l'azote ^{15}N peut être utilisé sous l'une des deux formes possibles : traceur enrichi ou abondance naturelle. L'isotope stable de l'azote peut être utilisé pour étudier l'impact des pratiques agricoles sur la qualité du sol (Li et al, 2023 ; Craine et al, 2015). En particulier, la technique de l'abondance naturelle du ^{15}N a également été utilisée avec succès pour suivre la trajectoire de l'azote dans les cultures (Bedard-Haughn et al, 2003 ; Robinson, 2001) et pour mieux comprendre la dynamique de l'azote dans différents sols avec différentes cultures, comme le maïs (Awiti et al, 2008 ; Salazar et al, 2011), le riz (Zhang et al, 2012 ; Ma et al, 2021), les cultures maraîchères (Halitligil et al, 2002 ; Bateman et al, 2005), le café (Cannavo et al, 2013), les cultures fourragères (Du et al, 2017 ; Abagandura et al, 2021), et le blé (Shalmani et al, 2017 ; Wan et al, 2021 ; Gotz et Ereku, 2023).

Plusieurs travaux de recherche ont évalué le NUE dans le cadre du semis direct sans utiliser de ^{15}N pour des cultures comme l'aubergine, la tomate et le blé (Ingraffia et al, 2023 ; Iqbal et al, 2011 ; Dalal et al, 2011), tandis que d'autres ont utilisé du ^{15}N , en particulier pour le blé (Dalal et al, 2007 ; Busari et al, 2016 ; Giambalvo et al, 2018 ; Smith et Chalk, 2020). Les deux types d'études ont été réalisées dans différents pays du monde.

A notre connaissance, bien que la recherche sur le semis direct ait commencé dans notre pays au début des années 1980, aucune étude utilisant le ^{15}N n'a été menée au Maroc. Par conséquent, pour combler cette lacune, nous proposons d'utiliser un engrais marqué au ^{15}N pour déterminer les effets des doses d'azote et de deux types de travail du sol sur le rendement en grains et en paille de blé, l'azote dérivé de l'engrais et l'efficacité de l'utilisation de l'azote dans des conditions de culture pluviale.

I. Rendements en grains et en paille

Les rendements moyens en grains étaient très similaires et variaient entre 3,1 et 3,3 t/ha, tandis que les rendements en paille variaient entre 6,3 et 6,9 t/ha (tableau 26). Les résultats de l'analyse statistique ANOVA ont montré que, dans l'ensemble, il n'y a pas de différences statistiquement significatives entre les deux types de travail du sol et les trois doses d'azote, ni d'interaction entre ces deux facteurs pour les rendements en grains et en paille (toutes les valeurs p sont largement supérieures au seuil de signification de 0,05). Ceci est confirmé par les tailles d'effet qui sont soit nulles ($<0,010$), soit faibles (0,010-0,059), soit moyennes (0,059-0,138).

Tableau 26. Résultats de l'ANOVA pour les rendements en grains de blé et en paille et pour l'azote total : moyennes, écarts types, valeurs p et tailles d'effet.

Facteurs	Niveaux/Effects	Rendement (t/ha)		Azote total de la plante (g kg ⁻¹)	
		Grain	Paille	Grain	Paille
Type de semis	SC	3,19 ± 0,42	6,27 ± 1,39	31,00 ± 05,12	3,80 ± 1,26 b
	SD	3,17 ± 0,52	6,88 ± 0,82	39,14 ± 15,18	5,58 ± 1,19 a
Azote (kg/ha)	82	3,32 ± 0,48	6,47 ± 1,17	35,01 ± 11,47	3,96 ± 1,25
	115	3,14 ± 0,59	6,73 ± 1,35	30,28 ± 09,27	4,70 ± 1,81
	149	3,09 ± 0,32	6,53 ± 1,11	39,94 ± 14,03	5,42 ± 1,23
Valeur p	Type de semis (T)	0,961	0,311	0,103	0,005
	Azote (N)	0,718	0,929	0,269	0,108
	T*N	0,506	0,432	0,072	0,299
Taille de l'effet	Type de semis (T)	0,0002	0,085	0,206	0,499
	Azote (N)	0,054	0,012	0,197	0,31
	T*N	0,107	0,13	0,355	0,182

SC, Semis conventionnel ; SD, Semis direct. Les niveaux des facteurs avec des lettres différentes, en minuscules ou en majuscules, sont significativement différents d'après le test post-hoc de Tukey HSD.

II. Teneur en azote total des plantes

D'après les résultats de l'analyse ANOVA (tableau 26), il n'y a de différence significative qu'entre les deux types de travail du sol pour le rendement en paille de blé (valeur p = 0,005, ce qui est bien inférieur au seuil de signification de 0,05) avec une valeur moyenne plus élevée pour SD (5,6 g kg⁻¹) par rapport à SC (3,8 g kg⁻¹). Toutes les tailles d'effet sont importantes (>0,138), la plus grande (0,499) correspondant au seul effet significatif du type de travail du sol sur le rendement en paille de blé. Bien qu'il n'y ait pas de différence significative entre les deux types de travail du sol en ce qui concerne le rendement en grains (valeur p = 0,103), les deux valeurs moyennes sont très différentes, avec un supplément d'azote total de 8,1 g kg⁻¹ ou 26,3 % pour SD par rapport à SC. Ceci est confirmé par une taille d'effet importante (0,206). La non-significativité pourrait s'expliquer par la grande variabilité des trois répétitions pour le SD (avec un écart-type de 15,2 g kg⁻¹ contre 5,1 g kg⁻¹ pour le SC). La même remarque peut être faite pour l'effet de la dose d'azote sur le rendement en paille avec une différence de 1,5 g kg⁻¹ ou

36,9% en faveur de 149 kg ha⁻¹ par rapport à 82 kg ha⁻¹, ce qui est confirmé par la troisième taille d'effet la plus importante (0,310).

III. Azote dérivé de l'engrais

En ce qui concerne la NDFP des grains, seul l'effet de la dose d'azote était statistiquement significatif (p-value = 0,021) avec une taille d'effet importante (0,474) et une valeur moyenne de 26,7% correspondant à un apport de 149 kg/ha, beaucoup plus élevée que 19,3% et 18,0% correspondant à 115 et 82 kg/ha, respectivement (tableau 27). **Wan et al. (2021)** ont montré une augmentation plus nette de la NDFP avec la dose d'azote car ils ont utilisé des doses beaucoup plus élevées (0, 120, 240 et 360 kg/ha) que dans le cas de notre étude et ont considéré à la fois des champs pluviaux et irrigués.

Les deux effets principaux et leur interaction étaient statistiquement significatifs pour la NDFP de la paille (toutes les valeurs p étaient inférieures à 0,05) avec des tailles d'effet importantes de 0,315 et 0,892 pour le type de travail du sol et la dose d'azote, respectivement. Les valeurs moyennes étaient plus élevées pour SD (19,0%) que pour SC (15,7%) et augmentaient avec la quantité d'azote fournie (10,1% pour 82 kg/ha à 27,0% pour 149 kg/ha).

Tableau 27 : Résultats de l'ANOVA pour l'azote dérivé des engrais (NDFP) et l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE) : moyennes, écarts-types, valeurs p et tailles d'effet.

Facteurs	Niveaux/ Effects	NDFP (%)		NUE (%)	
		Grain	Paille	Grain	Paille
Type de semis	SC	22,00±5,92	15,69±05,11 b	18,64±03,78	3,77 ± 1,29 b
	SD	20,63±6,43	19,04±11,01 a	22,08±10,82	5,81 ± 2,98 a
Azote (kg/ha)	82	18,02±6,01 B	10,10±02,86 C	23,62±05,94 A	3,43 ± 0,48 B
	115	19,26±4,95 B	15,00±04,08 B	13,90±06,79 B	4,16 ± 1,77 B
	149	26,67±3,27 A	27,00±06,29 A	23,55±08,03 A	6,78 ± 3,14 A
Valeur p	Type de semis (T)	0,565	0,037	0,11	0,015
	Azote (N)	0,021	<0,001	0,002	0,006
	T*N	0,337	0,004	0,001	0,042
Taille de l'effet	Type de semis (T)	0,028	0,315	0,199	0,403
	Azote (N)	0,474	0,892	0,636	0,571
	T*N	0,166	0,596	0,683	0,411

SC, Semis conventionnel ; SD, Semis direct ; NDFE, azote dérivé de l'engrais ; NUE, efficacité d'utilisation de l'azote.

Les niveaux des facteurs avec des lettres différentes, en minuscules ou en majuscules, sont significativement différents d'après le test post-hoc de Tukey HSD.

Comme l'interaction entre le type de travail du sol et la dose d'azote était statistiquement significative (valeur $p = 0,004$) avec une taille d'effet importante (0,596) et que nous cherchions à mieux comprendre le rendement de la paille, nous avons comparé les deux types de travail du sol pour chaque dose d'azote séparément et les trois doses d'azote pour chaque type de travail du sol (figure 12). Le NDFE de la paille différait significativement (p -valeur $< 0,001$) entre les deux types de travail du sol seulement à 149 kg/ha avec une valeur plus élevée (32,7%) pour le SD contre 21,3% pour SC (figure 12, lettres minuscules). En ce qui concerne l'analyse séparée par type de travail du sol (figure 12, lettres majuscules), le NDFE de la paille diffère significativement entre les trois doses d'azote pour les deux types de travail du sol (valeur $p = 0,020$ pour SC et moins de 0,001 pour SD). Pour SC, le NDFE de la paille a augmenté avec la quantité d'azote, passant de 11,7 à 21,3% pour des quantités d'azote fournies de 82 à 149 kg/ha, alors que l'augmentation était beaucoup plus forte pour SD (de 8,5 à 32,7% pour les mêmes quantités d'azote fournies que celles mentionnées ci-dessus).

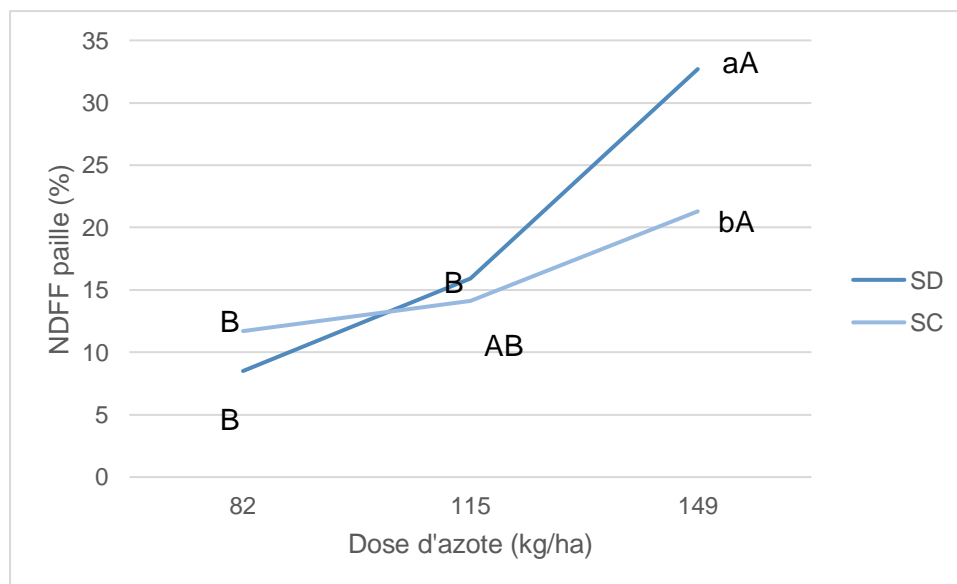


Figure 12. NDFE de la paille de blé (%).

SC, labour conventionnel ; SD, non labour ; NDFE, azote dérivé de l'engrais.

Les barres verticales représentent les erreurs standards. Les types de travail du sol avec des lettres minuscules différentes sont significativement différents selon le test post-hoc de Tukey HSD pour chaque dose d'azote. Les doses d'azote avec des lettres majuscules différentes sont

significativement différentes selon le test post-hoc de Tukey HSD pour chaque type de travail du sol.

IV. Efficacité de l'utilisation de l'azote

La dose d'azote et son interaction avec le type de travail du sol ont été statistiquement significatives pour la NUE du grain (valeurs $p = 0,002$ et $0,001$, respectivement) et les deux effets factoriels et leur interaction ont été statistiquement significatifs pour la NUE de la paille (valeurs $p = 0,015$, $0,006$ et $0,042$, pour le type de travail du sol, la dose d'azote et leur interaction, respectivement) (tableau 28). La NUE de la paille était plus élevée en SD (5,8%) qu'en SC (3,8%) et augmentait avec la quantité d'azote fournie (de 3,4% pour 82 kg/ha à 6,8% pour 149 kg/ha). La NUE des grains était similaire pour les doses d'azote les plus faibles (23,6%) et beaucoup plus élevée par rapport à la dose d'azote moyenne (13,9%). **Omara et al (2019)** ont constaté une différence significative entre les doses d'azote (0, 45, 90 et 135 kg/ha), mais avec des valeurs NUE diminuant avec les doses d'azote. Le seul facteur non significatif est le type de travail du sol pour la NUE du grain, même si le SD apporte 3,5% de plus que le SC et que ce facteur a une taille d'effet importante (0,199). Comme pour l'azote total du grain, ceci est probablement dû à la grande variabilité de la NUE du grain avec un écart-type de 10,8% pour SD comparé à 3,8% pour SC. **Ingraffia et al (2023)** ont trouvé une différence significative entre les deux types de travail du sol, même si les valeurs de la NUE étaient plus élevées (28,7 et 25,8% contre 22,1 et 18,6% dans notre étude, pour SD et SC, respectivement) mais avec une différence de moindre ampleur en faveur de SD (2,9% contre 3,5% dans notre étude). De même, **Omara et al (2019)** ont constaté une différence significative entre les deux types de travail du sol, avec une valeur NUE beaucoup plus élevée pour SD que pour SC (une différence moyenne de 9,8% entre les deux types de travail du sol).

Étant donné que l'interaction était statistiquement significative pour la NUE des grains et de la paille avec des tailles d'effet importantes de 0,683 et 0,411, respectivement, nous avons effectué deux analyses séparées comparant un facteur pour chaque niveau de l'autre facteur. En ce qui concerne la NUE du grain, il y avait une différence significative entre les deux types de travail du sol à 115 et 149 kg/ha (valeurs $p = 0,047$ et $0,002$, respectivement) mais pas à 82 kg/ha (valeur $p = 0,226$) (figure 13). Le schéma n'était pas le même pour ces deux doses d'azote : La NUE des grains était plus élevée sous SC à 115 kg/ha (19,0% contre 8,8%), mais sous SD à 149 kg/ha (30,6% contre 16,5%). Les trois doses d'azote différaient significativement sous SD (valeur $p = 0,002$) mais pas sous SC (valeur $p = 0,485$). Les valeurs moyennes de la NUE des

grains sous SD ont suivi le même schéma que celui de l'analyse globale avec des valeurs élevées similaires pour les doses d'azote les plus faibles et les plus élevées (26,8 et 30,6%, respectivement) qui diffèrent significativement de la dose intermédiaire avec une valeur faible (8,8%). Cela peut s'expliquer par les effets de la sécheresse sur le sol qui s'est produite lors de la deuxième application d'azote à la mi-saison (8 février), ce qui a affecté la NUE étant donné qu'il y a eu peu de précipitations à ce moment-là (figure 8). Ce n'était pas le cas pour les doses d'azote les plus faibles et les plus élevées, car ces deux doses ont été appliquées dans des conditions climatiques favorables, en particulier en ce qui concerne les précipitations. Ceci est en accord avec des études réalisées au Maroc, qui ont rapporté que la NUE du blé est fortement liée à la distribution des pluies dans des conditions semi-arides (**Karrou, 1996 ; Moussaddaq et Moughli, 1999**). La NUE moyenne des grains, plus faible pour 115 kg N /ha, peut s'expliquer par le fait qu'il y a eu peu de précipitations lors de la deuxième application d'engrais (figure 8). Elle augmente ensuite à 149 kg N /ha, ce qui est conforme aux études qui ont montré que les valeurs isotopiques stables de l'azote dans les plantes sont affectées par les précipitations (**Amundson et al, 2002**). Au départ, il est essentiel d'optimiser les taux d'azote en tenant compte à la fois de la fertilité du sol et des besoins des cultures. Une fois optimisées, ces doses doivent être appliquées à l'aide de méthodes appropriées et au moment opportun, en tenant compte des propriétés spécifiques du sol et des conditions climatiques dominantes (**Xu et al, 2014 ; Wang et al, 2020**). En ce qui concerne la NUE de la paille, une différence significative entre les deux types de travail du sol a été observée uniquement pour la dose d'azote la plus élevée (valeur $p = 0,033$), mais pas pour les deux autres doses (valeurs $p = 0,830$ et $0,400$, pour 82 et 115 kg/ha, respectivement), avec une valeur plus élevée (9,2%) sous SD par rapport à 4,3% sous SC (figure 14). Comme pour le grain, il y a eu une différence significative dans la NUE de la paille entre les trois doses d'azote seulement sous SD (valeur $p = 0,012$) mais pas sous SC (valeur $p = 0,694$). Les valeurs de la NUE de la paille ont augmenté avec les doses d'azote de 3,4 à 9,2%.

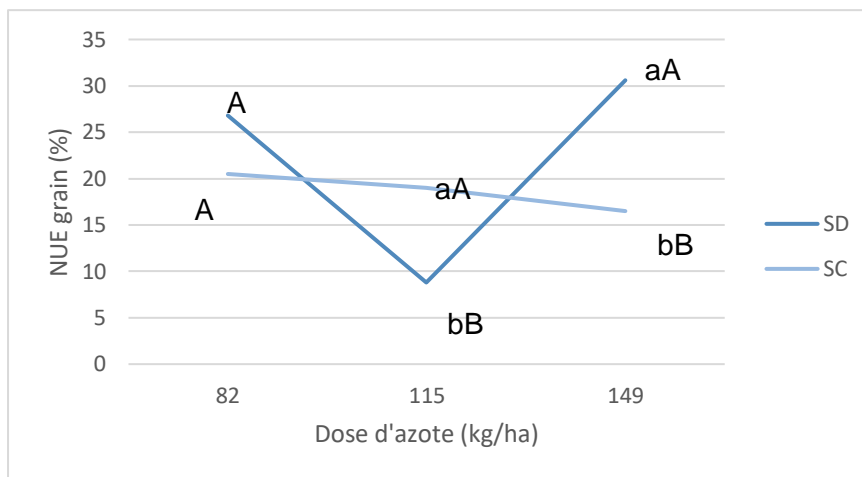


Figure 13. NUE du grain de blé (%).

SC, semis conventionnel ; SD, semis direct ; NUE, efficacité d'utilisation de l'azote.

Les barres verticales représentent les erreurs standards. Les types de travail du sol avec des lettres minuscules différentes sont significativement différents d'après le test post-hoc de Tukey HSD pour chaque dose d'azote. Les doses d'azote avec des lettres majuscules différentes sont significativement différentes sur la base du test post-hoc de Tukey HSD pour chaque type de travail du sol.

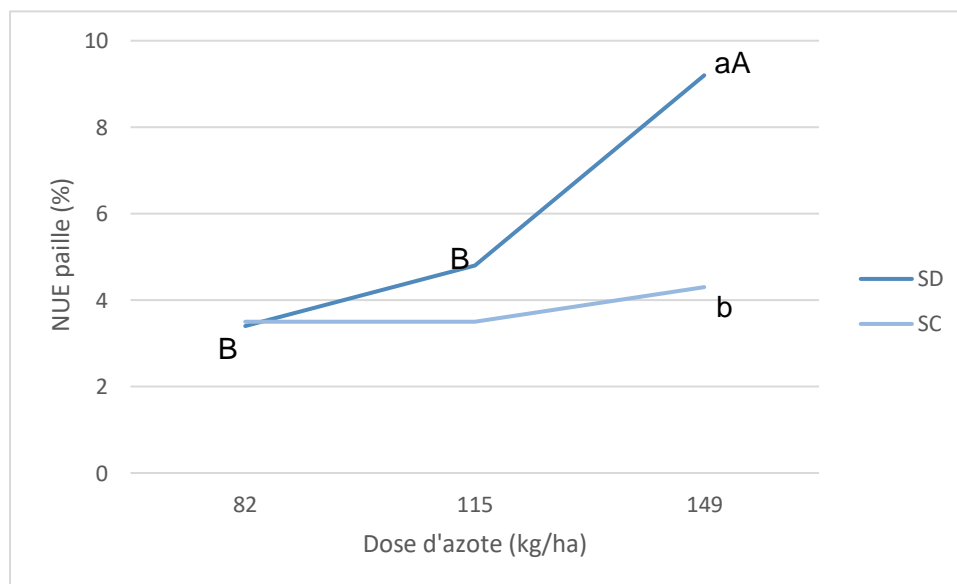


Figure 14. NUE de la paille de blé (%).

SC, semis conventionnel ; SD, semis direct ; NUE, efficacité d'utilisation de l'azote.

Les barres verticales représentent les erreurs standards. Les types de travail du sol avec des lettres minuscules différentes sont significativement différents d'après le test post-hoc de Tukey HSD pour chaque dose d'azote. Les doses d'azote avec des lettres majuscules différentes sont

significativement différentes sur la base du test post-hoc de Tukey HSD pour chaque type de travail du sol.

On constate que la NUE moyenne en SD est supérieure à celle en SC pour les rendements en grains et en paille. Par conséquent, le non-labour pourrait contribuer à préserver l'environnement grâce à la réduction du lessivage des nitrates dans le sol (Yagioka et al, 2015).

L'augmentation du rendement observée avec les pratiques sans labour et la réponse du rendement à différents niveaux d'engrais peuvent être attribuées à l'amélioration du rendement en N et NUE résultant d'une meilleure utilisation de l'azote et, par conséquent, d'une réduction des carences en éléments nutritifs du sol. L'impact du travail du sol et des engrais sur le rendement en grains du blé varie en fonction des conditions du sol (Unger,1984), de la disponibilité de l'eau et des régimes de précipitations (Rasmussen, 1999), ainsi que des niveaux spécifiques de travail du sol et d'engrais utilisés (Ishaq et al, 2001). De nombreux chercheurs (Lal, 1996, 1997 ; Diaz-Zortia, 2000) ont suggéré que la réaction des cultures au travail du sol dépendait de plusieurs facteurs interdépendants, tels que l'espèce cultivée, le sol et les conditions climatiques.

En outre, Walley (1999) indique que les pratiques de semis direct augmentent également la rétention de l'humidité du sol et améliorent l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les cultures.

Tableau 28. Efficacité d'utilisation de l'azote (NUE, %) pour les types de travail du sol SD et SC pour les rendements en grains et en paille pour les trois doses d'azote.

NUE (%)	Type de semis	Minimum (%)	Maximum (%)	Moyenne (%)	Écart-type (%)
Grain	SC	14,35	25,96	18,64	3,78
	SD	8,33	35,47	22,08	10,82
Paille	SC	2,06	5,95	3,77	1,29
	SD	2,7	10,74	5,81	2,98

Le tableau 28 montre que le travail du sol peut améliorer le rendement en améliorant la teneur en azote du sol et l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE). L'augmentation du rendement observée avec les pratiques de sol non-travaillé et la réponse du rendement à différents niveaux d'engrais peuvent être attribuées à l'amélioration du rendement en N et en NUE résultant de la réduction des carences en éléments nutritifs du sol. L'impact du travail du sol et des engrais sur le rendement en grains du blé varie en fonction des conditions du sol (Unger, 1984), de la

disponibilité de l'eau et de la pluviométrie (**Rasmussen, 1999**), ainsi que des niveaux spécifiques de travail du sol et d'engrais utilisés (**Ishaq et al, 2001**). De nombreux chercheurs (**Lal, 1996 ; 1997 ; Diaz-Zortia, 2000**) ont suggéré que la réaction des cultures au travail du sol dépendait de plusieurs facteurs interdépendants, tels que l'espèce cultivée, le sol et les conditions climatiques. En outre, **Walley et al, 1999** ont signalé que les pratiques de semis direct augmentent également la rétention de l'humidité du sol et améliorent l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les cultures.

Conclusion générale

Cette étude a permis d'analyser, dans un premier temps, l'impact du semis direct (SD) sur les propriétés physico-chimiques du sol d'un essai à court terme, dans le domaine expérimental de l'INRA d'El Koudia. Les résultats ont démontré que le SD favorise l'accumulation de matière organique (MO) en surface, en particulier dans l'horizon 0-5 cm, contrairement au semis conventionnel (SC). Cette accumulation accrue de MO contribue à une meilleure adsorption des éléments nutritifs, notamment les macronutriments et les oligo-éléments, ce qui a été confirmé par la comparaison avec des recherches antérieures. De plus, le semis direct (SD) a montré une amélioration de la densité apparente et de la stabilité structurelle des sols par rapport au SC, bien que l'augmentation de la densité apparente dans les premières années du SD soit un obstacle notable. Cette augmentation est liée à la récente introduction du SD dans la parcelle (seulement deux ans). Cependant, l'accroissement du diamètre pondéral moyen (DMP) dans le SD est un indicateur positif de la cohésion des agrégats, attestant de l'effet bénéfique du non-labour sur la structure du sol. Ces résultats soulignent que les sols labourés sont plus vulnérables à la dégradation par érosion, contrairement aux sols sous SD, qui présentent des agrégats plus stables, comme l'indique le test de stabilité structurelle.

Par ailleurs, une autre étude a été réalisée, dans un site après 18 années d'essai, dans le domaine de Merchouch. Les sept propriétés du sol étudiées varient en fonction de la profondeur, avec des valeurs plus élevées en surface sous SD, à l'exception des nitrates. En outre, les niveaux d'azote total, d'ammonium et de nitrates différaient selon les trois doses d'azote testées. La teneur en azote total en surface sous les doses de 20 et 40 kg N ha⁻¹ était plus élevée en SD qu'en SC, de même que la teneur en ammonium, ce qui peut s'expliquer par une concentration initialement plus élevée en MO dans le SD par rapport au SC. Ces différences mettent en lumière l'impact significatif du type de travail du sol et de la gestion des apports en azote sur la fertilité du sol.

Concernant les rendements en grains et en paille de blé mesurés durant la campagne 2020-2021, des différences significatives ont été observées uniquement entre les variétés de blé dur. Il n'y avait pas de différences notables entre les types de travail du sol et les doses d'azote appliquées, et aucune interaction significative n'a été observée. Les rendements en grains étaient faibles, proches de ceux observés en zones semi-arides, malgré les conditions climatiques favorables du site d'étude. Ce résultat s'explique principalement par le stress hydrique et le déficit en précipitations, qui ont réduit l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE). Les variétés Nachit et Faraj se sont avérées les plus performantes, tandis que Louiza a enregistré les rendements les plus faibles. Nachit et Faraj ont montré un rendement accru sous traitement à faible dose d'azote

(20 kg N ha⁻¹), ce qui confirme leur meilleure adaptation aux conditions de SD. Toutefois, ces résultats nécessitent une confirmation à travers la répétition des essais et une étude approfondie de l'effet de l'azote sur la qualité des grains pour chaque variété. L'interaction entre la dose d'azote, le type de travail du sol et les différentes variétés de blé souligne la nécessité d'ajuster les pratiques culturales en fonction de la variété cultivée et du système de travail du sol adopté.

Enfin, cette étude a évalué l'impact du type de travail du sol et de l'application d'engrais azotés sur la distribution de l'azote dans le sol et les grains de blé dur (variété Louiza). Deux types de travail du sol ont été comparés : le semis direct (SD) et le semis conventionnel (SC), avec trois doses d'azote (82, 115 et 149 kg N ha⁻¹). La séquestration de l'azote dans le sol a été mesurée à l'aide de la méthode des isotopes stables de l'azote (¹⁵N). Les résultats de l'ANOVA ont révélé qu'il n'y avait pas de différence significative entre le type de travail du sol et les doses d'azote pour les rendements en grains et en paille, ni pour l'azote total des grains. Cependant, les interactions entre ces deux facteurs étaient significatives pour l'azote total de la paille. L'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE) dans les grains était légèrement supérieure en SD (+3,5 %) par rapport au SC, bien que les doses d'azote aient eu un effet significatif sur cette efficacité. En analysant séparément les doses d'azote pour chaque type de travail du sol, il a été observé que la NUE pour les grains était de 20,5 %, 8,4 % et 16,5 % pour les trois doses en SC, contre 26,8 %, 19,0 % et 30,6 % en SD, confirmant ainsi la supériorité du SD sur le SC. Concernant la paille, la NUE était de 3,2 %, 3,5 % et 5,4 % sous SC, contre 3,4 %, 4,9 % et 9,2 % sous SD pour les mêmes doses d'azote. Ces résultats montrent clairement que le SD favorise une meilleure utilisation de l'azote et une rétention plus élevée dans le sol, comparé au SC.

En conclusion, le non-travail du sol, combiné à une gestion optimisée des apports en azote, s'avère être une stratégie efficace pour améliorer la fertilité des sols et la productivité agricole tout en réduisant les impacts négatifs sur l'environnement. Le semis direct permet non seulement une meilleure stabilité des sols, mais aussi une utilisation plus efficace des ressources en azote, ce qui en fait une option prometteuse pour l'agriculture durable au Maroc.

Annexes

Annexe 1 : Echantillonnage



Annexe 2 : Participations aux événements scientifiques





Annexe 3 : Analyses physico-chimiques des sols

➤ Analyses physiques

Analyse granulométrique

Réactif :

HCl 3N
H₂O₂ 50%
Eau distillée
Kcl

Matériel :



Mode opératoire :

- Peser 10g du sol (2mm)
- Attaquer le calcaire en ajoutant un volume V HCl 3N
- Laisser agir 30 min
- Remplir l'eren avec l'eau distillée
- Laisser décanter et siphonner
- Répéter le lavage deux fois
- Ajouter 20 ml H₂O₂ 50%
- Laisser agir une nuit
- Porter sur plaque chauffante mais sans porter à l'ébullition
- Laisser agir jusqu'à ce que le surnageant soit limpide et la solution soit claire
- Porter à l'ébullition, laissé refroidir
- Ajoutée une pensée de Kcl
- Remplir avec H₂O laissé décanter et siphonner, répéter le lavage jusqu'a ce que les argiles restent en suspension.
- Transvaser le contenu du flacon dans une éprouvette de 500 ml
- Remplir jusqu'à 450 ml avec l'eau distillée
- Agiter la solution environ 30 secondes
- Ajouter l'eau distillée jusqu'à 490 ml
- Agiter par retournement ou à l'aide d'un agitateur manuel en déclenchant le chronomètre et en complétant à 500 ml
- Prendre des lectures après 5, 10, 480 et 1440 min soit (R1, R2, R3, R4) à l'aide du densimètre
- Faire passer le contenu de l'éprouvette dans un tamis de 0.05 mm
- Récupérer le sable dans une capsule
- Sécher à 105 °C pendant 24h
- Peser le sable totale S_t
- Tamiser à 0.2 mm
- Peser le sable grossier S_g.

Calcul :

$V_{HCl} \text{ ajoutée} = (CaCO_3 * 0,5) + 5ml$; $(A+L_f) \% = (R1 + R2) * 2,5$; $A \% = (R3 + R4) * 2,5$;
 $S_f \% = (S_t - S_g) * 5$; $S_g \% = S_g * 5$; $L_g = 100 - (A + L_f + S_t + S_g + CaCO_3 + H_2O) \%$

Stabilité Structurale

Réactif :

Ethanol ; Eau distillée

Matériel :



Mode opératoire :

- 1-fritter les mottes de sol et Tamiser entre deux tamis de 3,15mm et 5mm
- 2-Peser 50g des grains de 3,15mm<d<5mm et déposer les dans l'étuve à 40°C pendant une nuit.
- 3-peser 5g Peser 5g des grains de sol dans des creusets de porcelaine

Test d'eau(10min) :

- 1- Ajouter 50ml d'eau distillée dans un bécher de 250ml ;
- 2- Rajouter les 5g des gains de sol préalablement pesés dans le bécher, les laisser pendant 10min ;
- 3- Verser l'eau distillée contenu dans le bécher et garder le sol ;
- 4- À l'aide de l'éthanol, déposer le sol dans un tamis de 50µm ;
- 5- Passer le dans l'appareil de Henin, et faire tourner 5 fois ;
- 6- Rincer le tamis par de l'éthanol, et récupérer le sol dans le creuset de porcelaine.

Test d'alcool (30min) :

- 1-Verser 50ml de l'éthanol dans un bécher de 250ml. ;
- 2-Rajouter soigneusement des 5g des grains de sol, les laisser immerger pendant 30min ;
- 3-Verser l'éthanol et récupérer les grains. ;
- 4- Dans un erlenmeyer de 250ml, rempli par 100ml d'eau distillée, ajouter les grains à l'aide d'une pissette à eau distillée. ;
- 5-Jauger jusqu'à 250ml, les bien fermer puis les mélanger (10 tours), laisser à décanter 30min ;
- 6-Verser l'eau distillée contenue dans l'erlenmeyer et récupérer le sol. ;
- 7- Passer à l'appareil de Henin et récupérer dans le creuset.

L'essai d'humectation : (1h)

- 1-Dans un récipient rempli d'eau distillée, on place une éponge jusqu'à saturation d'eau.
- 2-Déposer un papier filtre sur lequel on pose 5g des grains de façon dispersive, et les laisser pendant une heure (60min)
- 3-Dans un tamis de 50µm, verser les grains et bien rincer le papier filtre par de l'éthanol.
- 4-Passer à l'appareil de Henin, même procédure précédente, et récupérer Le sol dans le creuset. Placer tous les creusets dans l'étuve à 105°C Pendant 48h.

Tamissage : 1-Verser le contenu du creuset dans un ensemble de tamis de dimension différente : 2mm ; 1mm ; 0,5mm ; 0,2mm ; 0,1mm ; 0,05mm. ;

2-Tamiser soigneusement ;

3-Peser le contenu de chaque tamis.

Calcul :

$DMP = \sum x_i * W_i$ avec : x_i : diamètre moyen entre deux tamis

W_i : proportion de la masse totale d'agrégats résiduels dans chaque tamis

➤ **Analyses chimiques :**

Matière organique :

Réactif :

H₂O Distillée
Dichromate de Potassium K₂Cr₂O₇
1N
Sel de Mohr 0.5N
Acide sulfurique (H₂SO₄)96%
Fluorure de sodium NaF 3%
Diphénylamine 0.5% dans H₂SO₄
Indicateur coloré

Matériel :



Mode opératoire :

- Peser 2g de terre (0.2mm) dans un erlen 300mL ;
 - Ajouter 15 ml de Dichromate de Potassium 1N
- Agiter avec précaution ;
Ajouter 20 ml de H₂SO₄ ;
Agiter avec précaution et laisser reposer 30 min ;
Ajouter 115 ml H₂O_{Distillée} et laisser reposer 2h ;
Prélever 50mL et mettre dans un second erlen
Ajouter 5 ml de NaF ;
Ajouter 3 gouttes de Diphénylamine 0.5% Titrage par sel de Mohr 0,5N

Calcul :

$MO\% = ((V_T - V_E) * 5,85 * 1,72) / (V_T * M_t) ;$ Avec

V_T: volume de témoin
V_E: volume d'échantillon
M_t: Masse de la terre

Capacité d'échange cationique

Réactif :

Acétate de sodium CH_3COONa 1N à pH8,2
Acétate d'ammonium $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N à pH 7
Ethanol 99%

Matériel :



Mode opératoire :

- Peser 4g de terre (2mm) dans les tubes de centrifugeuse ;
- Ajouter 33ml de CH_3COONa ;
- Agiter 5min à l'agitateur va et vient ;
- Centrifugeuse pendant 5min à 2500T/min ;
- Verser la solution surnageant dans une fiole jauger de 100ml (Répéter ces étapes 3 fois pour aboutir à un volume de 100ml)
- Laver l'échantillon de sol avec l'éthanol par 3 fractions de 33ml en procédant comme précédemment (agitation, centrifugation) ; Laisser le sol pendant 2 heures.
- Procéder ensuite à l'extraction de Na par $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ par 3 fractions de 33 ml en procédant comme pour CH_3COONa (agitation, centrifugation) ;
- Récupérer ces fractions de solution après centrifugation dans une fiole de 100ml ; ajouter 1ml de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$; bien homogénéiser ; filtrer ;
- Faire les dilutions ;
- Et finalement doser Na par photomètre à flamme.

Calcul :

$$\text{CEC (még/100)} = 0,109 * \text{lecture}$$

Le phosphore assimilable

Réactif :

H₂O Distillée
Hydrogène Carbonate de Sodium
(NaHCO₃) 0.5N pH=8.5
Charbon actif dé-phosphaté
Solution sulfo-molybdique
Acide ascorbique 1%

Matériel :



Mode opératoire :

- Peser 2.5g de terre (2mm) ;
- Ajouter 50ml de NaHCO₃ ;
- Ajouter environ 0.5g de charbon actif
- Agiter sur agitateur va et vient pendant 30 min à 140t/min (flacon en position verticale) ;
- Filtrer dans un erlen 100 ml ; Prélever 5 ml de la solution d'extraction dans fiole jaugée 25 ml ;
- Ajouter 6ml de solution sulfo-molybdique ;
- Agiter pour dégazer la solution ;
- Ajouter quelques ml d'H₂O_{Distillée} ;
- Ajouter 1ml d'acide ascorbique 1% ;
- Compléter à 25mL avec H₂O_{Distillée} ;
- Placer les fioles au bain marie 80°C pendant 15min avant lecture à $\lambda = 825$

Calcul :

$$P_2O_5(\text{ppm}) = \frac{1000}{2,5\text{g}} \times \frac{50}{5} \times \frac{25}{1000} \times L \times P$$

Le potassium assimilable :

Réactif :

H₂O Distillée
Acétate d'ammonium CH₃COONH₄
pH7

Matériel :



Mode opératoire :

- Peser 2 g de terre (2mm) ;
- Ajouter 50 ml de CH₃COONH₄ pH7 ;
- Agiter avec agitateur va et vient
- Filtrer ;
- Lecture au spectrophotomètre de flamme

Calcul :

$$K_2O(\text{ppm}) = \frac{1000}{2g} \times \frac{50}{1000} \times \frac{K_2O}{2K} \times L \times D$$

Éléments mineurs (Mg et Ca)

Réactif :

H₂O Distillée
 Solution tampon NH₄OH-NH₄Cl
 Solution triéthanolamine
 Solution de cyanure de potassium à 5%
 Solution de NaOH 5N
 Solution EDTA
 Indicateur Calconecarboxylique
 Indicateur Noir Erichrome

Matériel :



Mode opératoire :

- Solution d'extraction :
- 2g (2mm), ajouter 50 ml de CH₃COONH₄ pH7 ;
- Agiter avec agitateur va et vient, Filtrer ;
- Prélever 10ml de la solution d'extraction dans un erlenmeyer de 250 ml ;
- Ajouter 100ml d'H₂O distillée ;
- Ajouter 1ml triéthanolamine ;
- Ajouter 5 goutte de KCN ;
- Agiter et laisser reposer 5min

Pour Ca :

- Ajouter 20 ml de solution tampon;
- Ajouter l'indicateur de Noir Erichrome ;
- Titrer par l'EDTA

Pour Ca et Mg :

- Ajouter 20 ml de NaOH;
- Ajouter l'indicateur de Calconecarboxylique;
- Titrer par l'EDTA

Calcul :

• **Pour Ca :**

$$\text{Ca} \left(\frac{\text{még}}{100} \right) = V * 0,02 * \frac{V2}{V1} * \frac{100}{P}$$

• **Pour Mg :**

$$\text{Mg} \left(\frac{\text{még}}{100} \right) = (V' - V) * 0,02 * \frac{V2}{V1} * \frac{100}{P}$$

Avec :

V : volume de l'EDTA utilisé pour le dosage
 V1 : volume de la prise d'essai
 V2 : volume final de la solution d'extraction
 P : prise d'essai

V : volume d'EDTA utilisé pour doser (Ca+Mg)

V' : volume d'EDTA utilisé pour doser (Ca)
 V1 : volume de la prise d'essai
 V2 : volume final de la solution d'extraction
 P : prise d'essai

Les oligoéléments :

Réactif :

Acide diéthylènetriamine-pentaacétique (DTPA), Triéthanolamine (TEA), l'eau distillée (H_2O), chlorure de calcium dihydraté ($CaCl_2, 2 H_2O$),

Matériel :



Mode opératoire :

- Solution d'extraction : dissous 1,96g de (DTPA) dans 13,3 ml de (TEA) et 100 ml de l (H_2O), ajouté 1,47g de ($CaCl_2, 2 H_2O$),
- Homogénéisé,
- Ajusté le pH à 7,3 par (HCl), enfin compensé à 1000 ml avec du H_2O .
- Peser 20g du sol (2mm) ;
- Ajouter 40ml de solution d'extraction ;
- Agiter pendant deux heures à 180 tours/minutes ; filtré le mélange et récupéré le filtrat ;
- Dosage de Fe, de Zn, Mn et Cu par la spectrophotométrie d'absorption atomique (SAA)

Calcul :

$$\text{Zn, Fe, Cu, Mn (ppm)} = \text{lecture} * 2$$

Annexe 4 : Les variétés utilisées

1. Variété Louisa

Origine et Développement

- **Origine** : Louisa est une variété de blé dur développée dans le cadre de programmes de recherche et de sélection pour améliorer la productivité et la qualité du blé dur dans des environnements semi-arides (Azougagh et al, 2020).
- **Développement** : Sélectionnée pour ses caractéristiques agronomiques adaptées aux conditions locales de croissance, Louisa est souvent issue de programmes de croisement et d'amélioration variétale menés par des instituts de recherche agronomique.

Caractéristiques

- **Rendement** : Louisa est reconnue pour son rendement élevé dans des conditions de croissance variées, y compris les sols moins fertiles.
- **Qualité du Grain** : Elle produit des grains de haute qualité, adaptés à la fabrication de semoule et de pâtes alimentaires.
- **Résistance** : La variété montre une bonne résistance aux maladies courantes du blé dur, telles que la rouille et la fusariose.
- **Adaptation Climatique** : Adaptée aux régions semi-arides et arides, Louisa est conçue pour tolérer des conditions de sécheresse modérées.

2. Variété Nachit

Origine et Développement

- **Origine** : Nachit est une autre variété de blé dur développée pour améliorer les rendements dans les régions de culture du blé dur au Maroc et dans d'autres pays méditerranéens (Houssaini et al, (2021).
- **Développement** : Développée par des programmes de sélection variétale visant à créer des variétés avec une meilleure adaptation aux conditions climatiques spécifiques.

Caractéristiques

- **Rendement** : Nachit est connue pour son rendement élevé, particulièrement dans des conditions de sol optimales.
- **Qualité du Grain** : Les grains de Nachit sont bien adaptés pour la production de semoule de qualité, avec une bonne texture et une faible teneur en protéines.

- **Résistance** : La variété possède une résistance améliorée à certaines maladies, notamment la rouille du blé et les maladies fongiques.
- **Adaptation Climatique** : Nachit est adaptée aux conditions climatiques méditerranéennes, avec une tolérance modérée à la sécheresse.

3. Variété Faraj

Origine et Développement

- **Origine** : Faraj est une variété développée spécifiquement pour répondre aux besoins de rendement et de qualité dans les environnements agricoles arides et semi-arides (Idrissi et al, 2022).
- **Développement** : Issues de programmes de sélection variétale ciblant des améliorations spécifiques en termes de rendement, de qualité du grain, et de résistance aux stress environnementaux.

Caractéristiques

- **Rendement** : Faraj est reconnue pour son rendement élevé et sa stabilité dans des conditions de culture variées, même dans des sols moins fertiles.
- **Qualité du Grain** : La qualité du grain est élevée, avec des caractéristiques favorables pour la semoule et les pâtes, y compris une bonne tenue à la cuisson.
- **Résistance** : La variété offre une bonne résistance aux maladies courantes du blé dur et aux conditions de sécheresse.
- **Adaptation Climatique** : Bien adaptée aux conditions arides et semi-arides, Faraj est souvent utilisée dans des régions avec des restrictions en eau.

Références Bibliographiques

- Akhter, M.M., Hossain, A., Timsina, J., Teixeira da Silva, J.A., Islam, M.S. (2016). Chlorophyll meter-A decision-making tool for nitrogen application in wheat under light soils. *Int. J. Plant Prod.*, 10, 289–302.
- Al-Kaisi, M.M. & Yin, X. (2005). Soil Management for Sustainable Agriculture: A Review of the Literature. *Journal of Environmental Quality*, 34(2), 437-445. doi :10.2134/jeq2005.0437.
- Allaerts, M., Boon, W. & Feyen, J. (1982). Influence of soil texture on the aggregation of soil aggregates. *Revue de l'Agriculture*, 35, 1673-1695.
- Allart, K., Almoussawi, A., Kerbey, L., Catterou, M., Roger, D., Mortier, D.; Blanc, E., Robert, B., Spicher, F., Emery, L., et al. (2023). Splitting nitrogen fertilization is more important than nitrogen level when mixed wheat varieties are cultivated in a conservation agriculture system. *Agronomy*, 13, 1295.
- Altieri, M. A. (2018). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press. ISBN 978-1138204082.
- Altieri, M. A., et Koohafkan, P. (2008). Enduring farms: Climate change, smallholders and traditional farming communities. Third World Network. <https://www.twn.my/title/end/pdf/end.pdf>
- Álvarez, R., et Steinbach, H. S. (2009). "A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability, and crops yield in the Argentine Pampas." *Soil and Tillage Research*, 104(1), 1-15. DOI : 10.1016/j.still.2009.02.005.
- Álvarez, R., Steinbach, HS., De Paepe, JL. (2017). Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil Tillage Res.* 170 :53-65.
- Andrade, D.S., Colozzi-Filho, A., Giller, K.E. (2003). In: El Titi, A. (Ed.), *The soil microbial community and soil tillage*. In : *Soil tillage in agroecosystems*, 51–81. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Aziz, I., Mahmood, T., et Islam, K. R. (2013). Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil and Tillage Research*, 131, 28-35. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.002>
- Baggs, E. M., Rees, R. M., Smith, K. A., et Vinten, A. J. A. (2003). "Effect of urea fertilizer and legume residues on the emissions of N₂O, CO₂, and CH₄ from a Vietnam upland soil." *Soil Biology and Biochemistry*, 35(3), 337-348. DOI : 10.1016/S0038-0717(02)00283-1.
- Baggs, E. M., Rees, R. M., Smith, K. A., et Vinten, A. J. A. (2006). Nitrous oxide emission from soils after incorporating crop residues. *Soil Use and Management*, 16(2), 82-87. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2000.tb00179.x>
- Banque mondiale (2021). *Maroc : Génération Green 2020-2030 et la transition vers une agriculture durable*.
- Banque mondiale. (2020a). "Agricultural productivity and innovation". Consulté le 12 décembre 2023.
- Banque mondiale. (2020b). "Morocco : Promoting Sustainable Agriculture". Consulté le 11 septembre 2022. Lien.
- Banque mondiale. (2020c). *World Development Report 2020: Trading for Development in the Age of Global Value Chains*.
- Banque mondiale. (2020d). *Sustainable Agriculture in Morocco: The Role of Direct Seeding*.
- Bardgett, R. D., Bowman, W. D., Kaufmann, R., et Schmidt, S. K. (2003). "The effect of plant community composition on soil microbial communities and nutrient cycling." *Soil Biology and Biochemistry*, 35(7), 891-902. DOI : 10.1016/S0038-0717(03)00063-3.
- Bekkaoui, F., Sadiki, M. et Thami Alami, I. (2024). "Contribution of agricultural research for better resilience of Moroccan agriculture." *AFRIMED AJ – Al Awamia*, 143, 1-8.

- Ben Moussa, N., Errouissi, F., et Houmani, M. (2017). Direct Seeding in Semi-Arid Areas of Morocco: Agronomic Performance and Economic Assessment. *Journal of Plant Nutrition*, 40(14), 2005-2018.
- Blanco-Canqui, H., et Lal, R. (2008). No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 72(3), 693-701. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0233>
- Blanco-Canqui, H., et Lal, R. (2010). "No-tillage and soil-profile carbon sequestration: an on-farm assessment". *Soil Science Society of America Journal*, 74(2), 377-385.
- Boddey, R. M., Urquiaga, S., Alves, B. J. R., et Reis, V. (2001). Biological nitrogen fixation associated with sugar cane. *Plant and Soil*, 252(1), 1-9.
- Bouaziz, A., et Kaanane, A. (2015). Conservation Agriculture and Direct Seeding in Morocco: Results and Prospects. *Plant, Soil and Environment*, 61(10), 435-442.
- Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W., Griffioen, J., Van Groenigen, J. W., Hefting, M. M., Oenema, O., ... et Seitzinger, S. (2013). "Nitrate leaching from agricultural soils and its impact on the environment." *Environmental Pollution*, 174, 1-10. DOI : 10.1016/j.envpol.2012.11.007.
- Bouwman, A. F., Van Vuuren, D. P., Derwent, R. G., et Posch, M. (2002). "A global high-resolution emission inventory for ammonia." *Global Biogeochemical Cycles*, 16(2), 8-1. DOI : 10.1029/2000GB001389.
- Burger, M., et Venterea, R. T. (2008). Nitrogen immobilization and mineralization kinetics of cattle, hog, and turkey manure applied to soil. *Soil Science Society of America Journal*, 72(6), 1570-1579.
- Butterbach-Bahl, K., Baggs, E. M., Dannenmann, M., Kiese, R., et Zechmeister-Boltenstern, S. (2013). "Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls?" *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130122. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0122>.
- Cavigelli, M. A., Teasdale, J. R., Conklin, A. E., Grandy, A. S., Heckman, J. R., Kornecki, T. S., Mirsky, S. B., Reddy, K. N., Spargo, J. T., et Weil, R. R. (2013). "Long-term agronomic performance of organic and conventional field crops in the Mid-Atlantic region." *Agronomy Journal*, 105(4), 1007-1020. <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0373>.
- Clough, T. J., Kelliher, F. M., Sherlock, R. R., et Ford, C. D. (2003). Direct measurement of nitrous oxide emissions from agricultural soils using Fourier-transform infrared spectrometry. *Australian Journal of Soil Research*, 41(4), 531-540.
- Davidson, E. A. (1993). "Sources of nitric oxide and nitrous oxide emissions from soils." *Nitrogen Cycling in the Americas*, 1, 73-90. DOI : 10.1007/978-1-4615-2410-4_5.
- Davidson, E. A., et Kanter, D. (2014). Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environmental Research Letters*, 9(10), 105012. doi :10.1088/1748-9326/9/10/105012
- Davidson, E. A., Stark, J. M., et Firestone, M. K. (1991). Microbial production and consumption of nitrate in an annual grassland. *Ecology*, 72(6), 1968-1975.
- Derpsch R. (GTZ), 2001. Conservation tillage, no-tillage and related technologies, Keynote contributions "First world Congress on Conservation Agriculture; 1-5 octobre 2001", Madrid (SP), ECAF-FAO, p161-170, 394 pp
- Drinkwater, L. E., et Snapp, S. S. (2007). "Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm." *Advances in Agronomy*, 92, 163-186. DOI : 10.1016/S0065-2113(04)92004-9.
- Fageria, N. K., Baligar, V. C., et Jones, C. A. (2011). "Nutrient management for improving lowland rice productivity and sustainability." *Advances in Agronomy*, 110, 63-152. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385531-2.00003-8>.

- FAO. (2020). Agriculture de conservation : vers une agriculture durable au Maroc. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- FAO. (2021d). The State of the World's Soil Resources: Towards More Sustainable Soil Management. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO/ Sept/Déc 2011. Département de l'agriculture et de la protection des consommateurs HTE N°149/150
- FAO.(2001).EnvironmentalDepartment Website <http://www.fao.org/ag/magazine/0110sp.htm>
- Amundson R., Austin A.T., Schuur A.G., Yoo K., Matzek V., Kendall C., Uebersax A., Brenner D., and Baisden W.T. (2002). Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 1031-1041.
- Awiti, A.O., Walsh, M.G., Kinyamario, J. (2008). Dynamics of topsoil carbon and nitrogen along a tropical forest–cropland chronosequence: evidence from stable isotope analysis and spectroscopy. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 127, 265–272.
- Aziz, I., Mahmood, T., Islam, K.R. (2013). Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil Tillage Res.*, 131, 28–35.
- Azougagh, Y., Nachit, M., Benbelkacem, A., Amri, A., and Belqadi, L. (2020). "Performance of the Louisa durum wheat variety under different environmental conditions." *Agricultural Research*, 9(1), 77-85. doi :10.1007/s40003-020-00444-1
- Baha Eddine, S., El Yousfi, B., Douira, A. (2019). Interaction of nitrogen fertilizers with wheat growth stage and foliar treatment with urea effects on WCR induced by *Fusarium culmorum*. *Plant Arch.* 19, 2829–2835.
- Baha Eddine, S., El Yousfi, B., Douira, A. (2020). Effects of nitrogen forms and rates on *Fusarium culmorum* growth, fitness, aggressiveness and wheat, barley and triticale resistance to crown rot disease. *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* 21, 107–129.
- Baize, D. (2000). Guide des analyses en pédologie. 2e édition, revue et augmentée, INRA Paris.
- Balesdent, J., Chenu, C. & Balabane, M. (2000). A critical review of the role of soil organic matter in the formation of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 53(3-4), 215-230. doi :10.1016/S0167-1987(00)00179-0
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.*, 53, 215–230.
- Basic, F., Kisic, I., Mesic, M., Nestroy, O. & Butorac, A. (2004). The effect of soil compaction on soil properties and crop yield in a temperate climate. *Soil & Tillage Research*, 78(2), 197-206. doi: 10.1016/j.still.2004.02.005
- Bateman, A.S., Kelly, S.D., Jickells, T.D. (2005). Nitrogen isotope relationships between crops and fertilizer: Implications for using nitrogen isotope analysis as an indicator of agricultural regime. *J. Agric. Food Chem.*, 53, 5760–5765.
- Bedard-Haughn, A., Van Groenigen, J.W., van Kessel, C. (2003). Tracing 15 N through landscapes: potential uses and precautions. *Agron. J.*, 272, 175–190.
- Benjamin, L.T., Barba, J.C.D., Leo, M.C. & Susan, N. (2005). Methods for the analysis of soil and water : A review. *Talanta*, 66(2), 294-306. Doi : 10.1016/j.talanta.2004.09.022
- Benlhabib, O., Wahbi, S., Bouzerzour, H., & Haddad, L. (2016). Durum wheat genotypic variation in response to nitrogen fertilization in Morocco. *Journal of Plant Nutrition*, 39(4), 549-565.
- Bessam, F., et Mrabet, R. (2003). Long-term changes in soil organic matter under conventional tillage and no-tillage systems in semiarid Morocco. *Soil Use and Management*, 19(1), 139-143.
- Bhat, M.I., Faisal-ur-Rasool Bhat, M.A. (2010). Applications of stable and radioactive isotopes in soil science. *Curr. Sci.*, 98, 1458–1471.
- Biljana, B., Aca, M. (2009). Correlation between nitrogen and chlorophyll content in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Kragujev. J. Sci.*, 31, 69–74.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). "Bulk density." In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., pp. 363-375). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. DOI: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c12.

- Blake, R. & Hartage, K. (1986). Methods of Soil Analysis: Physical and Mineralogical Methods. *Soil Science*, 1, 363-375.
- Bower, C.A., Reitemeier, R.F. & Fireman, M. (1952). The determination of cation exchange capacity of soils. *Soil Science*, 73(4), 251-261. doi :10.1097/00010694-195204000-00002
- Boyer, J. (1978). Rapport OSTROM. Paris, 35, 173.
- Brand, W.A., Coplen, T.B., Vogl, J., Rosner, M., Prohaska, T. (2014). Assessment of international reference materials for isotope-ratio analysis (IUPAC technical report). *Pure Appl. Chem.*, 86, 425–467.
- Bremner, J.M. (1996). Nitrogen—Total. In *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods: Part 3*. Soil Science Society of America Book Series No. 5; Sparks, D.L., Ed.; ASA-SSSA: Madison, WI, USA.
- Busari, M.A., Salako, F.K., Tuniz, C. (2016). Stable isotope technique in the evaluation of tillage and fertilizer effects on soil carbon and nitrogen sequestration and water use efficiency. *Eur. J. Agron.*, 73, 98–106.
- Cannavo, P., Harmand, J.M., Zeller, B., Vaast, P., Ramirez, J.E., Dambrine, E. (2013). Low nitrogen use efficiency and high nitrate leaching in a highly fertilized *Coffea arabica*–*Inga densiflora* agroforestry system: A ¹⁵N labeled fertilizer study. *Nutr. Cycl. Agroecosystems*, 95, 377–394.
- Castellini, M., Fornaro, F., Garofalo, P.; Giglio, L., Rinaldi, M., Ventrella, D., Vitti, C., Vonella, A.V. (2019). Effects of no-tillage and conventional tillage on physical and hydraulic properties of fine textured soils under winter wheat. *Water*, 11, 484.
- Charlet, L. & Schlegel, M.L. (1999). An overview of soil fertility and quality in Mediterranean agriculture. *Compte Rendu d'Académie d'Agriculture*, 85, 7-24.
- Craine, J.M., Brookshire, E.N.J., Cramer, M.D., Hasselquist, N.J., Koba, K., Erika Marin-Spiotta, E., Wang, L.X. 2015. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils. *Plant Soil*, 396, 1–26.
- D'Haene, K., Vandenbruwane, J., De Neve, S., Gabriels, D., Salomez, J., Hofman, G. (2008). The effect of reduced tillage on nitrogen dynamics in silt loam soils. *Eur. J. Agron.*, 28, 449–460.
- Dalal, R.C., Strong, W.M., Cooper, J.E., King, A.J. (2007). No-tillage and nitrogen application affect the decomposition of ¹⁵N-labelled wheat straw and the levels of mineral nitrogen and organic carbon in a Vertisol. *Aust. J. Exp. Agric.*, 47, 862–868.
- Dalal, R.C., Wang, W., Allen, D.E., Reeves, S., Menzies, N.W. (2011). Soil Nitrogen and Nitrogen-Use Efficiency under Long-Term No-till Practice. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 75, 2251–2261.
- De Jesus, H.I., da Silva, A.L.B.R., Cassity-Duffey, K., Coolong, T. (2023). Estimating fertilizer nitrogen-use efficiency in transplanted short-day onion. *Nitrogen*, 4, 286–295.
- Decoopman, B., Hanocq, D. & Heddadj, D. (2013). Dossier pour le pôle agronomie-productions végétales des chambres d'agriculture de Bretagne.
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., & Hongwen, L. (2014). Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6(1), 1-25.
- D'Haene, K., Vandenbruwane, J., De Neve, S., Gabriels, D., Salomez, J. & Hofman, G. (2008). Soil compaction and its effect on soil quality in different agricultural systems. *European Journal of Agronomy*, 28(4), 449-460. doi: 10.1016/j.eja.2008.01.004
- Diaz-Zortia, M. (2000). Effect of deep tillage and nitrogen fertilization interactions on dry land corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Till. Res.*, 54, 11–19.
- Diaz-Zortia, M. Effect of deep tillage and nitrogen fertilization interactions on dry land corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Till. Res.*, 2000, 54, 11–19.
- Ding, J.F., Li, F.J., Le, T., Wu, P., Zhu, M., Li, C.Y., Zhu, X.K., Guo, W.S. (2020). Nitrogen management strategies of tillage and no-tillage wheat following rice in the Yangtze River Basin, China: Grain yield, grain protein, nitrogen efficiency, and economics. *Agronomy*, 10, 155.
- Dinon, E. & Gerstmans, A. (2008). Université de Liège. Rapport de recherche.
- Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J. (2006). *L'agronomie Aujourd'hui* ; Ed. Quae Editions : Versailles, France ; p. 384.

- Drury, C.F. et Tan, C.S. (1995). Long-term (35 years) effects of fertilization, rotation, and weather on corn yields. *Revue canadienne de phytotechnie*, 75, 355-362.
- Du, Y.G., Guo, X.W., Zhou, G., Cao, G.M., Li, Y.K. (2017). Effect of grazing intensity on soil and plant $\delta^{15}\text{N}$ of an alpine meadow. *Pol. J. Environ. Stud.*, 26, 1071–1075.
- Dzvene, A. R., Tesfahuney, W., Walker, S., et Ceronio, G. (2022). Effects of intercropping sunn hemp into maize at different times and densities on productivity under rainwater harvesting technique. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6, 1009443. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1009443>.
- Edwards, J.H., Wood, C.W., Thurlow, D.L. & M.E. (1992). Organic matter content and its effect on soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, 56(6), 1577-1582. doi :10.2136/sssaj1992.03615995005600060011x
- El Aissaoui, A., El Brahli, A., El Gharras, O. & El Hantaoui, N. (2009). Sustainability of agriculture in Mediterranean regions. Symposium international « agriculture durable en région méditerranéenne (AGDUMED) », Rabat, Maroc, 249-256.
- Estevez, B. (2006). Agriculture, pêche et alimentaire au Québec.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C. (2005). Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* 88, 97–185.
- Fahmi, A., El Asli, A., Mouhtadi, E. M., & Tour, A. (2018). Effects of nitrogen fertilization and tillage practices on durum wheat productivity in semi-arid Morocco. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 68(4), 331-341.
- FAO (2021a). "The state of food and agriculture 2021". Consulté le 8 juin 2023.
- FAO (2021b). "Promoting conservation agriculture in Morocco". Consulté le 6 août 2022.
- FAO (2021c). "Conservation Agriculture". Consulté le 14 octobre 2022.
- Feland, B.C., Quideau, S.A. (2020). Isotope applications to soil science at the University of Alberta—An historical perspective. *Can. J. Soil Sci.*, 100, 344–355.
- Fernández-López, J.A., Alacid, M., Obón, J.M., Martínez-Vives, R., Angosto, J.M. (2023). Nitrate-polluted waterbodies remediation: Global insights into treatments for compliance. *Appl. Sci.*, 13, 4154.
- FIDA. (2021). Investing in Rural People. Fonds International de Développement Agricole. Lien
- Fierer, N., Schimel, J. P., et Holden, P. A. (2003). "Variation in microbial community composition through two soil depth profiles." *Soil Biology and Biochemistry*, 35(7), 1019-1025. DOI: 10.1016/S0038-0717(03)00168-3.
- Fischer, R.A. (1993). Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Res.*, 33, 57–80.
- Floate, M.J.S. & Enright, P.D. (1991). The impact of soil structure on crop production in New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 34(4), 453-465. doi :10.1080/00288233.1991.10420996
- Flohr, P., Jenkins, E., Williams, H.R.S., Jamjoum, K., Nuimat, S., Muldner, G. (2019). What can crop stable isotopes ever do for us? An experimental perspective on using cereal carbon stable isotope values for reconstructing water availability in semi-arid and arid environments. *Veg. Hist. Archaeobotany*, 28, 497–512.
- Follum, M., Granum, M. G., Jørgensen, A., et Havnerås, E. (2018). No-till effects on nitrogen dynamics and soil health. *Soil and Tillage Research*, 186, 1-9.
- Francisco, C.A.L., Loss, A., Brunetto, G., Gonzatto, R., Giacomini, S.J., Aita, C., Piccolo, M.d.C., Marchezan, C., Scopel, G., Vidal, R.F. (2021). Aggregation, carbon, nitrogen, and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in soils under no-tillage system fertilized with injection and surface application of pig slurry for five years. *Carbon Manag.*, 12, 275–287.
- Franc-Xavier, A.K. (2016). Université Félix Houphouët-Boigny, UFR des sciences de la terre et des sols.
- Franzluebbers, A. J. (2002). "Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality." *Soil and Tillage Research*, 66(2), 95-106. DOI: 10.1016/S0167-1987(02)00018-1.
- Franzluebbers, A. J. (2002). "Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth". *Soil and Tillage Research*, 66(2), 197-205.
- Friedrich, T., Kassam, A., et Shaxson, F. (2009). Conservation agriculture. *Agriculture for Developing Countries*, 1-8.

- Gál, A., Vyn, T.J., Michéli, E., Kladvko, E.J. & McFee, W.W. (2007). Soil physical properties affected by tillage and crop rotation. *Soil and Tillage Research*, 96(1), 42-51. doi: 10.1016/j.still.2007.02.006
- Gál, A., Vyn, T.J., Michéli, E., Kladvko, E.J., McFee, W.W. (2007). Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. *Soil Tillage Res.*, 96, 42–51.
- Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., Boyer, E. W., Howarth, R. W., Seitzinger, S. P., ... et Vörösmarty, C. J. (2004). Nitrogen cycles: past, present, and future. *Biogeochemistry*, 70(2), 153-226. doi:10.1007/s10533-004-0370-0
- Gardner, J.B., Drinkwater, L.E. (2009). The fate of nitrogen in grain cropping systems: A meta-analysis of 15N field experiments. *Ecol. Appl.*, 19, 2167–2184.
- Garrido-Lestache, E., López-Bellido, R.J., López-Bellido, L. (2005) Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *Eur. J. Agron*, 23, 265–278.
- Gäth, S., Steffens, D., et Schmidt, W. (2020). "Effect of nitrogen fertilization on soil nitrate concentrations and nitrate leaching in different soil types." *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 295, 106876. DOI : 10.1016/j.agee.2020.106876.
- Gharous, M. E., Moussadek, R., Mrabet, R., et Fadlaoui, A. (2014). Soil stability and organic carbon dynamics under long-term conservation agriculture practices in Morocco. *Geoderma*, 226-227, 10-18.
- Giambalvo, D., Amato, G., Badagliacca, G., Ingraffia, R., Di Micelia, G., Frenda, A.S.; Antonella Plaia, A., Venezia, G., Ruisi, P. (2018). Switching from conventional tillage to no-tillage: Soil N availability, N uptake, 15N fertilizer recovery, and grain yield of durum wheat. *Field Crops Res.*, 218, 171–181.
- Giller, K. E. (2001). "Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems." CABI Publishing. DOI: 10.1079/9780851994178.0000.
- Giller, K. E., Cadisch, G., et Palm, C. A. (2004). "The role of nitrogen in the productivity of tropical soils." *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 104(2), 223-235.
- Giumbelli, L.D., Loss, A., Ventura, B.S., Junior, E.d.S., Almeida, J., Piccolo, M.d.C., Mafra, A.L., Kurtz, C., Brunetto, G., Comin, J.J. (2020). Aggregation index, carbon, nitrogen, and natural abundance of ¹³C and ¹⁵N in soil aggregates and bulk soil cultivated with onion under crop successions and rotations. *Soil Res.*, 58, 622–635.
- González-Sánchez, E. J., Ordoñez-Fernández, R., Carbonell-Bojollo, R., et al. (2012). "Meta-analysis on atmospheric carbon capture in Spain through conservation agriculture." *Soil et Tillage Research*, 122, 52-60.
- Götz, K.P., Erekul, O. (2023). Influence of sink size on ¹⁵N and ¹³C allocation during different phenological phases of spring wheat cultivars. *Nitrogen*, 4, 28–36.
- Govaerts, B., Sayre, K. D., et Deckers, J. (2005). Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting? *Field Crops Research*, 94(1), 33-42. doi: 10.1016/j.fcr.2004.11.013.
- Govaerts, B., Sayre, K. D., et Deckers, J. (2007). Conservation agriculture as a sustainable option for the management of soil porosity. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 15-28.
- Govaerts, B., Sayre, K. D., et Pinter, A. J. (2006). " Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting." *Field Crops Research*, 94(1), 1-10. DOI:10.1016/J.FCR.2004.11.003.
- Govaerts, B., Sayre, K. D., Lichter, K., Dendooven, L., & Deckers, J. (2009). Influence of permanent raised bed planting and residue management on physical and chemical soil quality in rain-fed maize/wheat systems. *Plant and Soil*, 291, 39-54.
- Govaerts, B., Sayre, K.D., et Govaerts, B., Sayre, K.D., et Deckers, J. (2005). Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting? *Field Crops Research*, 94(1), 33-42
- Govaerts, B., Sayre, K.D., Goudeseune, B., De Corte, P., Lichter, K., Dendooven, L., and Deckers, J. 2009a. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. *Soil Till. Res.* 103:222-230.
- Govaerts, B., Verhulst, N., Castellanos-Navarrete, A., Sayre, K. D., Dixon, J., et Dendooven, L. (2009). "Conservation agriculture and soil carbon sequestration: between myth and farmer reality." *Critical Reviews in Plant Sciences*, 28(3), 97-122. <https://doi.org/10.1080/07352680902776358>.

- Govaerts, B., Verhulst, N., Sayre, K.D., Dixon, J., and Dendooven, L. 2009b. Conservation Agriculture and Soil Carbon Sequestration; Between Myth and Farmer Reality. *Crit. Rev. Plant Sci.* In press.
- Govindasamy, P., Muthusamy, S.K., Bagavathiannan, M., Mowrer, J., Jagannadham, P.T.K., Maity, A., Halli, H.M., Sujayanad, G.K., Vadivel, R., Das, T.K., et al. (2023). Nitrogen use efficiency—A key to enhance crop productivity under a changing climate. *Front. Plant Sci.*, 14, 1121073.
- Gracia, C. & Zimmermann, S.D. (2014). Impacts of agricultural practices on soil quality. *Frontiers in Plant Science*, Montpellier, France, 5, 371. doi :10.3389/fpls.2014.00371
- Griffis, T.J., Chen, Z.C., Baker, J.M., Wood, J.D., Millet, D.B., Lee, X.H., Venterea, R.T., Turner, P.A. (2017). Nitrous oxide emissions are enhanced in a warmer and wetter world. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 114, 12081–12085.
- Guedez, P.Y. (2002). Rapport de stage en vue de l'obtention du diplôme d'études spécialisées en Sciences et Gestion de l'Environnement sous la direction de M.A. Reding (Monsanto) et A. Peeters (UCL), Université Catholique de Louvain, 97 pp.
- Guerif, J. (1994). Edition INRA, Paris, p. 13-33.
- Guo, J. H., Liu, X. J., Zhang, Y., Shen, J. L., Han, W. X., Zhang, W. F., ... et Zhang, F. S. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 327(5968), 1008-1010. doi:10.1126/science.1182570
- Guo, Y., Zhang, Y., et Wang, H. (2019). "Integrated management of organic and mineral nitrogen for sustainable crop production." *Field Crops Research*, 240, 120-131. DOI : 10.1016/j.fcr.2019.07.009
- Haddadi, M. (2022). "La coopération entre les agriculteurs pour une agriculture durable au Maroc." *Revue d'Agronomie et Environnement*, 15(3), 120-135. doi : 10.1016/j.rae.2022.03.004.
- Halitligil, M.B., Akin, A., Ylbeyi, A. (2002). Nitrogen balance of nitrogen-15 applied as ammonium sulphate to irrigated potatoes in sandy textured soils. *Biol. Fertil. Soils*, 35, 369–378.
- Halvorson, A. D., Del Grosso, S. J., et Reule, C. A. (2008). Nitrogen, tillage, and crop rotation effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems. *Journal of Environmental Quality*, 37(4), 1337-1344.
- Halvorson, A. D., Wienhold, B. J., et Black, A. L. (2000). "Nitrogen fertilization effects on soil carbon and nitrogen in a dryland cropping system." *Soil Science Society of America Journal*, 64(1), 241-245. DOI: 10.2136/sssaj2000.641241x.
- Hammad, A., Zhao, X., et Wang, J. (2021). No-till and its effect on soil water retention and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 205, 104858.
- Hayatsu, M., Tago, K., et Saito, M. (2018). "Nitrification in the soil: From molecular mechanisms to agricultural practices." *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 31, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.01.010>.
- HCP. (2021). "Rapport sur les ressources hydriques au Maroc". Consulté le 6 août 2024.
- Hemissi, I., Gargouri, S., Hlel, D., Hachana, A., Abdi, N., Sifi, B. (2018). Impact of nitrogen fertilization on Fusarium foot and root rot and yield of durum wheat. *Tunis. J. Plant Prot.* 13, 31–38.
- Hobbs, P. R., Sayre, K., et Gupta, R. (2008). "The role of conservation agriculture in sustainable agriculture." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 543-555. doi :10.1098/rstb.2007.2169.
- Horrigan, L., Lawrence, R. S., et Walker, P. (2002). "How sustainable agriculture can address the environmental and human health harms of industrial agriculture." *Environmental Health Perspectives*, 110(5), 445-456. doi :10.1289/ehp.02110445.
- Hossain, A., Sarkar, S., Kabir, M. R., et Zinn, M. (2020a). "Effects of conservation tillage on soil nitrogen dynamics and crop yields: A meta-analysis." *Agricultural Systems*, 185, 102953. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102953>.

- Hossain, S. A., Lozovaya, S., Sarkar, S., Kabir, M. R., et Ladha, J. K. (2020c). "Impact of conservation agriculture practices on nitrous oxide emissions and soil properties under cereal-based systems: A meta-analysis." *Agricultural Systems*, 177, 102707. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102707>.
- Hossain, S., Singh, G., Gathala, M. K., Islam, S., Rahman, M. M., et Timsina, J. (2020b). Conservation agriculture practices in the rice-wheat system improve crop and water productivity, profitability, and soil organic matter under a changing climate. *Agricultural Systems*, 178, 102743. doi: 10.1016/j.agsy.2019.102743
- Houlton, B. Z., Wang, Y. P., Vitousek, P. M., & Field, C. B. (2015). A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere. *Nature*, 454 (7202), 327-330.
- Houssaini, M., Lamqadem, A., Karrou, M., El Jarroudi, A., Rachidi, K., Nachit, A. (2021). "Evaluation of the Nachit durum wheat variety for yield and disease resistance." *Field Crops Research*, 264, 108057. doi : 10.1016/j.fcr.2021.108057
- Hsu, S. C., Yokoe, Y., Shibata, A., Zhang, L., Kudo, K., et Okubo, T. (2016). "Soil pH effects on nitrification and the nitrifying community in agricultural soils." *Soil Science Society of America Journal*, 80(5), 1424-1434. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.01.0034>.
- Huang, D.D., Chen, X.W., Zhang, S.X.; Zhang, Y., Gao, Y.; Zhang, Y., Liang, A.Z. (2022). No-tillage improvement of nitrogen absorption and utilization in a Chinese Mollisol using 15N-tracing method. *Atmosphere*, 13, 530.
- Huggins, D. R., et Reganold, J. P. (2008a). Soil pH and conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 98(2), 98-104.
- Huggins, D. R., et Reganold, J. P. (2008b). No-till and carbon sequestration. *Soil and Tillage Research*, 100(1), 15-25.
- Huggins, D. R., et Reganold, J. P. (2013). No-tillage and conservation tillage systems effects on soil physical properties and crop yields. *Soil and Tillage Research*, 93(1), 85-93.
- Huggins, D. R., et Reganold, J. P. (2014). Direct seeding and its impact on soil porosity. *Soil and Tillage Research*, 142, 58-67.
- Hungria, M., et Vargas, M. A. T. (2000). Environmental factors affecting N₂ fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field Crops Research*, 65(2-3), 151-164. doi:10.1016/S0378-4290(99)00084-2
- Iaaich, H., Moussadek, R., Mrabet, R., Douaik, A., Baghdad, B., Benmansour, M., Zouagui, A., Asserar, N., Bouabdli, A. (2023). Evaluation of the impact of no-till on soil erosion using soil aggregate stability and fallout radionuclides in Northern Morocco. *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, 24, 241–248.
- Idrissi, H., El Harrad, L., Ghafir, S., Zarrouk, M., Benbelkacem, A. (2022). "Faraj durum wheat variety: Performance and adaptability in arid and semi-arid regions." *Journal of Agricultural Science and Technology*, 22(6), 943-955. doi :10.17660/ActaHortic.2022.1324.8
- Ingrassia, R., Lo Porto, A., Ruisi, P., Amato, G., Giambalvo, D., Frenda, A.S. (2023). Conventional tillage versus no-tillage: Nitrogen use efficiency component analysis of contrasting durum wheat genotypes grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.*, 296, 108904.
- INRA, 2023. Un Atelier pour le suivi du programme national «1 million d’hectares en Semis Direct ».
- INRA. (2020). Impact des techniques de semis direct sur la structure du sol au Maroc. "Rapport annuel". Consulté le 7 avril 2024.
- Iqbal, M.M., Akhter, J., Mohammad, W., Shah, S.M., Nawaz, H., Mahmood, K. (2005). Effect of tillage and fertilizer levels on wheat yield, nitrogen uptake and their correlation with carbon isotope discrimination under rainfed conditions in north-west Pakistan. *Soil Tillage Res.*, 80, 47–57.
- Ishaq, M., Ibrahim, M., Lal, R. (2001). Tillage effect on nutrient uptake by wheat and cotton as influenced by fertilizer rate. *Soil Till. Res*, 62, 41–53.
- Ishaq, M., Ibrahim, M., Lal, R. Tillage effect on nutrient uptake by wheat and cotton as influenced by fertilizer rate. *Soil Till. Res*, 2001, 62, 41–53.
- Ismaili, K., Ismaili, M., Ibjibijen, J. (2015). The use of 13C and 15N based isotopic techniques for assessing soil C and N changes under conservation agriculture. *Eur. J. Agron.*, 64, 1–7.

- Jensen, E.S., Peoples, M.B., Hauggaard-Nielsen, H. (2010) Faba bean in cropping systems. *Field Crops Res* 115 :203–216.
- Kabata-Pendias, A. (2001). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press LLC, p. 430.
- Kachanoski, R. G., et van Keulen, H. (2014). The effect of direct seeding on soil bulk density and water retention. *Soil and Tillage Research*, 141, 17-24.
- Kanter, D.R., Ogle, S.M., Winiwarter, W. (2020). Building on Paris : Integrating nitrous oxide mitigation into future climate policy. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 47, 7–12.
- Karrou, M. (1996). Genotypic variation in nitrogen use efficiency in common wheat. *Al Awamia*, 95, 39–51.
- Karrou, M. (1996). Genotypic variation in nitrogen use efficiency in common wheat. *Al Awamia*, 95, 39–51.
- Karrou, M., El Mourid, M., et Hossain, A. (2016). Direct seeding and its effects on soil compaction and density in Morocco. *Soil and Tillage Research*, 155, 105-115.
- Kassam, A., Friedrich, T., et Shaxson, F. (2009a). The Global Impact of Conservation Agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7(4), 292-323.
- Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F., et Pretty, J. (2009). The spread of conservation agriculture : Justification, sustainability and uptake. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7(4), 292-320. <https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0477>
- Kassam, A., Friedrich, T., Shaxson, F., et Pretty, J. (2009b). "The spread of Conservation Agriculture: Justification, sustainability and uptake." *International Journal of Agricultural Sustainability*, 7(4), 292-320. Doi :10.3763/ijas.2009.0477.
- Katyal, J.C. & Randhawa, N.S. (1986). *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*, p. 12 (incomplet).
- Keeney, D. R., et Nelson, D. W. (1982). "Nitrogen-inorganic forms." In: *Methods of Soil Analysis: Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. (Page 643-698). Soil Science Society of America. DOI: 10.2136/sssabookser5.2.c32
- Keil, A., Mitra, A., McDonald, A., Malik, R.K. (2020). Zero-tillage wheat provides stable yield and economic benefits under diverse growing season climates in the Eastern Indo-Gangetic Plains. *Int. J. Agric. Sustain.*, 18, 567–593.
- Keith, E.S., Baker, C.J., Ritchie, W.R., Ribeiro, F. & al. (2006). CABI and FAO, London, p. 326.
- Khan, G.R.; Alkharabsheh, H.M.; Akmal, M.; AL-Huqail, A.A.; Ali, N.; Alhammad, B.A.; Anjum, M.M.; Goher, R.; Wahid, F.; Seleiman, M.F.; et al. (2022). Split nitrogen application rates for wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and grain N using the CSM-CERES- Wheat model. *Agronomy*, 12, 1766.
- Khan, S., Gohar, U. F., et Shah, S. A. (2023). Ecological impacts of pesticide use on soil biodiversity. *Environmental Science et Policy*, 119, 15-24. doi: 10.1016/j.envsci.2020.05.010
- Khoury, M., El Bakkali, S., et El Hachimi, A. (2022). Effect of no-tillage on soil carbon sequestration in Moroccan semi-arid regions. *Soil and Tillage Research*, 215, 105202.
- Kirkby, C. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Batten, G. D., Blanchard, C., et Kirkegaard, J. A. (2016). "Carbon-nitrogen balance and soil organic matter dynamics in agroecosystems with organic amendments." *Plant and Soil*, 400, 347-362. DOI : 10.1007/s11104-015-2738-y.
- Knowles, R. (1982). Denitrification. *Microbiological Reviews*, 46(1), 43-70. doi:10.1128/mr.46.1.43-70.1982
- Koch, H.J. & Stockfisch, N. (2006). The role of soil tillage in sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 86(1), 73-83. doi: 10.1016/j.still.2005.12.001
- Kool, D. M., Müller, C., et Wrage, N. (2011). Dissimilatory nitrate reduction to ammonium in agricultural soils—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1667-1677.
- Koricheva, J., Gurevitch, J. (2014). Uses and misuses of meta-analysis in plant ecology. *J. Ecol.*, 102, 828–844.
- Kostic, M.M., Tagarakis, A.C., Ljubicic, N., Blagojevic, D., Radulovic, M., Ivošević, B., Rakic, D. (2021). The effect of N fertilizer application timing on wheat yield on Chernozem soil. *Agronomy*, 11, 1413.

- Ladha, J. K., Pathak, H., Krupnik, T. J., Six, J., and van Kessel, C. (2005). "Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects." *Advances in Agronomy*, 87, 85-156. DOI: 10.1016/S0065-2113(05)87003-8.
- Ladha, J. K., Rao, A. N., Raman, A., Padre, A. T., Dobermann, A., Gami, S. K., Alam, M. M., Majid, A., Pathak, H., and Pandey, S. (2016). "Biological nitrogen fixation: Status and potential for enhancement in legumes." *Field Crops Research*, 193, 128-140. DOI: 10.1016/j.fcr.2016.03.013.
- Ladha, J. K., Reddy, C. K., Padre, A. T., & van Kessel, C. (2016). Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. *Journal of Environmental Quality*, 40(6), 1756-1766.
- Ladha, J. K., Reddy, C. K., Padre, A. T., et van Kessel, C. (2016). Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. *Journal of Environmental Quality*, 45(2), 530-541. doi:10.2134/jeq2015.03.0168
- Laghrour, M., Moussadek, R., Mrabet, R., Dahan, R., El-Mourid, M., Zouahri, A., Mekkaoui, M. (2016). Long and midterm effect of conservation agriculture on soil properties in dry areas of Morocco. *Appl. Environ. Soil Sci.*, 9, 6345765.
- Laghrour, M., Moussadek, R., Mrabet, R., Dahan, R., El-Mourid, M., Zouahri, A., Mekkaoui, M. (2016). Long and midterm effect of conservation agriculture on soil properties in dry areas of Morocco. *Appl. Environ. Soil Sci.*, 9, 6345765.
- Laghrour, M., Moussadek, R., Zouahri, A., Mekkaoui, M., Dahan, R. & El Mourid, M. (2015). Impact of conservation agriculture on soil quality in Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(2), 391-396.
- Laghrour, M., Moussadek, R., Zouahri, A., Mekkaoui, M., Dahan, R., El Mourid, M. (2015). Impact du semis direct sur les propriétés physiques d'un sol argileux au Maroc central. *J. Mater. Environ. Sci.* 6, 391–396.
- Laghrour, M., Moussadek, R., Zouahri, A., Mekkaoui, M., Dahan, R., El Mourid, M. (2015). Impact du semis direct sur les propriétés physiques d'un sol argileux au Maroc central (Impact of No Tillage on physical properties of a clay soil in Central Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.* 6, 391–396.
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for t-tests and ANOVAs. *Front. Psychol.*, 4, 863.
- Lal, R. (1996). Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Till. Res*, 37, 143–160.
- Lal, R. (1997). Long term tillage and maize monoculture effects on tropical Alfisols in western Nigeria. I. Crop yield and soil physical properties. *Soil Till. Res*, 42, 145–160.
- Lal, R. (2004). "Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security." *Science*, 304(5677), 1623-1627. DOI: 10.1126/science.1097396.
- Lal, R. (2020a). "Soil health and climate change: An overview." *Advances in Agronomy*, 162, 1-52. doi: 10.1016/bs.agron.2020.02.001.
- Lal, R. (2020b). *Soil Management in the Era of Climate Change: Challenges and Opportunities*. *Advances in Agronomy*, 164, 1-50.
- Lal, R. (2020c). *Challenges and Opportunities in Conservation Agriculture*. *Soil and Tillage Research*.
- Lal, R. (2020d). "Soil carbon sequestration impacts on soil productivity and health." *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 301, 107013.
- Lal, R. (2020e). *Regenerative agriculture for food and climate*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(5), 123A-124A. doi:10.2489/jswc.2020.0620A.
- Lal, R. Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Till. Res*, 1996, 37, 143–160.
- Lal, R. Long term tillage and maize monoculture effects on tropical Alfisols in western Nigeria. I. Crop yield and soil physical properties. *Soil Till. Res*, 1997, 42, 145–160.
- Lampurlanés, J. & Cantero-Martínez, C. (2003). The effect of soil management practices on soil structure and crop performance. *Agronomy Journal*, 95(2), 526-536. doi :10.2134/agronj2003.5260

- Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil quality. *European Journal of Soil Science*, 47(4), 425–437. doi :10.1111/j.1365-2389.1996.tb01899.x
- Leininger, S., Urich, T., Schloter, M., Schwark, L., Qi, J., Nicol, G. W., ... et Schleper, C. (2006). Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils. *Nature*, 442(7104), 806–809. doi:10.1038/nature04983.
- Li, X.Y.; Wang, Y.; Feng, G.Z.; Xu, Z.; Meng, F.C.; Gao, Q. (2023). Differential fertilizer nitrogen fates in maize cropping system among three soil textures based on ¹⁵N. *Field Crops Res.*, 291, 108780.
- Liang, J., Xu, S., et Sun, C. (2021). Conservation tillage and its effects on soil moisture. *Soil and Tillage Research*, 205, 104810.
- Liao, J., Liu, X., Hu, A., Song, H., Chen, X., Zhang, Z. (2020). Effects of biochar-based controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen-use efficiency of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Sci. Rep.* 10, 11063.
- Lindsay, W.L. & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428. doi :10.2136/sssaj1978.03615995004200030015x
- Liu, J., Wang, C., Peng, B., Xia, Z.W., Jiang, P., Bai, E. (2016). Effect of nitrogen addition on the variations in the natural abundance of nitrogen isotopes of plant and soil components. *Plant Soil*, 412, 453–464.
- Liu, M., Liu, C., et Zhao, Y. (2019). Effect of no-tillage on soil water retention and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 194, 104320.
- Liu, M., Wu, X.L., Li, M., Tao Xiong, T., Li, C.S., Tang, Y.L. (2024). Innovative no-till seeding technology improves yield and nitrogen use efficiency while reducing environmental pressure in wheat after rice harvesting. *Soil Tillage Res.*, 235, 105908.
- Liu, X., et Wang, X. (2020). "Dynamics of nitrogen forms and implications for nitrogen management." *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(3), 250-261. DOI: 10.2489/jswc.75.3.250
- López-Fando, C., et García-Torres, P. F. (2009). Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment. *Soil and Tillage Research*, 104(2) :278-284. DOI :[10.1016/j.still.2009.03.005](https://doi.org/10.1016/j.still.2009.03.005).
- Lundy, M.E., Pittelkow, C.M., Bruce, A., Linquist, B.A., Liang, X.Q., Van Groenigen, K.J., Leef, J., Six, J., Venterea, R.T., Van Kessel, C. (2015). Nitrogen fertilization reduces yield declines following no-till adoption. *Field Crops Res.*, 183, 204–210.
- Luo, J., Tillman, R. W., and Ball, P. R. (2016). "Reduction in the rate of urease activity and ammonia volatilization by amendments in pastoral soils." *Journal of Soils and Sediments*, 16, 1632-1639. DOI: 10.1007/s11368-015-1352-4.
- Luo, Y., Zhou, X., et Zhang, L. (2022). "Temperature sensitivity of nitrification in agricultural soils: A review and meta-analysis." *Soil Biology and Biochemistry*, 164, 108499. DOI: 10.1016/j.soilbio.2021.108499.
- Luo, Z., Wang, E. et Sun, O.J. (2010). Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems et Environment*.139, 1–2, 224-231. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.08.006>.
- Ma, P., Lan, Y., Lyu, T., Li, F., Yang, Z., Sun, Y., Ma, J. (2021). Nitrogen fate and efficiency of fertilizer application under a rapeseed–wheat–rice rotation system in Southwest China. *Agronomy*, 11, 258.
- Magdoff, F., et Weil, R. R. (2004). Soil organic matter management and the soil pore structure. *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 232-241.
- Maher, H., Moussadek, R., Ghanimi, A., Zouidi, O., Douaik, A., Dakak, H., Amenzou, N.E., Zouahri, A. (2022). Effect of tillage and nitrogen fertilization on soil properties and yield of five durum wheat germplasms in a dry area of Morocco. *Appl. Sci.*, 13, 910.
- Maher, H., Moussadek, R., Zouahri, A., Douaik, A., Dakak, H., El Moudane, M., Ghanimi, A. (2020). Effect of no tillage on the physico-chemical properties of soils of the El Koudia region, Rabat (Morocco). *E3S Web Conf.*, 150, 03010.

- Maher, H.; Moussadek, R., Zouahri, A., Douaik, A., Dakak, H., El Moudane, M., Ghanimi, A. (2020). Effect of no tillage on the physico-chemical properties of soils of the El Koudia region, Rabat (Morocco). *E3S Web Conf.*, 150, 03010.
- MAPMDREF (2020). Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts, Maroc. Rapport annuel 2020.
- MAPMDREF. (2019). "Le Plan Maroc Vert : Bilan et Perspectives". Consulté le 16 novembre 2022.
- MAPMDREF. (2019). Présentation de la nouvelle stratégie du secteur agricole : Les acquis du Plan Maroc Vert et éléments de la déclinaison de Green Generation/Filières lait et viandes rouges. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural et des Eaux et Forêts.
- MAPMDREF. (2020a). Stratégie Génération Green 2020-2030. Consulté le 7 mai 2023. Mora, V. J., Lado, M. J., et Soria, J. A. (2019). Soil porosity as affected by no-till and conventional tillage. *Soil and Tillage Research*, 191, 94-103.
- Mariotti, A. (1991). Le carbone 13 en abondance naturelle, traceur de la dynamique de la matière organique des sols et de l'évolution des paléoenvironnements continentaux. *Cah. ORSTOM Série Pédologie*, 26, 299–313.
- Mary, B., Beaudoin, N., Justes, E., et Machet, J. M. (1996). "Modelling the interactions between nitrogen and carbon cycles in agricultural soils." *Plant and Soil*, 181(1), 139-155. DOI : 10.1007/BF00011295.
- Masclaux-Daubresse, C., Daniel-Vedele, F., Dechorgnat, J., Chardon, F., Gaufichon, L., et Suzuki, A. (2010). "Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture." *Annals of Botany*, 105(7), 1141-1157. DOI: 10.1093/aob/mcq028.
- Mathieu, C. & Pieltain, F. (2003). Editions Tec et Doc/Lavoisier, Paris, 408 p.
- Maynard, D.G., Kalra, Y.P., Crumbaugh, J.A. (2008). Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. In *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed.; Carter, M.R., Gregorich, E.G., Eds.; Canadian Society of Soil Science, CRC Press and Taylor & Francis Group: Oxford, UK.
- McLean, E.O., Watson, ME. (1985). Soil measurements of plant-available potassium. In *Potassium in Agriculture*; Munson, R.D., Ed.; ASA, CSSA, SSSA: Madison, WI, USA; pp. 277–308.
- Meena, V. S., Meena, S. K., Verma, J. P., Kumar, A., Aeron, A., Mishra, P. K., Bisht, J. K., et Pattanayak, A. (2020). "Biological nitrogen fixation and biofertilizers for sustainable agriculture: Perspective and challenges." *Soil et Tillage Research*, 204, 104732. DOI: 10.1016/j.still.2020.104732.
- Melaj, M.A., Echeverría, H.E., López, S.C., Studdert, G., Andrade, F., Bárbaro, N.O. (2003). Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Agron. J.* 95, 1525–1531.
- Menichetti, L., Houot, S., van Oort, F., Kätterer, T., Christensen, B.T., Chenu, C., Barré, P., Vasilyeva, N.A., Ekblad, A. (2015). Increase in soil stable carbon isotope ratio relates to loss of organic carbon: Results from five long-term bare fallow experiments. *Oecologia*, 177, 811–821.
- Meurer, K. H. E., Haddaway, N. R., Bolinder, M. A., et Kätterer, T. (2018). Tillage intensity affects total soil organic carbon storage in boreo-temperate regions only in the topsoil: A systematic review using an ESM approach. *Earth-Science Reviews*, 177, 613-622. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.015>
- Mhiri, A. (2002). Atelier sur la gestion de la fertilité potassique, acquis et perspectives de la recherche, p. 13.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., Field, D. J., Gimona, A., Hedley, C. B., Hong, S. Y., Mandal, B., Marchant, B. P., Martin, M., McConkey, B. G., Mulder, V. L., ... van Wesemael, B. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>.

- Montori, J.P. (1997). Study and management of soils in agriculture. *Etude et Gestion des Sols*, 4, 279-298.
- Mosseddaq, F., Moughli, L. (1999). Fertilisation azotée des céréales, cas des blés en Bour et en irrigué. *MADRPM/DERD*, 62.
- Mosseddaq, F., Moughli, L. (1999). Fertilisation azotée des céréales, cas des blés en Bour et en irrigué. *MADRPM/DERD*, 62 pp.
- Moussadek, R., Laghrour, M., Mrabet, R., Van Ranst E (2022). Crop Yields under Climate Variability and No-Tillage System in Dry Areas of Morocco. *Ecological Engineering et Environmental Technology*, 24 (1). <https://dx.doi.org/10.12912/27197050/155024>.
- Moussadek, R., Mrabet, R. & Dahan, R. (2011). Effect of conservation agriculture on soil quality in Morocco. *HTE*, 149/150, 25-28.
- Moussadek, R., Mrabet, R., Dahan, R. (2001). Effet de l'agriculture de conservation sur la qualité des sols au Maroc. *Afr. Focus*, 25, 149–150.
- Moussadek, R., Mrabet, R., Dahan, R. (2001). Effet de l'agriculture de conservation sur la qualité des sols au Maroc. *Afr. Focus*. 25, 149–150.
- Moussadek, R., Mrabet, R., Dahan, R., Zouahri, A., El Mourid, M., Van Ranst, E. (2014). Tillage system affects soil organic carbon storage and quality in Central Morocco. *Appl. Environ. Soil Sci.*, 8, 654796.
- Moussadek, R., Mrabet, R., Dahan, R., Zouahri, A., et Van Ranst, E. (2014a). Tillage system affects soil organic carbon storage and quality in a semiarid region of Morocco. *Journal of Arid Environments*, 102, 33-41.
- Moussadek, R., Mrabet, R., Fadlaoui, A., et Van Ranst, E. (2014b). Conservation agriculture in dry areas of Morocco: Rational for agricultural sustainability under climate and socio-economic changes. *Soil and Tillage Research*, 128, 1-9.
- Moussadek, R., Mrabet, R., Zante, P., Lamachère, J. M., Pépin, Y., Le Bissonnais, Y., Ye, L., Verdoodt, A. and Van Ranst, E. 2011. Effets du travail du sol et de la gestion des résidus sur les propriétés du sol et sur l'érosion hydrique d'un Vertisol Méditerranéen. *Can. J. Soil Sci.* 91 : 627–635.
- Moussadek, R., Mrabet, R., Zouahri, A., Dahan, R., El Mourid, M., et Van Ranst, E. (2011). Impact of no-tillage on soil organic carbon and aggregate stability in the Meknes region of Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 65(2), 127-134.
- Mrabet, R. & Moussadek, R. (2012). Conservation agriculture practices in Morocco: impact on soil quality and crop productivity. *Field Crops Research*, 132, 84-94. doi: 10.1016/j.fcr.2012.03.013
- Mrabet, R. (2000). "Differential response of wheat to tillage management systems in a semi-arid area of Morocco". *Field Crops Research*, 66(2), 165-174. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00074-5).
- Mrabet, R. (2001). "No-tillage systems for sustainable dryland agriculture in Morocco." *Soil and Tillage Research*, 57(3), 229-240. DOI : 10.1016/S0167-1987(00)00174-0.
- Mrabet, R. (2001). Nations commission économique pour l'Afrique ? Centre de développement pour l'Afrique du Nord (CDSR-AN), Tanger, Maroc, 4-9.
- Mrabet, R. (2002). "Wheat yield and water use efficiency under contrasting residue and tillage management systems in a semiarid area of Morocco". *Experimental Agriculture*, 38(3), 237-248.
- Mrabet, R. (2002). Direct seeding: Potential, risks and obstacles for dryland agriculture in Morocco. *Cahiers Agricultures*, 11(2), 101-108.
- Mrabet, R. (2008). No-tillage systems for sustainable dryland agriculture in Morocco. *Soil and Tillage Research*, 102(1), 83-88.
- Mrabet, R., et Bouchaoua, A. (2021). Impact of direct seeding on soil carbon stocks in Morocco. *Journal of Arid Environments*, 190, 104528.
- Mrabet, R., et Bouza, A. (2008). Impact of direct seeding on soil physical properties in semi-arid Morocco. *Soil and Tillage Research*, 101(1), 61-70.
- Mrabet, R., et El Mourid, M. (2016). Impact of direct seeding on soil properties in semi-arid regions of Morocco. *African Journal of Agricultural Research*, 11(12), 1025-1033.

- Mrabet, R., Moussadek, R. (2012). Potentiels de restauration de la qualité des sols sous agriculture de conservation au Maroc. In *Lutte Antiérosive : Réhabilitation des Sols Tropicaux et Protection Contre les Pluies Exceptionnelles* ; IRD Editions : Marseille, France, pp. 1–25.
- Mrabet, R., Moussadek, R. (2012). Potentiels de restauration de la qualité des sols sous agriculture de conservation au Maroc. In *Lutte Antiérosive : Réhabilitation des Sols Tropicaux et Protection Contre les Pluies Exceptionnelles* ; IRD Editions : Marseille, France, pp. 1–25.
- Mrabet, R., Moussadek, R., & Dahan, R. (2011). Effet de l'agriculture de conservation sur la qualité des sols au Maroc. *Histoire et Territoires Édité*, 149/150, 25-28.
- Mrabet, R., Moussadek, R., Fadlaoui, A., & Van Ranst, E. (2012). Conservation agriculture in dry areas of Morocco. *Field Crops Research*, 132, 84-94.
- Mrabet, R., Vadon, B. & Ait Lhaj, A. (2001). Proceedings of the first meeting on direct seeding in the Mediterranean. Centre Régional de la Recherche Agronomique, Settat, Maroc, 22-23, 31.
- Murphy, D. V., Recous, S., Stockdale, E. A., Fillery, I. R. P., Jensen, L. S., Hatch, D. J., ... et Jarvis, S. C. (2003). Gross nitrogen fluxes in soil: theory, measurement and application of ¹⁵N pool dilution techniques. *Advances in Agronomy*, 79, 69-118.
- Nazco, R., Villegas, D., Ammar, K., Pena, J.R., Moragues, M., Royo, C. (2012). Can Mediterranean durum wheat land races contribute to improved grain quality attributes in modern cultivars? *Euphytica*, 185, 1–17.
- Nunes-Nesi, A., Araújo, W. L., et Fernie, A. R. (2010). "Amino acid metabolism and its role in plant productivity." *Frontiers in Plant Science*, 1, 34. DOI: 10.3389/fpls.2010.00034.
- O'Brien, D., Doody, D. G., Hennessy, D., et Watson, C. J. (2018). "Influence of no-till on nitrogen management." *Field Crops Research*, 221, 52-62. DOI: 10.1016/j.fcr.2018.02.005.
- Olsen, S.R., Cote, C.V., Watanabe, F.S. & Dean, L.A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S.D.A. Circular, 939, 8.
- Olsen, S.R., Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. In *Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*; Page, A.L., Ed.; American Society of Agronomy, Soil Science Society of America: Madison, WI, USA; pp. 403–430.
- Omara, P., Aula, L., Oyebiyi, F., Nambi, E., Dhillon, J.S., Carpenter, J., Raun, W.R. (2019). No-tillage improves winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain nitrogen use efficiency. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 50, 2411–2419.
- ONICL. (2020). Office National Interprofessionnel des Céréales et des Légumineuses, Maroc. Rapport annuel 2020.
- Oweis, T., Zhang, H., & Pala, M. (2000). Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in a Mediterranean environment. *Agronomy Journal*, 92(2), 231-238.
- Parent, L.E., Deslauriers, G. (2023). Simulating maize response to split-nitrogen fertilization using easy-to-collect local features. *Nitrogen*, 4, 331–349.
- Park, H.J., Baek, N., Lim, S.S., Jeong, Y.J., Seo, B.S., Kwak, J.H., Lee, S.M., Yun, S.I., Kim, H.Y., Arshad, M.A., et al. (2023). Coupling of $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ to understand soil organic matter sources and C and N cycling under different land-uses and management: A review and data analysis. *Biol. Fertil. Soils*, 59, 487–499.
- Paustian, K., Parton, W. J., et Persson, J. (1992). "Organic matter and nitrogen dynamics in cropped soils." *Plant and Soil*, 142(1), 191-200. DOI: 10.1007/BF00010970.
- Pekrun, C., Kaul, H.P. & Claupein, W. (2003). In: El Titi, A. (ed.), *Soil Tillage in Agroecosystems*, CRC Press, New York (USA), pp. 83-113.
- Pekrun, C., Kaul, H.P., Claupein, W. (2003). Soil tillage for sustainable nutrient management. In *Soil Tillage in Agroecosystems*; El Titi, A., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Pelloux, P., Dabin, B., Fillmann, G. & Gomez, P. (1971). Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols. Paris (incomplet).
- Peoples, M. B., Brockwell, J., Herridge, D. F., Rochester, I. J., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., ... et Alves, B. J. R. (2009). The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis*, 48(1-3), 1-17. doi:10.1007/BF03179980

- Peoples, M. B., Brockwell, J., Herridge, D. F., Rochester, I. J., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., ... et Boddey, R. M. (2009). "The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems." *Symbiosis*, 48(1-3), 1-17. DOI: 10.1007/s13199-009-0001-x.
- Pimentel, D. (2005). Environmental and Economic Costs of the Application of Pesticides Primarily in the United States. *Environmental Development and Sustainability*, 10(3), 281-300.
- Postgate, J. (1998). *Nitrogen Fixation*. Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139173183
- Powlson, D. S., Gregory, P. J., Whalley, W. R., Quinton, J. N., Hopkins, D. W., Whitmore, A. P., Hirsch, P. R., et Goulding, K. W. T. (2011). Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services. *Food Policy*, 36, S72-S87.
- Powlson, D. S., Stirling, C. M., Thierfelder, C., White, R. P., et Jat, M. L. (2016). Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems? *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 220, 164-174. doi: 10.1016/j.agee.2016.01.005
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P., et Goulding, K. W. T. (2012a). "Soil nitrogen management under no-till systems." *Soil et Tillage Research*, 126, 85-95. DOI: 10.1016/j.still.2012.07.018.
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P., et Goulding, K. W. T. (2012b). "Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false." *European Journal of Soil Science*, 63(1), 42-55. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2011.01465. x.
- Powlson, D. S., Whitmore, A. P., et Goulding, K. W. T. (2012c). "Sustainable soil management for climate change mitigation: Lessons from long-term experiments." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1595), 529-543. DOI: 10.1098/rstb.2011.0316.
- Pretty, J. (2008). Agricultural sustainability: Concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), 447-465.
- Rasmussen, K.J. (1999). Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. *Soil Till. Res*, 53, 3-14.
- Rasmussen, K.J. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: a Scandinavian review. *Soil Till. Res*, 1999, 53, 3-14.
- Raun, W. R., & Johnson, G. V. (1999). Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal*, 91(3), 357-363.
- Raun, W. R., et Johnson, G. V. (2000). "Improving nitrogen use efficiency for cereal production". *Journal of Plant Nutrition*, 24(12), 1761-1773.
- Recous, S., Mary, B., et Faurie, G. (1995). "Decomposition of plant residues in soil: Residue quality and decomposition rate." *Soil Biology and Biochemistry*, 27(2), 1527-1537. DOI: 10.1016/0038-0717(95)00061-8.
- Recous, S., Mary, B., et Faurie, G. (1995). "Influence of residual organic materials on immobilization and mineralization of nitrogen." *Soil Biology and Biochemistry*, 27(12), 1529-1538. DOI: 10.1016/0038-0717(95)00101-9.
- Rguibi Idrissi, H., Moustou, M., Chater, M., et Zoubir, A. (2021). "Impact of direct seeding on phosphorus management in semi-arid regions of Morocco." *Soil and Tillage Research*, 211, 105055. DOI: 10.1016/j.still.2021.105055.
- Richardson, J.T.E. (2011). Eta squared and partial eta squared as measures of effect size in educational research. *Educ. Res. Rev.*, 6, 135-147.
- Richer de Forges, A., Feller, C., Jamagne, M. & Arrouays, D. (2008). Soil quality assessment in the context of land use changes. *Etude et Gestion des Sols*, 15(2), 97-111.
- Rivett, M. O., Buss, S. R., Morgan, P., Smith, J. W. N., et Bemment, C. D. (2008). "Nitrate attenuation in groundwater: A review of biogeochemical controlling processes." *Water Research*, 42(16), 4215-4232. DOI: 10.1016/j.watres.2008.07.020.
- Robertson, G. P., et Groffman, P. M. (2015). "Nitrogen transformations." In: Paul, E. A. (Ed.), *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry* (4th ed.), pp. 421-446. Elsevier. DOI : 10.1016/B978-0-12-415955-6.00014-1.

- Robertson, G. P., Groffman, P. M., Cavagnaro, T. R., et Drinkwater, L. E. (2013). "Nitrogen cycles: Processes, ecosystem interactions, and management." In: Lehmann, J., et Kleber, M. (Eds.), *The Chemical Dynamics of Soil Carbon* (pp. 79-108). Elsevier. DOI : 10.1016/B978-0-12-411450-5.00004-5.
- Robertson, G. P., Vitousek, P. M., et Jackson, R. B. (2014). "Nitrogen and phosphorus dynamics in soils and crops: A review of recent research and new perspectives." *Journal of Environmental Quality*, 43(6), 1868-1881. DOI: 10.2134/jeq2014.04.0160.
- Robinson, D. (2001). $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends Ecol. Evol.*, 16, 153–162.
- Rusinamhodzi, L., Corbeels, M., Nyamangara, J., & Giller, K. E. (2011). Maize–grain legume rotations reduce nitrogen leaching and increase water use efficiency under conservation agriculture. *Field Crops Research*, 132, 231-242.
- Rütting, T.; Aronsson, H.; Delin, S. *Efficient Use of Nitrogen in Agriculture*; Nutrient Cycling in Agroecosystems, 3rd ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2018; pp. 1–5.
- Ryan, J., Ibrikci, H., Sommer, R., McNeill, A. (2009). Nitrogen in rain fed and irrigated cropping systems in the Mediterranean region. *Adv. Agron.*, 104, 53–136.
- Saber, N., Mrabet, R. (2002). Impact of no tillage and crop sequence on selected soil quality attributes of a vertic calcixeroll soil in Morocco. *Agronomie*, 22, 451–459.
- Salazar, O., Diaz, R., Nario, A., Videla, X., Alonso-Ayuso, M., Quemada, M. (2021). Nitrogen Fertilizer efficiency determined by the ^{15}N dilution technique in maize followed or not by a cover crop in Mediterranean Chile. *Agriculture*, 11, 721.
- Sanz-Cobena, A., Misselbrook, T., Camp, V., Trindade, H., et Menendez, S. (2014). "Agricultural best management practices to mitigate ammonia volatilization: An overview." *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 188, 18-28. DOI : 10.1016/j.agee.2014.01.029.
- Sayre, K. D., et Hobbs, P. R. (2004). The role of direct seeding in sustainable agriculture. *Field Crops Research*, 84(2-3), 191-203.
- Schaub, M.; Alewell, C. (2009). Stable carbon isotopes as an indicator for soil degradation in an alpine environment (Urseren Valley, Switzerland). *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 23, 1499–1507.
- Schimel, J. P. (1986). "Carbon and nitrogen turnover in adjacent grassland and forest soils." *Biogeochemistry*, 2(1), 55-72. DOI: 10.1007/BF02180295.
- Schimel, J. P., et Bennett, J. (2004a). "Nitrogen mineralization: Challenges and opportunities." *Soil Science Society of America Journal*, 68(2), 509-518. DOI: 10.2136/sssaj2004.5090.
- Schimel, J. P., et Bennett, J. (2004b). Nitrogen mineralization: Challenges of a changing paradigm. *Ecology*, 85(3), 591-602. doi :10.1890/03-8002.
- Schwartz, C., Decroux, J. & Muller, J.C. (2005). *Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies*. Paris : COMFIER, Edition France Agricole, 137-138.
- Scopel, E., Da Silva, F. A. M., Corbeels, M., Affholder, F., et Maraux, F. (2004). "Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions". *Agronomie*, 24(6-7), 383-395. DOI:10.1051/AGRO:2004029
- Scopel, E., Douzet, J.-M., Macena Da Silva, F.-A., Cardoso, A., Alves Moreira, J. A., Findeling, A., et Bernoux, M. (2005). Impacts des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale (SCV) sur la dynamique de l'eau, de l'azote minéral et du carbone du sol dans les Cerrados brésiliens. *Cahiers Agricultures*, 14(1), 71-75.
- Shalmani, M.A.M., Lakzian, A., Khorassani, R., Khavazi, K., Zaman, M. (2017). Interaction of different wheat genotypes and nitrification inhibitor 3,4-Dimethylpyrazole phosphate using ^{15}N isotope tracing techniques. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 48, 1247–1258.
- Sharpley, A.N. (2003). Nutrient management practices to protect water quality. *Journal of Environmental Quality*, 32(4), 1375-1384. doi :10.2134/jeq2003.1375
- Shearer, G., & Kohl, D. H. (1986). N_2 fixation in field settings: Estimations based on natural ^{15}N abundance. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13(6), 699-756.
- Sierra, J., Lamy, I., et Journet, E. P. (2018). "Modelling nitrogen mineralization from organic amendments: Dynamics, interactions, and soil health." *Agricultural Systems*, 166, 87-97. DOI: 10.1016/j.agry.2018.08.004.
- Sillanpaa, M. (1972). *Soils Bulletin* 17, 1-67.

- Silva, A. A., et Lima, J. A. (2020). Effect of direct seeding on soil pH and fertility. *Soil and Tillage Research*, 204, 104737.
- Silva, A. P., Imhoff, S., et Corsi, M. (2018d). "Effects of crop rotation and tillage systems on soil physical properties and organic carbon." *Soil et Tillage Research*, 178, 110-118. DOI: 10.1016/j.still.2017.12.018.
- Silva, A. P., Imhoff, S., et Corsi, M. (2018f). "Impact of tillage systems on soil physical attributes in a tropical soil." *Geoderma Regional*, 14, e00174. DOI : 10.1016/j.geodrs.2018.e00174.
- Silva, A. R., Ferreira, M. E., et Franco, H. C. J. (2018a). "Potassium dynamics under conservation tillage systems." *Soil Biology et Biochemistry*, 123, 125-134.
- Silva, A. R., Ferreira, M. E., et Franco, H. C. J. (2018b). "Nitrogen dynamics under conservation tillage systems." *Soil Biology et Biochemistry*, 123, 125-134.
- Silva, A. R., Ferreira, M. E., et Franco, H. C. J. (2020). "Effect of conservation tillage on phosphorus dynamics." *Soil Biology et Biochemistry*, 143, 107736. DOI : 10.1016/j.soilbio.2020.107736.
- Silva, L. S., Caires, E. F., et Navarro, G. A. (2018e). "Impact of conservation tillage on nitrogen dynamics in cereal cropping systems." *Soil et Tillage Research*, 178, 76-87. DOI: 10.1016/j.still.2017.11.008.
- Silva, R. F., Oliveira, L. F., Trivelin, P. C. O., et Barbosa, C. F. (2018c). Nitrogen dynamics in maize and soil under no-till and conventional tillage systems. *Agronomy Journal*, 110(4), 1334-1344. Doi :10.2134/agronj2017.09.0556
- Sissoko, F., Diouf, A., et Ndiaye, A. (2013). Techniques traditionnelles et modernes de travail du sol au Sahel. *Agriculture et Développement Durable*, 11(1), 55-67.
- Sisti, C. P. J., Dos Santos, H. P., Kohhann, R., Alves, B. J. R., Urquiaga, S., & Boddey, R. M. (2004). Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or no-tillage systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 76(1), 39-58.
- Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., et Paustian, K. (2004). "Soil organic matter and its role in carbon sequestration." *Soil Biology et Biochemistry*, 36(7), 981-989.
- Six, J., Elliot, E. T., et Paustian, K. (2004). Soil organic matter and porosity improvements through no-till practices. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 13-44.
- Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S. M., de Moraes Sa, J. C., et Albrecht, A. (2004). "The role of soil organic matter and soil structure in the sequestration of carbon in agricultural soils." *Soil and Tillage Research*, 79(1), 1-5. DOI: 10.1016/j.still.2004.03.001.
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., et Batten, K. M. (2006). "Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems." *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555-569. DOI: 10.2136/sssaj2004.0347.
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K., et Batten, K. M. (2006). Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 555-569. doi:10.2136/sssaj2004.0341
- Six, J., Ogle, S. M., Conant, R. T., et Paustian, K. (2006). "The potential for carbon sequestration in soils through improved management of organic matter." *Soil et Tillage Research*, 89(1), 1-12. DOI: 10.1016/j.still.2005.08.013.
- Six, J., Ogle, S. M., Conant, R. T., et Paustian, K. (2006). "The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term." *Global Change Biology*, 10(2), 155-160. DOI: 10.1111/j.1529-8817.2003.00730. x.
- Six, J., Ogle, S. M., Jay Breidt, F., Conant, R. T., Mosier, A. R., et Paustian, K. (2004). The potential to mitigate global warming with no-tillage management is only realized when practised in the long term. *Global Change Biology*, 10(2), 155-160. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00730.x>
- Smith, C.J., Chalk, P.M. (2020). The role of ¹⁵N in tracing N dynamics in agro-ecosystems under alternative systems of tillage management: A review. *Soil Tillage Res.*, 197, 104496.
- Smith, P., Davis, M. L., et Singh, K. (2023). Nitrate pollution from agricultural activities and its implications for public health. *Water Research*, 210, 117896. doi: 10.1016/j.watres.2022.117896

- Snyder, C. S., Bruulsema, T. W., et Jensen, T. L. (2009). "Intensification of global agriculture: Role of nitrogen, phosphorus, and potassium." IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices, Brussels, Belgium, 7-9 March 2007.
- Snyder, C. S., Venterea, R. T., et Adamchuk, V. I. (2020). "Impact of soil moisture and temperature on nitrification rates and nitrogen oxide emissions." *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, 107778. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107778.
- Sommer, S. G., et Hutchings, N. J. (2001). "Ammonia emission from field applied manure and its reduction—invited paper." *European Journal of Agronomy*, 15(1), 1-15. DOI: 10.1016/S1161-0301(01)00112-5.
- Stein, L. Y. (2016). "Nitrification: from the environment to the lab and back again." *FEMS Microbiology Ecology*, 92(10), fiw181. DOI: 10.1093/femsec/fiw181.
- Stevens, R. J., Laughlin, R. J., et Cooper, J. A. (2012). "Volatilization of ammonia from soils and manures." *Soil Use and Management*, 28(3), 307-320. DOI: 10.1111/j.1475-2743.2012.00425.x
- Sumner, M.E., Miller, W.P. (1996). Cation exchange capacity, and exchange coefficients. In *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical Properties*, 3rd ed.; Sparks, D.L., Ed.; ASA, SSSA, CSSA: Madison, WI, USA.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., Befort, B.L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 20260–20264.
- Tranaviciene, T., Urbonaviciute, A., Samuoliene, G., Duchovskis, P., Vaguseviciene, I., Sliesaravicius, A. (2008). The effect of differential nitrogen fertilization on photosynthetic pigment and carbohydrate contents in the two winter wheat varieties. *Agron. Res.*, 6, 555–561.
- Tullberg, J. N., et Gault, R. R. (2014). The impact of direct seeding on soil moisture and crop production. *Soil and Tillage Research*, 139, 1-9.
- Unger, P.W. (1984). Tillage systems for soil and water conservation. *FAO Soils Bulletin* 54. FAO, Rome, 287 pp.
- Unger, P.W. Tillage systems for soil and water conservation. *FAO Soils Bulletin* 54. FAO, Rome, 1984, 287 pp.
- Unger, P.W. Tillage Systems for Soil and Water Conservation; *FAO Soils Bulletin* 54; FAO: Rome, Italy, 1984; p. 287.
- Unkovich, M. J., Baldock, J., et Peoples, M. B. (2008). Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N₂ fixation by crop and pasture legumes. *Plant and Soil*, 312(1-2), 109-121.
- Ussiri, D., Lal, R. (2013). The role of nitrous oxide on climate change. In *Soil Emission of Nitrous Oxide and Its Mitigation*; Springer: Dordrecht, The Netherlands.
- Van Bemmelen, J. (1890). Die Absorption.
- Van Groenigen, J. W., Huygens, D., Boeckx, P., Kuyper, T. W., Lubbers, I. M., Rütting, T., et Groffman, P. M. (2010). The soil N cycle: new insights and key challenges. *Soil*, 2(2), 241-247. doi: 10.5194/soil-2-241-2016.
- Van Kessel, C., Horwath, W. R., Hartwig, U. A., et Harris, D. (2000). "Impact of cropping systems on carbon sequestration and nitrogen cycling in soils." *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(3), 222-226.
- Van Kessel, C., Horwath, W. R., Hartwig, U. A., et Harris, D. (2000). "Influence of crop rotation and residue management on carbon sequestration and nitrogen cycling in soils." *The Journal of Soil and Water Conservation*, 55(3), 222-226.
- Van Kessel, C., Venterea, R., Six, J., Adviento-Borbe, M. A., Linquist, B., et van Groenigen, K. J. (2013). Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 19(1), 33-44. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02779>.
- Vitousek, P. M., Menge, D. N., Reed, S. C., et Cleveland, C. C. (2013). Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1621), 20130119. doi:10.1098/rstb.2013.0119

- Vitousek, P. M., Naylor, R., Crews, T., David, M. B., Drinkwater, L. E., Holland, E., ... et Townsend, A. R. (2009). Nutrient imbalances in agricultural development. *Science*, 324(5934), 1519-1520. doi:10.1126/science.1170261
- Walkley, A. & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. doi :10.1097/00010694-193401000-00003
- Walkley, A.J., Black, I.A. (1934). Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Sci.*, 37, 29–38.
- Wallace, M., Jones, G., Charles, M., Fraser, R., Halstead, P., Heaton, T.H.E., Bogaard, A. (2013). Stable carbon isotope analysis as a direct means of inferring crop water status and water management practices. *World Archaeol.*, 45, 388–409.
- Walley, F.L., Lafond, G.P., Matus, A., Van Kessel, C. (1999). Water use efficiency and carbon isotopic composition in reduced tillage system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 356–361.
- Walley, F.L., Lafond, G.P., Matus, A., Van Kessel, C. Water use efficiency and carbon isotopic composition in reduced tillage system. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63, 356–361.
- Wan, X.J., Wu, W., Liao, Y.C. (2021). Mitigating ammonia volatilization and increasing nitrogen use efficiency through appropriate nitrogen management under supplemental irrigation and rain-fed condition in winter wheat. *Agric. Water Manag.*, 255, 107050.
- Wang, W., Dalal, R. C., Wang, Y., et Reeves, S. H. (2017). "Soil mineral nitrogen availability and dynamics in cropping systems." *Soil Biology and Biochemistry*, 112, 1-11. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.05.016.
- Wang, Y., Li, C., Li, Y., Zhu, L., Liu, S., Yan, L., Feng, G., Gao, Q. (2020). Agronomic and environmental benefits of nutrient expert on maize and rice in Northeast China. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 27, 22–37.
- Watson, C. J., Foy, R. H., et Murphy, W. E. (1994). "Sources of nitrogen for cereal production." *The Journal of Agricultural Science*, 122(1), 71-79. DOI: 10.1017/S0021859600066856.
- Williams, J.D., Wuest, S.B. (2021) Minimum tillage and no-tillage winter wheat–summer fallow for low precipitation regions. *J. Soil Water Conserv.*, 76, 246–255.
- Xu, M., Wang, Y., Dalal, R. C., et Reeves, S. (2016). "Soil moisture impacts on nitrogen mineralization in a mixed grassland ecosystem." *Soil Biology and Biochemistry*, 97, 1-8. DOI: 10.1016/j.soilbio.2016.03.004.
- Xu, X., He, P., Pampolino, M.F., Johnston, A.M., Qiu, S., Zhao, S., Chuan, L., Zhou, W. (2014). Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. *Field Crop. Res.*, 157, 27–34.
- Xue, Y., Song, J.X., Zhang, Y., Kong, F.H., Wen, M., Zhang, G.T. (2016). Nitrate pollution and preliminary source identification of surface water in a semi-arid river basin, using isotopic and hydrochemical approaches. *Water*, 8, 328.
- Yagioka, A., Komatsuzaki, M., Kaneko, N., Ueno, H. (2015). Effect of no-tillage with weed cover mulching versus conventional tillage on global warming potential and nitrate leaching. *Agric. Ecosyst Environ*, 200, 42–53.
- Yang, T., Siddique, H.M.K., Liu K. (2020). Cropping systems in agriculture and their impact on soil health-A review. *Global Ecology and Conservation*. 23, e01118. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01118>
- Zaghouane, O., Abdellaoui, Z. & Houassine, D. (2006). Soil fertility and sustainability in Mediterranean agriculture. *Options Méditerranéennes, Série A*, 69, 183-187.
- Zaman, M., Nguyen, M. L., et Sagar, S. (2009). "The role of inhibitors in mitigating nitrogen losses from land applied animal manure and fertilizer." *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 6(2), 408-425. DOI: 10.3390/ijerph6020408.
- Zehr, J. P., Jenkins, B. D., Short, S. M., et Steward, G. F. (2003). Nitrogenase gene diversity and microbial community structure: a cross-system comparison. *Environmental Microbiology*, 5(7), 539-554. doi :10.1046/j.1462-2920.2003. 00451.x
- Zhang, L., Wang, X., et Liu, Y. (2022). Effect of direct seeding on soil water management. *Soil and Tillage Research*, 212, 104296.

- Zhang, Q.W., Yang, Z.L., Zhang, H., Yi, J. (2012). Recovery efficiency and loss of ¹⁵N-labelled urea in a rice–soil system in the upper reaches of the Yellow River basin. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 158, 118–126.
- Zhang, W., Wei, C., Zhao, Y., et Jiang, Y. (2017). "Soil nitrogen dynamics and the impacts of land management." *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(2), 191-209.
- Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., et Shen, Y. (2019). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature*, 566(7743), 51-59. doi:10.1038/s41586-019-0941-1
- Zhang, Y., He, N., Huang, J., Zhang, G., Han, X. (2013). Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland. *Acta Ecol. Sin.* 33, 6786–6794.
- Zhao, M., Bellarby, J., et Zhou, J. (2021). "The effects of no-till on soil organic carbon and nitrogen: A meta-analysis." *Agricultural Systems*, 189, 103040. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103040.
- Zhao, X., Gao, Y., et Wang, Y. (2021). "Effects of no-till on nitrogen availability and crop productivity." *Soil Biology and Biochemistry*, 158, 108184.
- Zhao, X., Gao, Y., et Wang, Y. (2021). "Effects of no-till on nitrogen availability and crop productivity." *Soil Biology and Biochemistry*, 158, 108184.
- Zhao, X., Gao, Y., et Wang, Y. (2021). "No-till and nitrogen management enhance soil organic carbon sequestration in wheat-maize cropping systems." *Agriculture, Ecosystems et Environment*, 306, 107191. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107191.
- Zhao, X., He, P., Xie, J., Li, Y., et Gao, R. (2021). Cover crops combined with reduced tillage systems enhance nitrogen use efficiency in maize production. *Agricultural Water Management*, 246, 106683. doi: 10.1016/j.agwat.2020.106683
- Zumft, W. G. (1997). "Cell biology and molecular basis of denitrification." *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 61(4), 533-616. DOI : 10.1128/MMBR.61.4.533-616.1997.

Publications scientifiques

Effect of no tillage on the physico-chemical properties of soils of the El Koudia region, Rabat (Morocco)

Hassnae Maher^{1,2*}, Rachid Moussadek², Abdelmjid Zouahri², Ahmed Douaik², Houria Dakak², Mouloud El Moudane¹ and Ahmed Ghanimi¹.

¹University Mohammed V, Faculty of Sciences, Department of Chemistry, Materials Laboratory, Nanotechnology and Environment, Rabat-Morocco.

²National Institute of Agronomic Research (INRA), PO Box 6356, Rabat-Morocco.

Abstract. In Morocco, agriculture is an important sector of the economy, accounting for 15 to 20% of Gross Domestic Product. However, it has faced several challenges: intensive tillage of land that has accelerated water erosion, seriously threatening water and soil potential, low plant cover density and misuse of traditional agricultural practices, causing a decrease in organic matter levels and destroying aggregate stability. Climate change is making water and soil management in agriculture more and more complicated. The major challenge for Moroccan agriculture is to increase agricultural production while preserving natural resources. The objective of our study is to evaluate the effect of no tillage (NT) on the physico-chemical properties of soil in the El Koudia experimental station, Rabat, Morocco. The crop is durum wheat, Arrehane variety. Soil samples are pre-dried, ground and screened to 0.2mm for organic matter (OM) analysis and 2mm for the remainder of the analyses. Plugs, canned, are then sintered, screened and dried for structural stability tests. The results show that no tillage (NT) favours the accumulation of surface OM, particularly at the 0-5cm horizon unlike conventional tillage (CT). The NT promotes structural stability, with a mean weight diameter (MWD) = 0.94mm for the NT compared to 0.83mm for the CT. These results show that soils ploughed in CT are more exposed to erosion degradation than soils not ploughed (NT). In addition, NT preserves soil moisture and promotes additional water retention of 5 to 10%.

Keywords: Agriculture, Erosion, no tillage, Irrigation, Soil, Water.

1 Introduction

Conservation agriculture was initiated in Morocco in the early 1980s. In 1983, INRA began research on this technique. A wider dissemination of the no tillage system has been carried out by development institutions in collaboration with INRA and higher agricultural education institutions [1]. This agricultural system is increasingly required to combat water and wind erosion, the destruction of organic matter and soil structure [2], and to cope with low soil productivity, low yields, degradation of natural resources, and the decrease in the rate at which local production meets needs. No tillage (NT), which is an integral part of conservation agriculture, is a conservatory soil and crop management system, in which the seed is placed directly into the soil that is never tilled [3]. It is presented as a solution to overcome the challenges facing agriculture today, particularly those related to climate change, globalization and price fluctuations and high input costs [4; 5; 6]. The main objective of the NT system is to ensure sustainable production;

the absence of tillage could contribute to the fight against global warming by reducing energy expenditure and therefore carbon emissions and storage capacity via organic matter in the soil [7], and increasing its structural stability after an adaptation period of a few years [8]. In addition, it increases crop productivity with less fertilizer and increases soil potential. Indeed, Mrabet et al. found that phosphorus, nitrogen and potassium levels improve in no tillage compared to conventional tillage [9]. In Morocco, research over the past 30 years has shown the need to use no-till farming systems to improve soil quality and stabilize long-term yields [5]. This article contributes to this research effort by focusing on the changes that have affected the properties of a soil undergoing an NT system for 2 years. The focus will be on physical properties (soil texture, bulk density, structural stability) and chemical properties (organic matter, electrical conductivity, cation exchange capacity, macroelements such as phosphorus, potassium, magnesium and calcium and trace elements such as zinc, iron, copper, manganese).

* Corresponding author: hassnaemahe@gmail.com

2 Materials and methods

2.1 Study site

The study site (Figure 1) is located at the El Koudia experimental station of the Regional Centre for

Agronomic Research in Rabat on secondary road 208 (Sidi Yahia Zaërs - Sidi Bettache, Morocco) 5 km from Sidi Yahia Zaërs, in the Rabat-salé-Kénitra region with the following coordinates: X: 356 325 m; Y: 355 189 m; Z: 193m.

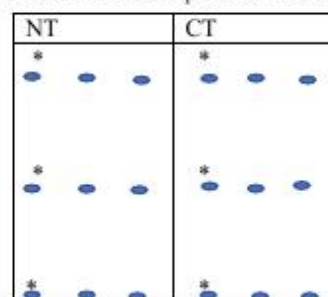


Figure 1. Presentation of the study site in the El Koudia experimental station.

The region is influenced by semi-arid and sub-humid climates with hot and temperate winters. The average annual rainfall is about 460mm while the average annual temperatures are around 18°C.

The study site (Figure 2) is a 1.5 ha plot of land divided into two sub-plots that have been practicing

two different agricultural management systems for two years: one has been practiced under no tillage (NT), while the other is under conventional tillage (CT), under grain-legume rotation. The previous crop is lentil/chickpea as legumes while as a second crop we have soft wheat (Arrehane variety) as cereals.



* Sampling point for other physico-chemical parameters.

● Sampling point for bulk density.

Figure 2: Test site plan with both systems (NT and CT) and sampling points.

2.2 Sampling

Soil sampling was carried out on April 2017, in both NT and CT plots, using a hand auger. Three replicates were made for each plot, with five depths per point (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, and 20-40 cm). A sample in the form of superficial clods representing each plot was selected for the structural stability test. Three 0-10cm horizon samples in each plot were placed in cylinders for the bulk density test. Samples were collected at the rate of 3 replicates per plot.

2.3 Preparation of samples

After collection, the soil samples were air-dried, hand-crushed and then screened to 2 mm to remove plant debris and stones larger than 2 mm. An aliquot of the 0.2 mm sieve soil is kept for organic matter analysis.

2.4 Soil texture

Soil texture [10], the mineral part of the soil, is a heterogeneous mixture of particles of very variable dimensions. A distinction is traditionally made between fine soil (< 2 mm) and coarse elements (> 2 mm).

2.5 Bulk density

The bulk density corresponds to the dry weight of a volume of soil whose structure has not been disturbed. It is also the mass of a unit volume of soil dried at 105°C. This volume includes both solids and pores. It is measured by the cylinder method [11].

2.6 Structural stability

Structural stability (SS) is a specific analysis of the physical properties of the soil. It is a good indicator

* Corresponding author: hassnaemaher@gmail.com

of its sensitivity to soil sealing and water erosion. It is measured by tests applied in the laboratory according to the "LeBissonnais" method [12].

The results are expressed in mm as mean weight diameter (MWD):

$$\text{MWD} = \left(\sum (\text{average diameter between two sieves} \times \% \text{ by weight of particles retained on the sieve}) \right) / 100 \quad (1)$$

2.7 Electrical conductivity

Electrical conductivity (EC) is an index of the contents of salts soluble in the soil solution, i.e. its degree of salinity [13].

2.8 Organic matter

Organic matter (OM) plays an essential role in maintaining soil quality, particularly in terms of water retention and the return of nutrients to plants (nitrogen, phosphorus, calcium, magnesium, etc.) [14]. The level of OM in the soil is determined by the method of Walkley-Black (1934). The carbon determination is carried out by wet process, it consists in cold oxidation of the carbon of the organic matter by a mixture of 1N potassium dichromate ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) and sulphuric acid (H_2SO_4) until the CO_2 is released [15]. The %MO is therefore obtained by multiplying the %C determined by the Van Bemmlen factor:

$$\% \text{MO} = \% \text{C} \times 1.724 \quad (2)$$

2.9 Cationic exchange capacity

Cation exchange capacity (CEC) is a measure of the size of the reservoir in nutrients that can easily pass through the soil solution. It represents the sum of the exchangeable acidity (H^+ and Al^{3+} ions) and the exchangeable base cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , and NH_4^+). Soil CEC must be measured at the pH of the soil solution to avoid changing the variable loads [16]. In conventional methods, CEC is measured either at pH 7 (Metson method) [17] for weakly acidic to neutral soils or at pH 8.2 (Bower method) [18] for alkaline soils, the latter have been investigated in our work.

2.10 Macroelements

2.10.1 Phosphorus

Phosphorus is a major element in the formation of nucleic acids, ATP and photosynthesis [19]. According to the Olsen method [20], the assimilable phosphorus is extracted by a sodium bicarbonate reagent (HCO_3Na), buffered at pH 8.5 with sodium hydroxide (NaOH).

2.10.2 Potassium

Potassium, like phosphorus, is one of the major elements essential for plant growth and development. It plays a multiple role in the plant: ionic exchanges

in the cell, activation of photosynthesis, protein synthesis [21]. The simplest and most commonly used method for the determination of potassium is the normal "K exchangeable with ammonium acetate" at pH = 7 [22], a simple and robust method [23].

2.10.3 Calcium and magnesium

Calcium and magnesium are adsorbed like other cations on the surface of mineral and organic colloids; they attach themselves to them by neutralizing negative charges. Calcium and magnesium usually form between 70 and 95% of the so-called exchangeable bases in soils [24]. The method based on extraction by neutral and normal ammonium acetate is the most widely used method for the determination of exchangeable calcium and magnesium. Three conditions are essential for the achievement of good complexometric dosages [25].

2.11 Trace elements

Trace elements play an essential role in the physiological cycle of plants. Several authors have summarized their role [26]:

Iron plays a major role in the synthesis of chlorophyll and proteins, the transport of oxygen, the metabolism of nitrates, and the enzymatic functions.

Manganese is bound to iron in its action on the formation of chlorophyll and in the metabolism of nitrates. It is involved in photosynthesis, enzymatic processes and protein metabolism.

Zinc participates in the metabolism of auxins, the synthesis of nucleic acids and proteins.

Copper is used in the composition of many oxidation enzymes; it is an enzyme activator. It participates in the synthesis of lignin. Thanks to this element, the plants keep a green and youthful appearance for a longer period of time, which is necessary throughout the growing season.

The DTPA (DiethyleneTriaminePentaAcetic Acid) extraction method developed by Lindsay and Norvell [27] has been adopted in many countries. This is probably the most widely used extraction technique to assess the assimilable Zn content of soils, as DTPA has proven to be a good extraction agent for several crops on very different soils. For this reason, we used this method in our work, which is based on the extraction of trace elements by DTPA, described by Mathieu and Pieltain [28].

2.12 Statistical analysis

Descriptive statistical analysis (mean, standard deviation, minimum, maximum and CV) of the different characteristics was carried out for all the data and then for each type of sowing. Then, two conditions were verified: normality (using the

* Corresponding author: hassnaemaher@gmail.com

Shapiro-Wilk test) and equality of variances (using the Levene test). If both conditions are verified, the analysis of variance (ANOVA) is used to compare the means of soil characteristics corresponding to the two types of seeding or the five depths. However, if either condition is not verified, a variable transformation must first be performed; otherwise, a non-parametric method such as the Mann-Whitney test must be used. The tests were applied at a probability level $p = 0.05$.

3 Results and discussion

3.1 Soil texture

According to Table 1, the granulometric analysis results of the soil samples from the two plots studied show that the soil studied has an identical texture of sandy silt.

Table 1. Soil texture for no tillage (NT) and conventional tillage (CN).

Type of tillage	% on dry fine soil						% on mineral part		
	C (%)	FSi (%)	GSi (%)	FSa (%)	GSa (%)	limestone (%)	C (%)	Si (%)	Sa (%)
NT	16,2	5,4	47,3	23,8	6,6	0,6	16,3	53,2	30,5
CT	16,2	5,4	46,9	24	6,9	0,5	17,3	52,4	30,3

C: Clay; FSi: Fine silt; GSi: Coarse silt; FSa: Fine sand; and GSa: Coarse sand.

3.2 Bulk density

Figure 2 shows a higher bulk density for no tillage (1.53 g/cm³) than for conventional tillage (1.31 g/cm³). This result is consistent with numerous studies conducted under various soil and climate conditions that conclude that the bulk density in no tillage increases in the first 5 to 10 cm of soil [30; 31]. The results obtained can be explained by the fact that in no tillage the soil is not disturbed and

therefore remains relatively compact unlike conventional tillage.

The non-overturning of soil layers by ploughing or surface tillage techniques, especially no tillage techniques, and the presence of biopores therefore contributes to reducing the effects of these techniques on soil bulk density in the long term (beyond 10 years of adoption of these techniques) [32; 33].

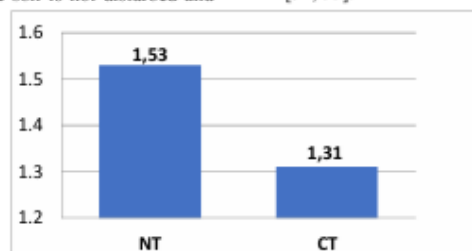


Figure 2. Bulk density (g/cm³) in the 0-10cm depth for NT and CT.

3.3 Structural stability

The statistical analysis shows a significant difference between the three tests that correspond to specific conditions in terms of water condition, for both plots (Table 2). The results showed that the MDW values for NT and CT are very similar with a slight increase for NT. This result is due to the reason that the conservative technique applied to this soil is still new (2nd year of testing). The results show that the three tests are often correlated with each other, the water test is often the most destructive followed by mechanical disintegration,

slow re-wetting, it allows to distinguish soils with very low stability because it is less harmful to the soils. The methodological framework of the Le Bissonnais method [12] takes into account three complementary treatments with different disintegration mechanisms, which provides a basic reference on the behaviour of soils under specific conditions in terms of water condition, humectant rate and applied energy. The results represent the average of the three tests (water, ethanol and re-wetting) for structural stability at the level of the two plots and indicate a MDW= 0.94 mm in NT greater than the CT value (0.83mm). This soil is

* Corresponding author: hassnaemaher@gmail.com

moderately stable according to the standards of "Le Bissonnais", which leads to frequent beating and

variable runoff risks depending on climatic and topographical parameters.

Table 2. Results of the structural stability tests.

Type of tillage	ET	RH	LH	Mean
CT	0,42	0,09	1,99	0,83
NT	0,48	0,20	2,13	0,94
Mean	0,45b	0,15c	2,06a	0,88

ET: Mechanical disintegration (Ethanol test); RH: Rapid Humectation; LH: Slow re-Humectation. Means with different letters indicates significant differences at a probability level of 0.05.

3.4 Soil chemical properties

The main descriptive statistics for pH, depth, EC, OM, CEC, macroelements, exchangeable bases and trace elements are presented in Table 3.

Table 3. Descriptive statistical parameters of the different soil properties.

Soil properties	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation	CV (%)
pH _{water}	5,80	6,80	6,34	0,33	5,3
pH _{KCl}	5,30	6,20	5,86	0,25	4,3
EC (mS/cm)	0,04	0,13	0,07	0,03	45,2
OM (%)	1,15	1,59	1,37	0,15	10,7
CEC (meq/100g)	4,58	12,86	8,47	2,28	26,9
P ₂ O ₅ (ppm)	51,48	123,39	72,35	21,51	29,7
K ₂ O (ppm)	197,00	990,00	296,30	244,82	82,6
Ca ²⁺ (meq/100g)	4,33	7,67	6,10	1,03	16,9
Mg ²⁺ (meq/100g)	1,33	5,67	3,23	1,64	50,8
Zn (ppm)	0,03	0,35	0,10	0,09	93,1
Fe (ppm)	0,67	1,53	0,95	0,25	26,7
Mn (ppm)	0,59	15,05	3,98	5,43	136,4
Cu (ppm)	0,01	0,07	0,04	0,02	39,0

Table 3 shows that soil constituents are highly variable. However, this variability depends on the constituents. The most variable element is Mn with a coefficient of variation (CV) of 136.4%, with an average value of 3.98 and values between 0.59 and 15.05 ppm. The second most variable component is Zn with a CV of 93.1% with an average of 0.099 and values ranging from 0.027 to 0.353 ppm, followed by K₂O with a CV of 82.6%, an average value of 296.3 and values between 197 and 990 ppm. Many other components have a similar variability of 26.7 to 50.8%: Fe, CEC, P₂O₅, Cu, EC, and Mg²⁺. The least variable components are

pH_{KCl}, pH_{water}, OM, and Ca²⁺ with a CV ranging from 4.3 to 16.9%.

3.5 Comparison between NT and CT

The Shapiro-Wilk normality test indicates that only the variables pH_{water}, pH_{KCl}, EC, OM, CEC, Mg²⁺, Mn, and Cu follow a normal distribution. Among these variables, Levene's variance equality test indicates that the latter hypothesis is not verified for EC and Mn. The logarithmic transformation of these two variables made equal variances. Therefore, ANOVA will be applied to the variables pH_{water}, pH_{KCl}, OM, CEC, Mg²⁺, and Cu on their original scale whereas it will be applied to EC and

* Corresponding author: hassnaemaher@gmail.com

Mn in their transformed (logarithmic) scale. For the other variables that do not follow a normal distribution (P_2O_5 , K_2O , Ca^{2+} , Zn and Fe), the Mann-Withney non-parametric test will be applied.

In addition to the formal Shapiro-Wilk normality test, a visual idea can be obtained by inspecting the boxplot of the variables. Thus, the graph in the upper left of Figure 3 shows that for pH_{water} , the two boxes corresponding to the two types of tillage are

more or less symmetrical with the absence of atypical values. The upper right graph, corresponding to the $\log(EC)$ shows less symmetry with an atypical value. The distribution of these two variables is normal. On the other hand, the two bottom graphs (Zn and Fe) indicate the total absence of symmetry of the boxes as well as the presence of extreme values. These are indicators of the non-normal distribution of their distribution.

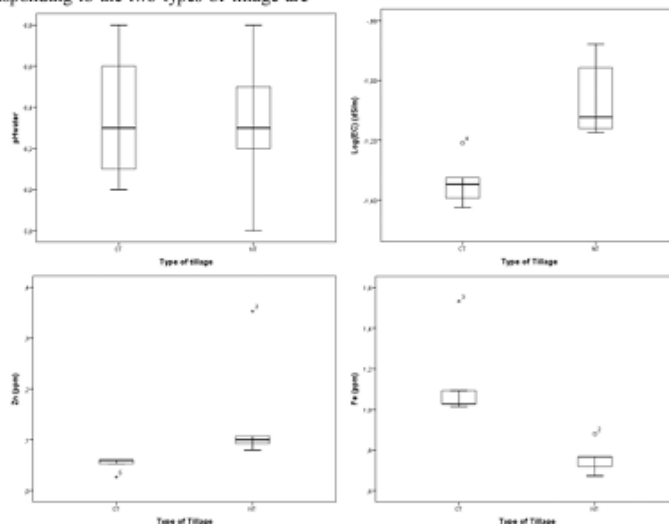


Figure 3. Boxplots of some soil properties: pH_{water} (top left), $\log(EC)$ (top right), Zn (bottom left) and Fe (bottom right).

3.5.1 Variables with a normal distribution: ANOVA

The results obtained from the analyses performed on our soil samples show a total dominance of weak acidic soil, according to the DIAEA/DRHA/SEEN 2008 standards. This is explained by the low limestone content in the soil which is characterized by a pH below 7. Several studies [34] have found a highly significant relationship between limestone content and pH. It can be seen that there is no variation in pH water either between the two NT and CT systems or as a function of depth.

According to the ANOVA, it can be observed that the average EC value differs significantly between the two types of tillage with a higher value in NT than in CT for all depths. This can be explained by the fact that in NT, fertilizers remain concentrated at the surface level while in CT the tillage distributes the fertilizers along the profile, therefore the concentration of salts is diluted and therefore the electrical conductivity here is lower.

Analysis of the organic matter at the El Kouidia site showed that the soil contains a moderately low content. By comparing organic matter contents between NT and CT, there is a higher value in the former compared to the latter system at the 0-5cm horizon and a lower value at the 10-40cm horizon. This result is consistent with Balesdent's research on organic C stocks in conservation systems which are higher on surface than in ploughed systems [35], but few differences appear at depth [36]. Other studies have shown that organic carbon concentrations in conservation systems are generally higher in the first 10 cm of soil compared to ploughed soil and decrease sharply in the underlying horizons [37; 38]. Our results can be explained by the short period of application of the NT system in the trial (2 years). On the other hand, other authors show that tillage techniques have little effect on these stocks [39].

The CEC in the NT recorded a remarkably higher value compared to the CT. The ability of a soil to store nutrients (Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , K^+ , etc.) and also H^+ ion depends on the clay and organic matter content of the soil. It has been measured in northern

* Corresponding author: hassnaemaher@gmail.com

Brittany that about 50% of the CEC is directly carried by the soil OM [40]. The CEC of a soil varies very little over time. This explains the low CEC content of our studied soil with a sandy silty texture.

It can be seen that the NT system has an advantage over the CT system for magnesium, which has a high NT value in all 5 depths with a decreasing potential at depth.

The results obtained for Cu and Mn show that the value of these elements is important in NT than in CT at the surface (0-10 cm). This result can be explained by the fact that the colloidal properties of OM, i.e. its character as an element binding substance and its chelating power, is likely to concentrate these contents at surface [41], with organic matter being more important under no tillage at the surface [35; 42].

Table 4. ANOVA results for the comparison of means of normal variables.

Type of tillage	pH _{water}	pH _{KCl}	EC	OM	CEC	Mg ²⁺	Mn	Cu
NT	6,360	5,960	0,046b	1,418	7,194	1,933	1,532	0,047
CT	6,320	5,760	0,091a	1,320	9,754	4,533	6,424	0,040
Mean	6,340	5,860	0,069	1,369	8,474	3,233	3,978	0,043

Means with different letters indicate significant differences at a probability level of 0.05.

3.5.2 Non-normal distribution variables: non-parametric test

The soil samples studied are characterized by a high concentration of assimilable phosphorus with a median of 67.5ppm for NT and 61.2ppm for CT, which presents a soil rich in P₂O₅, according to interpretation standards, while it decreases with depth. The results obtained in the literature find that tillage techniques primarily influence how phosphorus is distributed in the soil. Whatever techniques are used, they have no significant effect on the phosphorus levels, which are generally very low, of the soil layers below the greatest working depth. Another study in the surface horizon showed that cropping operations that turn or mix the soil tend to homogenize phosphorus in the worked volume. On the other hand, those that do not generate a mixture of the layers worked on, lead to the introduction of a gradient of decreasing contents with depth [43], this is what we actually notice in our results.

The median potassium content under NT (206ppm) is lower than under CT (244ppm), these values show that our soil is rich in potassium by standards. It should be noted that at the 0-10cm horizon, the

NT prevails over the CT, which is consistent with studies on the effect of no tillage on potassium [44], as well as the study that showed that in no tillage the amount of potassium can be reduced in depth [45].

The NT system has an advantage over the CT for calcium. According to the comparison of these results with the standards, the soil is moderately rich in minor elements.

According to the statistical analysis, it can be observed that the medians of zinc and iron differ significantly between the two types of tillage. Zn has an advantage in NT over CT, the opposite is true for iron. It has a low value for NT compared to CT. This can be explained by the existence of an antagonistic relationship between Fe and Mn: when one increases, the other decreases. In addition, in the case of compacted soils (high bulk density), iron tends to be less present than in more aerated soils. Taking into account the bulk density and the presence of iron and the Fe/Mn antagonist relationship [46], Mn is more present in NT and much less in CT and vice versa for Fe. However, toxicity can only be determined by considering the CEC and the OM content.

Table 5. Results of the non-parametric test with medians for non-normal variables (Mann-Whitney test).

Type of tillage	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca ²⁺	Zn	Fe
CT	61,2	244	6	0,06b	1,027a
NT	67,5	206	6,7	0,10a	0,767b
Mean	64,4	225	6,3	0,08	0,897

* Correspondingauthor:hassnaemaher@gmail.com

Medians with different letters indicate significant differences at a probability level of 0.05.

4 Conclusion

This study allowed us to evaluate the effect of no tillage on the physico-chemical properties of the soil in the El Koudia experimental field, located 30 km from Rabat. The site under study consists of two plots, one for no tillage and the other for conventional tillage, the crop is a cereal, more precisely durum wheat, Arrehane variety. The results show that no tillage favours the accumulation of OM on the soil surface, especially at the 0-5 cm horizon, unlike conventional tillage. This high organic matter content explains the high adsorbency of nutrients in no-till soils, especially major elements and trace elements. This was confirmed by comparing our results with the literature searches. The NT also promotes bulk density and structural stability relative to the CT.

The increase in bulk density in no tillage compared to conventional tillage is unfortunately a handicap of no tillage, especially in the first years. This result can be explained by the recent use of the practice of no-till (NT) in the plot (2 years). The increase in the MWD at the NT level is a good sign of aggregate cohesion, which proves that no tillage contributes to improving soil structure. From these results, it can be concluded that ploughed soils are more exposed to erosion degradation than soils under NT with stable aggregates as shown in the structural stability test. However, it would be even better to extend this study, by carrying out several campaigns at different periods during the year to fully understand the beneficial effect of using appropriate conservation techniques for a sustainable and conservative agriculture of soils and their environment.

References

1. R., Mrabet, B.Vadon, and A. Ait Lhaj. *Actes des resumes des premieres journees de rencontres sur le semis direct en Méditerranée. Centre Regional de la Recherche Agronomique, Settat, Maroc*, 22-23: **31** (2001).
2. O. Zaghouane, Z. Abdellaoui and D. Houassine. *Options Méditerranéennes, Série A*, **69**:183-187 (2006).
3. R. Mrabet. *Nations commission économique pour l'Afrique. (Centre de développement pour l'Afrique du Nord (CDSR-AN). Tanger, Maroc*, 4-9, (2001).
4. A. El Aissaoui, A. ElBrahli, O. El Gharras and N. El Hantaoui. *Symposium international « agriculture durable en région méditerranéenne (AGDUMED) », Rabat, Maroc* 249-256, (2009).
5. R. Moussadek, R. Mrabet, and R. Dahan. *Effet de l'agriculture de conservation sur la qualité des sols au Maroc*. HTE **149/150** : 25-28, (2011).
6. M. Laghrour, R. Moussadek, A. Zouahri, M. Mekkaoui, R. Dahan and M. El Mourid J. Mater. *Environ. Sci* **6** (2) 391-396, (2015).
7. P.Y. Guedez. *Rapport de stage en vue de l'obtention du diplôme d'études spécialisées en Sciences et Gestion de l'Environnement sous la direction de M.A. Reding (Monsanto) et A. Peeters (UCL), Université Catholique de Louvain*, 97 pp, (2002).
8. J. Gueric. *Edition INRA, Paris*, p. 13-33, (1994).
9. R. Mrabet and R. Moussadek. *Field Crops Research*, **132**: 84-94, (2012).
10. A. Richer de Forges, C. Feller, M. Jamagne and D. Arrouays. *Etude et Gestion des Sols*, **15**: 2, p 97-111, (2008).
11. R. Blake and K. Hartage. *Methods of soils analysis. Soil science*, **1**: 363-375, (1986).
12. Y. Le Bissonnais. *European Journal of Soil Science*, **47**: 425-437, (1996).
13. J.P. Montori. *Etude et Gestion des Sols* **4**: 279-298, (1997).
14. M. Allaerts, W. Boon and J. Feyen. *Revue de l'agriculture*, **35**: 1673-1695, (1982).
15. A. Walkley and I. A. Black. *Soil Science*, **37**: 29-38, (1934).
16. I. Charlet and M. I. Schlegel. *Compte Rendu d'Académie d'Agriculture*. **85**: 7-24, (1999).
17. D. Baize. *Guide des analyses en pédologie. 2e édition, revue et augmentée*, INRA Paris, (2000).
18. C. A. Bower, R. F. Reitemeier and M. Fireman. *Soil Sci.* **73**: 251-261, (1952).
19. L. T. Benjamin, C. D. Barba J., M.C. Leo and Susan N. *Talanta*, **66**: 294-306, (2005).
20. S.R. Olsen, C.V. Cote, F.S. Watanabe and L.A. Dean. *U.S.D.A. Circular* **939**:8, (1954).
21. C. Gracia and S. D. Zimmermann. *Frontiers in Plant Science, Montpellier, France*, **5**: 371, (2014).
22. C. Schwartz, J. Decroux and J-C. Muller. *Guide de la fertilisation raisonnée : grandes cultures et prairies. Paris: COMFIER Edition France agricole* 137-138, (2005).
23. A. Mhiri. *Atelier sur la gestion de la fertilité potassique, acquis et perspectives de la recherche*, p13, (2002).
24. J. Boyer. *Paris, OSTROM*, **35**: 173, (1978).
25. P. Pelloux, B. Dabin, G. Fillmann and P. Gomez. *Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols*, Paris, (1971).

* Corresponding author: hassnaemaher@gmail.com

26. A. Kabata-Pendias. *CRC press LLC*. p.430, (2001).
27. W. L. Lindsay and W. A. Norvell. *Soil Science Society of America Journal*, **42**: 421-428, (1978).
28. J. C. Katyal and N. S. Randhawa. *Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*, page 12, (1986).
29. C. Mathieu and F. Pieltain. *Editions Tec et Doc/Lavoisier, Paris*, 408 p, (2003).
30. J. Lampurlanès and C. Cantero-Martínez. *Agronomy Journal*, **95**: 526-536, (2003).
31. F. Basic, I. Kisić, M. Mesic, O. Nestroy and A. Butorac. *Soil & Tillage Research*, **78**: 197-206, (2004).
32. E. Dinon and A. Gerstmans. *Université de Liège*, (2008).
33. A. K. FRANC-XAVIER. *Université Félix Houphet-Boigny, UFR des sciences de la terre et des sols*, (2016).
34. M.J.S. Floate and P.D. Enright. *New Zealand Journal of agricultural Research*. **34**: 453-465, (1991).
35. K. D'Haene, J. Vandenbruwanc, S. De Neve, D. Gabriels, J. Salomez and G. Hofman. *European Journal of Agronomy* **28**: 449-460, (2008).
36. J. Balesdent, C. Chenu and M. Balabane. *Soil & Tillage Research*. **53**: 215-230, (2000).
37. M.M. Al-Kaisi and X. Yin. *Journal of environment quality* **34**: 437-445, (2005).
38. A. Gál, T.J. Vyn, E. Michéli, E.J. Klavivko and W.W. Mcfee. *Soil and Tillage Research*, **96**: 42-51, (2007).
39. E.S. Keith, C.J. Baker, W. R. Ritchi, F. Ribeiro and al. *CABI and FAO, London*, p. 326, (2006).
40. B. Decoopman, D. Hanocq and D. Heddadj. *Dossier pour le pôle agronomie-productions végétales des chambres d'agriculture de Bretagne*, (2013).
41. M. Sillanpaa. *Soils Bulletin* **17**: 1-67, (1972).
42. H.J. Koch and N. Stockfisch. *Soil and Tillage Research*, **86**: 73-83, (2006).
43. A. N. Sharpley. *Journal of Environmental Quality*, **32**: 1375-1384, (2003).
44. J.H. Edwards, C.W. Wood, D.L. Thurlow and M.E. *Soil Science Society of America Journal*, **56**: 1577-1582, (1992).
45. C. Pekrun, H.P. Kaul and W. Claupein. *In: El Titi, A. (ed.), Soil tillage in agroecosystems, CRC Press, New-York (USA)*, pp. 83-113, (2003).
46. B. Estevez. *Agriculture pêche et alimentaire au Québec*, (2006).

* Corresponding author: hassnaemaheer@gmail.com

Article

Nitrogen Use Efficiency Using the ^{15}N Dilution Technique for Wheat Yield under Conservation Agriculture and Nitrogen Fertilizer

Hassnae Maher ^{1,2,3,*}, Rachid Moussadek ^{2,3}, Abdelmjid Zouahri ², Ahmed Douaik ²,
Nour Eddine Amenzou ⁴, Moncef Benmansour ⁴, Hamza Iaaich ², Houria Dakak ², Zineb El Mouridi ²,
Abdelkbir Bellaouchou ¹ and Ahmed Ghanimi ¹

- ¹ Laboratory of Materials, Nanotechnologies, and Environment, Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Mohammed V University in Rabat, Rabat P.O. Box 1014, Morocco; belbir@fsr.ac.ma (A.B.); a.ghanimi@um5r.ac.ma (A.G.)
 - ² Research Unit on Environment and Conservation of Natural Resources, Regional Center of Rabat, National Institute of Agricultural Research, Rabat P.O. Box 6356, Morocco; rachid.moussadek@inra.ma or r.moussadek@cgiar.org (R.M.); abdelmjid.zouahri@inra.ma (A.Z.); ahmed.douaik@inra.ma (A.D.); hamza.iaaich@inra.ma (H.I.); houria.dakak@inra.ma (H.D.); zineb.elmouridi@inra.ma (Z.E.M.)
 - ³ International Center for Agricultural Research in Dry Areas (ICARDA), Rabat P.O. Box 2034, Morocco
 - ⁴ Division of Water and Climate, Direction of Studies and Scientific Research, National Center for Nuclear Energy, Sciences and Techniques (CNESTEN), Route de Kenitra-Mamoura, P.O. Box 1382, Kenitra 14000, Morocco; amenzou2002@yahoo.fr (N.E.A.); benmansour64@yahoo.fr (M.B.)
- * Correspondence: hassnaemaher@gmail.com or hassnae_maher@um5.ac.ma or h.maher@cgiar.org; Tel.: +212-676612863



Citation: Maher, H.; Moussadek, R.; Zouahri, A.; Douaik, A.; Amenzou, N.E.; Benmansour, M.; Iaaich, H.; Dakak, H.; El Mouridi, Z.; Bellaouchou, A.; et al. Nitrogen Use Efficiency Using the ^{15}N Dilution Technique for Wheat Yield under Conservation Agriculture and Nitrogen Fertilizer. *Nitrogen* 2023, 4, 369–381. <https://doi.org/10.3390/nitrogen4040026>

Academic Editor: Pete Iannetta

Received: 3 October 2023

Revised: 6 December 2023

Accepted: 6 December 2023

Published: 12 December 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: Conservation agriculture (CA), which could contribute to sustainable agriculture, maintains or improves soil nitrogen fertility by eliminating tillage (no-tillage). Quantitative assessment of soil constituents is enhanced by stable isotope techniques such as ^{15}N , which are used to better understand nitrogen dynamics. This study was therefore carried out to assess the impact of tillage type and fertilizer application on soil and plant nitrogen fractionation. The trial consisted of two tillage types: no-tillage (NT) and conventional tillage (CT). Three nitrogen doses (82, 115, and 149 kg ha⁻¹) were applied. The experimental design was a randomized complete block with three replications. The Louiza variety of durum wheat was used in this study. Soil nitrogen sequestration was assessed using the stable nitrogen isotope (^{15}N) method. The statistical analysis (ANOVA) showed that, overall, there was no significant difference between tillage types and nitrogen doses for grain and straw yields and grain total nitrogen. In contrast, the effect of both factors and their interaction were significant for straw total nitrogen. There was no difference between tillage types for grain nitrogen use efficiency (NUE), even though NT was superior to CT by 3.5%, but nitrogen doses had a significant effect and a significant interaction with tillage type. When comparing nitrogen doses for each tillage type separately, results showed that the average NUE for grain was 20.5, 8.4, and 16.5%, respectively, for the three nitrogen doses for CT compared with 26.8, 19.0, and 30.6% for NT, indicating clearly the better performance of NT compared to CT. Regarding straw, the NUE is 3.2, 3.5, and 5.4% for CT compared with 3.4, 4.9, and 9.2% for NT. NUE in grain and straw under no-tillage was higher than under conventional tillage in all three nitrogen doses. These results show that soil conservation techniques such as no-tillage and the integrated application of nitrogen fertilizer can be good strategies for reducing soil nitrogen losses.

Keywords: conventional tillage; durum wheat; nitrogen fertility; no-tillage; soil; stable isotope ^{15}N

1. Introduction

The importance of nitrogen (N) lies in its crucial role in improving the productivity and sustainability of agricultural, forest and pastoral lands [1–3]. Being an indispensable

nutrient for all crop plants, cereals in particular require an adequate supply of nitrogen to ensure optimal growth, yield, and quality [4]. Not only the amount of nitrogen that is crucial but also the time of its supply to crops [5–7] and its splitting [8–10] are very important since all these three factors have a tremendous impact on the nitrogen use efficiency (NUE) [11–13].

The excessive use of nitrogen fertilizers in agriculture would have a significant impact on the environment, including water quality and biodiversity, mainly nitrates pollution of groundwaters [14–16], as well as might contribute to climate change by the emission of nitrous oxide [17–19].

To minimize the environmental impact of agricultural practices, new crop management methods have been developed. These include no-tillage, which involves sowing crops in undisturbed soil, without ploughing or turning the soil, leaving crop residues in the field and adopting crop rotation [20–22]. This agricultural technique offers a number of advantages, such as reducing costs and fuel consumption, as well as preserving soil quality [23–25], improving nitrogen levels [26–28], and increasing cereal crop yields [29–31].

Isotopes of chemical elements are largely used in crop production and land management. Fallout radionuclides (^{137}Cs , ^7Be , and ^{210}Pb) are used to assess the level and intensity of soil erosion [32–34]. The stable isotope ^{13}C can be used to monitor land degradation [35], as well as water availability [36,37] and soil organic carbon [38–40].

Regarding ^{15}N , it is a natural nitrogen isotope that is not radioactive and is present in varying quantities in the different types of nitrogen fertilizers used in agriculture. The stable isotope of nitrogen ^{15}N can be used in one of two possible forms: either enriched tracer or natural abundance. The nitrogen-stable isotope can be used to study the impact of agricultural practices on soil quality [41,42]. In particular, the ^{15}N natural abundance technique has also been successfully used to monitor the trajectory of nitrogen in landscapes [43,44] and to better understand nitrogen dynamics in different soils with different grown crops, such as maize [45,46], rice [47,48], vegetable crops [49,50], coffee [51], fodder crops [52,53], and wheat [54–56].

Several research works evaluated NUE under no-tillage without using ^{15}N for crops like eggplant, tomato, and wheat [57–59] while others used also ^{15}N , especially wheat [60–63]. Both types of studies were performed in different countries around the world.

To the best of our knowledge, although research on no-tillage began in our country in the early 1980s, no studies using ^{15}N have been conducted in Morocco. Therefore, to fill the research gap, we propose to use a fertilizer labeled with ^{15}N to determine the effects of nitrogen doses and two tillage types on wheat grain and straw yield, nitrogen derived from fertilizer, and nitrogen use efficiency in rainfed conditions.

2. Materials and Methods

2.1. Study Site

The experimental work was performed at the Marchouch experimental station of the National Institute of Agricultural Research (INRA) (Figure 1) located in the Zaer region, about 60 km south of Rabat, Morocco with the geographic coordinates 33°37' N, 6°43' W. This region has a Mediterranean climate influenced by the Atlantic Ocean. The average temperature is 28 °C and the average rainfall amounts to 400 mm. No-till has been practiced on the site since 2004, with the adoption of the cereal–legume rotation.



Figure 1. Location map of the Marchouch experimental station.

The soil is classified as a vertisol with a silty clay texture (47% clay, 42% silt, and 11% sand). Some chemical characteristics are given in Table 1. The soil at the study site has a neutral pH and is characterized by low organic matter, non-saline conditions, with a cationic exchange capacity of 42 meq/100 g, 0.132% nitrogen, 114 mg kg⁻¹ of phosphorus, and 88 mg kg⁻¹ of potassium.

Table 1. Soil chemical properties.

pH	OC (g kg ⁻¹)	Potassium (mg kg ⁻¹)	Phosphorus (mg kg ⁻¹)	CEC (meq/100 g)	EC (dS/m)	Ca (meq/100 g)	Mg (meq/100 g)	Nitrogen (%)
7.4	8.6	88.2	114.2	42.2	1.7	7.0	4.3	0.132

OC, organic carbon; CEC, cationic exchange capacity; EC, electrical conductivity.

2.2. Experimental Protocol

The experiment included two factors: tillage type with two levels (conventional tillage, CT and no-till, NT) and nitrogen dose with three levels (82, 115, and 149 kg ha⁻¹). A randomized complete block design was used with three replications. Conventional tillage was completed using a disc harrow at 10 to 15 cm depth to prepare seedbeds and bury residues followed by a chisel plow. In no-tillage, the soil was loosened by 2 to 3 cm to plant the seeds at a depth of 5 cm, using a special no-tillage drill. Two nitrogen fertilizers were used. First, the NPK 10-20-20 base fertilizer was applied at a rate of 150 kg ha⁻¹ on 21 December 2020. One month later, the 33.5% ammonitrate fertilizer was supplied at 100 kg N ha⁻¹ on 20 January 2021. On 8 February 2021 and 10 March 2021, 7.998, 6.337, and 4.541 g of ¹⁵N were applied for the three nitrogen doses corresponding to 82, 115, and 149 kg ha⁻¹, respectively. These nitrogen doses were chosen such that we considered the recommended dose (115 kg ha⁻¹) and the one used by the farmers in the region (149 kg ha⁻¹). The smallest dose (82 kg ha⁻¹) was chosen as a less-than-optimal dose to have a constant difference between two consecutive doses (arithmetic progression or sequence), as recommended for optimizing quantitative factors during the statistical analysis.

The experiment used 18 experimental units, each having 10 m × 8 m = 80 m². Around each experimental unit, there were guard rows of 50 cm on each side; therefore, the whole

experiment covered approximately 1500 m². To trace the fate of N fertilizer, ¹⁵N-labeled (10.16%) was applied in each microplot of 2 m × 2 m = 4 m².

The crop used in the experimental work was durum wheat (*Triticum durum* Desf.), especially the Louiza (INRA-Maroc, 2011) variety. The cereal–legume rotation is practiced in the study site with lentils/chickpeas as the previous crop. Herbicides against dicotyledons and grasses were used for weed management. Two plots of one meter by one meter were selected and square metal rod quadrats were placed directly on the vegetation to determine grain and straw yields for each of the 18 experimental units. Plant samples were chopped and dried at 65 °C before grinding. Soil samples were sieved to 2 mm and then dried at 40 °C.

2.3. Climatic Data

Total rainfall and mean temperature for the growing season 2020–2021 as well as for 10 years (2013–2022) are shown in Figure 2. The pattern of mean temperature is almost the same for both time periods except for August and October, where the mean temperature was slightly lower for 2020–2021 compared to 2013–2022. In contrast, there is a drastic difference in the patterns of rainfall with very low levels for 2020–2021 compared to 2013–2022. These low rainfall amounts will have an impact on the grain and straw yield of wheat.

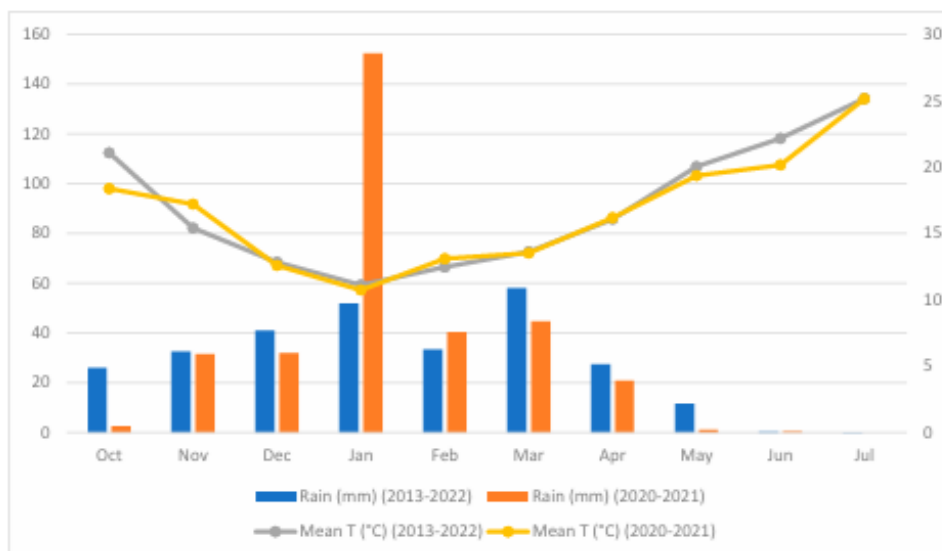


Figure 2. Contrasting rainfall and temperature in the Zaër Region: 2020–2021 season in comparison to the 10-year average (2013–2022) at the Marchouch experimental station.

2.4. Stable Isotope Analysis

¹⁵N and total nitrogen analyses were performed at the National Center for Nuclear Energy, Science, and Technology (CNESTEN, Rabat, Morocco). The abundance of ¹⁵N isotopes from the wheat grain and straw (5 to 6 mg of samples) was determined by EA-IRMS using an isotope ratio mass spectrometer (Delta V Thermo Scientific, Germany) coupled to an element analyzer (Thermo Scientific FLASH HT Plus, Waltham, MA, USA) following the procedure described by Mariotti [64]. The grain and straw materials were oven-dried at 70 °C for 24 h, ground separately, and transferred into small tin capsules in

an element analyzer tray. The stable isotope ratios were expressed in delta (δ) kg and a permil (‰) notation relative to an international standard [65]:

$$\delta AX(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{Sample}}}{R_{\text{Standard}}} - 1 \right) \times 1000 \quad (1)$$

$\delta^A X$ expresses the abundance of isotope A of element X in a sample relative to the abundance of that same isotope in a reference material. R_{sample} and R_{standard} are the $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ratios of the sample and sample standard for $\delta^{15}\text{N}$. Values of $\delta^{15}\text{N}$ are reported relative to N_2 in atmospheric air (AIR).

The isotopic $\delta^{15}\text{N}$ (‰) values of the samples were calibrated versus the certified reference materials Leucin ($\delta^{15}\text{N}$ (‰) = $10.4 \pm 0.5\text{‰}$) and Caffeine IAEA-600 ($\delta^{15}\text{N}$ (‰) = $1.0 \pm 0.2\text{‰}$). Uncertainty per batch (7 replicates of secondary isotopic reference material) was $\leq 1.5\text{‰}$ for $\delta^{15}\text{N}$.

Percent nitrogen derived from fertilizer (%NDFF), nitrogen derived from fertilizer (NDFF kg ha^{-1}), and nitrogen use efficiency (NUE) were calculated as follows [66]:

$$\%NDFF = \frac{\text{Atom } \% \text{ 15 N access in crop}}{\text{Atom } \% \text{ 15 N access in fertilizer}} \times 100 \quad (2)$$

$$NDFF (\text{kg ha}^{-1}) = \frac{\%NDFF}{100} \times \text{totalN} (\text{kg ha}^{-1}) \quad (3)$$

$$NUE (\%) = \left(\frac{\text{amount of N derived from fertilizer}}{\text{amount of N applied as fertilizer}} \right) \times 100 \quad (4)$$

where NDFF represents nitrogen derived from fertilizer (kg ha^{-1}), i.e., amount of nitrogen derived from fertilizer; NUE represents nitrogen use efficiency (%).

2.5. Statistical Analysis

Mean, standard deviation, minimum, and maximum were computed for wheat grain and straw yields, plant total nitrogen, nitrogen derived from fertilizer (NDFF), and nitrogen use efficiency (NUE). As data followed normality (checked by the Shapiro–Wilk test) and had equal variances (checked by the Levene test), the analysis of variance (ANOVA) was used to compare the means corresponding to the main effects of the two factors (the two tillage types and the three nitrogen doses) and, eventually, their interactions. In case of significant effects of the factors, the Tukey HSD post-hoc test was used to compare each pair of levels of both factors. A significance level of 5% was adopted for all statistical tests. Effect sizes (partial eta squared), giving the magnitude of the effects or their practical significance or biological relevance, were also reported [67,68], which can be used, subsequently, in meta-analysis [69–71]. The SPSS software, version 25 (IBM Corp., Armonk, NY, USA), was used for all computations.

3. Results and Discussion

3.1. Grain and Straw Yields

Mean grain yields were very similar and varied between 3.1 and 3.3 t ha^{-1} while those for straw yield ranged between 6.3 and 6.9 t ha^{-1} (Table 2). The ANOVA results showed that, overall, there were no statistically significant differences between both tillage

types and the three nitrogen doses nor any interaction between these two factors for both wheat grain and straw yields (all p -values are much higher than the significance level of 0.05). This is confirmed by the effect sizes that are either nil (<0.010), small (0.010–0.059), or medium (0.059–0.138).

Table 2. ANOVA results for wheat grain and straw yields and total nitrogen: means, standard deviations, p -values, and effect sizes.

Factors	Levels/Effects	Yield (t ha ⁻¹)		Plant Total Nitrogen (g kg ⁻¹)	
		Grain	Straw	Grain	Straw
Tillage	CT	3.19 ± 0.42	6.27 ± 1.39	31.00 ± 05.12	3.80 ± 1.26 b
	NT	3.17 ± 0.52	6.88 ± 0.82	39.14 ± 15.18	5.58 ± 1.19 a
Nitrogen (kg ha ⁻¹)	82	3.32 ± 0.48	6.47 ± 1.17	35.01 ± 11.47	3.96 ± 1.25
	115	3.14 ± 0.59	6.73 ± 1.35	30.28 ± 09.27	4.70 ± 1.81
	149	3.09 ± 0.32	6.53 ± 1.11	39.94 ± 14.03	5.42 ± 1.23
p -value	Tillage (T)	0.961	0.311	0.103	0.005
	Nitrogen (N)	0.718	0.929	0.269	0.108
	T*N	0.506	0.432	0.072	0.299
Effect size	Tillage (T)	0.0002	0.085	0.206	0.499
	Nitrogen (N)	0.054	0.012	0.197	0.310
	T*N	0.107	0.130	0.355	0.182

CT, conventional tillage; NT, no-tillage. Factor levels with different, either lowercase or uppercase, letters are significantly different based on the Tukey HSD post-hoc test.

3.2. Plant Total Nitrogen Contents

Based on the ANOVA results (Table 2), there was a significant difference only between the two tillage types for wheat straw yield (p -value = 0.005, which is much lower than the significance level of 0.05) with a higher mean value for NT (5.6 g kg⁻¹) compared to CT (3.8 g kg⁻¹). All effect sizes are large (>0.138) with the largest (0.499) corresponding to the only significant effect of tillage type on wheat straw yield. Although there was no significant difference between the two tillage types regarding grain yield (p -value = 0.103), the two mean values are quite different with an additional total nitrogen of 8.1 g kg⁻¹ or 26.3% for NT compared to CT. This is confirmed by a large effect size (0.206). The non-significance could be explained by the high variability of the three replications for NT (with a standard deviation of 15.2 g kg⁻¹ against 5.1 g kg⁻¹ for CT). The same remark can be made for the effect of nitrogen dose on straw yield with a difference of 1.5 g kg⁻¹ or 36.9% in favor of 149 kg ha⁻¹ compared to 82 kg ha⁻¹ which is confirmed by the third largest effect size (0.310).

3.3. Nitrogen Derived from Fertilizer

Regarding grain NDF, only the nitrogen dose effect was statistically significant (p -value = 0.021) with a large effect size (0.474) and a mean value of 26.7% corresponding to a supply of 149 kg ha⁻¹ much higher compared to 19.3 and 18.0% corresponding to 115 and 82 kg ha⁻¹, respectively (Table 3). Wan, X.J. et al. showed a sharper increase in NDF with nitrogen dose as they used much higher doses (0, 120, 240, and 360 kg ha⁻¹) than our study and considered both rainfed and irrigated fields [54].

Both the two main effects and their interaction were statistically significant for straw NDF (all p -values were lower than 0.05) with large effect sizes of 0.315 and 0.892 for tillage type and nitrogen dose, respectively. Mean values were higher for NT (19.0%) compared to CT (15.7%) and increased with the supplied amount of nitrogen (10.1% for 82 kg ha⁻¹ to 27.0% for 149 kg ha⁻¹).

Table 3. ANOVA results for nitrogen derived from fertilizer (NDFF) and nitrogen use efficiency (NUE): means, standard deviations, *p*-values, and effect sizes.

Factors	Levels/Effects	NDFF (%)		NUE (%)	
		Grain	Straw	Grain	Straw
Tillage	CT	22.00 ± 5.92	15.69 ± 05.11 b	18.64 ± 03.78	3.77 ± 1.29 b
	NT	20.63 ± 6.43	19.04 ± 11.01 a	22.08 ± 10.82	5.81 ± 2.98 a
Nitrogen (kg ha ⁻¹)	82	18.02 ± 6.01 B	10.10 ± 02.86 C	23.62 ± 05.94 A	3.43 ± 0.48 B
	115	19.26 ± 4.95 B	15.00 ± 04.08 B	13.90 ± 06.79 B	4.16 ± 1.77 B
	149	26.67 ± 3.27 A	27.00 ± 06.29 A	23.55 ± 08.03 A	6.78 ± 3.14 A
<i>p</i> -value	Tillage (T)	0.565	0.037	0.110	0.015
	Nitrogen (N)	0.021	<0.001	0.002	0.006
	T*N	0.337	0.004	0.001	0.042
Effect size	Tillage (T)	0.028	0.315	0.199	0.403
	Nitrogen (N)	0.474	0.892	0.636	0.571
	T*N	0.166	0.596	0.683	0.411

CT, conventional tillage; NT, no-tillage; NDFF, nitrogen derived from fertilizer; NUE, nitrogen use efficiency. Factor levels with different, either lowercase or uppercase, letters are significantly different based on the Tukey HSD post-hoc test.

As the tillage type and nitrogen dose interaction was statistically significant (*p*-value = 0.004) with a large effect size (0.596) and looking for more insight into straw yield, we compared the two tillage types for each nitrogen dose separately and the three nitrogen doses for each tillage type (Figure 3). The straw NDFF differed significantly (*p*-value < 0.001) between the two tillage types only at 149 kg ha⁻¹ with a higher value (32.7%) for NT compared to 21.3% for CT (Figure 3, lowercase letters). Regarding the separate analysis by tillage type (Figure 3, uppercase letters), straw NDFF differed significantly between the three nitrogen doses for both tillage types (*p*-value = 0.020 for CT and less than 0.001 for NT). For CT, straw NDFF increased with increasing nitrogen amount from 11.7 to 21.3% for supplied nitrogen of 82 to 149 kg ha⁻¹, whereas the increase was much stronger for NT (from 8.5 to 32.7% for the same supplied nitrogen amounts as mentioned above).

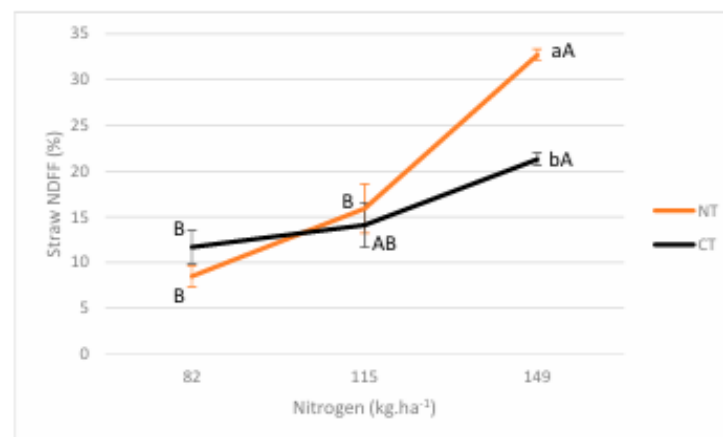


Figure 3. Wheat straw NDFF (%). CT, conventional tillage; NT, no-tillage; NDFF, nitrogen derived from fertilizer. Vertical bars represent standard errors. Tillage types with different lowercase letters are significantly different based on the Tukey HSD post-hoc test for each nitrogen dose. Nitrogen doses with different uppercase letters are significantly different based on the Tukey HSD post-hoc test for each tillage type.

3.4. Nitrogen Use Efficiency

Nitrogen dose and its interaction with tillage type were statistically significant for grain NUE (p -values = 0.002 and 0.001, respectively) and both factor effects and their interaction were statistically significant for straw NUE (p -values = 0.015, 0.006, and 0.042, for tillage type, nitrogen dose, and their interaction, respectively) (Table 3). Straw NUE was higher in NT (5.8%) compared to CT (3.8%) and increased with the amount of supplied nitrogen (from 3.4% for 82 kg ha⁻¹ to 6.8% for 149 kg ha⁻¹). Grain NUE was similar for the lowest nitrogen doses (23.6%) and much higher compared to the medium nitrogen dose (13.9%). Ref. [28] found a significant difference between the nitrogen doses (0, 45, 90, and 135 kg ha⁻¹) but with NUE values decreasing with nitrogen doses. The only non-significant factor is tillage type for grain NUE, even if NT has an additional 3.5% in comparison to CT and this factor has a large effect size (0.199). As for grain total nitrogen, this is probably due to the high variability in grain NUE with a standard deviation of 10.8% for NT compared to 3.8% for CT. Ref. [57] found a significant difference between the two tillage types, even though there were higher NUE values (28.7 and 25.8% compared to 22.1 and 18.6% in our study, for NT and CT, respectively) but with a lesser magnitude in difference in favor of NT (2.9% compared to 3.5% in our study). Also, Ref. [28] found a significant difference between the two tillage types with a much higher NUE value for NT compared to CT (an average difference of 9.8% between both tillage types).

Since interaction was statistically significant for both grain and straw NUE with large effect sizes of 0.683 and 0.411, respectively, we did two separate analyses comparing one factor for each level of the other factor. Regarding grain NUE, there was a significant difference between the two tillage types at 115 and 149 kg ha⁻¹ (p -values = 0.047 and 0.002, respectively) but not at 82 kg ha⁻¹ (p -value = 0.226) (Figure 4). The pattern was not the same at these two nitrogen doses: Higher grain NUE was found under CT at 115 kg ha⁻¹ (19.0% against 8.8%) but under NT at 149 kg ha⁻¹ (30.6% against 16.5%). The three nitrogen doses differed significantly at NT (p -value = 0.002) but not at CT (p -value = 0.485). The grain NUE mean values under NT followed the same pattern found in the overall analysis with similarly high values at the lowest and highest nitrogen doses (26.8 and 30.6%, respectively) that differed significantly from the intermediate dose with a low value (8.8%). This can be explained by the soil dry condition that occurred during the second application of N in the mid-season (February 8), which affected the NUE since there was little rainfall at this time (Figure 2). This was not the situation for the lowest and the highest nitrogen doses as these two doses were applied during favorable climatic conditions, in particular, rainfall. This is in line with studies carried out in Morocco, which reported that NUE in wheat is highly linked to rainfall distribution in semi-arid conditions [72,73]. The lower average grain NUE for 115 kg N ha⁻¹ may be explained by the fact that there was a small amount of rainfall when the second fertilizer application was made (Figure 2). It then increases at 149 kg N ha⁻¹, which is in line with studies that have shown that the stable isotope values of nitrogen in plants are affected by rainfall [74]. Initially, it is essential to optimize the N rates considering both soil fertility and crop requirements. Once optimized, these rates should be applied using suitable methods and timed appropriately, taking into account the specific soil properties and prevailing climatic conditions [75,76]. For straw NUE, a significant difference between the two tillage types was observed only at the highest nitrogen dose (p -value = 0.033) but not at the two other doses (p -values = 0.830 and 0.400, for 82 and 115 kg ha⁻¹, respectively) with a higher value (9.2%) under NT compared to 4.3% under CT (Figure 5). As for grain, there was a significant difference in straw NUE between the three nitrogen doses only at NT (p -value = 0.012) but not CT (p -value = 0.694). The straw NUE values increased with the nitrogen doses from 3.4 to 9.2%.

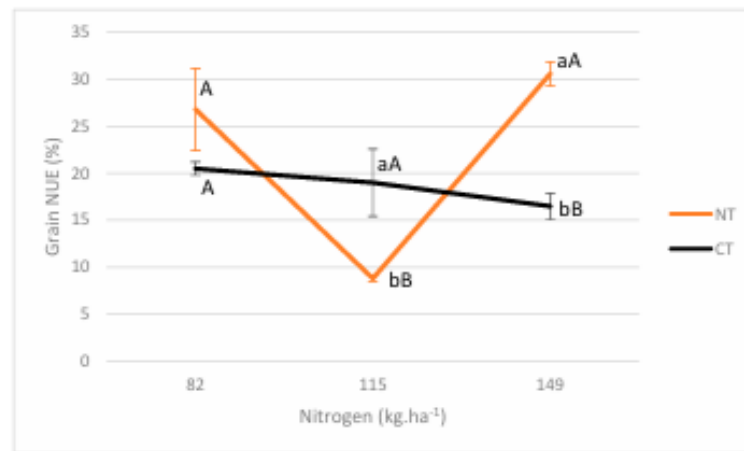


Figure 4. Wheat grain NUE (%). CT, conventional tillage; NT, no-tillage; NUE, nitrogen use efficiency. Vertical bars represent standard errors. Tillage types with different lowercase letters are significantly different based on the Tukey HSD post-hoc test for each nitrogen dose. Nitrogen doses with different uppercase letters are significantly different based on the Tukey HSD post-hoc test for each tillage type.

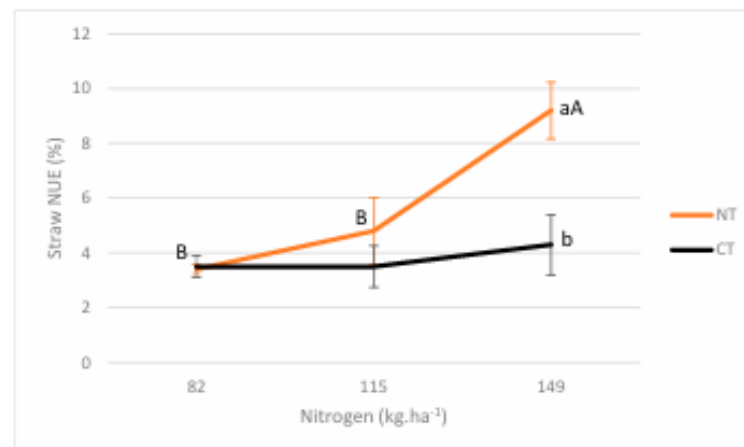


Figure 5. Wheat straw NUE (%). CT, conventional tillage; NT, no-tillage; NUE, nitrogen use efficiency. Vertical bars represent standard errors. Tillage types with different lowercase letters are significantly different based on the Tukey HSD post-hoc test for each nitrogen dose. Nitrogen doses with different uppercase letters are significantly different based on the Tukey HSD post-hoc test for each tillage type.

The average NUE in NT is higher than that in CT for grain and straw yields. Therefore, no-tillage could contribute to environmental conservation through a reduction in nitrate leaching in the soil [77] if adopted.

The increase in yield observed with no-tillage practices and the response of yield to varying fertilizer levels can be attributed to the improved N and NUE yield resulting from better use of nitrogen and consequently reduced soil nutrient deficiencies. The impact of tillage and fertilizers on wheat grain yield varies due to differences in soil conditions [78], water availability, and rainfall patterns [79], as well as the specific tillage and fertilizer levels used [80]. Many researchers [81–83] have suggested that the crop response to tillage depends on several interacting factors, such as the crop species, soil, and climatic conditions.

Furthermore, Ref. [84] reported that no-till practices also increase soil moisture retention and enhance water use efficiency in crops.

4. Conclusions

This study was carried out to assess the impact of tillage and fertilizer application on nitrogen distribution in soil and durum wheat (Louiza variety). Two tillage types were compared: no-till (NT) and conventional tillage (CT) using three nitrogen doses (82, 115, and 149 kg N ha⁻¹). Soil nitrogen content was assessed using the stable nitrogen isotope method (¹⁵N). ANOVA showed that there was no significant difference between tillage types and nitrogen doses for grain and straw yields and grain total nitrogen. The effects of both factors and their interaction were significant for straw total nitrogen. There was no difference between tillage types for grain nitrogen use efficiency (NUE), even though NT was superior to CT by 3.5%, but nitrogen doses had a significant effect and a significant interaction with tillage type. The results of the separate analysis of nitrogen doses for each tillage type showed that the average NUE for grain was 20.5, 8.4, and 16.5%, respectively, for the three nitrogen doses in the case of CT, while it was 26.8, 19.0, and 30.6% for NT. This indicates that NT outperformed CT. For straw, NUE was 3.2, 3.5, and 5.4% for CT and 3.4, 4.9, and 9.2% for NT, for the same nitrogen doses. The results highlight a higher NUE for grain and straw under no-till compared to conventional tillage, at all three nitrogen doses. Conservation agriculture practices, such as no-till, could be an effective strategy for reducing soil nitrogen losses. In conclusion, a no-tillage system should be promoted as one of the best practices to enhance the NUE, productivity, and quality of durum wheat under semi-arid conditions. Establishing a model linking these variations with N input rates could offer a promising approach to better understanding and predicting fertilizer N uses and losses, in order to precisely optimize N management practices under conservation agriculture.

Author Contributions: Conceptualization, R.M., H.M., H.D., A.G. and N.E.A.; methodology, N.E.A., H.M., H.D. and A.Z.; software, N.E.A., H.M., A.D. and R.M.; validation, N.E.A., H.M., A.D. and R.M.; formal analysis, N.E.A., H.M., A.D. and R.M.; investigation, N.E.A., H.M., A.D., A.Z., A.G. and R.M.; resources, N.E.A., H.M., H.I., Z.E.M. and R.M.; data curation, N.E.A., H.M. and A.D.; writing—original draft preparation, H.M.; writing—review and editing, H.M., A.D. and N.E.A.; visualization, A.D.; supervision, R.M., A.Z., A.G. and N.E.A.; project administration, R.M., M.B., A.Z., A.G. and A.B.; funding acquisition, R.M. and M.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors thank the INRA-ICARDA MCGP YG and EIA CA Use case projects for supporting the research and the publication of this paper.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: The authors would like to thank the staff of the CNESTEN, for their assistance with RAF 5086 this project.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Zhang, Y.; He, N.; Huang, J.; Zhang, G.; Han, X. Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland. *Acta Ecol. Sin.* **2013**, *33*, 6786–6794. [[CrossRef](#)]
2. Rütting, T.; Aronsson, H.; Delin, S. Efficient use of nitrogen in agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2018**, *110*, 1–5. [[CrossRef](#)]
3. Liao, J.; Liu, X.; Hu, A.; Song, H.; Chen, X.; Zhang, Z. Effects of biochar-based controlled release nitrogen fertilizer on nitrogen-use efficiency of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 11063. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Drury, C.F.; Tan, C.S. Long-term (35 years) effects of fertilization, rotation, and weather on corn yields. *Can. J. Plant Sci.* **1995**, *75*, 355–362. [[CrossRef](#)]

5. Melaj, M.A.; Echeverria, H.E.; López, S.C.; Studdert, G.; Andrade, F.; Bárbaro, N.O. Timing of nitrogen fertilization in wheat under conventional and no-tillage system. *Agron. J.* **2003**, *95*, 1525–1531. [\[CrossRef\]](#)
6. Kostić, M.M.; Tagarakis, A.C.; Ljubičić, N.; Blagojević, D.; Radulović, M.; Ivošević, B.; Rakić, D. The effect of N fertilizer application timing on wheat yield on Chernozem soil. *Agronomy* **2021**, *11*, 1413. [\[CrossRef\]](#)
7. Fischer, R.A. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Res.* **1993**, *33*, 57–80. [\[CrossRef\]](#)
8. Allart, K.; Almoussawi, A.; Kerbey, L.; Catterou, M.; Roger, D.; Mortier, D.; Blanc, E.; Robert, B.; Spicher, F.; Emery, L.; et al. Splitting nitrogen fertilization is more important than nitrogen level when mixed wheat varieties are cultivated in a conservation agriculture system. *Agronomy* **2023**, *13*, 1295. [\[CrossRef\]](#)
9. Khan, G.R.; Alkharabsheh, H.M.; Akmal, M.; AL-Huqail, A.A.; Ali, N.; Alhammad, B.A.; Anjum, M.M.; Goher, R.; Wahid, F.; Seleiman, M.F.; et al. Split nitrogen application rates for wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and grain N using the CSM-CERES-Wheat model. *Agronomy* **2022**, *12*, 1766. [\[CrossRef\]](#)
10. Parent, L.E.; Deslauriers, G. Simulating maize response to split-nitrogen fertilization using easy-to-collect local features. *Nitrogen* **2023**, *4*, 331–349. [\[CrossRef\]](#)
11. Govindasamy, P.; Muthusamy, S.K.; Bagavathiannan, M.; Mowrer, J.; Jagannadham, P.T.K.; Maity, A.; Halli, H.M.; Sujayanand, G.K.; Vadivel, R.; Das, T.K.; et al. Nitrogen use efficiency—A key to enhance crop productivity under a changing climate. *Front. Plant Sci.* **2023**, *14*, 1121073. [\[CrossRef\]](#)
12. Ding, J.F.; Li, F.J.; Le, T.; Wu, P.; Zhu, M.; Li, C.Y.; Zhu, X.K.; Guo, W.S. Nitrogen management strategies of tillage and no-tillage wheat following rice in the Yangtze River Basin, China: Grain yield, grain protein, nitrogen efficiency, and economics. *Agronomy* **2020**, *10*, 155. [\[CrossRef\]](#)
13. De Jesus, H.I.; da Silva, A.L.B.R.; Cassity-Duffey, K.; Coolong, T. Estimating fertilizer nitrogen-use efficiency in transplanted short-day onion. *Nitrogen* **2023**, *4*, 286–295. [\[CrossRef\]](#)
14. Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J.; Befort, B.L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2011**, *108*, 20260–20264. [\[CrossRef\]](#)
15. Xue, Y.; Song, J.X.; Zhang, Y.; Kong, F.H.; Wen, M.; Zhang, G.T. Nitrate pollution and preliminary source identification of surface water in a semi-arid river basin, using isotopic and hydrochemical approaches. *Water* **2016**, *8*, 328. [\[CrossRef\]](#)
16. Fernández-López, J.A.; Alacid, M.; Obón, J.M.; Martínez-Vives, R.; Angosto, J.M. Nitrate-polluted waterbodies remediation: Global insights into treatments for compliance. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 4154. [\[CrossRef\]](#)
17. Kanter, D.R.; Ogle, S.M.; Winiwarter, W. Building on Paris: Integrating nitrous oxide mitigation into future climate policy. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **2020**, *47*, 7–12. [\[CrossRef\]](#)
18. Griffis, T.J.; Chen, Z.C.; Baker, J.M.; Wood, J.D.; Millet, D.B.; Lee, X.H.; Venterea, R.T.; Turner, P.A. Nitrous oxide emissions are enhanced in a warmer and wetter world. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2017**, *114*, 12081–12085. [\[CrossRef\]](#)
19. Ussiri, D.; Lal, R. The role of nitrous oxide on climate change. In *Soil Emission of Nitrous Oxide and Its Mitigation*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2013.
20. Williams, J.D.; Wuest, S.B. Minimum tillage and no-tillage winter wheat–summer fallow for low precipitation regions. *J. Soil Water Conserv.* **2021**, *76*, 246–255. [\[CrossRef\]](#)
21. Castellini, M.; Fornaro, F.; Garofalo, P.; Giglio, L.; Rinaldi, M.; Ventrella, D.; Vitti, C.; Vonella, A.V. Effects of no-tillage and conventional tillage on physical and hydraulic properties of fine textured soils under winter wheat. *Water* **2019**, *11*, 484. [\[CrossRef\]](#)
22. Keil, A.; Mitra, A.; McDonald, A.; Malik, R.K. Zero-tillage wheat provides stable yield and economic benefits under diverse growing season climates in the Eastern Indo-Gangetic Plains. *Int. J. Agric. Sustain.* **2020**, *18*, 567–593. [\[CrossRef\]](#)
23. Maher, H.; Moussadek, R.; Zouahri, A.; Douaik, A.; Dakak, H.; El Moudane, M.; Ghanimi, A. Effect of no tillage on the physico-chemical properties of soils of the El Kouadia region, Rabat (Morocco). *E3S Web Conf.* **2020**, *150*, 03010. [\[CrossRef\]](#)
24. Aziz, I.; Mahmood, T.; Islam, K.R. Effect of long term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil Tillage Res.* **2013**, *131*, 28–35. [\[CrossRef\]](#)
25. Saber, N.; Mrabet, R. Impact of no tillage and crop sequence on selected soil quality attributes of a vertic calixeroll soil in Morocco. *Agronomie* **2002**, *22*, 451–459. [\[CrossRef\]](#)
26. Huang, D.D.; Chen, X.W.; Zhang, S.X.; Zhang, Y.; Gao, Y.; Zhang, Y.; Liang, A.Z. No-tillage improvement of nitrogen absorption and utilization in a Chinese Mollisol using ¹⁵N-tracing method. *Atmosphere* **2022**, *13*, 530. [\[CrossRef\]](#)
27. Francisco, C.A.L.; Loss, A.; Brunetto, G.; Gonzatto, R.; Giacomini, S.J.; Aita, C.; Piccolo, M.d.C.; Marchezan, C.; Scopel, G.; Vidal, R.F. Aggregation, carbon, nitrogen, and natural abundance of ¹³C and ¹⁵N in soils under no-tillage system fertilized with injection and surface application of pig slurry for five years. *Carbon Manag.* **2021**, *12*, 275–287. [\[CrossRef\]](#)
28. Omara, P.; Aula, L.; Oyebiyi, F.; Nambi, E.; Dhillon, J.S.; Carpenter, J.; Raun, W.R. No-tillage improves winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grain nitrogen use efficiency. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **2019**, *50*, 2411–2419. [\[CrossRef\]](#)
29. Maher, H.; Moussadek, R.; Ghanimi, A.; Zouidi, O.; Douaik, A.; Dakak, H.; Amenzou, N.E.; Zouahri, A. Effect of tillage and nitrogen fertilization on soil properties and yield of five durum wheat germplasms in a dry area of Morocco. *Appl. Sci.* **2022**, *13*, 910. [\[CrossRef\]](#)
30. Lundy, M.E.; Pittelkow, C.M.; Bruce, A.; Linquist, B.A.; Liang, X.Q.; Van Groenigen, K.J.; Leef, J.; Six, J.; Venterea, R.T.; Van Kessel, C. Nitrogen fertilization reduces yield declines following no-till adoption. *Field Crops Res.* **2015**, *183*, 204–210. [\[CrossRef\]](#)

31. Liu, M.; Wu, X.L.; Li, M.; Tao Xiong, T.; Li, C.S.; Tang, Y.L. Innovative no-till seeding technology improves yield and nitrogen use efficiency while reducing environmental pressure in wheat after rice harvesting. *Soil Tillage Res.* **2024**, *235*, 105908. [\[CrossRef\]](#)
32. Bhat, M.I.; Faisal-ur-Rasool Bhat, M.A. Applications of stable and radioactive isotopes in soil science. *Curr. Sci.* **2010**, *98*, 1458–1471.
33. Feland, B.C.; Quideau, S.A. Isotope applications to soil science at the University of Alberta—An historical perspective. *Can. J. Soil Sci.* **2020**, *100*, 344–355. [\[CrossRef\]](#)
34. Iaaich, H.; Moussadek, R.; Mrabet, R.; Douaik, A.; Baghdad, B.; Benmansour, M.; Zouagui, A.; Nezha Asserar, N.; Bouabdli, A. Evaluation of the impact of no-till on soil erosion using soil aggregate stability and fallout radionuclides in Northern Morocco. *Ecol. Eng. Environ. Technol.* **2023**, *24*, 241–248. [\[CrossRef\]](#)
35. Schaub, M.; Alewell, C. Stable carbon isotopes as an indicator for soil degradation in an alpine environment (Urseren Valley, Switzerland). *Rapid Commun. Mass Spectrom.* **2009**, *23*, 1499–1507. [\[CrossRef\]](#)
36. Flohr, P.; Jenkins, E.; Williams, H.R.S.; Jamjoum, K.; Nuimat, S.; Muldner, G. What can crop stable isotopes ever do for us? An experimental perspective on using cereal carbon stable isotope values for reconstructing water availability in semi-arid and arid environments. *Veg. Hist. Archaeobotany* **2019**, *28*, 497–512. [\[CrossRef\]](#)
37. Wallace, M.; Jones, G.; Charles, M.; Fraser, R.; Halstead, P.; Heaton, T.H.E.; Bogaard, A. Stable carbon isotope analysis as a direct means of inferring crop water status and water management practices. *World Archaeol.* **2013**, *45*, 388–409. [\[CrossRef\]](#)
38. Menichetti, L.; Houot, S.; van Oort, F.; Katterer, T.; Christensen, B.T.; Chenu, C.; Barré, P.; Vasilyeva, N.A.; Ekblad, A. Increase in soil stable carbon isotope ratio relates to loss of organic carbon: Results from five long-term bare fallow experiments. *Oecologia* **2015**, *177*, 811–821. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
39. Park, H.J.; Baek, N.; Lim, S.S.; Jeong, Y.J.; Seo, B.S.; Kwak, J.H.; Lee, S.M.; Yun, S.I.; Kim, H.Y.; Arshad, M.A.; et al. Coupling of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ to understand soil organic matter sources and C and N cycling under different land-uses and management: A review and data analysis. *Biol. Fertil. Soils* **2023**, *59*, 487–499. [\[CrossRef\]](#)
40. Giombelli, L.D.; Loss, A.; Ventura, B.S.; Junior, E.d.S.; Almeida, J.; Piccolo, M.d.C.; Mafra, A.L.; Kurtz, C.; Brunetto, G.; Comin, J.J. Aggregation index, carbon, nitrogen, and natural abundance of ^{13}C and ^{15}N in soil aggregates and bulk soil cultivated with onion under crop successions and rotations. *Soil Res.* **2020**, *58*, 622–635. [\[CrossRef\]](#)
41. Li, X.Y.; Wang, Y.; Feng, G.Z.; Xu, Z.; Meng, F.C.; Gao, Q. Differential fertilizer nitrogen fates in maize cropping system among three soil textures based on ^{15}N . *Field Crops Res.* **2023**, *291*, 108780. [\[CrossRef\]](#)
42. Craine, J.M.; Brookshire, E.N.J.; Cramer, M.D.; Hasselquist, N.J.; Koba, K.; Erika Marin-Spiotta, E.; Wang, L.X. Ecological interpretations of nitrogen isotope ratios of terrestrial plants and soils. *Plant Soil* **2015**, *396*, 1–26. [\[CrossRef\]](#)
43. Bedard-Haughn, A.; Van Groenigen, J.W.; van Kessel, C. Tracing ^{15}N through landscapes: Potential uses and precautions. *J. Hydrol.* **2003**, *272*, 175–190. [\[CrossRef\]](#)
44. Robinson, D. $\delta^{15}\text{N}$ as an integrator of the nitrogen cycle. *Trends Ecol. Evol.* **2001**, *16*, 153–162. [\[CrossRef\]](#)
45. Awiti, A.O.; Walsh, M.G.; Kinyamario, J. Dynamics of topsoil carbon and nitrogen along a tropical forest–cropland chronosequence: Evidence from stable isotope analysis and spectroscopy. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2008**, *127*, 265–272. [\[CrossRef\]](#)
46. Salazar, O.; Diaz, R.; Nario, A.; Videla, X.; Alonso-Ayuso, M.; Quemada, M. Nitrogen Fertilizer efficiency determined by the ^{15}N dilution technique in maize followed or not by a cover crop in Mediterranean Chile. *Agriculture* **2021**, *11*, 721. [\[CrossRef\]](#)
47. Zhang, Q.W.; Yang, Z.L.; Zhang, H.; Yi, J. Recovery efficiency and loss of ^{15}N -labelled urea in a rice–soil system in the upper reaches of the Yellow River basin. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2012**, *158*, 118–126. [\[CrossRef\]](#)
48. Ma, P.; Lan, Y.; Lyu, T.; Li, F.; Yang, Z.; Sun, Y.; Ma, J. Nitrogen fate and efficiency of fertilizer application under a rapeseed–wheat–rice rotation system in Southwest China. *Agronomy* **2021**, *11*, 258. [\[CrossRef\]](#)
49. Halitligil, M.B.; Akin, A.; Ylbeyi, A. Nitrogen balance of nitrogen- 15 applied as ammonium sulphate to irrigated potatoes in sandy textured soils. *Biol. Fertil. Soils* **2002**, *35*, 369–378.
50. Bateman, A.S.; Kelly, S.D.; Jickells, T.D. Nitrogen isotope relationships between crops and fertilizer: Implications for using nitrogen isotope analysis as an indicator of agricultural regime. *J. Agric. Food Chem.* **2005**, *53*, 5760–5765. [\[CrossRef\]](#)
51. Cannavo, P.; Harmand, J.M.; Zeller, B.; Vaast, P.; Ramirez, J.E.; Dambrine, E. Low nitrogen use efficiency and high nitrate leaching in a highly fertilized *Coffea arabica*–*Inga densiflora* agroforestry system: A ^{15}N labeled fertilizer study. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* **2013**, *95*, 377–394. [\[CrossRef\]](#)
52. Abagandura, G.O.; Park, D.; Bridges, W.C.; Brown, K. Soil surfactants applied with ^{15}N labeled urea increases bermudagrass uptake of nitrogen and reduces nitrogen leaching. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **2021**, *184*, 378–387. [\[CrossRef\]](#)
53. Du, Y.G.; Guo, X.W.; Zhou, G.; Cao, G.M.; Li, Y.K. Effect of grazing intensity on soil and plant $\delta^{15}\text{N}$ of an alpine meadow. *Pol. J. Environ. Stud.* **2017**, *26*, 1071–1075. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
54. Wan, X.J.; Wu, W.; Liao, Y.C. Mitigating ammonia volatilization and increasing nitrogen use efficiency through appropriate nitrogen management under supplemental irrigation and rain-fed condition in winter wheat. *Agric. Water Manag.* **2021**, *255*, 107050. [\[CrossRef\]](#)
55. Shalmani, M.A.M.; Lakzian, A.; Khorassani, R.; Khavazi, K.; Zaman, M. Interaction of different wheat genotypes and nitrification inhibitor 3,4-Dimethylpyrazole phosphate using ^{15}N isotope tracing techniques. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **2017**, *48*, 1247–1258. [\[CrossRef\]](#)
56. Götz, K.P.; Erekul, O. Influence of sink size on ^{15}N and ^{13}C allocation during different phenological phases of spring wheat cultivars. *Nitrogen* **2023**, *4*, 28–36. [\[CrossRef\]](#)

57. Ingrassia, R.; Lo Porto, A.; Ruisi, P.; Amato, G.; Giambalvo, D.; Frenda, A.S. Conventional tillage versus no-tillage: Nitrogen use efficiency component analysis of contrasting durum wheat genotypes grown in a Mediterranean environment. *Field Crops Res.* **2023**, *296*, 108904. [\[CrossRef\]](#)
58. Iqbal, M.M.; Akhter, J.; Mohammadb, W.; Shah, S.M.; Nawaz, H.; Mahmood, K. Effect of tillage and fertilizer levels on wheat yield, nitrogen uptake and their correlation with carbon isotope discrimination under rainfed conditions in north-west Pakistan. *Soil Tillage Res.* **2005**, *80*, 47–57. [\[CrossRef\]](#)
59. Dalal, R.C.; Wang, W.; Allen, D.E.; Reeves, S.; Menzies, N.W. Soil Nitrogen and Nitrogen-Use Efficiency under Long-Term No-till Practice. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **2011**, *75*, 2251–2261. [\[CrossRef\]](#)
60. Dalal, R.C.; Strong, W.M.; Cooper, J.E.; King, A.J. No-tillage and nitrogen application affects the decomposition of ¹⁵N-labelled wheat straw and the levels of mineral nitrogen and organic carbon in a Vertisol. *Aust. J. Exp. Agric.* **2007**, *47*, 862–868. [\[CrossRef\]](#)
61. Busari, M.A.; Salako, F.K.; Tuniz, C. Stable isotope technique in the evaluation of tillage and fertilizer effects on soil carbon and nitrogen sequestration and water use efficiency. *Eur. J. Agron.* **2016**, *73*, 98–106. [\[CrossRef\]](#)
62. Giambalvo, D.; Amato, G.; Badagliacca, G.; Ingrassia, R.; Di Micelia, G.; Frenda, A.S.; Antonella Plaia, A.; Venezia, G.; Ruisi, P. Switching from conventional tillage to no-tillage: Soil N availability, N uptake, ¹⁵N fertilizer recovery, and grain yield of durum wheat. *Field Crops Res.* **2018**, *218*, 171–181. [\[CrossRef\]](#)
63. Smitha, C.J.; Chalk, P.M. The role of ¹⁵N in tracing N dynamics in agro-ecosystems under alternative systems of tillage management: A review. *Soil Tillage Res.* **2020**, *197*, 104496. [\[CrossRef\]](#)
64. Mariotti, A. Le carbone 13 en abondance naturelle, traceur de la dynamique de la matière organique des sols et de l'évolution des paléoenvironnements continentaux. *Cah. ORSTOM Série Pédologie* **1991**, *26*, 299–313.
65. Brand, W.A.; Coplen, T.B.; Vogl, J.; Rosner, M.; Prohaska, T. Assessment of international reference materials for isotope-ratio analysis (IUPAC technical report). *Pure Appl. Chem.* **2014**, *86*, 425–467. [\[CrossRef\]](#)
66. Ismaili, K.; Ismaili, M.; Ibjibijen, J. The use of ¹³C and ¹⁵N based isotopic techniques for assessing soil C and N changes under conservation agriculture. *Eur. J. Agron.* **2015**, *64*, 1–7. [\[CrossRef\]](#)
67. Lakens, D. Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: A practical primer for *t*-tests and ANOVAs. *Front. Psychol.* **2013**, *4*, 863. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
68. Richardson, J.T.E. Eta squared and partial eta squared as measures of effect size in educational research. *Educ. Res. Rev.* **2011**, *6*, 135–147. [\[CrossRef\]](#)
69. Koricheva, J.; Gurevitch, J. Uses and misuses of meta-analysis in plant ecology. *J. Ecol.* **2014**, *102*, 828–844. [\[CrossRef\]](#)
70. Gardner, J.B.; Drinkwater, L.E. The fate of nitrogen in grain cropping systems: A meta-analysis of ¹⁵N field experiments. *Ecol. Appl.* **2009**, *19*, 2167–2184. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
71. Liu, J.; Wang, C.; Peng, B.; Xia, Z.W.; Jiang, P.; Bai, E. Effect of nitrogen addition on the variations in the natural abundance of nitrogen isotopes of plant and soil components. *Plant Soil* **2016**, *412*, 453–464. [\[CrossRef\]](#)
72. Karrou, M. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in common wheat. *Al Awamia* **1996**, *95*, 39–51.
73. Mosseddaq, F.; Moughli, L. Fertilisation azotée des céréales, cas des blés en Bour et en irrigué. *MADRP/DERD* **1999**, *62*, 2.
74. Amundson, R.; Austin, A.T.; Schuur, A.G.; Yoo, K.; Matzek, V.; Kendall, C.; Uehersax, A.; Brenner, D.; Baisden, W.T. Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. *Glob. Biogeochem. Cycles* **2002**, *17*, 1031–1041. [\[CrossRef\]](#)
75. Xu, X.; He, P.; Pampolino, M.F.; Johnston, A.M.; Qiu, S.; Zhao, S.; Chuan, L.; Zhou, W. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Res.* **2014**, *157*, 27–34. [\[CrossRef\]](#)
76. Wang, Y.; Li, C.; Li, Y.; Zhu, L.; Liu, S.; Yan, L.; Feng, G.; Gao, Q. Agronomic and environmental benefits of nutrient expert on maize and rice in Northeast China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2020**, *27*, 22–37.
77. Yagioka, A.; Komatsuzaki, M.; Kaneko, N.; Ueno, H. Effect of no-tillage with weed cover mulching versus conventional tillage on global warming potential and nitrate leaching. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2015**, *200*, 42–53. [\[CrossRef\]](#)
78. Unger, P.W. *Tillage Systems for Soil and Water Conservation*; FAO Soils Bulletin 54; FAO: Rome, Italy, 1984; p. 287.
79. Rasmussen, K.J. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil Tillage Res.* **1999**, *53*, 3–14. [\[CrossRef\]](#)
80. Ishaq, M.; Ibrahim, M.; Lal, R. Tillage effect on nutrient uptake by wheat and cotton as influenced by fertilizer rate. *Soil Tillage Res.* **2001**, *62*, 41–53. [\[CrossRef\]](#)
81. Lal, R. Axle load and tillage effects on crop yields on a Mollic Ochraqualf in northwest Ohio. *Soil Tillage Res.* **1996**, *37*, 143–160. [\[CrossRef\]](#)
82. Lal, R. Long term tillage and maize monoculture effects on tropical Alfisols in western Nigeria. I. Crop yield and soil physical properties. *Soil Tillage Res.* **1997**, *42*, 145–160. [\[CrossRef\]](#)
83. Diaz-Zortia, M. Effect of deep tillage and nitrogen fertilization interactions on dry land corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Till. Res.* **2000**, *54*, 11–19. [\[CrossRef\]](#)
84. Walley, F.L.; Lafond, G.P.; Matus, A.; Van Kessel, C. Water use efficiency and carbon isotopic composition in reduced tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **1999**, *63*, 356–361. [\[CrossRef\]](#)

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Article

Effect of Tillage and Nitrogen Fertilization on Soil Properties and Yield of Five Durum Wheat Germplasms in a Dry Area of Morocco

Hassnae Maher ^{1,2,3,*}, Rachid Moussadek ^{2,3}, Ahmed Ghanimi ¹, Oumaima Zouidi ^{1,2}, Ahmed Douaik ², Houria Dakak ², Nour Eddine Amenzou ⁴ and Abdelmjid Zouahri ²

¹ Laboratory of Materials, Nanotechnology and Environment, Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Mohammed V University, Rabat P.O. Box 1014, Morocco

² Research Unit on Environment and Conservation of Natural Resources, Regional Center of Rabat, National Institute of Agricultural Research, Rabat P.O. Box 6356, Morocco

³ International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Rabat P.O. Box 1014, Morocco

⁴ Division of Water and Climate, Direction of Studies and Scientific Research, National Center for Nuclear Energy, Sciences and Techniques (CNESTEN), Rabat P.O. Box 1014, Morocco

* Correspondence: hassnaemaher@gmail.com; Tel.: +212-676612863

Abstract: In Morocco, cereal production is below the expected potential. The adoption of best agricultural practices that reduce vulnerability to climate is a major requirement. No-tillage (NT) agriculture is a system that could improve cereal production by enhancing soil fertility. Some factors, in combination with no-tillage, can further improve cereal yields, especially the choice of variety the adequate fertilization. The objective of our study is to investigate the effect of no-tillage agriculture and nitrogen fertilization on soil fertility and the yield of five durum wheat varieties developed in Morocco in a long-term (18 years) NT trial at the INRA Merchouch experimental station, Morocco. The results show that tillage type had a significant effect on soil organic carbon and CEC (measured before the start of the experiment), as well as on ammonium and nitrates (measured at the end of the experiment), whereas nitrogen dose had a significant effect on total nitrogen and nitrates (measured at the end of the experiment). Regarding wheat yield, as measured at the end of the experiment during the 2020–2021 cropping season, the results show that, under NT, the varieties Nachit, Faraj, and Louiza had grain yields of 4.5, 4.3, and 3.4 t ha⁻¹ and straw yields of 9.8, 7.8, and 6.8 t ha⁻¹, respectively, whereas the LC and M.G germplasms had grain yields of 4.05 and 3.72 t ha⁻¹ and straw yields of 8.25 and 8.39 t ha⁻¹, respectively. These values are low for a favorable area and correspond to a semi-arid area. In addition, no effects of nitrogen dose were observed due to water stress, which reduced nitrogen use efficiency. Nachit is the most adapted variety under NT, with the highest yield (5.1 t ha⁻¹) under a low dose of nitrogen (20 kg N ha⁻¹), followed by Faraj (4.7 t ha⁻¹), still under NT but with a higher nitrogen dose (40 kg N ha⁻¹) and Nachit (4.5 t ha⁻¹) with the minimum nitrogen dose but under both NT and CT. In conclusion, Nachit and Faraj wheat varieties performed the best under no-tillage conditions with the minimal nitrogen dose. However, grain yield values were reduced, owing to water stress, which reduced nitrogen use efficiency.

Keywords: conventional tillage; durum wheat; nitrogen fertility; no-tillage; soil



Citation: Maher, H.; Moussadek, R.; Ghanimi, A.; Zouidi, O.; Douaik, A.; Dakak, H.; Amenzou, N.E.; Zouahri, A. Effect of Tillage and Nitrogen Fertilization on Soil Properties and Yield of Five Durum Wheat Germplasms in a Dry Area of Morocco. *Appl. Sci.* **2022**, *13*, 910. <https://doi.org/10.3390/app13020910>

Academic Editor: Rafael López Núñez

Received: 24 September 2022

Revised: 29 November 2022

Accepted: 30 November 2022

Published: 9 January 2023



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Soil is the main environment for the development of crops, guaranteeing a large part of the high yield. In recent years, there has been a trend of gradual transition from conventional tillage to new no-till techniques, culminating in no-tillage agriculture. Compared to other tillage practices, no-tillage techniques provide several economic, environmental, and agronomic advantages. It is a technique that has had generally positive effects on soil [1–3] by improving nitrogen levels [4], in addition to increasing grain yields. In the 2020–2021

growing year, the area of autumn cereals in Morocco reached 4.3 million hectares (ONICL, 2020). Cereals are grown in multiple of the country's agroclimatic zones in rotation with other annual crops (MAPM, 2020). Morocco's wheat imports in the 2020/2021 crop year were estimated at 6.2 million metric tons, which is approximately 35% higher than imports in 2019/2020. This significant increase was mainly the result of low domestic production and the suspension of import duties (ONICL, 2020).

The average Moroccan consumes 200 kg of wheat per year, which is three times more than the worldwide average. As in the other Maghreb countries, this cereal, particularly through bread, is a basic element in the diet. Durum wheat is the raw material for many byproducts (bread, semolina, pasta, pastries, and biscuits) and has received considerable attention, owing to its adaptation to semi-arid environments [5]. Wheat grain is an energetic food containing, on average, 70% starch, 12% protein, 9% pentosan and cellulose, and less than 5% free sugars, lipids, and minerals [6].

Nitrogen remains one of the most important elements for cereal production [7]. Its efficient use is decisive for the improvement of production in terms of quantity and quality [8–10]. Nitrogen fertilization of cereals should take into consideration the nature and the dose to be applied. Cereal nitrogen requirements vary depending on the growth phase [11,12]. The objective of our study is to investigate the effect of no-tillage techniques and nitrogen fertilization on soil fertility and the yield of five durum wheat varieties recently developed in Morocco—three new varieties (Louiza, Faraj, and Nachit) and two germplasms (M.G and I.C)—in a long-term NT (18 years) trial at the INRA Merchouch experimental station. Interactions between two or three factors can inform recommendations for farmers with respect to the optimal combination of tillage type, nitrogen dose, and variety.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The site (Figure 1) is located at the Merchouch experimental station of the National Institute of Agricultural Research (INRA) in the Zaer region (60 km south of Rabat; 33°37' N; 6°43' O). It is characterized by a Mediterranean climate with oceanic influence, with an average temperature of 28 °C and an average rainfall of 400 mm. The site was under no tillage since 2004, with cereal-food legume as rotation.

2.2. Soil sampling and Analysis

Soil samples were taken in September 2020 using a hand auger from both non-tillage (NT) and conventional tillage (CT) plots. Three replicates were considered for each tillage type at five depths (0–5, 5–10, 10–20, 20–40, and 40–60 cm) and each of the three nitrogen doses. After collection, soil samples were air-dried, hand-crushed, and sieved to 0.2 mm for laboratory analysis. Texture was determined using only two samples (one per tillage type) at a depth of 0–15 cm. Organic carbon (OC), phosphorus (P_2O_5), potassium (K_2O), and cationic exchange capacity (CEC) were analyzed before the start of the experiment, whereas total nitrogen, ammonium, and nitrates were analyzed at the end of the experiment. Soil properties were determined following international standards. OC was determined by the method of Walkley and Black [13]. Assimilable phosphorus was extracted by a sodium bicarbonate reagent (HCO_3Na) buffered at pH 8.5 with sodium hydroxide (NaOH) [14], potassium was evaluated using the normal "K exchangeable with ammonium acetate" method at pH = 7 [15], and CEC was measured by the Bower method [16]. Total nitrogen was determined by the Kjeldahl method [17], and ammonium and nitrates were extracted by a solution of KCl, then distilled [18].

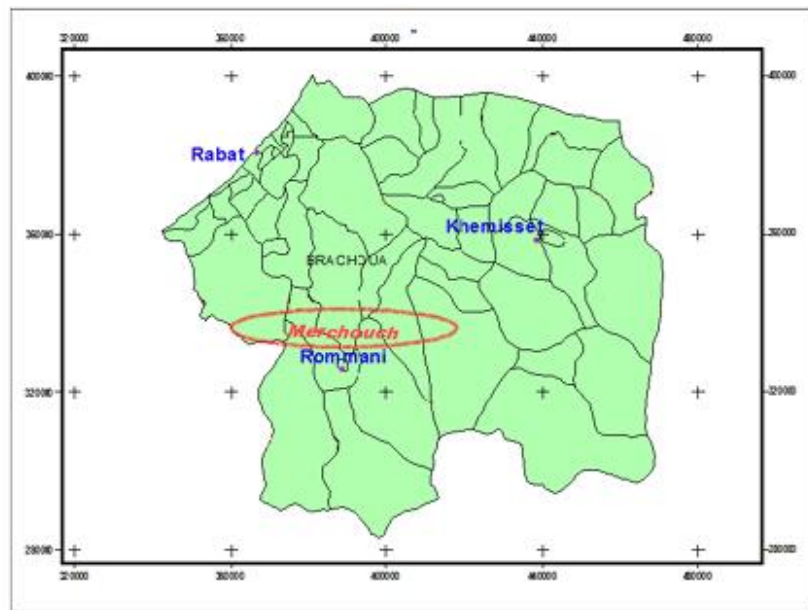


Figure 1. Map showing the location of the experimental site (in red).

2.3. Experimental Protocol

The experimental setup includes either ten treatments (two tillage types x five depths) for soil properties evaluated before the experiment or 30 treatments (two tillage types x three nitrogen doses x five depths for soil properties evaluated at the end of the experiment or two tillage types x three nitrogen doses x five varieties for wheat yield). The experimental design was a randomized complete block with three replications. Therefore, the corresponding experimental designs were either a split plot for soil properties determined before the start of the experiment (tillage type in main plots and depth in subplots) or a split-split plot for those determined at the end of the experiment and for wheat yield. For the former, tillage types were allotted to main plots, nitrogen doses were allotted to subplots, and depths were allotted to sub-subplots. The same is true for wheat yield, except varieties were allotted to sub-subplots. The two tillage types were conventional tillage (CT) and no tillage (NT). The three nitrogen doses were 20, 40, and 60 kg N ha⁻¹. On 21 December 2020, the base fertilizer NPK 10-20-20 was applied at 150 kg ha⁻¹, and on 20 January 2021 and 8 February 2021, ammonitrate 33.5% was supplied at a rate of 100 kg ha⁻¹. The five varieties of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) were Louiza (INRA-Morocco, 2011), Faraj (INRA-Morocco, 2007), and Nachit, as well as two germplasms (M.G and I.C). Some of the main characteristics of the three varieties are presented in Table 1; however, those relative to the two germoplasms are not yet publicly available.

Grain and straw yields were determined for each block, variety, nitrogen dose, and tillage type using two plots with a 1 m × 1 m square metal stem quadrats placed directly on the vegetation.

Table 1. Main characteristics of the three varieties.

Wheat Variety		Faraj	Nachit	Louiza
Year of official inscription		2007	2018	2011
Quality	Protein (%)	15.3	15.0	14.8
	Yellow index	29	27	33
Yield (t ha ⁻¹)	Favorable areas	5.9	5.9	5.5
	Semi-arid areas	3.8	4.1	3.1
	Potential	6.8	7.1	6.0

Source: INRA. (2022). Nouvelles obtentions variétales INRA. INRA éditions: Rabat, Morocco.

2.4. Statistical Analysis

Descriptive statistical parameters (mean, standard deviation, minimum, maximum, and coefficient of variation (CV)) of the various soil and crop characteristics were computed. Then, two conditions were verified: normality (using the Shapiro–Wilk test) and equality of variances (using the Levene test). Because both conditions were met, an analysis of variance (ANOVA) with 3 or 4 factors was used to compare the means corresponding to the two tillage types, the three nitrogen doses, and either the five depths or varieties, as well as their interactions. All factors were considered fixed, except block (replications), which was considered random, resulting in mixed ANOVA models. All the tests were applied at a significance level of 0.05. If significant differences were found, Duncan's multiple-range post hoc test was used for pairwise comparisons. All statistical analyses were performed using SPSS software, version 25 (IBM Corp., Armonk, NY, USA).

3. Results and Discussion

3.1. Soil

3.1.1. Texture

The results of the particle size analysis of the soil samples from the two plots (CT and NT) show that the soil has a clayey texture (Table 2) with almost 50% clay and less than 10% sand.

Table 2. Soil texture measured before the start of the experiment for no tillage (NT) and conventional tillage (CT) at a 15 cm depth.

	Texture					
	Clay (%)	Fine Silt (%)	Coarse Silt (%)	Fine Sand (%)	Coarse Sand (%)	CaCO ₃ (%)
NT	46.6	6.4	36.2	6.8	3.7	0.3
CT	46.5	5.6	37.2	6.3	4.0	0.4

3.1.2. Chemical Properties

Mean values of organic carbon (OC), potassium, phosphorus, and cationic exchange capacity (CEC) for the two tillage types and at the five depths are presented in Table 3.

With respect to organic carbon (OC) contents, ANOVA (Table 4) showed a highly significant difference (F value = 143.06 and *p*-value = 0.007) between NT and CT, with a slightly higher mean value for NT (8.8 g kg⁻¹) compared to CT (8.4 g kg⁻¹). There was also a very highly significant difference between depths (F value = 71.42 and *p*-value < 0.001), with the highest mean values at the soil surface (11.1 and 10.5 g kg⁻¹ at the 0–5 and 5–10 cm depths, respectively), as opposed to the 40–60 cm depth (6.0 g kg⁻¹). Duncan's post hoc test showed that only the 10–20 and 20–40 cm depths did not differ significantly, with mean OC values of 7.9 and 7.5 g kg⁻¹, respectively. This result is in agreement with research on organic matter stocks in conservation systems, which are higher at the surface than in ploughed systems [19–21], with small differences at deeper horizons [22]. Other studies have shown that OC levels in conservation systems are generally higher in the top 10 cm

of soil compared to tilled soil, decreasing sharply in the underlying horizons [23]. There was no significant interaction between the two factors (F value = 2.36 and p -value = 0.060), indicating that the ranking of tillage types in terms of OC content was the same for the five depths and higher for NT than CT.

Table 3. Chemical properties measured before the start of the experiment for no tillage (NT) and conventional tillage (CT) at each soil depth. Means ($n = 3$) with standard deviations followed by the same letter are not statistically different at the 0.05 significance level according to Duncan's post hoc test. OC: organic carbon; CEC: cationic exchange capacity.

Depth (cm)	Tillage	OC (g kg ⁻¹)	Potassium (mg kg ⁻¹)	Phosphorus (mg kg ⁻¹)	CEC (meq/100 g)
0–5	NT	11.6 (0.6)	117 (5)	198 (6)	64 (8)
	CT	10.6 (0.5)	103 (7)	155 (9)	51 (5)
5–10	NT	10.8 (1.8)	100 (11)	179 (16)	57 (7)
	CT	10.2 (1.4)	94 (8)	136 (8)	43 (4)
10–20	NT	7.9 (0.8)	95 (8)	100 (8)	46 (7)
	CT	7.8 (0.8)	95 (6)	120 (10)	38 (8)
20–40	NT	7.6 (1.1)	83 (10)	60 (9)	40 (9)
	CT	7.4 (0.9)	83 (6)	94 (9)	21 (5)
40–60	NT	6.1 (0.7)	65 (5)	40 (8)	35 (6)
	CT	5.9 (1.0)	47 (7)	60 (9)	27 (6)
0–5		11.1 (0.9) a	110 (13) a	177 (20) a	58 (11) a
5–10		10.5 (1.6) b	97 (11) b	158 (18) b	50 (11) b
10–20		7.9 (0.8) c	95 (7) b	110 (15) c	42 (8) c
20–40		7.5 (1.0) c	83 (9) c	77 (20) d	31 (10) d
40–60		6.0 (0.9) d	56 (11) d	50 (13) e	31 (7) d

Table 4. ANOVA results for soil properties measured before the start of the experiment.

Soil Properties	Organic Carbon		Potassium		Phosphorus		CEC	
	F Value	p -Value	F Value	p -Value	F Value	p -Value	F Value	p -Value
Tillage (T)	143.06	0.007 **	11.66	0.076 ns	12.57	0.071 ns	74.23	0.013 *
Depth (D)	71.42	<0.001 ***	117.07	<0.001 ***	536.17	<0.001 ***	51.55	<0.001 ***
T × D	2.36	0.060 ns	7.23	<0.001 ***	48.87	<0.001 ***	2.42	0.056 ns

ns: not significant; *, **, and ***: significant at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

ANOVA (Table 4) showed no significant differences between NT and CT in terms of available phosphorus (F value = 12.57 and p -value = 0.071), with mean values of 115 mg kg⁻¹ for NT and 113 mg kg⁻¹ for CT. This qualifies the soil as rich in P₂O₅ according to the interpretation standards. Phosphorus levels decrease significantly with depth for both NT and CT (F value = 536.17 and p -value < 0.001), with the highest content at the soil surface (177 mg kg⁻¹ at the 0–5 cm depth) and the lowest content in the deepest layer (50 mg kg⁻¹ at the 40–60 cm depth). There was a very highly significant interaction between the two factors (F value = 48.87 and p -value < 0.001), indicating that the ranking of tillage types changed with depths; for example, at the 0–5 cm depth, NT content (196 mg kg⁻¹) was higher than CT content (161 mg kg⁻¹), whereas at the 20–40 cm depth, the trend was reversed (57 mg kg⁻¹ for NT vs. 93 mg kg⁻¹ for CT).

According to ANOVA, exchangeable potassium content was not significantly different between NT and CT (F value = 11.66 and p -value = 0.076), with a slightly higher mean value for NT (92 mg kg⁻¹) compared to CT (84 mg kg⁻¹). These values show that the soil is moderately rich in potassium according to the standards. ANOVA also revealed highly significant differences between depths (F value = 117.07 and p -value < 0.001), with the highest mean values at the soil surface (110 mg kg⁻¹ at the 0–5 cm depth) and the lowest

in the deepest layer (56 mg kg^{-1} at the 40–60 cm depth). Duncan's post hoc test showed that each depth has significantly different potassium content than all the other depths, except 5–10 and 10–20 cm (97 and 95 mg kg^{-1}). At the 0–10 cm horizon, soil under NT has higher potassium content than that under CT, in agreement with the results of studies on the effect of direct seeding on potassium [3]. Previous studies showed that under no-tillage conditions, the amount of potassium can be reduced with depth [24]. There was a highly significant interaction between the two factors (F value = 7.23 and p -value < 0.001).

ANOVA indicated a significant difference between NT and CT for CEC (F value = 74.23 and p -value = 0.013), with a higher mean value for NT (48 meq/100 g) than for CT (36 meq/100 g), which can be explained by the increase in organic matter under NT vs. CT. Furthermore, highly significant differences in CEC were observed relative to depth (F value = 51.55 and p -value < 0.001), with the highest mean value at the soil surface (58 meq/100 g at the 0–5 cm depth) and the lowest in the deepest layers (31 meq/100 g at the 20–40 and 40–60 cm depths). Duncan's post hoc revealed significant differences between all depths, except the two deepest levels. There was no significant interaction between the two factors (F value = 2.42 and p -value = 0.056).

3.1.3. Total Nitrogen

Table 5 shows total nitrogen mean values for the five soil depths (0–5, 5–10, 10–20, 20–40, and 40–60 cm) with the three nitrogen doses (20, 40, and 60 kg N ha^{-1}) for each tillage type (NT and CT), and ANOVA results are presented in Table 6.

Table 5. Total nitrogen content (mg kg^{-1}) measured at the end of the experiment for each nitrogen dose (kg N ha^{-1}), tillage type, and soil depth (cm). Means ($n = 3$) with standard deviations followed by the same letter are not statistically different at the 0.05 significance level according to Duncan's post hoc test. NT= no tillage, CT= conventional tillage.

Nitrogen (kg N ha^{-1})	Tillage/Depth (cm)	0–5	5–10	10–20	20–40	40–60	Mean	Mean
20	NT	700 (50)	770 (90)	280 (30)	560 (40)	840 (80)	630 (197)	585 (166) A
	CT	420 (20)	520 (50)	490 (70)	590 (40)	680 (110)	540 (127)	
40	NT	870 (120)	560 (80)	280 (50)	350 (60)	700 (50)	552 (215)	539 (189) B
	CT	770 (60)	490 (60)	420 (60)	350 (80)	600 (60)	526 (165)	
60	NT	560 (50)	630 (90)	490 (130)	420 (40)	570 (80)	534 (109)	626 (186) A
	CT	930 (90)	910 (60)	560 (40)	350 (70)	840 (40)	718 (213)	
Mean	NT	710 (105)	653 (122)	350 (113)	443 (138)	703 (141)	572 (183)	583 (186)
	CT	707 (204)	640 (197)	590 (88)	430 (165)	707 (133)	595 (190)	
Mean		708 (158) a	647 (159) b	420 (117) c	437 (148) c	705 (133) a		

Table 6. ANOVA results for soil properties measured at the end of the experiment.

Soil Properties	Total Nitrogen		Ammonium		Nitrates	
	F Value	p-Value	F Value	p-Value	F Value	p-Value
Tillage (T)	16.94	0.054 ns	325.14	0.003 **	50.10	0.019 *
Nitrogen (N)	33.55	<0.001 ***	0.60	0.573 ns	30.74	<0.001 ***
Depth (D)	80.76	<0.001 ***	5.94	0.001 **	11.81	<0.001 ***
T × N	32.62	<0.001 ***	9.25	0.008 **	3.65	0.075 ns
T × D	3.40	0.016 *	15.05	<0.001 ***	7.83	<0.001 ***
N × D	19.91	<0.001 ***	7.62	<0.001 ***	3.76	0.002 **
T × N × D	9.01	<0.001 ***	4.88	<0.001 ***	6.70	<0.001 ***

ns: not significant; *, **, and ***: significant at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

ANOVA indicated no significant difference between the two tillage types (F value = 16.94 and p -value = 0.054), with mean values of 595 and 572 mg kg^{-1} for CT and NT, respectively. In contrast, there were highly significant differences between the three nitrogen doses (F value =

33.55 and p -value < 0.001) and the five depths (F value = 80.76 and p -value < 0.001). Duncan's post hoc test showed no significant difference between 20 and 60 kg N ha⁻¹ with higher total nitrogen content (585 and 626 mg kg⁻¹, respectively) compared to 40 kg N ha⁻¹ with lower content (539 mg kg⁻¹). Regarding soil depths, there were three groups: 0–5 and 40–60 cm, which did not significantly differ (708 and 705 mg kg⁻¹; 5–10 cm (647 mg kg⁻¹); and 10–20 and 20–40 cm, which did not significantly differ (420 and 437 mg kg⁻¹, respectively). For 20 and 40 kg N ha⁻¹, the total surface nitrogen content was higher in NT than in CT, whereas for 60 kg N ha⁻¹, CT was higher than NT. All interactions were statistically significant, indicating that the effect of each of the three factors depends on the levels of the other two factors. Therefore, there is no unique optimal nitrogen dose and wheat variety for both tillage types.

In NT, fertilizer remained concentrated at the surface (0–10 cm), mainly under 20 and 40 kg N ha⁻¹ nitrogen doses, whereas under conventional tillage, fertilizer was distributed along the profile. This result is in line with studies that reported that N use efficiency (NUE) in wheat varied with environmental conditions and that it is higher with low N input and decreases with increasing N input [25,26].

3.1.4. Ammonium

Measurements of ammonium in the soil samples for the five soil depths (0–5, 5–10, 10–20, 20–40, and 40–60 cm) with the three nitrogen doses (20, 40, and 60 kg N ha⁻¹) for each type of tillage (NT and CT) are presented in Table 7, and ANOVA results are reported in Table 6.

Table 7. Ammonium content (mg kg⁻¹) measured at the end of the experiment for each nitrogen dose (kg N ha⁻¹), tillage type, and soil depth (cm). Means ($n = 3$) with standard deviations followed by the same letter are not statistically different at the 0.05 significance level according to Duncan's post hoc test. NT= no tillage, CT= conventional tillage.

Nitrogen (kg N ha ⁻¹)	Tillage/Depth (cm)	0–5	5–10	10–20	20–40	40–60	Mean	Mean
20	NT	17.8 (5.1)	9.1 (0.4)	7.1 (0.4)	9.6 (0.9)	13.6 (0.9)	11.4 (3.5)	8.7 (3.0) A
	CT	5.0 (0.8)	6.6 (1.0)	5.5 (0.9)	8.0 (0.8)	5.0 (1.1)	6.0 (1.6)	
40	NT	19.6 (3.6)	10.1 (1.8)	12.1 (2.5)	9.8 (0.3)	5.0 (0.9)	11.3 (3.7)	8.3 (4.1) A
	CT	6.0 (0.8)	5.2 (0.8)	4.0 (0.7)	5.1 (0.6)	6.0 (0.7)	5.3 (1.2)	
60	NT	7.4 (0.9)	11.1 (1.7)	10.6 (0.6)	9.6 (1.0)	7.1 (1.0)	9.2 (1.7)	8.0 (2.0) A
	CT	5.0 (0.9)	7.5 (0.8)	8.1 (0.5)	6.6 (0.6)	6.8 (0.6)	6.8 (1.1)	
Mean	NT	14.9 (5.1)	10.1 (1.6)	9.9 (2.8)	9.7 (0.9)	8.6 (1.3)	10.6 (3.3)	8.3 (3.1)
	CT	5.3 (0.9)	6.4 (1.3)	5.9 (1.7)	6.6 (1.6)	5.9 (1.3)	6.0 (1.4)	
Mean		10.1 (5.1)	8.3 (2.8)	7.9 (3.1)	8.1 (1.8)	7.3 (1.3)		

ANOVA (Table 6) showed no significant difference between the three nitrogen doses (F value = 0.60 and p -value = 0.573), with mean values of 8.7, 8.3, and 8 mg kg⁻¹ for the 20, 40, and 60 kg N ha⁻¹ doses, respectively. Tillage type (F value = 325.14 and p -value = 0.003) and soil depth (F value = 5.94 and p -value = 0.001) were differed significantly. Mean ammonium content was much higher under NT (10.6 mg kg⁻¹) compared to CT (6.0 mg kg⁻¹). Duncan's post hoc test identified three groups of depths: 0–5 cm, with a mean value of 10.1 mg kg⁻¹; 5–10, 10–20, and 20–40 cm, which did not significantly differ, with mean values of 8.3, 7.9, and 8.1 mg kg⁻¹, respectively; and 40–60 cm, with a mean value of 7.3 mg kg⁻¹. Ammonium content at the soil surface was higher in NT than in CT, with an advantage under 40 kg N ha⁻¹ treatment, in agreement with studies evaluating the effect of N dose [27] or N form [28,29]. With respect to total nitrogen, all interactions between the three factors were statistically significant.

3.1.5. Nitrate

Mean soil nitrate contents for each tillage type, nitrogen dose, and soil depth are presented in Table 8, and ANOVA results are reported in Table 6. Table 8 shows that

nitrate contents for each nitrogen dose are higher under conventional conditions than under no-tillage conditions.

Table 8. Nitrate content (mg kg^{-1}) measured at the end of the experiment for each nitrogen dose (kg N ha^{-1}), tillage type, and soil depth (cm). Means ($n = 3$) with standard deviations followed by the same letter are not statistically different at the 0.05 significance level according to Duncan's post hoc test. NT= no tillage, CT= conventional tillage.

Nitrogen (kg N ha^{-1})	Tillage/Depth (cm)	0-5	5-10	10-20	20-40	40-60	Mean	Mean
20	NT	5.5 (0.7)	12.2 (1.2)	8.7 (0.9)	5.2 (0.9)	5.2 (1.2)	7.4 (2.4)	8.4 (3.1)
	CT	6.9 (0.8)	6.1 (0.8)	10.8 (1.0)	10.4 (0.6)	12.6 (4.0)	9.4 (3.2)	
40	NT	6.9 (1.0)	13.0 (1.8)	8.7 (1.1)	13.4 (1.3)	15.1 (2.9)	11.4 (2.8)	13.9 (3.8)
	CT	17.8 (1.8)	14.7 (1.9)	19.9 (1.3)	12.1 (0.9)	17.8 (1.9)	16.5 (2.8)	
60	NT	11.2 (0.8)	19.5 (3.7)	19.9 (4.3)	19.0 (5.0)	10.4 (0.9)	16.0 (4.2)	15.8 (3.9)
	CT	10.8 (0.5)	16.0 (2.3)	19.5 (2.1)	14.7 (2.9)	17.3 (4.5)	15.7 (3.6)	
Mean	NT	7.9 (2.4)	14.9 (3.4)	12.4 (4.9)	12.5 (4.6)	10.2 (3.3)	11.6 (4.1)	12.7 (4.3)
	CT	11.8 (3.9)	12.3 (4.7)	16.7 (4.4)	12.4 (2.4)	15.9 (3.3)	13.8 (4.0)	
Mean		9.9 (3.7)	13.6 (4.0) A	14.6 (5.0)	12.5 (3.7) A	13.1 (4.4) A		

ANOVA (Table 6) revealed highly significant differences for the three factors: F value = 50.10 and p -value = 0.019 for tillage type, F value = 30.74 and p -value < 0.001 for nitrogen dose, and F value = 11.81 and p -value < 0.001 for soil depth. Mean values were higher for CT (13.8 mg kg^{-1}) than NT (11.6 mg kg^{-1}). Duncan's post hoc test showed that the three nitrogen doses significantly differed, with mean values of 8.4, 13.9, and 15.8 mg kg^{-1} corresponding to 20, 40, and 60 kg N ha^{-1} , respectively. Regarding soil depth, three groups were identified: 10–20 cm, with a mean value of 14.6 mg kg^{-1} ; 5–10, 20–40, and 40–60 cm, which did not significantly differ, with mean values of 13.6, 12.5, and 13.1 mg kg^{-1} , respectively; and 0–5 cm, with a mean value of 9.9 mg kg^{-1} . All interactions, except tillage type \times nitrogen dose, were statistically significant.

The levels of total nitrogen and ammonium in NT were higher than in CT, contrary to nitrate content, which can be explained by the use of excess nitrogen fertilizers or by the use of plant protection products. In addition, nitrate content for each nitrogen treatment was higher under CT than NT, although nitrate has higher mobility than ammonium, which could be impacted by leaching.

3.2. Wheat Yield

Grain and straw yields of the five varieties for each tillage type are presented in Tables 9 and 10 under the three nitrogen doses.

Globally, ANOVA results (Table 11) show that only variety has a very highly significant effect on grain and straw yields (F values = 14.62 and 6.41, respectively, and p -value < 0.001), whereas there were no significant differences between the two tillage types (F values = 4.40 and 1.20 and p -values = 0.171 and 0.388, respectively) and the three nitrogen doses (F values = 3.95 and 2.06 and p -values = 0.064 and 0.190, respectively). None of the interactions was significant.

Duncan's post hoc test showed that the Louiza variety had the lowest grain yield (3.18 t ha^{-1}), followed by I.C and M.G with intermediate grain yields (4.05 and 3.72 t ha^{-1} , respectively) and finally Faraj and Nachit with the highest grain yield (4.13 and 4.46 t ha^{-1}) (Table 9). A comparison of the values presented in Table 9 with those presented in Table 1 shows that grain yields for the three varieties correspond to considerably increased yields in semi-arid areas, although the study site is in a favorable area. In addition, the observed yield values are much lower than those corresponding to the yield potential that can be reached if all crop conditions (soil, climate, and crop management practices) are optimal. These low grain yield values are mostly the consequence of water stress that occurred for the last three years. A slightly higher grain yield was attained under NT (4.07 t ha^{-1})

compared to CT (3.75 t ha⁻¹). The effect of tillage type on yield was not significant, although there were significant differences in soil properties (especially OC, CEC, ammonium, and nitrates) corresponding to the two tillage types, which could also be explained by water stress that prevented these varieties from using all available nitrogen. With respect to nitrogen doses, mean grain yields were 4.09, 3.92, and 3.72 t ha⁻¹ under 20, 40, and 60 kg N ha⁻¹, respectively. Water stress is likely the cause of the absence of nitrogen dose effect, reducing nitrogen use efficiency.

Table 9. Wheat grain yield (t ha⁻¹) measured at the end of the experiment during the 2020–2021 cropping season for all tillage types, nitrogen doses (kg N ha⁻¹), and varieties. Means ($n = 3$) with standard deviations followed by the same letter are not statistically different at the 0.05 significance level according to Duncan's post hoc test. NT= no tillage, CT= conventional tillage.

Nitrogen (kg N ha ⁻¹)	Tillage/Variety	Faraj	I.C	Louiza	M.G	Nachit	Mean	Mean
20	NT	4.31 (0.34)	4.74 (0.42)	3.42 (0.49)	4.52 (0.96)	4.47 (0.83)	4.29 (0.73)	4.09 (0.75)
	CT	4.46 (0.34)	3.87 (0.70)	3.21 (0.55)	3.40 (0.41)	4.52 (0.74)	3.89 (0.73)	A
40	NT	4.32 (0.17)	3.88 (0.66)	2.93 (0.66)	3.97 (0.48)	5.14 (1.03)	4.05 (0.93)	3.92 (0.81)
	CT	3.77 (0.35)	4.24 (0.19)	3.34 (0.55)	3.05 (0.13)	4.48 (0.76)	3.78 (0.67)	A
60	NT	4.04 (0.59)	3.93 (0.44)	3.17 (0.47)	3.95 (0.13)	4.24 (0.03)	3.86 (0.51)	3.72 (0.56)
	CT	3.86 (0.20)	3.63 (0.89)	3.01 (0.15)	3.43 (0.73)	3.90 (0.50)	3.57 (0.59)	A
Mean	NT	4.22 (0.38)	4.18 (0.61)	3.17 (0.52)	4.15 (0.61)	4.62 (0.78)	4.07 (0.75)	
	CT	4.03 (0.42)	3.91 (0.63)	3.19 (0.42)	3.29 (0.46)	4.30 (0.66)	3.75 (0.67)	
Mean		4.13 (0.40) a	4.05 (0.62) b	3.18 (0.46) c	3.72 (0.68) b	4.46 (0.72) a	3.91 (0.72)	

Table 10. Wheat straw yield (t ha⁻¹) measured at the end of the experiment during the 2020–2021 cropping season for all tillage types, nitrogen doses (kg N ha⁻¹), and varieties. Means ($n = 3$) with (standard deviations) followed by the same letter are not statistically different at the 0.05 significance level according to Duncan's post hoc test. NT= no tillage, CT= conventional tillage.

Nitrogen (kg N ha ⁻¹)	Tillage/Variety	Faraj	I.C	Louiza	M.G	Nachit	Mean	Mean
20	NT	7.85 (1.74)	10.25 (1.69)	6.60 (1.31)	9.21 (1.87)	9.95 (1.55)	8.77 (1.98)	8.54 (2.03)
	CT	10.76 (3.12)	7.38 (1.13)	6.34 (1.30)	8.34 (0.31)	8.75 (1.51)	8.31 (2.12)	A
40	NT	8.17 (1.80)	9.04 (1.93)	5.48 (2.13)	9.24 (1.25)	9.00 (3.11)	8.18 (2.31)	8.01 (1.91)
	CT	9.01 (1.12)	7.54 (1.29)	6.79 (2.07)	7.48 (0.94)	8.32 (1.48)	7.83 (1.45)	A
60	NT	7.90 (1.73)	7.88 (2.29)	7.37 (0.38)	8.95 (1.39)	8.60 (0.35)	8.14 (1.35)	7.77 (1.50)
	CT	8.93 (0.25)	7.43 (2.12)	5.69 (0.91)	7.13 (1.72)	7.81 (1.10)	7.40 (1.59)	A
Mean	NT	7.97 (1.53)	9.06 (2.00)	6.48 (1.51)	9.13 (1.33)	9.18 (1.85)	8.37 (1.90)	
	CT	9.57 (1.89)	7.45 (1.37)	6.27 (1.39)	7.65 (1.13)	8.29 (1.26)	7.85 (1.75)	
Mean		8.77 (1.86) a	8.25 (1.86) a	6.38 (1.41) b	8.39 (1.42) a	8.74 (1.60) a	8.11 (1.83)	

Table 11. ANOVA results for wheat grain and straw yield ($t\ ha^{-1}$) measured at the end of the experiment during the 2020–2021 cropping season.

Source of Variation	Grain		Straw	
	F Value	p-Value	F Value	p-Value
Tillage (T)	4.40	0.171 ns	1.20	0.388 ns
Nitrogen (N)	3.95	0.064 ns	2.06	0.190 ns
Variety (V)	14.62	<0.001 ***	6.41	<0.001 ***
T × N	0.14	0.876 ns	0.13	0.880 ns
T × V	1.60	0.189 ns	2.12	0.093 ns
N × V	0.76	0.637 ns	0.16	0.996 ns
T × N × V	1.07	0.398 ns	0.70	0.690 ns

ns: not significant; ***: significant at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

In terms of straw yield, Duncan's post hoc test identified two groups of varieties: in the first group, Louiza, with the lowest mean yield ($6.38\ t\ ha^{-1}$), and in the second group, the four remaining varieties, with mean yields ranging between 8.25 and $8.77\ t\ ha^{-1}$. In terms of tillage type, mean straw yields were $7.85\ t\ ha^{-1}$ for CT and $8.37\ t\ ha^{-1}$ for NT. For nitrogen doses, straw yields varied between 7.77 and $8.54\ t\ ha^{-1}$ with 60 and $20\ kg\ N\ ha^{-1}$, respectively.

Comparing NT to CT, the former resulted in higher grain and straw yields with most combinations (11 out of 15) nitrogen doses and varieties (Tables 9 and 10). In terms of grain yield, CT outperformed NT only for Faraj and Nachit varieties under $20\ kg\ N\ ha^{-1}$ and I.C and Louisa varieties under $40\ kg\ N\ ha^{-1}$, whereas in terms of straw yield, CT achieved better results than NT only for the Faraj variety under the three nitrogen doses and Louisa variety under $40\ kg\ N\ ha^{-1}$.

Ignoring varieties and comparing the two tillage types for the three nitrogen doses, grain and straw yields were always higher for NT compared to CT, independent of the nitrogen dose (Tables 9 and 10). Furthermore, combining nitrogen dose and comparing tillage types for the different varieties, the ranking of the varieties was the same for both tillage types in terms of grain yield, with Nachit identified as the best variety ($4.30\ t\ ha^{-1}$ under CT and $4.62\ t\ ha^{-1}$ under NT) and Louiza identified as the variety providing the lowest yield ($3.19\ t\ ha^{-1}$ under CT and $3.17\ t\ ha^{-1}$ under NT). The behavior of varieties was different considerably in terms of straw yield. Although the Louiza variety had the lowest yield under both NT and CT, it the ranking of the Nachit variety changed drastically from the best variety under CT ($9.57\ t\ ha^{-1}$) to the second lowest yield under NT ($7.97\ t\ ha^{-1}$).

Grain yield results show that all three nitrogen doses resulted in higher yields in NT compared to CT (Table 9), with mean values of 4.3 , 4.1 , and $3.9\ t\ ha^{-1}$ as opposed to 3.9 , 3.8 , and $3.6\ t\ ha^{-1}$ corresponding to 20 , 40 , and $60\ kg\ N\ ha^{-1}$, respectively. The same applies to straw yield, with mean values of 8.8 , 8.2 , and $8.1\ t\ ha^{-1}$ compared to 8.3 , 7.8 , and $7.4\ t\ ha^{-1}$ corresponding to 20 , 40 , and $60\ kg\ N\ ha^{-1}$, respectively.

Louisa, M.G, and I.C had higher grain yields (3.42 , 4.52 , and $4.74\ t\ ha^{-1}$) under NT than under CT with the minimum nitrogen dose ($20\ kg\ N\ ha^{-1}$) (Table 9). On the other hand, the varieties Faraj and, in particular, Nachit require more nitrogen under NT than under CT ($40\ kg\ N\ ha^{-1}$) to achieve an increased grain yield (4.32 and $5.14\ t\ ha^{-1}$, respectively) (Table 9).

4. Conclusions

After 18 years, all the seven soil properties differed by depth, with higher values at soil surface under no-tillage conditions, except for nitrates. Furthermore, total nitrogen, ammonium, and nitrates measured at the end of the experiment differed between the three nitrogen doses. In addition, total nitrogen content on the surface under 20 and $40\ kg\ N\ ha^{-1}$ was higher under NT than CT, and ammonium content on the surface was higher under NT than CT, which could be explained by the higher organic matter content measured before the start of the experiment under NT vs. CT.

Regarding wheat grain and straw yields measured at the end of the experiment during the 2020–2021 cropping season, differences were observed only between varieties. There were no differences between tillage types and nitrogen doses, and no interaction was significant. In particular, grain yields were low, similar to those in semi-arid areas, although the study site is a climatically favorable area, mainly as a result of water stress, with rainfall shortages reducing nitrogen use efficiency. The varieties Nachit and Faraj achieved the best performance, whereas the Louiza variety had the lowest yield. Nachit and Faraj are the most adapted to no-tillage (NT) conditions, with an increased yield under a low dose of nitrogen treatment (20 kg N ha⁻¹). However, this result should be confirmed by repeating the research conditions and studying the effect of nitrogen on the grain quality for each germplasm. In contrast, the behavior of nitrogen dose is variable and differed between the two tillage types and the five germplasms, indicating that the optimal nitrogen dose depends on the tillage and the variety.

Author Contributions: Conceptualization, O.Z.; Methodology, H.M. and H.D.; Validation, H.M., R.M., A.G. and A.D.; Formal analysis, A.D.; Investigation, H.M. and R.M.; Writing—original draft, H.M.; Writing—review & editing, H.M. and A.D.; Visualization, H.M. and N.E.A.; Supervision, R.M., A.G. and A.Z.; Project administration, R.M.; Funding acquisition, R.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Research for this article was conducted as part of a project by MCGP and CAMA. We gratefully acknowledge the International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), National Institute of Agronomic Research (INRA) and PRIMA CAMA project for supporting this publication including APC.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: Data are available upon request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Moussadek, R.; Mrabet, R.; Dahan, R. Effet de l'agriculture de conservation sur la qualité des sols au Maroc. *Afr. Focus* **2001**, *25*, 149–150.
2. Laghrour, M.; Moussadek, R.; Zouahri, A.; Mekkaoui, M.; Dahan, R.; El Mourid, M. Impact du semis direct sur les propriétés physiques d'un sol argileux au Maroc central (Impact of No Tillage on physical properties of a clay soil in Central Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.* **2015**, *6*, 391–396.
3. Maher, H.; Moussadek, R.; Zouahri, A.; Douaik, A.; Dakak, H.; El Moudane, M.; Ghanimi, A. Effect of no tillage on the physico-chemical properties of soils of the El Koudia region, Rabat (Morocco). *E3S Web Conf.* **2020**, *150*, 03010. [[CrossRef](#)]
4. Mrabet, R.; Moussadek, R. Potentiels de restauration de la qualité des sols sous agriculture de conservation au Maroc. In *Lutte Antérosive: Réhabilitation des Sols Tropicaux et Protection Contre les Pluies Exceptionnelles*; IRD Editions: Marseille, France, 2012; pp. 1–25.
5. Nazco, R.; Villegas, D.; Ammar, K.; Pena, J.R.; Moragues, M.; Royo, C. Can Mediterranean durum wheat land races contribute to improved grain quality attributes in modern cultivars? *Euphytica* **2012**, *185*, 1–17. [[CrossRef](#)]
6. Doré, T.; Le Bail, M.; Martin, P.; Ney, B.; Roger-Estrade, J. *L'agronomie Aujourd'hui*; Ed. Quae Editions: Versailles, France, 2006; p. 384.
7. Ryan, J.; Ibriki, H.; Sommer, R.; McNeill, A. Nitrogen in rain fed and irrigated cropping systems in the Mediterranean region. *Adv. Agron.* **2009**, *104*, 53–136.
8. Fageria, N.K.; Baligar, V.C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* **2005**, *88*, 97–185.
9. Garrido-Lestache, E.; López-Bellido, R.J.; López-Bellido, L. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *Eur. J. Agron.* **2005**, *23*, 265–278. [[CrossRef](#)]
10. Akhter, M.M.; Hossain, A.; Timsina, J.; Teixeira da Silva, J.A.; Islam, M.S. Chlorophyll meter-A decision-making tool for nitrogen application in wheat under light soils. *Int. J. Plant Prod.* **2016**, *10*, 289–302.
11. Tranaviciene, T.; Urbonaviciute, A.; Samuoliene, G.; Duchovskis, P.; Vaguseviciene, I.; Sliesaravicius, A. The effect of differential nitrogen fertilization on photosynthetic pigment and carbohydrate contents in the two winter wheat varieties. *Agron. Res.* **2008**, *6*, 555–561.
12. Biljana, B.; Aca, M. Correlation between nitrogen and chlorophyll content in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Kragujev. J. Sci.* **2009**, *31*, 69–74.

13. Walkley, A.J.; Black, I.A. Estimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method. *Soil Sci.* **1934**, *37*, 29–38. [\[CrossRef\]](#)
14. Olsen, S.R.; Sommers, L.E. Phosphorus. In *Methods of Soil Analysis Part 2 Chemical and Microbiological Properties*; Page, A.L., Ed.; American Society of Agronomy, Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 1982; pp. 403–430.
15. McLean, E.O. Watson ME Soil measurements of plant-available potassium. In *Potassium in Agriculture*; Munson, R.D., Ed.; ASA, CSSA, SSSA: Madison, WI, USA, 1985; pp. 277–308.
16. Sumner, M.E.; Miller, W.P. Cation exchange capacity, and exchange coefficients. In *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical Properties*, 3rd ed.; Sparks, D.L., Ed.; ASA, SSSA, CSSA: Madison, WI, USA, 1996.
17. Bremner, J.M. Nitrogen—Total. In *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods: Part 3. Soil Science Society of America Book Series No. 5*; Sparks, D.L., Ed.; ASA-SSSA: Madison, WI, USA, 1996.
18. Maynard, D.G.; Kalra, Y.P.; Crumbaugh, J.A. Nitrate and exchangeable ammonium nitrogen. In *Soil Sampling and Methods of Analysis*, 2nd ed.; Carter, M.R., Gregorich, E.G., Eds.; Canadian Society of Soil Science, CRC Press and Taylor & Francis Group: Oxford, UK, 2008.
19. D’Haene, K.; Vandendriessche, J.; De Neve, S.; Gabriels, D.; Salomez, J.; Hofman, G. The effect of reduced tillage on nitrogen dynamics in silt loam soils. *Eur. J. Agron.* **2008**, *28*, 449–460. [\[CrossRef\]](#)
20. Moussadek, R.; Mrabet, R.; Dahan, R.; Zouahri, A.; El Mourid, M.; Van Ranst, E. Tillage system affects soil organic carbon storage and quality in Central Morocco. *Appl. Environ. Soil Sci.* **2014**, *8*, 654796. [\[CrossRef\]](#)
21. Laghrour, M.; Moussadek, R.; Mrabet, R.; Dahan, R.; El-Mourid, M.; Zouahri, A.; Mekkaoui, M. Long and midterm effect of conservation agriculture on soil properties in dry areas of Morocco. *Appl. Environ. Soil Sci.* **2016**, *9*, 6345765. [\[CrossRef\]](#)
22. Balesdent, J.; Chenu, C.; Balabane, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.* **2000**, *53*, 215–230. [\[CrossRef\]](#)
23. Gál, A.; Vyn, T.J.; Michéli, E.; Kladiivko, E.J.; Mcfee, W.W. Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing over estimated with tilled-zone sampling depths. *Soil Tillage Res.* **2007**, *96*, 42–51. [\[CrossRef\]](#)
24. Pekrun, C.; Kaul, H.P.; Claupein, W. Soil tillage for sustainable nutrient management. In *Soil Tillage in Agroecosystems*; El Titi, A., Ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2003.
25. Karrou, M. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in common wheat. *Al Awamia* **1996**, *95*, 39–51.
26. Mosseddaq, F.; Moughli, L. Fertilisation azotée des céréales, cas des blés en Bour et en irrigué. *MADRP/DERD* **1999**, *62*.
27. Hemissi, I.; Gargouri, S.; Hlel, D.; Hachana, A.; Abdi, N.; Sifi, B. Impact of nitrogen fertilization on Fusarium foot and root rot and yield of durum wheat. *Tunis. J. Plant Prot.* **2018**, *13*, 31–38.
28. Baha Eddine, S.; El Yousfi, B.; Douira, A. Interaction of nitrogen fertilizers with wheat growth stage and foliar treatment with urea effects on WCR induced by Fusarium culmorum. *Plant Arch.* **2019**, *19*, 2829–2835.
29. Baha Eddine, S.; El Yousfi, B.; Douira, A. Effects of nitrogen forms and rates on Fusarium culmorum growth, fitness, aggressiveness and wheat, barley and triticale resistance to crown rot disease. *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.* **2020**, *21*, 107–129.

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

Résumé

L'agriculture représente une part essentielle de l'économie marocaine, contribuant à 15-20 % du PIB, mais elle fait face à des défis structurels majeurs tels que l'érosion des sols liée au labour intensif et les effets du changement climatique. Le semis conventionnel (SC), en perturbant les sols, accélère leur dégradation et réduit la stabilité des agrégats, exacerbant l'érosion hydrique. Face à ces enjeux, le défi de l'agriculture marocaine est d'augmenter la production tout en préservant les ressources naturelles. Cette étude examine l'impact du semis direct (SD) et de la fertilisation azotée sur les propriétés du sol et les rendements du blé dur. Les résultats montrent que le SD améliore la structure du sol, l'accumulation de matière organique, la rétention d'eau et l'efficacité d'utilisation de l'azote (NUE), surpassant le SC. Les variétés Nachit, Faraj et Luiza ont obtenu des rendements plus élevés sous SD, même avec de faibles doses d'azote. De plus, l'utilisation de la technique isotopique stable ^{15}N a permis de mieux comprendre la dynamique de l'azote, démontrant que le SD réduit les pertes d'azote et améliore l'efficacité des ressources. Ces résultats soulignent l'importance des pratiques agricoles durables pour améliorer la productivité tout en limitant les impacts environnementaux.

Mots-clefs : *Efficacité d'utilisation d'azote NUE, Fertilité azotée, Isotope stable ^{15}N , Semis conventionnel, Semis direct.*

Abstract

Agriculture is an essential part of the Moroccan economy, contributing 15-20% of GDP, but it faces major structural challenges such as soil erosion linked to intensive ploughing and the effects of climate change. Conventional tillage (CT), by disturbing soils, accelerates their degradation and reduces the stability of aggregates, exacerbating water erosion. Faced with these challenges, Moroccan agriculture aims to increase production while preserving natural resources. This study examines the impact of no tillage (NT) and nitrogen fertilization on soil properties and durum wheat yields. Results show that SD improves soil structure, organic matter accumulation, water retention and nitrogen use efficiency (NUE), outperforming CT. The varieties Nachit, Faraj and Luiza achieved higher yields under NT, even at low nitrogen rates. In addition, the use of the ^{15}N stable isotope technique enabled a better understanding of nitrogen dynamics, demonstrating that NT reduces nitrogen losses and improves resource efficiency. These results underline the importance of sustainable agricultural practices to improve productivity while limiting environmental impacts.

Keywords: *Conventional tillage, Nitrogen fertility, Nitrogen use efficiency NUE, No tillage, Stable isotope ^{15}N .*