

N° d'ordre 3692

THESE

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

Centre de recherche : Sciences des Matériaux

Structures de Recherche : Nanostructures, Génie des Procédés et Environnement

Discipline : Chimie & Physique

Spécialité : Sciences du sol et Modélisation

Présentée et soutenue le : 11/10/2022 par :
Ibtissame LEMBAID

Modélisation de la séquestration du carbone organique du sol sous différents scénarios climatiques, pratiques agricoles alternatives, et propriétés du sol par le modèle DNDC dans une région semi-aride au Maroc

MEMBRES DE JURY

Abderrahman NOUNAH	PES, Université Mohammed V- Directeur de l'Ecole Supérieure de Technologie- Salé	Président
Driss ZEJLI	PES, Université Ibn Tofail - Ecole Nationale des Sciences Appliquées- Kénitra	Rapporteur/Examineur
Souad ABDERAFFI	PES, Université Mohammed V - Ecole Mohammadia d'Ingénieurs - Rabat	Rapporteur/Examineur
Adnane ELHAMIDI	PES, Université Mohammed V- Faculté des Sciences - Rabat	Rapporteur/Examineur
Rachid BOULIF	Directeur de recherche chargé de mission à l'OCP	Examineur
Rachid MOUSSADEK	Chercheur principal conjoint à ICARDA-INRA	Co-encadrant
Rachid MRABET	Directeur de recherche- INRA - Rabat	Co-encadrant
Ahmed BOUHAOUSS	PES-Expert, Université Mohammed V- Faculté des Sciences - Rabat	Co-directeur de thèse
Mohammed HALIM	PES, Université Mohammed V- Faculté des Sciences - Rabat	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2021/2022

Dédicaces

Louange à Dieu le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux - Paix et Salut sur Son Prophète.

Louange à Allah comme il se doit à la majesté de son visage et à la grandeur de sa puissance et de sa grâce, Louange à Lui, qui m'a permis de voir ce jour tant attendu.

Je dédie cette thèse : A mon très cher papa Bouzekri LEMBAID. Vous avez toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer l'homme que vous êtes. Ce modeste travail est le fruit de vos encouragements pour aller de l'avant sur le chemin de la science. Je vous aime papa et j'implore le tout-puissant pour qu'il vous accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

A mon très chère maman Amina RIRI. Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour vous. Vous m'avez comblé avec votre tendresse et affection tout au long de ma vie. En ce jour mémorable, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le Tout Puissant vous donner santé, bonheur et longue vie.

A mon très cher frère Mohamed LEMBAID. Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de soutien que vous m'offrez quotidiennement. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

A mes chères sœurs Safaa et Sanaa LEMBAID. En gage d'une reconnaissance et d'un amour sans failles, Que Dieu tout puissant, vous préserve, vous procure santé et bonheur pour que vous demeuriez des flambeaux illuminant le chemin de notre famille.

A mes adorables amis : Fadwa ZOUGGAR, Zineb EL MOURIDI, Sahar BENNANI, Bahia BAAYOUD, et Hamza BRIAK, qui ont su croire en moi et qui m'ont apporté toute leur aide quand j'en ai eu besoin. Ce mémoire leur est dédié à 100%. Je vous aime et j'implore le tout-puissant pour qu'il vous accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

En témoignage de mon grand respect et de ma profonde reconnaissance

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein d'Equipe des Nanostructures, Génie des Procédés et Environnement qui fait partie du Centre de Recherche : Sciences des Matériaux, et au sein de l'Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles à l'INRA.

Je tiens à remercier Monsieur **Mohammed REGRAGUI**, Professeur de l'Enseignement Supérieure, Doyen de la Faculté des Sciences – Université Mohammed V de Rabat, et Madame **Souad EL HAJJAJI**, Professeur d'enseignement supérieure, Vice-Doyenne chargée de la recherche et la coopération à la Faculté des Sciences de Rabat, pour leurs encouragements envers les chercheurs pour développer et promouvoir la recherche scientifique et technique, la R&D et le partenariat avec les secteurs socioéconomiques et industriels.

Je remercie Monsieur **Abderrahman NOUNAH**, Professeur d'Enseignement Supérieure et directeur de l'Ecole Supérieure de technologie- Université Mohammed V à Rabat, qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse et pour son intérêt enthousiaste pour mon travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à Monsieur **Mohammed HALIM** Professeur d'Enseignement Supérieur - Directeur du Centre de Recherche en Science des Matériaux (SM) à la Faculté des Sciences de Rabat, de m'avoir accueillie au sein de son centre de recherche, et pour l'intérêt et le soutien administratif qu'il a porté à cette thèse. Qu'il reçoive toute l'expression de ma reconnaissance pour le soutien qu'il a pu apporter.

Mes chaleureux remerciements vont également au Monsieur **Ahmed BOUHAOUSS** Professeur d'Enseignement Supérieur - Expert à la Faculté des Sciences – Université

Mohammed V Rabat, qui a assuré l'encadrement scientifique de cette thèse, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe et qui m'a dirigé tout au long des années de Master et de thèse. Il a toujours été disponible, à l'écoute de mes nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancée de mes travaux. Les nombreuses discussions scientifiques que nous avons eues ainsi que ses conseils sont pour beaucoup dans le résultat final de ce travail. Sa capacité d'analyse et son enthousiasme m'ont montré que le monde de la recherche pouvait être un univers passionnant. Enfin, ses relectures et corrections de cette thèse ont été très appréciées. Je lui suis également reconnaissante pour sa franchise et sa sympathie. Cette thèse lui doit beaucoup, je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Mes chaleureux remerciements vont également à mon co-encadrant de thèse, Monsieur **Rachid MOUSSADEK**, Chercheur principal conjoint à ICARDA-INRA, pour avoir dirigé mes recherches. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ces années et pour tous ses conseils et remarques constructives. Son contact a d'ailleurs été très enrichissant tant au niveau humain qu'au niveau de mon travail. Il peut être assuré de mon sincère respect et de ma profonde gratitude.

Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance à mon co-encadrant Monsieur **Rachid MRABET** Directeur de la recherche à INRA, pour toute la patience tout au long de ce travail, la disponibilité dont il a fait preuve à mon égard, ainsi pour ses réelles qualités humaines. Ses conseils et remarques constructives m'ont permis d'améliorer grandement la qualité de mes travaux et de ce mémoire. Je tiens à lui exprimer mes remerciements pour l'honneur qu'il me fait en participant à ce jury.

Mes remerciements vont également à Monsieur **Driss ZEJLI**, Professeur d'Enseignement Supérieure à l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées-Université Ibn Tofail à Kénitra, qui a

accepté avec beaucoup d'enthousiasme d'expertiser mon travail de thèse. Je suis ainsi très reconnaissante pour l'effort qu'il a fourni pour élaborer son rapport.

Je remercie infiniment Madame **Souad ABDERAFI**, Professeur d'Enseignement Supérieure à l'Ecole Mohammadia d'Ingénieurs- Université Mohammed V à Rabat, qui a accepté avec honneur d'évaluer ce travail. Je suis ainsi très reconnaissante de sa coopération et le temps qu'il a consacré pour produire son rapport.

Je remercie Monsieur **Adnane ELHAMIDI**, Professeur d'Enseignement Supérieure à la Faculté des Sciences - Université Mohammed V à Rabat, qui a accepté d'évaluer ce travail et de remettre son rapport.

Mes vifs remerciements vont également à Monsieur **Rachid BOULIF**, Directeur de recherche chargé de mission à l'OCP pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier également Monsieur **Ahmed DOUAIK**, Ingénieur en chef principal à l'INRA pour son appui scientifique et sa contribution à une partie de cette thèse.

Je suis particulièrement reconnaissante au Dr. **Donna Giltrap**, Chercheur principal-Modélisateur basé sur les processus de l'institut de recherche Manaaki Whenua - Landcare Research, New Zealand, pour son aide précieuse sur les questions techniques du modèle.

Je souhaite également rendre hommage au Professeur **Mohamed BADRAOUI**, ex Directeur de l'INRA, pour m'avoir accueilli au sein de l'INRA. Qu'Allah lui fasse miséricorde et lui ouvre les portes du paradis.

Je tiens exprimer toute ma reconnaissance à mes parents, mon frère et mes sœurs qui ont su croire en moi et qui m'ont apporté toute leur aide quand j'en ai eu besoin. Ce mémoire leur est dédié à 100%.

Enfin, et surtout, je remercie mes amis **Zineb, Fadwa, Sahar, Bahia, Hamza, et Kamal** pour leurs encouragements durant cette étude.

Je remercie le soutien de toutes les personnes dont l'aide a rendu cette thèse possible.

Résumé

Le carbone organique du sol (COS) est très important pour ses contributions à la production alimentaire, la réduction et l'adaptation au changement climatique et la réalisation des Objectifs pour le Développement Durable. De ce fait, l'étude des facteurs qui influencent le COS est primordiale. Dans cette thèse, un modèle basé sur les processus, Dénitrification-Décomposition (DNDC), a été exécuté, validé et utilisé pendant 9 ans pour évaluer les impacts de différents facteurs environnementaux, des pratiques de gestion agricole, et les propriétés du sol sur le changement des stocks de COS, dans une région semi-aride au Maroc. Les résultats de validation du modèle ont montré un bon accord entre les valeurs simulées et celles observées du modèle, sur la base de l'erreur quadratique moyenne normalisée (RMSE) et du coefficient de corrélation de Pearson (r). Le potentiel de séquestration du C (PSC) a été considérablement amélioré avec l'augmentation du taux de résidus de culture et l'application de fumier. D'autre part, l'augmentation du taux d'engrais a eu un effet faible à négligeable sur les stocks du COS. La température de l'air dans les conditions climatiques et le COS initial dans les propriétés du sol ont eu un impact important sur l'accumulation du COS dans le site d'étude. Le taux de séquestration du C induite par les effets des scénarios climatiques combinés était inférieure à leurs effets individuels (pour la plupart des scénarios).

Les informations contenues dans ce rapport de thèse peuvent contribuer à fournir une preuve scientifique de l'importance de l'approche de modélisation d'évaluer des changements des stocks du COS sous différents scénarios alternatifs, ainsi être utiles aux scientifiques et aux décideurs politiques qui s'occupent de régions présentant des conditions environnementales similaires à celles de Merchouch Station, par l'identification des scénarios alternatifs de séquestration du C dans le sol.

Mots clés : Carbone organique du sol, modèle DNDC, pratiques agricoles, semis direct, facteurs environnementaux, propriétés du sol, taux de séquestration du carbone.

Abstract

Soil organic carbon (SOC) is very important for its contributions to food production, climate change mitigation and adaptation, and achieving the Sustainable Development Goals. Therefore, the study of the factors that influence SOC is crucial. In this thesis, a process-based model, Denitrification-Decomposition (DNDC), was run, validated and used for 9 years under local climate, soil and management conditions to assess the impacts of different environmental factors, agricultural management practices, and soil properties on the change of SOC stocks, in a semi-arid region in Morocco. The model validation results showed good agreement between the simulated and observed model values, based on the normalized root mean square error (RMSE) and Pearson's correlation coefficient (r). The C sequestration potential (CSP) was significantly improved with the increase in crop residue rate and manure application. On the other hand, increasing fertilizer rate had a small to negligible effect on SOC stocks. Air temperature in climatic conditions and initial SOC in soil properties had a significant impact on SOC accumulation in the study site. The rate of C sequestration induced by the effects of the combined climate scenarios was lower than their individual effects (for most scenarios).

The information contained in this thesis report can help provide scientific evidence of the importance of the modeling approach to assess changes in SOC stocks under different alternative scenarios, as well as be useful to scientists and policy makers dealing with regions with environmental conditions similar to those of Merchouch Station, through the identification of alternative soil C sequestration scenarios.

Keywords: Soil organic carbon, DNDC model, agricultural practices, no-tillage, environmental factors, soil properties, carbon sequestration rate.

ملخص

ملخص يعتبر الكربون العضوي في التربة مهماً جداً لمساهماته في إنتاج الغذاء ، وتخفيف تغير المناخ والتكيف معه ، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. لذلك ، فإن دراسة العوامل التي تؤثر على الكربون العضوي ضرورية. في هذه الأطروحة ، تم تشغيل نموذج قائم على العمليات (DNDC) ، والتحقق من صحته واستخدامه لمدة 9 سنوات لتقييم آثار العوامل البيئية المختلفة ، وممارسات الإدارة الزراعية، وخصائص التربة على تغيير مخزون الكربون العضوي، في منطقة شبه قاحلة في المغرب. أظهرت نتائج التحقق من صحة النموذج توافقاً جيداً بين القيم المحاكاة و تلك التي لوحظت من النموذج ، بناءً على جذر متوسط الخطأ التربيعي المعياري (RMSE) ومعامل ارتباط بيرسون (r). تم تحسين إمكانات عزل الكربون بشكل كبير مع زيادة معدل بقايا المحاصيل واستخدام السماد الطبيعي. من ناحية أخرى ، كان لزيادة معدل الأسمدة تأثير ضئيل على مخزون الكربون العضوي في التربة. كانت درجة حرارة الهواء في الظروف المناخية و الكربون العضوي الأولي في التربة في خصائص التربة تأثير كبير على تراكم الكربون العضوي في التربة في موقع الدراسة. من ناحية أخرى كان معدل عزل الكربون الناجم عن تأثيرات سيناريوهات المناخ المجتمعة أقل من تأثيراتها الفردية (لمعظم السيناريوهات).

يمكن أن تسهم المعلومات الواردة في تقرير هذه الأطروحة في تقديم دليل علمي على أهمية نهج النمذجة لتقييم التغييرات في مخزونات الكربون العضوي في التربة في إطار سيناريوهات بديلة مختلفة ، وبالتالي تكون مفيدة للعلماء وصانعي السياسات المعنيين الذين يشغلون على مناطق ذات ظروف بيئية مماثلة لتلك الخاصة بمحطة مرشوش ، من خلال تحديد سيناريوهات بديلة لعزل الكربون العضوي في التربة.

الكلمات المفتاحية: الكربون العضوي للتربة ، نموذج ، الممارسات الزراعية، الزرع المباشر ، العوامل البيئية خصائص التربة ، معدل عزل الكربون

Production scientifique

Publications éditées (Indexées)

LEMBAID, I., MOUSSADEK , R., MRABET, R., DOUAIK, A., BOUHAOUSS, A., Modeling the effects of farming management practices on soil organic carbon stock under two tillage practices in a semi-arid region, Morocco. *Heliyon* 7 (2021) e05889.

LEMBAID, I., MOUSSADEK , R., MRABET, R., BOUHAOUSS, A., Modeling Soil Organic Carbon Changes under Alternative Climatic Scenarios and Soil Properties Using DNDC Model at a Semi-Arid Mediterranean Environment. *Climate*. 2022; 10(2):23.

Communications orales

LEMBAID, I., MOUSSADEK , R., MRABET, R., DOUAIK, A., BOUHAOUSS, A. Modeling impacts of alternative management practices on soil organic carbon under No-tillage system in Morocco using DNDC Model. 8th Global conference on global warming, Doha, Qatar 22-25. April 2019.

LEMBAID, I., MOUSSADEK , R., MRABET, R., DOUAIK, A., BOUHAOUSS, A. CONSERVATION AGRICULTURE: strategy for responding to climate change in dry Mediterranean. Anthropology, Weather and Climate Change Conference, London- United Kingdom, 27-29. May 2016.

LEMBAID, I., MOUSSADEK , R., MRABET, R., DOUAIK, A., BOUHAOUSS, A. Etude de la dynamique du carbone et sa séquestration dans les sols marocains sous agricultures de conservation. 7^{èmes} Journées des Doctorants du LPED, Marseille – France, 26 – 28 March 2015.

Communications affichées

LEMBAID, I., MOUSSADEK , R., MRABET, R., DOUAIK, A., BOUHAOUSS, A. Comparison of The Impact Of No-Tillage And Conventional Tillage On Physical, Chemical Properties By The Student. Test Spatial Statistics: One World, One Health Conference, Lancaster United Kingdom, 4-7 July 2017.

LEMBAID, I., MOUSSADEK , R., MRABET, R., DOUAIK, A., BOUHAOUSS, A. Conservation agriculture what is it and why is it important for future sustainable food

production. First Mediterranean Forum for PhD Students and Young Researchers: Designing Sustainable Agricultural and Food production Systems under Global Changes in the Mediterranean. Montpellier – France. 18-19 July 2016.

LEMBAID, I., MOUSSADEK, R., MRABET, R., DOUAIK, A., BOUHAOUSS, A. Impact of Conservation Agriculture on physical, chemical proprieties of soil in Central Morocco (Ain Jemaa). The Third World Scientific Conference on CLIMATE –SMART Agriculture, Montpellier – France, 16 – 18 March 2015.

LEMBAID, I., MOUSSADEK, R., MRABET, R., DOUAIK, A., BOUHAOUSS, A. Impact du semis direct sur les propriétés physico-chimiques des sols du Maroc (Meknès- Ain-Bitit). Afro-Mediterranean Soils: Constraints and Potentialities. Marrakech- Morocco, 18-19 December 2015.

Liste des figures

Figure 1: Variation des teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre depuis 1750. (GIEC, 2001).....	10
Figure 2 : Principales mesures du PMV pour l'adaptation au changement climatique	16
Figure 3: Les deux fondements de la nouvelle stratégie nationale du secteur agricole « Génération Green 2020-2030 »	17
Figure 4 : Stocks et flux de carbone à l'échelle de la planète (Source ADEME, 2014)	19
Figure 5: Cycle du carbone du sol.....	23
Figure 6: Extrapolation spatiale de la vulnérabilité des stocks de COS en fonction de la température (Crowther et al., 2016)	25
Figure 7: Mécanismes de protection du C du sol par l'association de minéraux argileux	27
Figure 8: Les variations mondiales du pH du sol vont du sol acide (rouge), au sol neutre (jaune) puis au sol alcalin (basique, bleu). Les zones noires restent sans données.	28
Figure 9: Stock de carbone organique estimé pour différents modes d'occupation des sols (source : ADEME, 2014)	29
Figure 10: Changement relatif de la teneur en C organique du sol sans labour (NL) par rapport au labour (L) en fonction de la profondeur du sol (Angers and Eriksen-Hamel, 2008)	30
Figure 11: Aperçu schématique et stratégies pour une gestion efficace des résidus de culture	33
Figure 12: Avantages des cultures de couverture sur l'environnement (source : service de conservation des ressources naturelles en EESI)	34
Figure 13: Stratégies de gestion suggérées et déconseillées pour la séquestration du carbone du sol et leur impact sur la productivité alimentaire, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique (Descheemaeker et al., 2016)	36
Figure 14 : Nombre total de citations pour différents modèles de COS dans la littérature Web of Science (pour les modèles nommés avec plus de 50 citations)(Redessiné de Campbell et Paustian. (2015).....	40
Figure 15 : Carte de l'emplacement du site d'étude.....	45

Figure 16 : Moyenne mensuelle des précipitations et des températures du 2008 au 2016 à la station Merchouch au Maroc	46
Figure 17 : Structure du modèle DNDC (adapté de (Li et al., 2006)).....	48
Figure 18 : diagramme schématique de la famille étendue du modèle DNDC (adopté de (Gilhespy et al., 2014)).....	50
Figure 19 : Sous modèle du dynamique du carbone dans le modèle DNDC	51
Figure 20 : Surveillance de la dynamique quotidienne des principaux facteurs simulés pendant l'exécution du modèle dans la station de Merchouch.	61
Figure 21 : Pratiques de gestion actuelles (Référence) et scénarios de gestion alternatifs pour le site d'étude, Merchouch, Maroc.....	67
<i>Figure 22 : Organigramme représente la méthodologie générale d'utilisation du modèle DNDC dans cette étude</i>	<i>68</i>
Figure 23 : Dynamique du COS observé et modélisé en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch, en 2008-2016.....	69
Figure 24 : Impact modélisé des résidus de culture alternatifs retournés en surface sur le COS en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch	72
Figure 25 : Impact modélisé du taux d'amendement du fumier sur le COS en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch.	72
Figure 26 : Moyenne annuelle modélisée sur 9 ans des stocks de COS, selon les pratiques SD et SC, avec la variation du taux des résidus de culture et de fumier	73
Figure 27: Impact modélisé de l'augmentation du taux d'engrais de 30 %, 50 % et 80 % (% du taux de référence) sur le COS en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch.....	76
Figure 28 : Impact modélisé de diminution du taux d'engrais de 30 %, 50 % et 80 % (% du taux de référence) sur le COS en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch.	77
Figure 29 : Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent contenu initial de COS dans la station Merchouch	89
Figure 30: Augmentation (ou diminution) du taux de séquestration du C sous les propriétés du sol alternative dans le site de Merchouch : AR-0.19, AR-0.34, AR-0.4 and AR-0.63; diminution en contenu en argile de la ligne de référence (0.50 %) à 0.19%, 0.34%, 0.4%, et augmentation à 0.63%; C-0.005, C-0.02 et C-0.03- diminution en contenu de COS de la ligne de base (0.01 kg C/ha) à 0.005 kg C/ha, et augmentation à 0.02 kg C/ha and 0.03 kg C/ha.	89

Figure 31: Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent teneur en argile dans la station Merchouch	91
Figure 32: Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent pH du sol dans la station Merchouch	92
Figure 33: Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent scenario de température dans la station Merchouch.....	94
Figure 34: Augmentation (ou diminution) du taux de séquestration du C sous différents scenarios climatiques dans le site de Merchouch : AP-10, AP-20, DP-10 et DP-20 – Augmentation et diminution des précipitations par 10% et 20%, respectivement; AT-2, AT-4, DT-2 et DT-4 – Augmentation et diminution de la température par 2 °C et 4 °C, respectivement.....	94
Figure 35: Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent scenario de précipitation dans la station Merchouch.....	95
Figure 36: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scenario combiné T2A1 (augmentation de la température de 2°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 %) et les scénarios individuels T2 et A1 dans la station Merchouch.	98
Figure 37: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scenario combiné T2A2 (augmentation de la température de 2°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 %) et les scénarios individuels T2 et A2 dans la station Merchouch	98
Figure 38: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scenario combiné T4A1 (augmentation de la température de 4°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 %) et les scénarios individuels T4 et A1 dans la station Merchouch ...	100
Figure 39: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scenario combiné T4A2 (augmentation de la température de 4°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 %) et les scénarios individuels T4 et A2 dans la station Merchouch. ..	101
Figure 40: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scenario combiné T2D1 (augmentation de la température de 2°C et simultanément diminuer la quantité de précipitations de 10 %) et les scénarios individuels T2 et D1 dans la station Merchouch.	102
Figure 41: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scenario combiné T2D2 (augmentation de la température de 2°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 %) et les scénarios individuels T2 et D2 dans la station Merchouch. ..	103
Figure 42: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scenario combiné T4D1 (augmentation de la température de 4°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 %) et les scénarios individuels T4 et D1 dans la station Merchouch ...	105

Figure 43: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scenario combiné T4D2 (augmentation de la température de 4°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 %) et les scénarios individuels T4 et D2 dans la station Merchouch ... 105

Liste des tableaux

Tableau 1:Étendue de l'adoption du non-labour dans le monde (pays avec > 100 000 ha)(Derpsch et al., 2010).....	31
Tableau 2: Caractéristiques du sol de la station de Merchouch	45
Tableau 3:Principaux paramètres d'entrée requis par le DNDC	52
Tableau 4 : : Critère d'évaluation de la performance du modèle DNDC recommandés pour un pas de temps annuel.....	64
Tableau 5 : Potentiels de séquestration du COS modélisés par le DNDC modèle sous des conditions de gestion alternatives pour les systèmes SD et SC à la station Merchouch, Maroc	74
Tableau 6 : Scénarios de référence et alternatif pour les tests de sensibilité.....	83
Tableau 7: Ligne de base et scénarios individuels alternatives des facteurs climatiques	85
Tableau 8: Scénarios alternatives combinés de l'augmentation de la température et diminution des précipitations.....	86
Tableau 9 : Indices de sensibilité calculés pour quantifier l'impact des paramètres d'entrée testés sur les stocks de COS de sortie	87
Tableau 10: Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C des scénarios combinés T2A1 et T2A2 par rapport au scénarios individuels T2 , A1 et A2.	99
Tableau 11: Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C des scénarios combinés T4A1 et T4A2 par rapport au scénarios individuels T4, A1 et A2.	101
Tableau 12: Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C des scénarios combinés T2D1 et T2D2 par rapport au scénarios individuels T2, D1 et D2.	103
Tableau 13: Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C des scénarios combinés T4D1 et T4D2 par rapport au scénarios individuels T4, D1 et D2.	106

Liste des acronymes

AC : Agriculture de conservation

C : Carbone

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

COS : Carbone organique du sol

COP : Conférences des Parties

DNDC : Dénitrification-Décomposition

EESI : Environmental and energy study institute

FAO : Food and agriculture organization

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

MCG : Modèles Climatiques Généraux

MOS : Matière organique du sol

PIB : Produit Intérieur Brut

PGB : pratiques de gestion bénéfiques

PMV : Plan Maroc Vert

PSC : Potentiel de séquestration de carbone

SC : Semis conventionnel

SCI : Stocks de C initiaux

SCP : Stocks de C prévus

SD : Semis-direct

SI : Sensitivity index

PPN : productivité primaire nette

SCOS : Stock du carbone organique du sol

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements	III
Résumé	VII
Abstract	VIII
ملخص.....	IX
Production scientifique.....	XI
Liste des figures	XII
Liste des tableaux	XVI
Liste des acronymes	XVII
Table des matières	XVIII
Introduction	1
1. Contexte général et problématique de la thématique traitée	1
2. Objectifs et motivation de la thèse :	5
3. Structure du manuscrit	6
Chapitre I : Etat de l’art.....	8
1. Introduction	8
2. Importance des sols face au changement du climat	8
3. Aperçue Historique des négociations climatiques.....	9
4. Le changement climatique au Maroc	12
4.1 Engagements internationaux du Maroc face au changement climatique.....	14
4.2 Enjeux et perspectives des changements climatiques sur le secteur agricole	14

4.3	Stratégie nationale face au changement climatique	15
4.4	Future stratégie nationale	16
5.	Carbone organique du sol (COS)	18
5.1	le sol est un réservoir terrestre du COS.....	18
5.2	COS: Un élément de la matière organique du sol (MOS).....	20
5.3	Dynamique du carbone organique des sols et processus de stabilisation	22
5.3.1	Cycle biogéochimique du carbone organique	22
5.4	La séquestration du COS	23
5.5	Stockage de carbone organique : influence des facteurs naturels.....	24
5.5.1	Climat	24
5.5.2	Propriétés du sol	26
5.5.3	Mode d'occupation des sols	28
5.6	Stockage de carbone organique : influence des pratiques de gestion agricoles.....	29
5.6.1	Méthodes de travail du sol.....	29
5.6.2	Gestion des engrais.....	31
5.6.3	Gestion des résidus des cultures	32
5.6.4	Les cultures de couverture.....	33
5.6.5	Application de fumier et de compost.....	34
5.6.6	Rotation des cultures	35
6.	Modélisation du changement du carbone organique du sol	36
6.1	Modélisation du COS dans les terres agricoles.....	37
6.2	Modèles fréquemment utilisés	39

6.3	Choix du modèle	40
6.4	Validation des résultats	41
7.	Conclusion.....	43
Chapitre II :Site d'étude et présentation du modèle DNDC.....		44
1.	Introduction	44
2.	Présentation de site d'étude.....	44
3.	Montage expérimental du site	46
4.	Modèle DNDC	47
4.1	Développement du modèle DNDC	49
4.2	Le sous-modèle de dynamique du carbone dans DNDC	50
4.3	Paramètres d'entrée	52
4.4	Paramètres de sortie.	54
4.5	Avantages.....	54
4.6	Inconvénients	55
4.7	Brève description d'autres modèles	55
4.7.1	Le modèle DayCent.....	55
4.7.2	Le modèle CENTURY	56
4.7.3	Le modèle DSSAT.....	56
4.7.4	DAISY model	56
5.	Conclusion.....	57
Chapitre III : Evaluation de la performance du modèle DNDC et modélisation de l'impact des pratiques agricoles alternatives sur les stocks du carbone organique du sol sous deux types de travail du sol dans une région semi-aride au Maroc.....		58

1.	Introduction	58
2.	Matériels et méthodes.....	59
2.1	Site d'étude	59
2.2	Préparation des données pour le modèle DNDC	59
2.2.1	Données climatiques.....	60
2.2.2	Données pédologiques.....	60
2.2.3	Données des pratiques agricoles.....	60
2.3	Exécution du DNDC en mode site.....	60
2.4	Mesures du terrain pour la vérification du modèle DNDC.....	62
2.4.1	Expression de Coefficient corrélation de Pearson (r).....	63
2.4.2	Expression de L'erreur quadratique moyenne (RMSE).....	63
2.5	Scénarios de la ligne de référence et de pratiques agricoles alternatives.....	64
2.6	Le potentiel de séquestration du COS.....	66
3.	Résultats et discussions	69
3.1	Vérification de la performance du modèle DNDC	69
3.2	Teneurs en COS dans les conditions de gestion actuelles (ligne de base).....	70
3.3	Effets des pratiques de gestion des résidus de culture et du fumier sur les stocks de COS	71
3.4	Effets des pratiques de gestion des engrais sur les stocks de COS	76
4.	Conclusion.....	78
 Chapitre IV : Sensibilité du COS dans le modèle DNDC aux changement des scénarios climatiques et aux propriétés du sol en conditions Méditerranéennes		
1.	Introduction	80

2.	Matériels et Méthodes	82
2.1	Test de sensibilité.....	82
2.2	Taux de séquestration du C.....	84
2.3	Calcul de INDICE de sensibilité.....	84
2.4	Scénarios des facteurs climatiques individuels et combinés.....	85
3.	Résultats et discussion.....	86
3.1	Variations des stocks du COS sous différentes propriétés du sol	86
3.1.1	Effet de la teneur initial en COS sur les stocks du COS.....	87
3.1.2	Effet de la teneur en argile sur les stocks du COS.....	90
3.1.3	Effet de la teneur du pH du sol sur les stocks du COS	91
3.2	Effets des scenarios climatiques sur les stocks de COS	92
3.2.1	Effets de la température sur les stocks de COS	93
3.2.2	Effets des précipitations sur les stocks de COS.....	95
3.3	Scénarios alternatifs combinés de l’augmentation de la température et des précipitations	97
3.3.1	Scénarios A et B : T2A1 et T2A2.....	97
3.3.2	Scénarios C et D : T4A1 et T4A2.....	99
3.4	Scénarios alternatives combinés de l’augmentation de la température et diminution des précipitations.....	101
3.4.1	Scénarios A et B : T2D1 et T2D2.....	101
3.4.2	Scénarios C et D: T4D1 et T4D2.....	103
4.	Conclusion.....	106
	Conclusion générale et perspectives.....	108

1. Conclusions	108
2. Limites de l'étude et perspectives	111
ANNEXES	113
Annexe A : Mesure de la granulométrie	113
Annexe B : Détermination de la matière organique et le carbone total	115
Annexe C : Analyse du pH dans le sol	118
Annexe D : Analyse du Phosphore assimilable (Méthode OLSEN).....	120
Annexe E : Analyse du Potassium assimilable	123
Références	125

Introduction

1. Contexte général et problématique de la thématique traitée

Le secteur agricole joue un rôle important dans la croissance de l'économie marocaine et constitue un appui fort au développement du pays puisqu'il représente jusqu'à 20 % du produit intérieur brut et emploie environ 40% de la population active [1]. Actuellement, la surface agricole utile (SAU) au Maroc représente environ 9,2 millions d'hectares dont 65% est emblavée en céréaliculture. Cependant, cette superficie devrait être réduite de 22% tout en augmentant sa production de 50% à l'horizon 2030 dans le cadre de la nouvelle stratégie agricole « Génération Green ». Ceci pose un double défi à ce secteur: assurer une sécurité alimentaire pour une population à croissance démographique accélérée et amortir la dégradation des sols agricoles dont 90 % se situent dans les zones semi-arides et arides [2]. La dégradation du sol constitue en effet une problématique majeure de notre secteur agricole. En effet, l'agriculteur marocain s'oriente vers une exploitation maximale du sol pour faire face à des insuffisances techniques, économiques et foncières. Ainsi, après des décades d'utilisation des terres, le sol se trouve dépourvu de matière organique et présente une structure dégradée facilement transportable.

La séquestration du carbone (C) dans les sols agricoles a été reconnue comme un outil potentiellement important pour atténuer les effets du changement climatique. Elle a été présentée comme une approche peu coûteuse pour atténuer l'effet de serre. Des décisions importantes doivent être prises concernant les futurs niveaux tolérables de la teneur en CO₂ de l'atmosphère, ainsi que les stratégies d'utilisation des terres et des combustibles fossiles qui nous permettront d'atteindre ces objectifs (Sarmiento et Bender, 1994).

Dans les zones semi-arides du bassin méditerranéen, le changement climatique a des effets néfastes sur les cultures pluviales: (i) des taux de minéralisation élevés de la matière organique du sol (MOS) augmentés par des températures élevées pendant les périodes humides ; (ii) des résidus insuffisants pour couvrir la surface du sol après des périodes de sécheresse, qui influencent la production agricole ; (iii) certaines pratiques de travail du sol sont effectuées immédiatement après la récolte pour enfouir les résidus par disque, voire pour préparer partiellement le lit de semence en conditions sèches ; et (iv) les résidus de cultures céréalières sont actuellement mis en balles après la récolte [4], [5].

Le Maroc, comme tous les pays du monde, connaît des changements importantes dans les niveaux des températures et l'intensité des précipitations. Selon des données du secrétariat d'Etat chargé du développement durable, les températures moyennes annuelles vont augmenter de 1 à 1.5°C à l'horizon 2100, sur l'ensemble du Maroc (scénario optimiste). Tandis que selon le scénario pessimiste, on assisterait à une hausse des températures sur l'ensemble du pays à l'horizon de 2100. Cette hausse oscillerait entre 5 et 7 °C dans les régions du Sud-Est de la chaîne de l'Atlas, entre 2 et 5°C dans les régions méditerranéennes, les régions Atlantiques ainsi que le centre du pays et entre 3 et 4°C dans provinces sahariennes. Les résultats modèles climatiques globaux (GCM), prévoit une importante diminution du cumul annuel des précipitations sur l'ensemble du pays . Cette diminution du cumul annuel associé à des jours extrêmement pluvieux (précipitations > 99e percentile), en revanche les projections pour d'autres indices caractérisant les pluies intenses (nombre de jours avec précipitations supérieures à 10 ou 20 mm ou valeur du maximum mensuel des précipitations journalières par exemple) sont en désaccord et le signal est peu clair pour la période 2036-2065 [6].

La situation actuelle est déjà alarmante. Les sols Marocains ont une faible teneur en MOS (<2%). Cette perte de MOS est estimée à environ 30 % entre 1987 et 1997 [7] en raison

principalement des pratiques inappropriées de gestion des sols, telles que le labour conventionnel. En effet, l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a estimé que 71% des terres agricoles marocaines sont dégradées et incite à adopter des systèmes de conservation. Par conséquent, l'agriculture de conservation (AC) a été proposée par plusieurs chercheurs et a été adoptée dans de nombreuses régions au Maroc comme une approche alternative pour augmenter les rendements et assurer la sécurité alimentaire.

Certes, le problème d'épuisement de la MOS est lié aussi aux pratiques agricoles. Plusieurs pratiques alternatives de gestion agricole ont été testées afin d'identifier leur potentiel d'optimisation des teneurs en C dans les agroécosystèmes. Ces pratiques alternatives peuvent aider à améliorer les stocks du COS, et de ce fait, offrent des solutions à faible coût pour augmenter la productivité [8]. Les stratégies d'amélioration du COS, suggérées par les pédologues du monde, impliquent l'optimisation des pratiques de gestion alternatives de stockage du COS, souvent appelées pratiques de gestion bénéfiques (PGB), par la modification des apports de C provenant des résidus de culture retournés à la surface sous forme de paillis, et/ou l'application d'engrais organiques, y compris le fumier et le compost. Au cours des dernières années, la gestion des résidus de culture au Maroc a été changée de manière significative en retournant jusqu'à 30% des résidus à la surface après la récolte sous les systèmes de l'agriculture de conservation.

Les engrais organiques, notamment le fumier et le compost, constituaient une source importante de nutriments pour les sols agricoles marocains avant les années 1970. À cette époque, presque toutes les ressources organiques telles que les déchets animaux et la paille disponibles dans les zones agricoles ont été soigneusement collectées et incorporées dans les sols afin de maintenir la fertilité des sols. Cependant, avec la croissance rapide de la demande alimentaire due à

l'augmentation constante de la population dans les années 1970 à 1990, les engrais organiques ont été progressivement remplacés par des engrais synthétiques plus efficaces.

D'une autre part, le COS dans les agroécosystèmes est simultanément influencé par les propriétés du sol (texture, pH du sol, COS initial et teneur en argile). La texture représente l'une des variables clés du sol compte tenu de sa corrélation étroite avec la croissance des racines, la conductivité thermique, les échanges gazeux et les agrégats. Les particules d'argile stabilisent la MOS contre la minéralisation microbienne, améliorent la rétention d'eau du sol et ont une capacité d'échange cationique élevée. Le pH du sol régule aussi la biodisponibilité des nutriments du sol, le renouvellement de la MOS et il est impliqué dans d'autres propriétés du sol, influençant ainsi les niveaux de COS. Le COS initial est considéré comme une composante environnementale prédominante. En effet, un COS initial plus élevé dans les sols peut entraîner des pertes importantes de COS en raison de l'environnement favorable aux communautés microbiennes, entraînant une décomposition accélérée et un taux de séquestration du COS inférieur. Cela est particulièrement vrai dans des conditions méditerranéennes où la diminution de la température stimule l'activité microbienne.

Compte tenu de la complexité de prédire les changements du COS dans les agroécosystèmes, une planification efficace basée sur des études scientifiques appropriées et utilisant des modèles basés sur les processus est nécessaire. Au cours des 20 dernières années, plusieurs modèles biogéochimiques ont été conçus et développés à cet effet. Ces modèles incluent CANDY [9], RothC [10], CENTURY [11], DAISY [12], DNDC (Li *et al.*, 1992), et NCSOIL [14]. Le modèle DNDC est l'un des modèles les plus puissants reconnu par plusieurs études antérieures. C'est dans ce contexte que la présente étude a été basée sur l'approche de modélisation par l'utilisation d'un modèle basé sur les processus, Dénitrification-Décomposition (DNDC), en

fonction du climat local, des propriétés du sol et des pratiques agricoles adoptées actuellement dans une région semi-aride au Maroc (station de Merchouch).

2. Objectifs et motivation de la thèse :

L'objectif global de ce travail vise à utiliser le modèle DNDC pour prédire les stocks du COS sous une ligne de base (conditions réelles) dans une région qui a été considérée depuis longtemps comme le grenier du Maroc, et qui souffre depuis quelques décennies d'un épuisement non négligeable des teneurs en COS, menant par conséquent à la diminution des rendements des cultures et de la production régionale. Par la suite, le modèle a été appliqué sous différents scénarios environnementaux alternatives pour évaluer l'impact des propriétés du sol et des paramètres climatiques sur les changements des stocks du COS en comparaison avec la ligne de référence. De cet objectif général, il découle un ensemble d'objectifs spécifiques qui peuvent être présentés comme suit :

- i) Evaluer la performance du modèle DNDC et identifier la dynamique du COS dans les scénarios de référence par approche de modélisation,
- ii) Utiliser le modèle validé en fonction du climat local et des propriétés du sol afin de prédire l'impact des pratiques alternatives de gestion sur les stocks de COS sous l'effet de deux types de travail du sol
- iii) Evaluer la sensibilité des changements du COS aux facteurs climatiques (précipitations et température), et aux propriétés du sol (teneur en carbone initial, pH du sol, et teneur en argile) en se basant sur notre modèle validé.
- iv) Prédire l'effets combiné de la température et des précipitations sur les stocks du COS.

Les résultats de cette étude peuvent aider les scientifiques, les décideurs et tous les intervenants dans le domaine de l'environnement à définir tous les aspects qui nécessitent une intervention pour réduire l'épuisement des stocks du COS. Le modèle validé dans le site sélectionné pourrait aider à cet effet en testant les différentes meilleures pratiques de gestion (MPA) qui sont intégrées séparément dans le modèle DNDC. En outre, le modèle peut également être utilisé dans des études prospectives pour analyser les impacts des effets du changement climatique sur les taux de séquestration du C, et ainsi définir le seuil de saturation du COS sous différents pratiques agricoles dans le futur.

3. Structure du manuscrit

Le corps de cette thèse est structuré en cinq chapitres qui s'articulent ainsi :

Une introduction générale où nous cernons le cadre global, la problématique ainsi que les objectifs de notre recherche.

Le chapitre I : Etat de l'art, met l'accent sur le changement climatique dans le monde entier est spécialement au Maroc : historiques des négociations face au changement climatique, ainsi qu'un aperçu général sur le COS, leur dynamique dans le sol, les facteurs environnementaux qui influencent sa séquestration, et son rôle dans la mitigation du changement climatique.

Le chapitre II : Site d'étude et présentation du modèle DNDC, présente les principales caractéristiques du site d'étude et les principales informations sur le modèle DNDC : développement, paramètres d'entrées et de sorties, ainsi ses avantages et inconvénients.

Le chapitre III : Evaluation de la performance du modèle DNDC et modélisation de l'impact des pratiques agricoles alternatives sur les stocks du carbone organique du sol sous deux types de travail du sol dans une région semi-aride au Maroc, a pour objectif

d'évaluer la performance du modèle utilisé et de modéliser l'impact des pratiques agricoles (résidus de culture, fumier et fertilisants azotés) sur l'évolution des stocks du COS dans le but d'estimer les pratiques qui permettent un stockage important du C dite bénéfiques.

Le chapitre IV : Sensibilité du COS aux changement des scenarios climatiques et aux propriétés du sol en conditions Méditerranéennes, permet de déterminer la sensibilité du COS aux changements des scénarios climatiques et aux propriétés du sol en conditions méditerranéennes toujours par l'approche de modélisation, ainsi examiner l'effet combiné des précipitations et de la température, les deux facteurs climatiques les plus critiques qui n'ont pas été complètement élucidés à ce jour sur les stocks du COS, dans le but de comprendre les changements de ce dernier en réponse au changement climatique.

Une conclusion générale tentera de synthétiser les principaux résultats acquis et les perspectives futures de recherche.

Chapitre I : Etat de l'art

1. Introduction

Le grand cycle du carbone, dans lequel entre le carbone organique du sol (COS), prend en compte le cycle du carbone (C) dans le sol, mais aussi dans la végétation, l'océan et l'atmosphère. Le contenu de COS est estimé environ 1 500 PgC entre 0 et 1 mètre de profondeur. Cela représente plus de carbone que ce qui est actuellement contenu dans l'atmosphère (environ 800 PgC) et dans la végétation terrestre (500 PgC) réunis (Wang et al., 2008). Cette quantité phénoménale de COS n'est pas statique, mais évolue en permanence au travers de cycles entre les différentes réserves de carbone, sous des formes moléculaires diverses.

L'écosystème agricole fournit la nourriture dont les gens ont besoin et transporte également de manière cruciale le (C) dans le cycle du C. L'écosystème est affecté par de nombreux facteurs naturels et humains, tels que le sol, le climat, les cultures et les pratiques agricoles. Tous ces facteurs sont reliés les uns aux autres par des échanges de substances et d'énergie, formant ainsi un système biogéochimique complexe. Cependant, en raison des activités humaines, l'écosystème agricole est une source essentielle de gaz à effet de serre (GES). Ce chapitre présente un état d'art sur la dynamique du COS ainsi que le processus de stabilisation, les facteurs qui influencent leur changement dans le sol, et leur importance pour la mitigation du changement climatique. Par ailleurs, une partie de ce chapitre traitera l'approche de modélisation et leur importance pour déduire les stocks et les distributions du COS sous différents scénarios est également décrite.

2. Importance des sols face au changement du climat

les sols sains constituent la plus grande réserve de carbone terrestre. Lorsqu'ils sont gérés durable, les sols peuvent jouer un rôle important dans l'atténuation du changement climatique

en stockant le carbone (séquestration du carbone) et diminuant les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. À l'inverse, si les sols sont mal gérés ou cultivés selon des pratiques agricoles non durables, le carbone du sol peut être libéré dans l'atmosphère sous la forme de dioxyde de carbone (CO₂), ce qui peut contribuer au changement climatique. La préoccupation croissante concernant les effets désastreux du réchauffement global contraste avec l'incapacité de nombreux pays à réduire leurs émissions nettes de gaz à effet de serre.

3. Aperçu Historique des négociations climatiques

Le climat a toujours changé, cependant, dans l'histoire de la civilisation humaine, les changements actuels que nous vivons sont particulièrement alarmants. Principalement parce que le climat n'a jamais changé aussi rapidement. Nous présentons ci-dessous un aperçu chronologique des négociations climatiques de 1979 à aujourd'hui qui mettent en évidence les changements majeurs du climat et les actions qui en résultent qui ont été entreprises. En 1979, La première Conférence Mondiale sur le Climat tenue à Genève a permis l'initiation d'un Programme de recherche climatologique mondial. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est créé en 1988 afin d'établir un suivi scientifique des processus de réchauffement climatique. Le premier rapport du GIEC date de 1990 : il reconnaît la responsabilité humaine dans les dérèglements climatiques, par l'émission des GES, qui a fortement augmenté depuis l'ère industrielle (XIX^e siècle figure 1). Ce rapport sert ensuite de base à l'élaboration de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC).

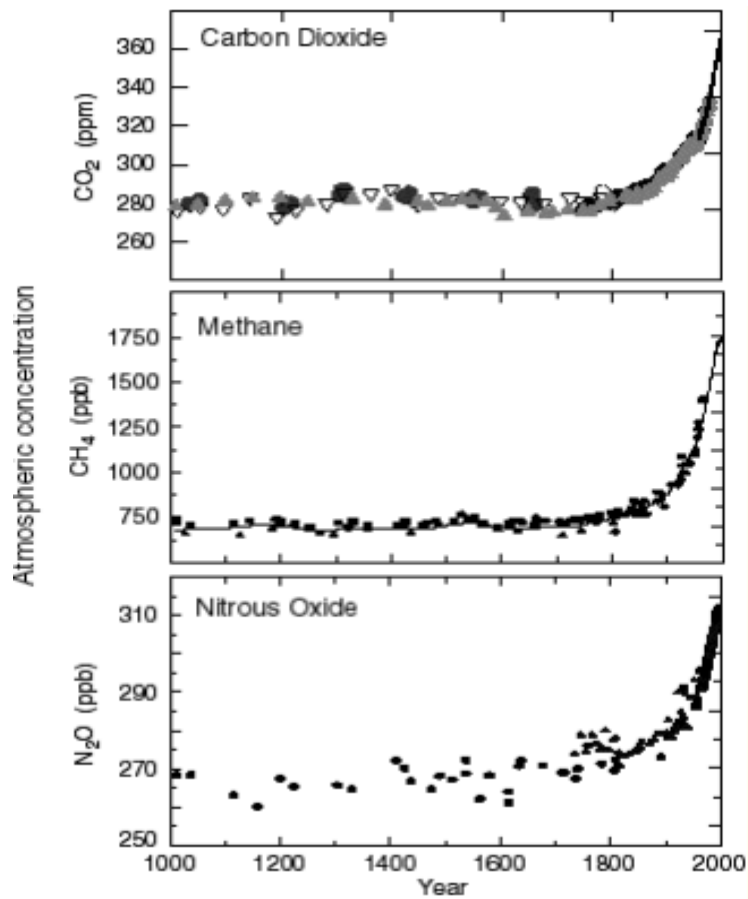


Figure 1: Variation des teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre depuis 1750. (GIEC, 2001)

En Juin 1992, le Sommet de la Terre à Rio de Janeiro, au Brésil, a adopté la CCNUCC, qui a reconnu l'existence des changements climatiques et la responsabilité humaine dans ce phénomène. La Convention-cadre entrée en vigueur en 1994, est ratifiée par 196 pays appelés « parties » dont le but ultime est de stabiliser les concentrations GES dans l'atmosphère à un niveau qui ne met pas en danger le climat mondial. Depuis l'adoption de cette Convention, les parties se réunissent chaque année lors des Conférences des Parties (COP). La première s'est tenue à Berlin en 1995 ; la seconde à Kyoto en 1997 : Pour la première fois, 37 pays développés et en transition s'engagent sur des objectifs contraignants de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre pour atteindre une réduction globale de ces émissions de 5,2% entre 2008

et 2012 par rapport à 1990. 193 pays ont depuis ratifié le protocole, qui est entré en vigueur en 2005. La COP7 est tenue à Marrakech en Novembre 2001, ces accords en définissent les règles en précisant les questions liées aux obligations des pays développés (fixation et principes) et en consacrant également une large part aux aides à apporter aux pays en développement. Entrée en vigueur du Protocole de Kyoto suite à la ratification de la Russie en 2005, durant le COP11 à Montréal. En plus, un rapport de la NASA constate que 2005 a été la plus chaude depuis la fin du 19^{ème} siècle. La terre s'est réchauffée de 0,8° C depuis un siècle et de 0,6 °C depuis 30 ans. Après plusieurs années des travaux condensés menés par 2500 scientifiques, le 4^{ème} rapport du GIEC a été publié en 2007. Les scientifiques du GIEC établissent la responsabilité humaine dans le réchauffement climatique. En Décembre de la même année, le Plan d'action de Bali (COP 13) constitue la décision qui a ouvert officiellement les négociations post-2012, en vue de l'adoption d'un nouvel accord international jusqu'à fin 2009 pour donner une suite à la première période d'engagement du Protocole de Kyoto. En 2008, la COP14 est tenue à Poznan, plusieurs pays s'entendent sur les moyens d'honorer leur engagement de diminution globale de leurs émissions de GES de 20% en 2020 par rapport à 1990, voire de 30% en cas d'accord international ambitieux à Copenhague. L'accord de Copenhague a été signé par les Chefs d'État lors de la COP15 en 2009. L'objectif de cet accord est de contenir le réchauffement climatique sous 2°C d'ici la fin du siècle et l'engagement d'un effort inédit de la part des pays développés de 30 milliards de dollars sur 2010-2012, porté à 100 milliards de dollars de financements publics et privés par an en 2020. L'année 2010 a été témoin de deux événements importants : le premier en Novembre qui inclut la Publication du premier rapport "Emissions Gap Report" par le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE), qui conclue à l'insuffisance des engagements de réduction des émissions pour atteindre l'objectif des 2°C. Le deuxième, c'est la signature des accords de Cancún au Mexique lors de la COP16 en Décembre. En 2011, les accords de Durban en Afrique du Sud ont été signés lors de la COP17. Cette conférence a

décidé du lancement d'un processus ("Plate-forme de Durban") devant mener à l'adoption d'un accord universel en 2015. En 2012, la COP15 organisé à Doha à garantir la mise en œuvre d'une poursuite du Protocole de Kyoto, à clôturer les deux pistes parallèles de négociations sur le post 2012 et à poser les jalons du futur accord à obtenir en 2015. La première période d'engagement du protocole de Kyoto a été expirée le 31 décembre 2012. En 2013, les scientifiques du GIEC ont publié le 5e rapport. L'Agenda de l'action, qui associe les acteurs non-étatiques, notamment les entreprises, aux efforts mondiaux pour lutter contre le changement climatique a été créée en 2014 lors de la COP20 au Pérou. Cette conférence est considérée importante pour la préparation de la COP21. En 2015, l'accord de Paris est adopté lors de la COP21 au Bourget qui vise à contenir la hausse des températures sous 1,5°-2°C. cette accord est entrée en vigueur en 2016 lors de la COP22. A cette conférence les Parties se sont accordés sur un calendrier des négociations, qui devraient aboutir au plus tard à la COP24. la conclusion et adoption des règles d'application de l'accord de Paris, à l'exception de celles concernant l'article 6 lors de la COP24 tenue en Pologne en 2018. En 2019, 77 pays se sont engagés lors du Sommet de l'Action pour le Climat en marge de la 74ème Assemblée générale des Nations Unies à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre pour atteindre un bilan nul d'ici à 2050. L'année 2020 ayant été marquée par les lourdes conséquences de la crise de la pandémie du covid-19, la COP26 initialement prévue en novembre 2020 a été reportée à novembre 2021, à Glasgow. Pendant cette conférence plusieurs pays ont renouvelé leur objectif de limiter le réchauffement à 1,5 degré.

4. Le changement climatique au Maroc

En tant qu'un pays d'Afrique du Nord qui se situe entre deux zones climatiques, tempérée au Nord tropicale au Sud, le Maroc se distingue par quatre types de climat : humide, subhumide, semi-aride et aride. Les observations climatiques, concernant le Maroc, réalisées sur les dernières décennies attestent de la progression du climat semi-aride vers le Nord du pays.

Comme dans toutes les régions arides du monde, le Maroc est caractérisé par des précipitations annuelles et saisonnières très variables. Le coefficient de variation des précipitations annuelles varie entre 25 % dans les 9 régions proches de l'Atlantique et plus de 100 % dans le Sahara. Malgré cette variabilité, il a été constaté (DMN, 2007) une baisse générale des précipitations au niveau national. Les pluies de printemps ont diminué de plus de 40 % et la durée maximale des périodes sèches a augmenté de 15 jours depuis les années 1960. En termes d'évolution récente, les précipitations ont enregistré une tendance générale à la baisse, disparates temporellement et géographiquement, et fluctuantes. Les températures maximales d'hiver, et minimales et maximales d'été, s'inscrivent plutôt dans une tendance à la hausse, tandis que la température minimale d'hiver connaît une tendance à la baisse.

En effet, depuis les années soixante du siècle dernier, les températures moyennes annuelles au Maroc ont augmenté de 0,16°C par décennie, alors qu'on observait une diminution significative du nombre de jours froids (température maximale de moins de 15°C). Aussi, les pluies de printemps ont diminué de plus de 40% et la durée maximale des périodes sèches a augmenté de 15 jours.

Plusieurs Modèles Climatiques Généraux (MCG) projettent que le Maroc deviendra plus chaud et aride, en particulier, durant les dernières décennies du siècle en cours. Les résultats de plusieurs études prospectives [15]–[18] sur l'évolution future du climat de la région du Maghreb et du Maroc montrent qu'il y a une concordance des différents modèles utilisés sur une augmentation de la température et une diminution des précipitations par rapport à la période de référence 1960-1990. Ces modèles climatiques projettent des changements dans les températures (de +1°C à +6°C à l'horizon 2100, avec des augmentations plus faibles dans le nord-ouest et plus importantes vers l'intérieur et le nord dans le Rif, et vers l'est dans la région orientale en passant par les reliefs des Atlas) et dans les précipitations (-20 à -50% à l'horizon

2100), avec une augmentation du nombre de jours chauds, de la fréquence de vagues de chaleur et d'événements pluviométriques intenses, conduisant ainsi à davantage d'inondations et de sécheresses et par conséquent à des impacts négatifs sur les écosystèmes, le secteur socioéconomique et sur la santé.

4.1 Engagements internationaux du Maroc face au changement climatique

Concernant ses engagements internationaux, le Maroc a procédé à la signature de la CCNUCC en 1992. Depuis sa ratification en 1995, il n'a cessé de contribuer activement à divers travaux pour la lutte contre le changement climatique. Le Royaume est également signataire du Protocole de Kyoto en 1997 et l'a ratifié en 2002. Il a abrité aussi la 7^{ème} Conférence des Parties (COP7) en 2001 et la COP 22 en 2016 et a ratifié l'accord de Paris le 21 septembre 2016. L'accord prévoit de contenir d'ici à 2100 le réchauffement climatique « bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels » et si possible de viser à « poursuivre les efforts pour limiter la hausse des températures à 1,5°C ».

4.2 Enjeux et perspectives des changements climatiques sur le secteur agricole

Au Maroc, l'agriculture a toujours été un secteur stratégique pour l'économie nationale. La place de priorité qu'elle occupe dans tous les plans de développement économique et social depuis l'indépendance en témoigne. Elle contribue actuellement à hauteur de 20% au Produit Intérieur Brut (PIB) national selon les années, dont 15% attribué aux productions végétale et animale et 5% à l'agro-industrie, génère quatre millions d'emplois surtout dans le monde rural, et exerce aussi un effet d'entraînement sur les autres secteurs de production ou de service.

C'est un secteur qui est fortement liée aux conditions climatiques du fait que plus de 80% des terres agricoles soient localisées dans les zones arides et semi-arides. Elle se caractérise par un système d'exploitation traditionnel et vivrier avec une prédominance des céréales, au détriment

d'autres cultures pouvant mieux équilibrer les assolements. La production céréalière provient en grande partie (95%) des cultures pluviales, occupant 83% de la superficie agricole utile, qui sont très vulnérables aux sécheresses. Les fluctuations enregistrées dans cette production ou dans ses rendements, sont largement liées à la clémence du ciel.

4.3 Stratégie nationale face au changement climatique

Le contexte mondial marqué par l'insécurité alimentaire, le changement climatique, la hausse des prix des produits agricoles, la responsabilisation des producteurs, la lutte contre la pauvreté a imposé au Maroc de revoir sa stratégie agricole dans un sens de mise à niveau, de restructuration et de redéfinition des missions. Le Maroc a adopté une série de politiques vertes pour préserver ses ressources naturelles et rendre l'agriculture plus résiliente. L'approche du Maroc vise à récolter le triple avantage de s'adapter au changement climatique tout en diminuant son impact, et de créer de nouvelles opportunités.

C'est dans cette perspective, le Royaume a lancé le Plan Maroc Vert (PMV), ou stratégie verte en 2008 et ce, pour rendre l'agriculture le principal moteur de croissance de l'économie nationale dans les 15 à 20 prochaines années, et pour faire face aussi à la menace du changement climatique. Cette stratégie agricole a pour objectif d'accélérer la croissance, de réduire la pauvreté, d'assurer la durabilité à long terme du secteur et de consolider son intégration aux marchés national et international et ce à travers la mise en valeur de l'ensemble du potentiel agricole territorial et la transformation du secteur de l'agriculture, d'un système traditionnel et vivrier en un système plus moderne (figure 2).

Il s'agit d'une triple victoire, puisqu'il s'agit à la fois d'adapter le pays à la réalité du changement climatique et de prendre des mesures pour réduire son impact sur sa population et son environnement, tout en créant des opportunités telles que l'aide aux agriculteurs pour qu'ils

adoptent des techniques intelligentes face au climat et augmentent leur productivité, et la mise en place de meilleurs liens avec les marchés pour leurs produits. Le PMV concernera 1,5 million d'agriculteurs aussi bien dans la grande que la petite agriculture. Il est structuré en deux piliers: l'un pour l'agriculture intensive (pilier I) et l'autre pour l'agriculture vivrière (pilier II).

Agriculture solidaire inclusive	✓ Réalisation des projets agricoles solidaires inclusifs intégrant les mesures d'adaptation au changement climatique (Mobilisation annuelle d'environ 2 Milliards dh).
Programmes d'économie d'eau d'irrigation	✓ Sécurisation des ressources hydriques : <ul style="list-style-type: none"> • Une économie d'eau de 1,4 milliard de m³/an par la réalisation du programme de reconversion de 550.000 ha irriguées en goutte à goutte ; • Octroi aux agriculteurs de subvention à l'irrigation par goutte à goutte à hauteur de 100% pour les petits agriculteurs ayant moins de 5 Ha ; • Réalisation d'un programme d'irrigation additionnelle de 160.000 Ha, qui portera la superficie totale irriguée au Maroc à 1,6 million Ha.
Subventions dans le cadre du FDA	✓ Mesures incitatives au titre du Fonds de Développement Agricole : équipements en Irrigation localisée, semences, vitroplants et plants certifiés
Recherche agronomique	✓ Valorisation des acquis de la recherche agronomique : cartes de vocation agricole, conservation et valorisation des ressources phylogénétiques, semences certifiées, gestion et conservation de l'eau et du sol...

Figure 2 : Principales mesures du PMV pour l'adaptation au changement climatique

4.4 Future stratégie nationale

Pour franchir un nouveau palier dans son développement, le secteur agricole s'est doté d'une nouvelle stratégie « Génération Green 2020-2030 » (figure. 3). Lancée en février 2020, elle repose sur deux fondements, à savoir « la priorité à l'élément humain » et « la pérennité du développement agricole » et implique une multitude d'intervenants.

Dans le cadre de son 2^{ème} fondement, et « la pérennité du développement agricole » cette stratégie vise à développer 4 axes dont la promotion d'une agriculture résiliente et éco-efficente et ce à travers notamment le renforcement de l'efficacité hydrique et la conservation des sols.



Figure 3: Les deux fondements de la nouvelle stratégie nationale du secteur agricole « Génération Green 2020-2030 »

L'objectif étant d'investir, à l'horizon 2030, dans l'efficacité hydrique et énergétique afin de préserver les ressources naturelles et de créer de nouvelles activités génératrices de revenus et d'emploi, les principales actions à mettre en œuvre dans le cadre de cet axe consistent en ce qui suit :

- Poursuite des programmes de mobilisation et d'économie d'eau
- Promotion des énergies renouvelables (solaires et biomasse)
- Diffusion des techniques de conservation des sols

5. Carbone organique du sol (COS)

5.1 le sol est un réservoir terrestre du COS

À l'échelle mondiale, la quantité de C stockée dans le sol n'est dépassée que par celle de l'océan (38 400 Gt). Alors que le réservoir de carbone biotique terrestre représente ~560 Gt du COS, le réservoir de carbone du sol représente plus de quatre fois ce chiffre. La capacité du réservoir de C organique des sols mondiaux a été estimée de diverses manières pour les principaux biomes. Par exemple, environ 2344 Gt de C organique sont stockées dans les trois premiers mètres du sol, 54% ou 1500 Gt de C organique (figure. 4) étant stockées dans le premier mètre du sol et environ 615 Gt dans les 20 premiers cm [19], [20]. Cela contraste avec l'ajout de ~9 Gt de " nouveau " C libéré par l'homme qui est ajouté à l'atmosphère chaque année à partir de sources de C fossiles (charbon, pétrole et gaz) et par la dégradation des écosystèmes. Plusieurs points s'ensuivent rapidement. Par exemple, un changement de seulement 10% dans le réservoir de COS serait équivalent à 30 ans d'émissions anthropogéniques et pourrait affecter de manière spectaculaire les concentrations de CO₂ atmosphérique [21]. Par ailleurs, de légères augmentations des taux d'oxydation du carbone du sol en raison de l'augmentation des températures pourraient entraîner de nouvelles augmentations des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère [22].

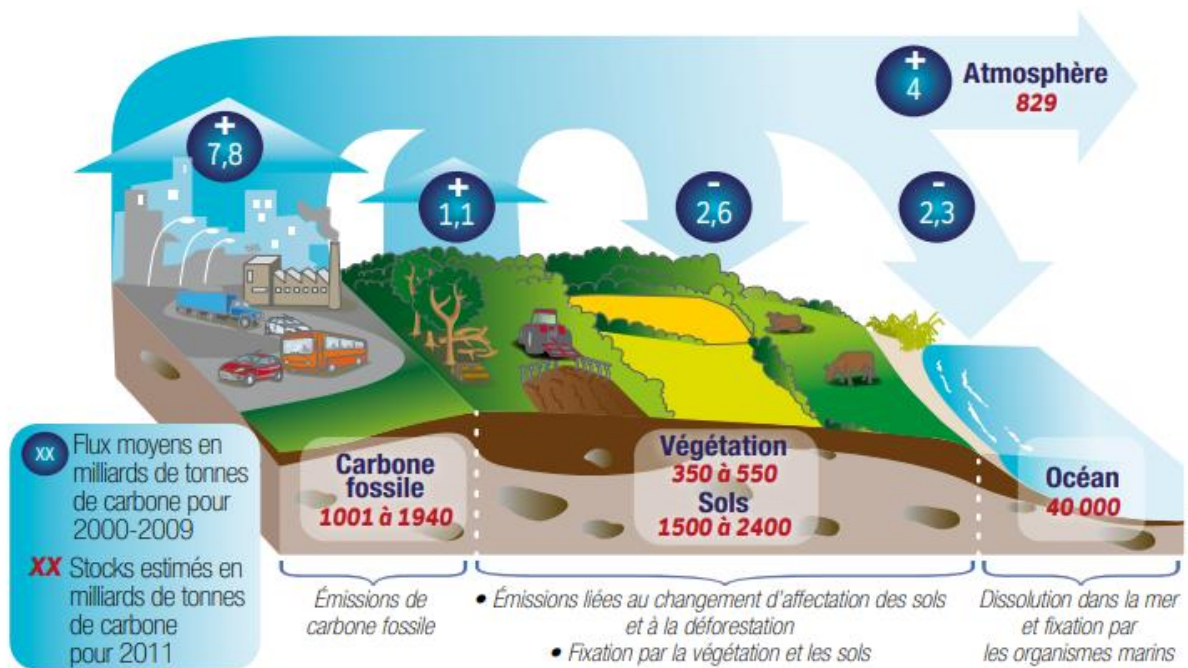


Figure 4 : Stocks et flux de carbone à l'échelle de la planète (Source ADEME, 2014)

En général, la production végétale et les modèles d'allocation de la biomasse influencent fortement les distributions relatives de C avec la profondeur du sol [19]. Plus le profil du sol est profond, plus le COS stocké est susceptible d'être ancien. Par exemple, Trumbore, (2009) a postulé que le C de faible densité et les acides phospholipidiques microbiens augmenteraient en âge avec la profondeur du sol. Fontaine *et al.* (2007) ont proposé une augmentation des temps de séjour moyens du COS allant jusqu'à 2000-10 000 ans pour les profondeurs supérieures à 20 cm. L'augmentation des temps de séjour moyens reflète une réduction de l'activité microbienne et du renouvellement du COS en profondeur. Ce modèle conceptuel est soutenu par les modèles de biomasse racinaire et de densité relative des racines qui diminuent également avec la profondeur du sol [19] et par l'augmentation des concentrations de complexes organo-minéraux avec la profondeur [24].

5.2 COS: Un élément de la matière organique du sol (MOS)

La matière organique du sol (MOS) décrit les constituants organiques du sol à différents états de décomposition, comme les tissus provenant de végétaux ou d'animaux morts, d'une taille de moins de 2 mm, et organismes du sol. La MOS joue un rôle critique dans la stabilisation de la structure du sol, la rétention et la libération de nutriments pour les végétaux et le maintien de la capacité de rétention des sols. Elle est ainsi un indicateur clé de la productivité agricole, mais aussi de la résilience environnementale. Le renouvellement de la MOS influence le fonctionnement des écosystèmes et le réchauffement climatique. La décomposition de la MOS libère des nutriments minéraux. Ces derniers deviennent disponibles et permettent ainsi la croissance des végétaux (Wal et Boer, 2017). Une meilleure croissance des végétaux et une plus grande productivité contribuent ainsi à assurer la sécurité alimentaire. Différents réservoirs de MOS peuvent être identifiés en fonction du temps nécessaire à sa pleine décomposition et au temps de permanence de ses produits dans le sol (temps de renouvellement) [26] :

Le réservoir actif - renouvellement en quelques mois ou quelques années;

Le réservoir passif - renouvellement pouvant atteindre le millier d'années

Une longue période pour le renouvellement des composés du sol ne peut pas seulement s'expliquer par la présence de conditions d'anaérobie, comme dans les tourbières. Elle peut aussi être due à l'incorporation d'éléments de la MOS au sein d'agrégats reliant la matière organique aux surfaces minérales protectrices, à la déconnection spatiale entre la MOS et les décomposeurs et les propriétés biochimiques intrinsèques de la MOS. Les micro agrégats sont considérés comme responsables de la stabilisation des réservoirs passifs (agents stabilisateurs permanents), alors que les macro agrégats et les mottes de terre entourant les petits agrégats (Degens, 1997) sont considérés comme des agents stabilisateurs transitoires (Tisdall et Oades, 1982; Dexter, 1988). La stabilisation physique et chimique de la MOS empêche, à différents

degrés, la décomposition microbienne (du fait d'une mobilité restreinte et de l'accès des microbes à la matière organique), ainsi que la diffusion de l'eau, des enzymes et du dioxygène. La stabilisation nécessite une grande diversité d'enzymes microbiennes pour dégrader les macromolécules insolubles que peut comporter la MOS (Van der Wal et de Boer, 2017). La MOS comporte environ 55 à 60 pour cent de C en masse. Dans de nombreux sols, ce C comprend la majeure partie ou le stock entier de C (désigné comme COS) sauf lorsque des formes inorganiques de C du sol surviennent (FAO et ITPS, 2015). Similaire à la MOS, le COS est divisé en plusieurs réservoirs en fonction de sa stabilité physique et chimique (FAO et ITPS, 2015; O'Rourke et al., 2015).

La MOS comporte environ 55 à 60 pour cent de C en masse. Dans de nombreux sols, ce C comprend la majeure partie ou le stock entier de C (désigné comme COS) sauf lorsque des formes inorganiques de C du sol surviennent (FAO et ITPS, 2015). Similaire à la MOS, le COS est divisé en plusieurs réservoirs en fonction de sa stabilité physique et chimique (FAO et ITPS, 2015; O'Rourke et al., 2015):

- **Le réservoir rapide** (aussi réservoir labile ou actif) : Après addition de carbone organique frais dans le sol, la biomasse initiale est décomposée au bout de 1 à 2 ans.
- **Le réservoir intermédiaire** : Comprend le carbone organique partiellement stabilisé sur des surfaces minérales et/ou protégé au sein d'agrégats après transformation par les microbes. Le temps de renouvellement est de l'ordre de 10 à 100 ans.
- **Le réservoir lent** (réservoir stable ou réfractaire) : COS hautement stabilisé. Le renouvellement très lent (de 100 à plus de 1 000 ans)

5.3 Dynamique du carbone organique des sols et processus de stabilisation

Si le changement de COS, à un instant t , représente le bilan entre les entrées et les sorties de COS, la quantité correspondante de COS stockée et la durée de ce stockage dépendent de divers processus de stabilisation du COS, entrant dans son cycle biogéochimique dans les sols.

5.3.1 Cycle biogéochimique du carbone organique

Le cycle de COS correspond à l'entrée de carbone organique dans le sol, à sa transformation et à sa dissipation. De nombreux processus sont en jeu : i) la déposition (i.e. addition de COS à la fraction organique du sol), ii) l'altération (i.e. la conversion du COS d'une structure chimique en une autre différente, résultant d'attaques enzymatiques ou de réactions chimiques), iii) l'assimilation (i.e. incorporation du COS dans les tissus des organismes décomposeurs) et enfin iv) la minéralisation qui correspond à la conversion du COS en CO_2 , via la respiration des organismes du sol [27]. La somme de ces processus aboutit à la notion de décomposition du COS [27]. La figure. 5 retrace ce cycle tel qu'il a été validé en milieu « naturel » et agricole.

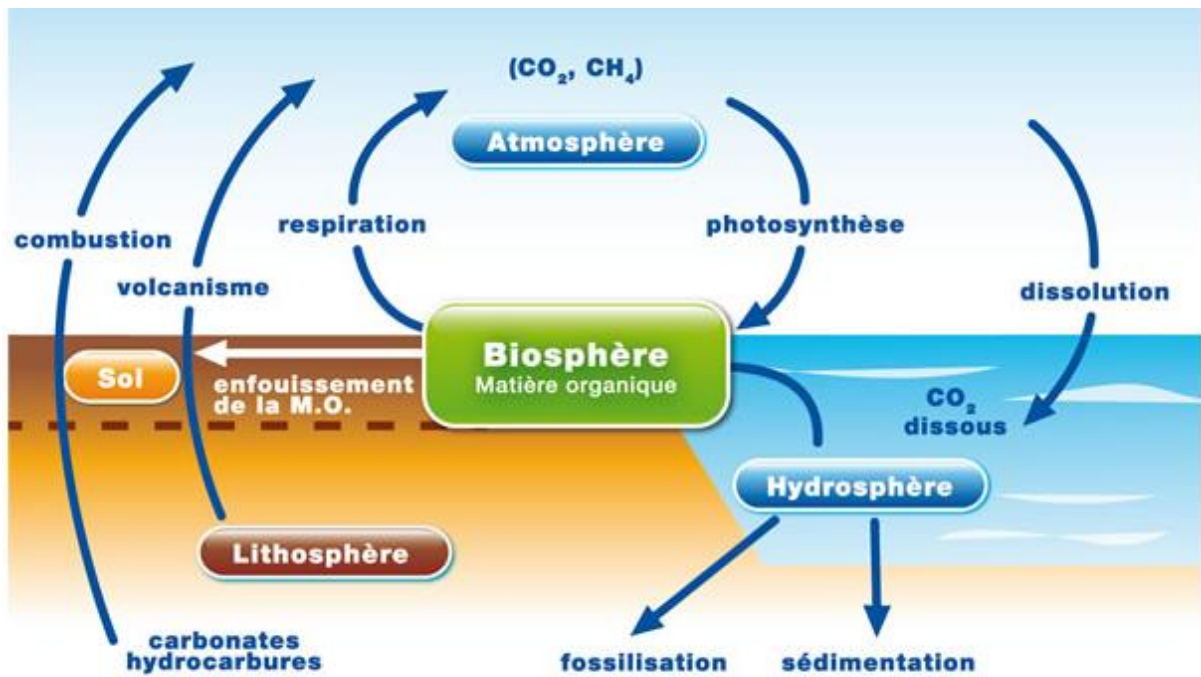


Figure 5: Cycle du carbone du sol

5.4 La séquestration du COS

La séquestration du COS est le processus de transfert du carbone atmosphérique vers le sol à travers les plantes, les résidus végétaux et d'autres solides organiques, qui sont stockés ou retenus en tant que partie de la matière organique du sol (humus) (Olson et al., 2010). A partir du CO₂, la séquestration du COS comporte trois étapes: 1) prélèvement de CO₂ dans l'atmosphère via la photosynthèse des végétaux, 2) transfert de carbone du CO₂ en biomasse végétale et 3) transfert du carbone de la biomasse végétale vers le sol dans lequel il est stocké sous forme de COS dans le réservoir le plus instable. La durée de rétention du carbone séquestré dans le sol (réservoir terrestre) peut aller d'un stockage à court terme (pas immédiatement libéré dans l'atmosphère) à un stockage à long terme (millénaires). Le processus de séquestration du COS devrait augmenter le stockage net du C organique du sol pendant et à la fin d'une étude

pour dépasser les niveaux de base antérieurs au traitement et entraîner une réduction nette des niveaux de CO₂ dans l'atmosphère.

Le carbone nouvellement ajouté peut être stabilisé dans le sol au moyen d'un certain nombre de mécanismes [29]. Physiquement, le C peut être stabilisé par isolation à l'intérieur des micro et macro agrégats du sol d'où il est inaccessible aux organismes du sol. Chimiquement, le C peut être fortement fixé aux argiles par liaisons chimiques, ce qui empêche la consommation de carbone par les organismes. Biochimiquement, le carbone peut être re-synthétisé en des structures moléculaires complexes qui peuvent freiner la décomposition. Ces trois mécanismes dépendent d'un certain nombre de facteurs biotiques, abiotiques et associés à la gestion, qui déterminent l'efficacité de la stabilisation du carbone du sol [30], [31].

5.5 Stockage de carbone organique : influence des facteurs naturels

5.5.1 Climat

Les conditions climatiques, à savoir la température et les précipitations, sont des facteurs clés du stockage du COS à l'échelle mondiale, affectant à la fois l'apport de C dans le sol et la décomposition du COS. Les précipitations déterminent la productivité primaire nette (PPN) dans de nombreux environnements terrestres (limités en eau) et donc l'apport de C dans le sol. De plus, les conditions humides favorisent la formation de COS stabilisant les surfaces minérales par une altération intensifiée du matériau parent [32], [33], et provoquent souvent une acidification du sol conduisant à une décomposition réduite de la MOS [34]. Dans la plupart des cas, lorsque les précipitations augmentent, la croissance des plantes augmente également. L'augmentation de la croissance des plantes tend à conduire à des quantités plus importantes de C stocké [35]. La température affecte largement la décomposition microbienne de la MOS, car ses attributs moléculaires complexes ont une sensibilité intrinsèque élevée à la température [36], [37]. Bien que cette relation soit régie par de multiples contraintes, de

nombreuses études ont indiqué une diminution du COS avec l'augmentation de la température (Sleutel *et al.*, 2007; Koven *et al.*, 2017). Une forte conviction empirique véhicule l'idée que l'augmentation des températures stimulera la perte nette de carbone du sol vers l'atmosphère, conduisant à une rétroaction carbone terrestre-climat positive qui pourrait accélérer le changement climatique (figure.6) [40]. En raison de ces influences combinées, les stocks de COS sont généralement les plus élevés dans des conditions fraîches et humides et diminuent dans des climats plus chauds et plus secs à l'échelle mondiale. En outre, les précipitations sont identifiées comme un facteur principal qui affecte l'apport de C organique dans le sol (Gabarrón-Galeote *et al.*, 2015).

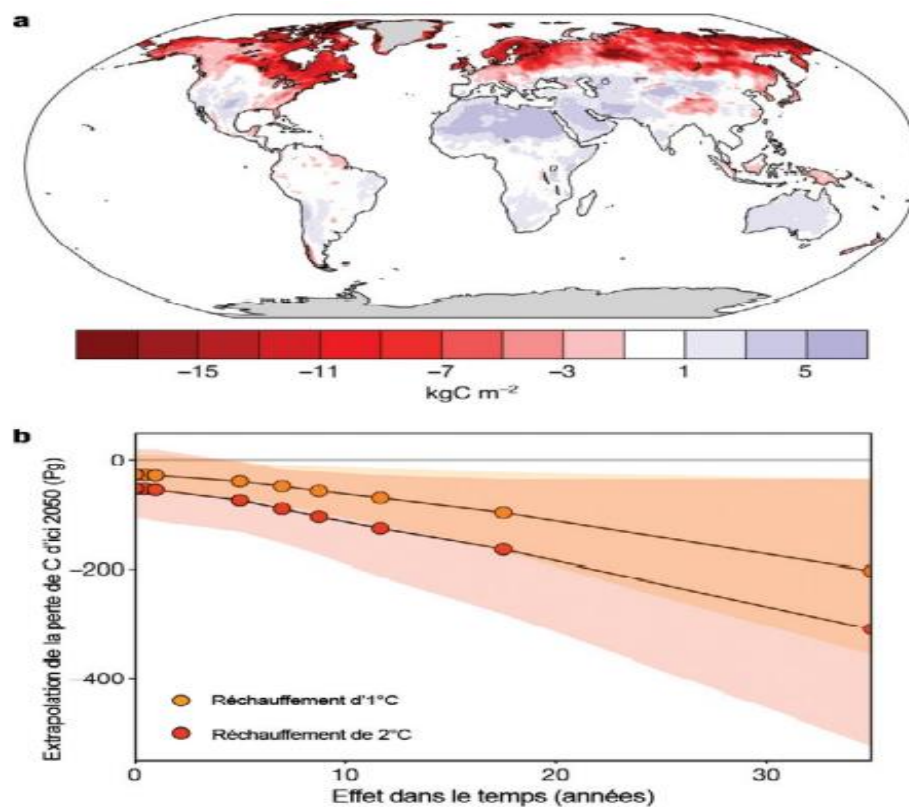


Figure 6: Extrapolation spatiale de la vulnérabilité des stocks de COS en fonction de la température [40]

La modification des régimes de précipitations aura un impact important sur la fonction et la structure des écosystèmes terrestres, car l'eau est un élément moteur de pratiquement tous les processus chimiques et biologiques, notamment la croissance et la survie des plantes, la

photosynthèse, l'activité microbienne et la respiration du sol [42]. Plusieurs études ont rapporté des relations plus fortes entre le COS et la température qu'avec les précipitations [43], [44]. Ainsi, ces relations entre les facteurs climatiques et le stockage du COS ne sont pas toujours faciles à déchiffrer. Pour concilier ces rapports contradictoires, il a été suggéré que l'importance relative de la température ou des précipitations sur le stockage du COS dépend des principaux facteurs limitant la production et le renouvellement du COS dans la région étudiée [45]. Dans les environnements arides ou semi-arides, la disponibilité de l'eau limite la PPN, de sorte que le système, et donc le stockage du COS, est limité en termes d'intrants (Hobley *et al.*, 2016). En revanche, dans les régions où la disponibilité en eau est suffisante mais où les températures sont plus froides, l'activité microbienne est limitée dans une plus large mesure que la PPN [36], de sorte que le système et le stockage de COS est limité en sortie. Ces modèles entraînent une accumulation de COS dans les zones suivantes zones plus froides et humides, un stockage modéré du COS dans les régions plus chaudes et humides et un stockage plus faible du COS dans les régions plus sèches. et un stockage de COS plus faible dans les régions plus sèches et plus chaudes.

5.5.2 Propriétés du sol

5.5.2.1 Texture du sol

Les composants texturaux du sol (sable, limon et argile) ont des propriétés physiques et chimiques qui interagissent avec le COS et influencent la rétention de la matière organique [47]. La texture du sol influence aussi plusieurs caractéristiques du microenvironnement du sol. Les processus médiés par les microorganismes du sol, tels que la décomposition de la litière et le renouvellement de la MOS, répondent de façon spectaculaire aux changements du microenvironnement du sol [29], [48]. De nombreuses études ont rapporté que la teneur en argile est positivement corrélée à la teneur en COS. Les argiles, en particulier, ont des propriétés qui ont une influence sur l'accumulation et la rétention du carbone dans le sol. La

figure. 7 montre les mécanismes de protection du C du sol par l'association de minéraux argileux. Plus la teneur en argile augmente, plus la surface du sol et le potentiel d'accumulation du COS augmentent.

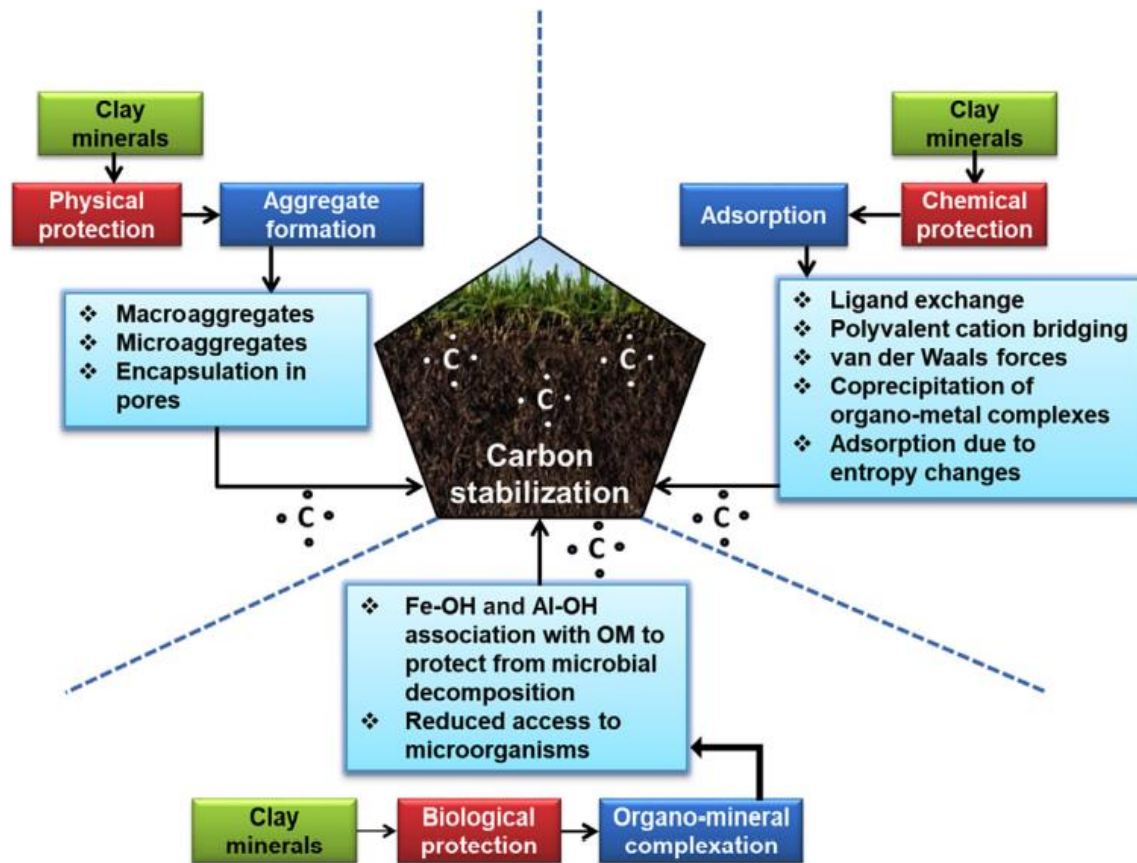


Figure 7: Mécanismes de protection du C du sol par l'association de minéraux argileux

5.5.2.2 pH du sol

Il est bien connu que le pH du sol affecte la décomposition de la MOS en influençant l'activité microbienne [49], [50] et les processus d'hydrolyse et de protonation. En particulier, la protonation régule de nombreux processus du sol, y compris la solubilisation et la complexation, qui affectent la stabilité de la MOS, en contrôlant la sorption et l'absorption de C organique sur les surfaces minérales [51]. La figure. 8 montre les variations du pH du sol dans le monde. Malgré son importance avérée en tant que facteur influençant la transformation

de la MOS [52], la prévision de l'effet du pH sur la dynamique de la MOS nécessite une meilleure compréhension mécaniste et une description des processus.

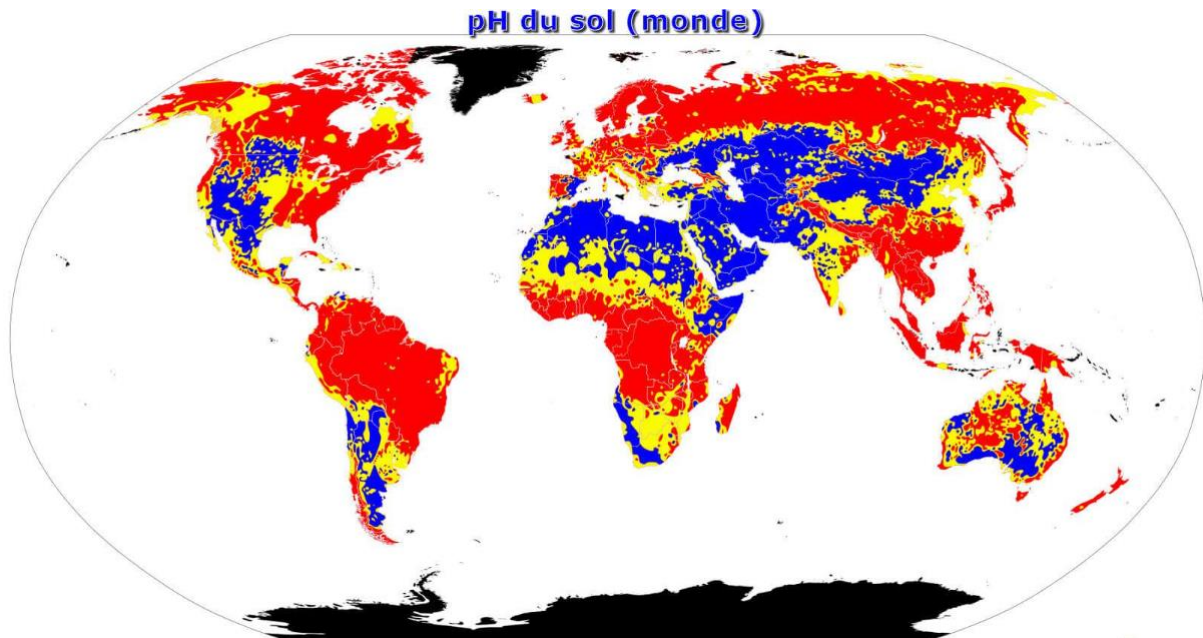


Figure 8: Les variations mondiales du pH du sol vont du sol acide (rouge), au sol neutre (jaune) puis au sol alcalin (basique, bleu). Les zones noires restent sans données.

5.5.3 Mode d'occupation des sols

Le stock du COS est également différent en fonction des modes d'occupation des sols, en lien avec des modes de gestion différents. Par exemple, en France, les sols agricoles, et notamment les vergers et les vignes, ont le plus faible SCOS ($3,5-5,0 \text{ kgC.m}^{-2}$; figure. 9), du fait des pratiques culturales perturbant les sols (e.g., moissons, labour). Au contraire, les prairies et forêts montrent un SCOS plus élevé ($8,0 \text{ kgC.m}^{-2}$). Ainsi, la conversion d'un sol forestier en sol agricole induit généralement une perte de C dans les sols [53].

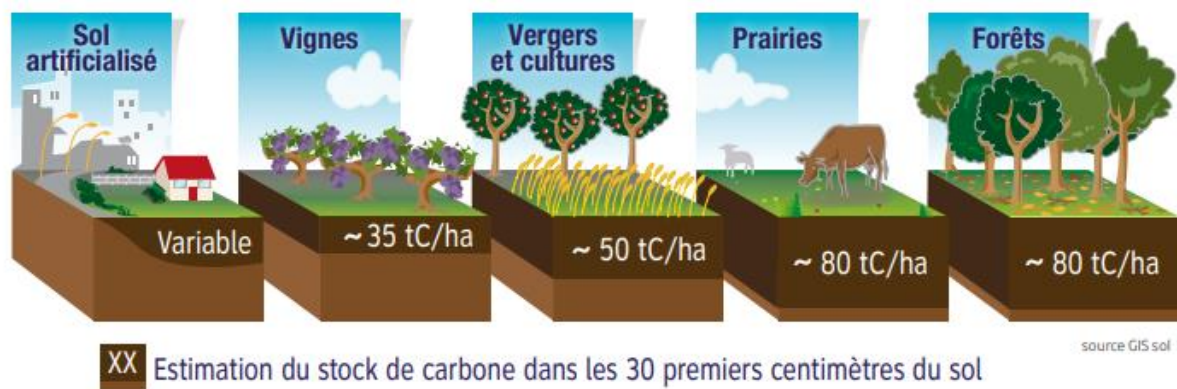


Figure 9: Stock de carbone organique estimé pour différents modes d'occupation des sols (source : ADEME, 2014)

5.6 Stockage de carbone organique : influence des pratiques de gestion agricoles

Les pratiques de gestion agricoles peuvent soit augmenter soit diminuer le COS. Le fait de laisser les résidus de culture à la surface du sol, le non-travail du sol, l'utilisation de cultures de couverture ou d'autres pratiques qui ajoutent de la matière organique et influencent sur la respiration du sol et la minéralisation du COS.

5.6.1 Méthodes de travail du sol

Le but principal du travail du sol est de perturber physiquement les couches supérieures du sol afin de préparer le lit du sol, d'incorporer les engrais, les résidus de culture et de lutter contre les mauvaises herbes. Les méthodes de travail du sol dans le monde varient en fonction du sol, du climat, de la gestion des cultures et de la disponibilité de la technologie. La relation entre le travail du sol, la structure du sol et la dynamique de la matière organique du sol est essentielle pour la capacité de séquestration du C des sols agricoles (figure. 10). Les effets du travail du sol sur la dynamique du C dans le sol sont complexes et souvent variables [54]. Les réductions mondiales du COS naturel dues à la culture par l'homme sont évidentes, et on estime qu'elles entraînent une perte de 60 % (régions tempérées) à 75 % (régions temporelles) du COS d'origine [55]. Les pratiques conventionnelles de travail du sol ont conduit à une diminution du carbone du sol de 30 à 50% au niveau mondial [56] à seulement 20% [57].

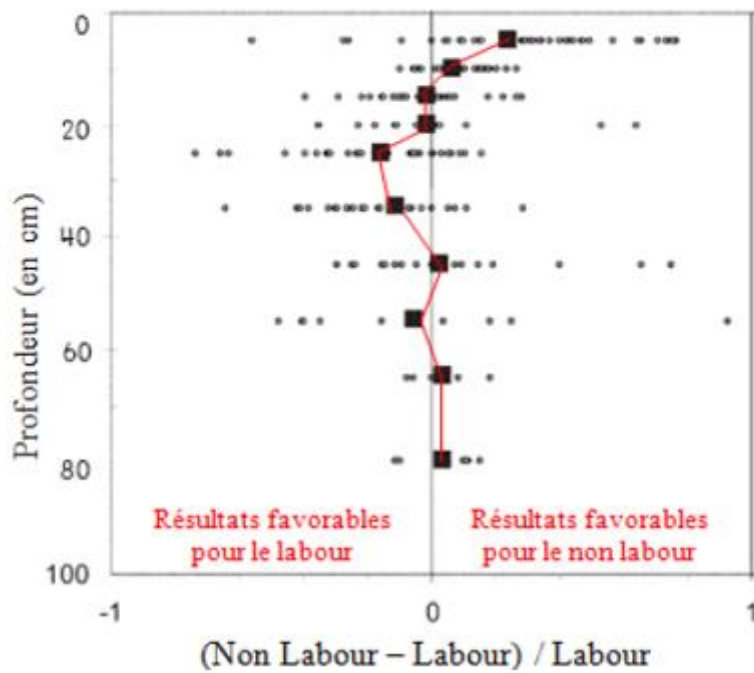


Figure 10: Changement relatif de la teneur en C organique du sol sans labour (NL) par rapport au labour (L) en fonction de la profondeur du sol [58]

Le travail du sol et les systèmes de culture peuvent influencer l'activité microbienne, qui affecte finalement la dynamique et la stabilité du COS et la minéralisation du sol peut être diminuée en réduisant ou en éliminant le travail du sol et en augmentant l'intensité des cultures et l'efficacité de la production végétale. En cas de non-travail du sol, la litière s'accumule à la surface du sol, ce qui réduit l'évaporation du sol, car les résidus de surface et les chaumes sur pied diminuent la vitesse du vent à la surface du sol, ce qui se traduit par un échange moins turbulent d'eau et de chaleur [59], [60]. La réduction de la température du sol par l'utilisation de paillis de surface et de pratiques de SD est importante pour maintenir les stocks de matière organique du sol, en

particulier dans les sols tropicaux [61]. Le tableau 1 détaille l'étendu de l'adoption du non-labour dans le monde [62].

Tableau 1: Étendue de l'adoption du non-labour dans le monde (pays avec > 100 000 ha)[62]

Pays	Superficie sous le système non-labour (ha) 2008-2009
Etats- unis	26,500,000
Brésil	25,502,000
Argentine	19,719,000
Canada	13,481,000
Australie	17,000,000
Paraguay	2,400,000
Chine	1,330,000
Kazakhstan	1,200,000
Bolivie	706,000
Uruguay	655,100
Espagne	650,000
Afrique du Sud	368,000
Venezuela	300,000
France	200,000
Finlande	200,000
Chili	180,000
Nouvelle-Zélande	162,000
Colombie	102,000
Ukraine	100,000
Total	110,755,10

5.6.2 Gestion des engrais

Les engrais chimiques sont une source d'émission de GES, notamment de N₂O. En outre, la production et le transport des engrais sont également associés aux émissions de GES. L'utilisation judicieuse d'engrais augmente le rendement et la rentabilité des cultures, et environ

50 Pg de CO₂ ont été ajoutés à l'atmosphère par les sols cultivés [63], par le biais du processus de minéralisation du carbone organique du sol (COS). L'utilisation d'engrais a considérablement augmenté la productivité agricole, mais des études révèlent que l'utilisation chronique de la fertilisation azotée diminue l'activité microbienne du sol [64]–[66]. L'utilisation continue d'engrais équilibrés est nécessaire pour assurer la fertilité durable des sols et la productivité des cultures [67]. Cependant, les effets ultimes de la fertilisation azotée continue sur les sols sont compliqués et restent peu clairs. L'utilisation appropriée d'engrais en fonction de l'état du sol peut contribuer à la séquestration maximale du carbone, à la production maximale de cultures et à la réduction des émissions de différents gaz à effet de serre [68].

5.6.3 *Gestion des résidus des cultures*

Les résidus de culture sont des parties végétatives détachées des plantes cultivées qui sont intentionnellement laissées à l'abandon dans les champs agricoles après la récolte. Dans le monde, la production annuelle de résidus de culture est d'environ $3,4 \times 10^9$ tonnes, et si 15 % de ces résidus totaux sont appliqués au sol, cela peut augmenter la teneur en carbone du sol, car, par exemple, une tonne de résidus de céréales contient 12-20 kg de N, 1-4 kg de P, 7-30 kg de K, 4-8 kg de Ca et 2-4 kg de Mg. Le paillage est une végétation détachée, qui comprend de la paille de blé, du compost, ou peut-être des feuilles de plastique, qui sont étalées autour des plantes pour les protéger de l'évaporation excessive et du stress dû au froid et, de la même manière, pour favoriser la teneur en MOS du sol. La gestion des résidus de culture contribue à maintenir la teneur en eau du sol en protégeant la surface du sol et en augmentant l'efficacité de l'irrigation (figure. 11). Elle fournit de la nourriture aux micro-organismes du sol en apportant de la matière organique supplémentaire au sol. En outre, les résidus de culture offrent de multiples services écosystémiques à l'environnement lorsqu'ils sont conservés dans le champ après la récolte. Les résidus de culture, en tant que ressources naturelles, contribuent à développer la stabilité et à maintenir la fertilité des sols [69]. Un système de culture basé sur un

paillage à SD augmente la matière organique du sol, en raison de l'augmentation des apports de carbone et de la diminution de la perturbation du sol.

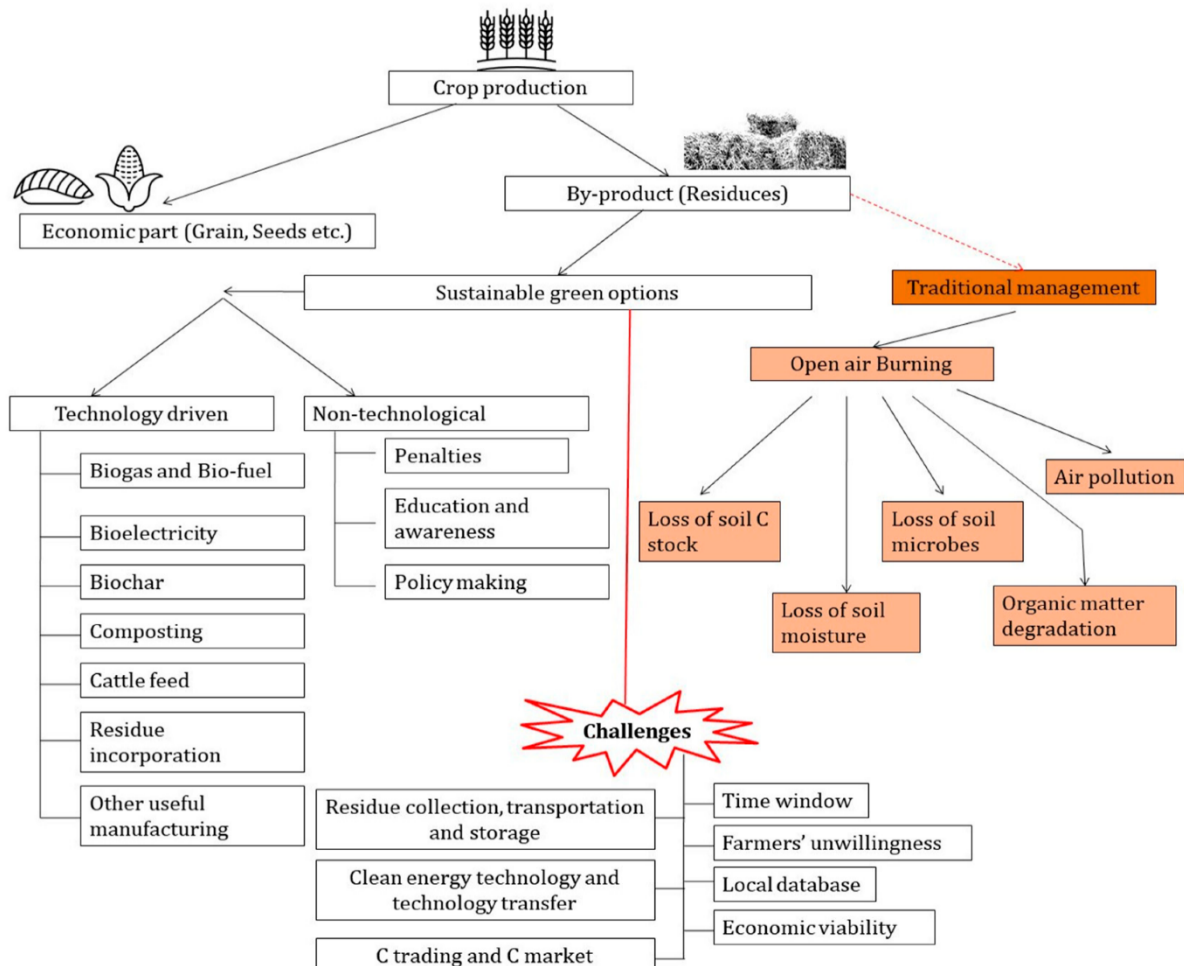


Figure 11: Aperçu schématique et stratégies pour une gestion efficace des résidus de culture

5.6.4 Les cultures de couverture

Les cultures de couverture sont cultivées pour le bénéfice du sol plutôt que pour le rendement des cultures. Les cultures de couverture améliorent la qualité du sol en augmentant le COS par le biais de la biomasse, en améliorant les agrégats et la stabilité du sol, et en protégeant le sol contre le ruissellement de surface (figure. 12). Des études révèlent que l'adoption de cultures de couverture est une mesure efficace pour atténuer le changement climatique [70]. Selon Olson

et al. (2010), l'utilisation de cultures de couverture dans des rotations intensives de cultures en ligne avec différents traitements du travail du sol a permis de séquestrer le COS.

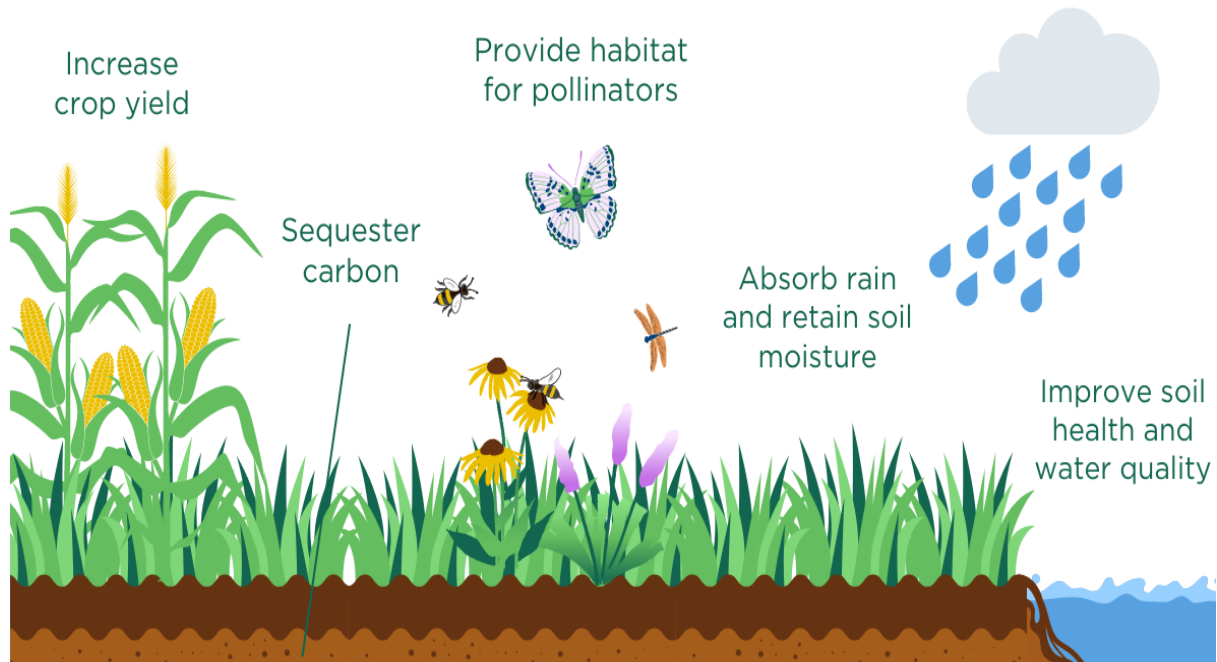


Figure 12: Avantages des cultures de couverture sur l'environnement (source : service de conservation des ressources naturelles en EESI)

5.6.5 Application de fumier et de compost

Le fumier animal est constitué d'excréments d'animaux collectés dans les fermes d'élevage et les basses-cours et est utilisé pour enrichir le sol, tandis que le compost est un matériau constitué en grande partie de matières organiques décomposées et est utilisé pour fertiliser et conditionner les sols agricoles. L'application de fumier est importante pour le maintien de la santé du sol [71], [72] et constitue une source de C, et son application à différentes cultures a des effets importants sur les teneurs en C [73]. Par rapport à l'application des engrais azotés seulement, l'application de fumier en conjugaison avec les engrais azotés a augmenté la séquestration de C dans les système de culture [74]. Le compostage augmente non seulement la production primaire nette mais aussi la teneur en carbone du sol [75]. Il a été signalé que la diminution de

l'application de fumier et d'engrais organiques influence non seulement les composés organiques stables mais aussi les microorganismes du sol et les régimes nutritifs [76], [77].

5.6.6 *Rotation des cultures*

La rotation des cultures désigne la séquence de cultures pratiquées en succession régulière sur la même surface de terre. Les cultures successives peuvent durer deux ans ou plus. Les différences entre les rotations de cultures, les climats, les sols et les différentes pratiques de gestion liées aux cultures ont également une incidence sur le piégeage du C. Différentes cultures de légumineuses, telles que les pois, les lentilles, la luzerne, le pois chiche, le sesbania, etc. peuvent servir de sources de substitution pour l'azote. Les rotations de cultures, en particulier l'utilisation de cultures de couverture à base de légumineuses, qui contiennent des composés carbonés probablement plus résistants au métabolisme microbien, peuvent rendre le carbone du sol plus stable [78]. La figure. 13 définit la rotation des culture comme une bonne pratique d'adaptation et d'atténuation du changement climatique ainsi pour une production alimentaire améliorée.

La sélection de rotations de cultures appropriées en fonction des conditions du sol et de l'environnement peut être utile pour la séquestration du carbone, ce qui non seulement améliore la fertilité du sol mais réduit également les émissions de CO₂ dans l'atmosphère et augmente le revenu des agriculteurs [79].

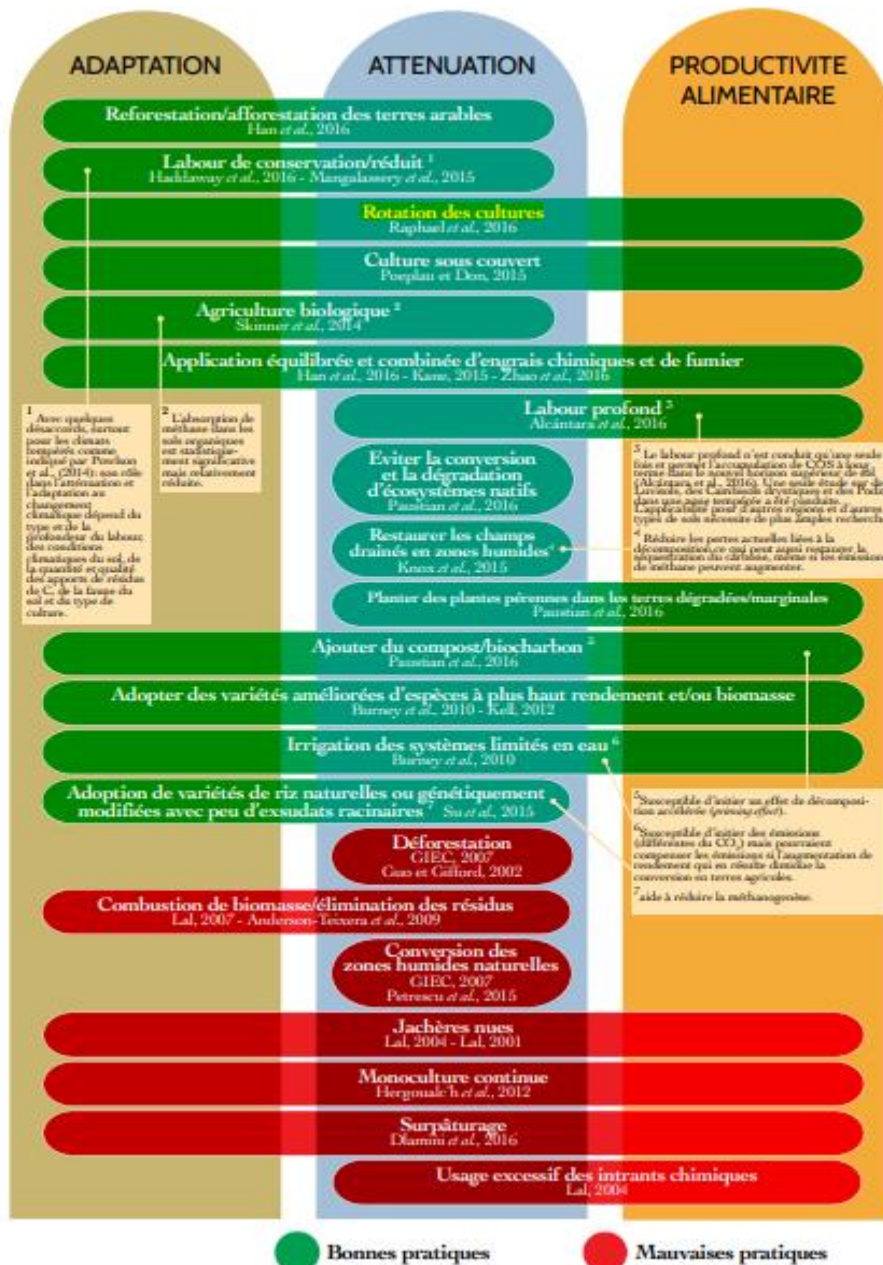


Figure 13: Stratégies de gestion suggérées et déconseillées pour la séquestration du carbone du sol et leur impact sur la productivité alimentaire, l'adaptation et l'atténuation du changement climatique [80]

6. Modélisation du changement du carbone organique du sol

La modélisation est une approche utilisée pour déduire les stocks et les distributions de COS dans des conditions où ils n'ont pas été mesurés, par exemple : (1) dans des conditions climatiques futures, (2) à des endroits ou pour des types de sol ou des régions où aucune mesure n'existe, (3) pour des scénarios de gestion agricoles qui n'ont pas encore été testés, par exemple

l'utilisation de nouvelles mode de labour, des changements dans le taux de fertilisation azoté ou organique ou le régime des résidus de culture. L'impossibilité de mesurer directement les stocks de COS peut avoir diverses causes, telles qu'un accès difficile à des points d'échantillonnage représentatifs, le manque d'équipement ou le fait que le nombre d'échantillons nécessaires pour couvrir de manière représentative une certaine zone d'intérêt dépasse les moyens disponibles. Par ailleurs, l'information obtenue par des mesures directes n'est pas toujours suffisante pour répondre à toutes les questions pertinentes liées au stock et à la dynamique du COS.

Au cours des dernières décennies, des modèles numériques ont été développés, notamment des représentations mathématiques qui décrivent quantitativement les caractéristiques et les processus du sol. L'ampleur de ces approches peut être illustrée par la compilation récente de 90 modèles mathématiques décrivant les changements de COS et les processus biogéochimiques du sol développés au cours des 80 dernières années. Cependant, selon leur structure, le nombre de variables d'entrée requises et la résolution temporelle et spatiale, tous les modèles du C disponibles ne conviennent pas à toutes les études. De plus, en raison du biais dans les études précédentes vers des écosystèmes particuliers, il existe des lacunes notables dans notre compréhension. Par exemple, actuellement, la plupart des efforts de modélisation se sont concentrés sur les forêts et les terres cultivées, tandis que les prairies ont reçu moins d'attention.

6.1 Modélisation du COS dans les terres agricoles

Alors que l'agriculture a un grand potentiel d'atténuation des gaz à effet de serre par la séquestration du C, la quantification des changements de stock de COS de l'échelle régionale à l'échelle nationale s'est avérée être peu étudiée. À cette fin, les modèles biogéochimiques sont des outils très utiles pour trouver les facteurs de changement de la distribution du COS. Il y a

un certain nombre de raisons à cela. Le cycle du carbone est très complexe et réparti dans de nombreux bassins, ce qui rend très difficile la mesure expérimentale de tous les composants à des échelles temporelles et spatiales. Par exemple, il est extrêmement difficile de mesurer les changements dans les stocks de COS en raison de la grande variabilité spatiale

Les modèles de dynamique du COS dans les terres agricoles, développés et testés par les scientifiques, sont utilisés par les spécialistes de la vulgarisation et les consultants pour formuler des recommandations pratiques en faveur de pratiques agricoles intelligentes sur le plan climatique. Les spécialistes de la vulgarisation utilisent des modèles pour prévoir les changements à long terme du COS pour des exploitations spécifiques et communiquent ces informations aux agriculteurs, en termes de meilleures pratiques pour la gestion des terres agricoles. Les consultants et les conseillers du secteur public appliquent une approche similaire, utilisant des modèles pour évaluer la durabilité de la gestion de ces terres à différentes échelles afin de faciliter la prise de décision dans les secteurs public et privé. Les décideurs souhaitent identifier les options des meilleures gestions qui offrent un équilibre optimal entre le piégeage du carbone, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et les effets plus généraux sur la santé écologique, la résilience et la productivité.

Les modèles doivent être utilisés lorsque l'objectif est d'estimer ou d'extrapoler les variations des stocks de carbone dans ou à des conditions dans lesquelles elles n'ont pas été mesurées, par ex. type de sol, conditions climatiques et gestion des pratiques agricoles. En outre, une fois que les modèles sont correctement validés, ils peuvent être utilisés pour étudier l'effet des facteurs environnementaux sur les stocks du COS. Plusieurs modèles d'écosystèmes basés sur les processus ont été envisagés depuis les années 1900.

6.2 Modèles fréquemment utilisés

Les modèles de simulation du COS les plus répandus sont fonctionnels (bien que classés comme mécanistes par certains auteurs), processus orientés et déterministes, car ils représentent une solution de compromis entre leur relative simplicité et leur robustesse pour expliquer le fonctionnement des processus les plus importants du système. Plusieurs chercheurs ont entrepris une revue quantitative pour évaluer l'utilisation des modèles COS dans la littérature scientifique de 1930 à 2015, en enregistrant le nombre de citations de plus de 70 modèles nommés. Leur analyse suggère qu'un sous-ensemble relativement restreint de modèles connus du COS, illustrés à la figure. 14, domine les simulations du COS dans la littérature scientifique. En outre, les cinq modèles les plus cités sont CENTURY [11], [81] , ROTH-C [10], [82] , DNDC (Li *et al.*, 1992; Li *et al.*, 1994), EPIC (Williams *et al.*, 1984), and DSSAT [85] représentent 61 % du total des citations. D'autres modèles peuvent être largement utilisés avec succès dans certains environnements spécifiques ou pour la simulation de certains processus particuliers, mais leur diffusion est relativement limitée. Dans cette thèse on a choisi d'utiliser le modèle DNDC (Denitrification- decomposition). Une littérature pertinente sur le modèle DNDC, ses six sous modèles et ses entrées a été présentée dans le chapitre II.

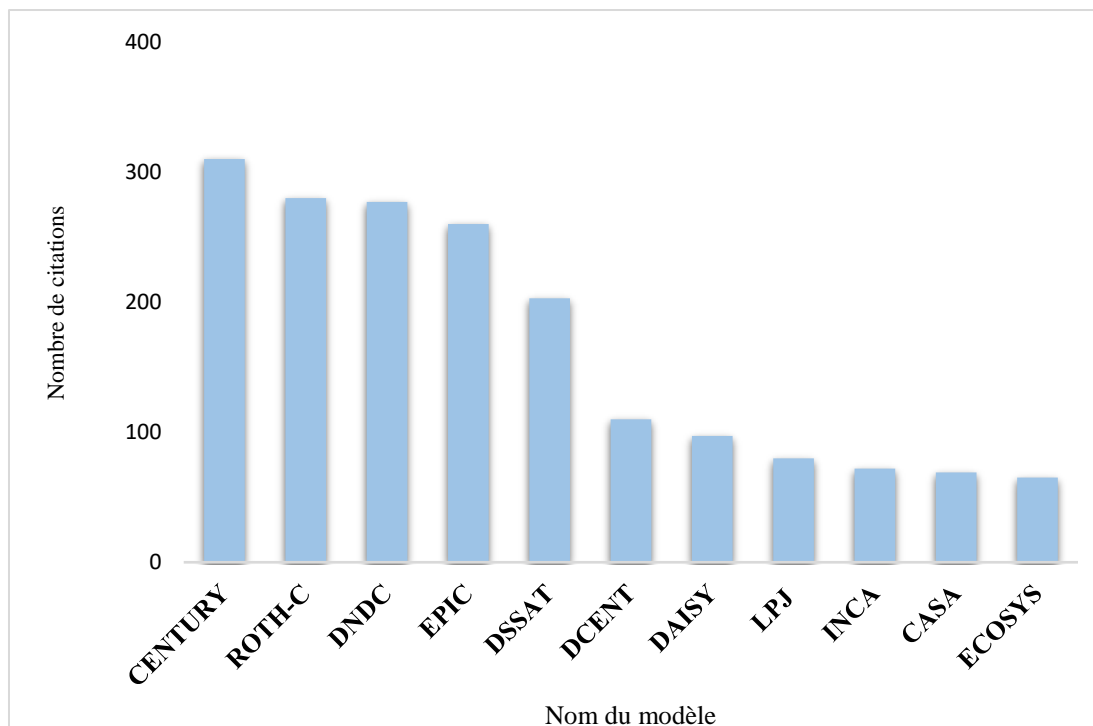


Figure 14 : Nombre total de citations pour différents modèles de COS dans la littérature Web of Science (pour les modèles nommés avec plus de 50 citations)(Redessiné de Campbell et Paustian. (2015))

6.3 Choix du modèle

En pratique, lors du choix d'un modèle de carbone du sol à utiliser dans un système de surveillance du carbone du sol basé sur un modèle, il est généralement nécessaire de faire un compromis entre la complexité du modèle de carbone du sol et la disponibilité des données d'entrée. Lorsque les données d'entrée requises par les modèles complexes ne sont pas disponibles, il peut être nécessaire d'utiliser un modèle plus simple. En outre, le modèle simple doit tenir compte de l'hétérogénéité des conditions dans la région d'application de manière adéquate et être capable de décrire les effets des facteurs les plus importants affectant le C. Ce n'est qu'à cette condition que les résultats du système de surveillance de la teneur en carbone des sols basé sur un modèle seront fiables et que le système sera en mesure de saisir la variabilité fondamentale des bassins de carbone des sols et les principales tendances de changement dans les bassins de carbone. Une étape importante dans l'application d'un système de surveillance du

carbone dans le sol basé sur un modèle est l'évaluation de la fiabilité des résultats. Les informations sur la fiabilité peuvent être obtenues en comparant les résultats du système avec les données mesurées.

6.4 Validation des résultats

La validation d'un modèle est le processus qui consiste à déterminer le degré auquel un modèle de simulation est capable de représenter avec précision les conditions réel pour un ensemble d'applications du modèle. Ainsi, le terme validation est utilisé ici pour la comparaison de la sortie du modèle avec les mesures. Un modèle validé est un modèle qui génère des prédictions qui sont cohérentes avec les observations du monde, ou qui se situent dans des limites ou des erreurs acceptables [87]. La validation des modèles est un processus continu dans lequel le modèle est vérifié dans différentes conditions, avec des connaissances et des besoins nouvellement développés. Les chercheurs ont identifié les problèmes suivants à prendre en compte lors de la validation du modèle :

Finalité de la validation : il peut y avoir différentes finalités pour la validation du modèle. Il peut s'agir de l'évaluation de l'exactitude des estimations par rapport à la réalité, le degré de confiance que l'on peut avoir dans les résultats du modèle, ou le comportement du modèle dans des applications spécifiques (par exemple, comment le modèle réagit si l'on change les conditions de simulation). si nous changeons les conditions de la simulation).

Les prédictions des modèles : l'utilisation de modèles pour la prédiction implique une série de problèmes de validation, car les données nécessaires pour quantifier l'exactitude des estimations n'existent pas encore. Les prédictions deviennent de plus en plus incertaines au mesure que l'on considère un horizon temporel dans un avenir lointain. Néanmoins, les modèles prédictifs peuvent être validés s'ils expliquent des événements passés (validation ex-post) [88]. La

validation revêt une importance fondamentale dans la définition des limites et des conditions dans lesquelles le modèle peut être utilisé et des conditions dans lesquelles le modèle peut être appliqué de manière condensée.

Complexité du modèle: le niveau de complexité des modèles influe sur le type d'évaluation qui peut être effectué. Souvent, la comparaison du modèle avec les données mesurées ne s'applique qu'à certains résultats (par exemple, le rendement ou le COS). Cependant, lorsque la complexité du modèle est élevée et qu'il se compose de nombreux sous-modèles, chacun d'entre eux simulant une partie du processus, l'évaluation doit tenir compte de ces éléments et de chaque sous-modèle doit en tenir compte et les différents sous-modèles doivent être validés. L'autre façon de traiter ce problème est de donner aux modèles une pénalité pour chaque variable. La validation de tous les sous-modèles pourrait être très onéreuse et n'est pas recommandée.

Exactitude et qualité des données : l'exactitude des données est une exigence fondamentale de la modélisation. En effet, la confiance des résultats de simulation dépend non seulement de la précision avec laquelle les algorithmes du modèle sont capables de prédire le comportement du processus étudié, mais aussi de la qualité des données d'entrée et des données utilisées pour la validation des sorties. Les erreurs aléatoires proviennent l'échantillonnage des données, c'est-à-dire que les données peuvent ne pas représenter correctement la variabilité temporelle et spatiale, et la manipulation des échantillons. Les erreurs systématiques peuvent être dues à une validation incorrect des instruments utilisés pour collecter les données d'entrée, à un plan d'échantillonnage inadéquat (c'est-à-dire un manque de représentativité des données) ou à l'utilisation de données proximales. Tous ces facteurs doivent être pris en compte dans le processus de validation.

Robustesse des résultats du modèle : la capacité d'un modèle à conserver sa précision dans différentes conditions expérimentales

7. Conclusion

En guise de conclusion, on peut affirmer que la séquestration du carbone par les sols est lié à de nombreux enjeux environnementaux. Ce phénomène joue un rôle majeur dans la régulation du climat mais aussi dans la préservation de la qualité des eaux et de l'air, la préservation de la fertilité des sols et le maintien de la biodiversité, surtout dans les régions semi-arides, tout particulièrement via la préservation, voire l'accroissement des stocks de matières organiques. La mise en œuvre des réseaux d'observation est limitée par leur coût et leur durée. Ainsi, pour l'évaluation des politiques affectant la gestion des sols et les stocks de carbone, le recours à la modélisation est nécessaire pour compléter et extrapoler les mesures directes. La bonne compréhension et la présentation de la situation actuelle du carbone dans les sols va constituer une base solide pour la constitution d'un plan de recherche adéquat ainsi que la mise en œuvre de scénarios alternatives de séquestration du carbone.

Chapitre II :Site d'étude et présentation du modèle DNDC

1. Introduction

Notre recherche a été réalisée auprès d'un site situé dans une région semi-aride au Maroc. Ce site est caractérisé par une base de données complète. Le présent chapitre montre les principales caractéristiques du site d'étude ainsi qu'un aperçu général sur le modèle choisi pour cette étude, son développement, ses paramètres d'entrées et de sorties, ainsi que ses avantages et inconvénients.

2. Présentation de site d'étude

L'expérimentation est localisée dans la station expérimentale de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Merchouch. Elle est située sur le plateau central de la commune rurale de Merchouch, cercle de Rommani, province de Khemisset, à environ 60 km au sud-est de Rabat et 18 km au nord-ouest de Rommani (figure. 15). Les coordonnées géographiques de ce site sont les suivantes : altitude : 425 ; longitude : 6°42' ouest ; latitude : 33°34' nord. Les précipitations et températures moyennes annuelles sont respectivement de 450 mm et 23°C. La figure. 16 montre les séries chronologiques mensuelles de précipitations et de températures moyennes au cours des années simulées (2008-2016). Selon WRB, (2006) , le site expérimental est classé Vertisol. Selon l'analyse de granulométrie effectuée au laboratoire de l'INRA (voir annexe A) : le sol est riche en argile (>50% d'argile). Par ailleurs, le sol est caractérisé par une faible teneur en COS (12,2 g/kg de sol), un pH basique (tableau 2), et une faible capacité de drainage. La caractérisation du sol du site étudié a été effectuée par analyse au laboratoire de l'INRA (tableau. 2) (Voir annexes A,B,C,D, et E).

Tableau 2: Caractéristiques du sol de la station de Merchouch

Profondeur (cm)	Argile	Limon	Sable	pH	P ₂ O ₅	K ₂ O	Carbone	Azote
0-20	50.5	38	12.7	7.6	19.61	323	12.2	1.18
0-40	51.7	39.1	10.6	8.2	4.24	185	11.4	1.07
40-90	52.5	35.2	12.2	8.9	0.53	145	9.7	0.89

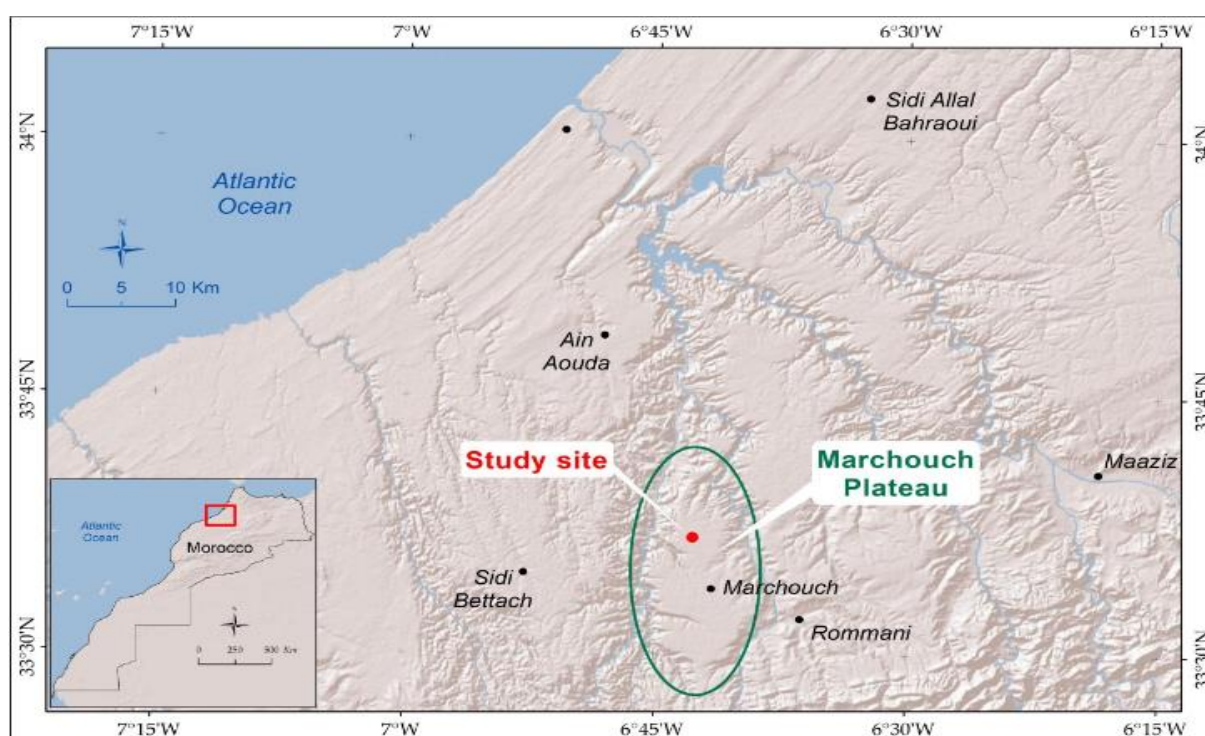


Figure 15 : Carte de l'emplacement du site d'étude

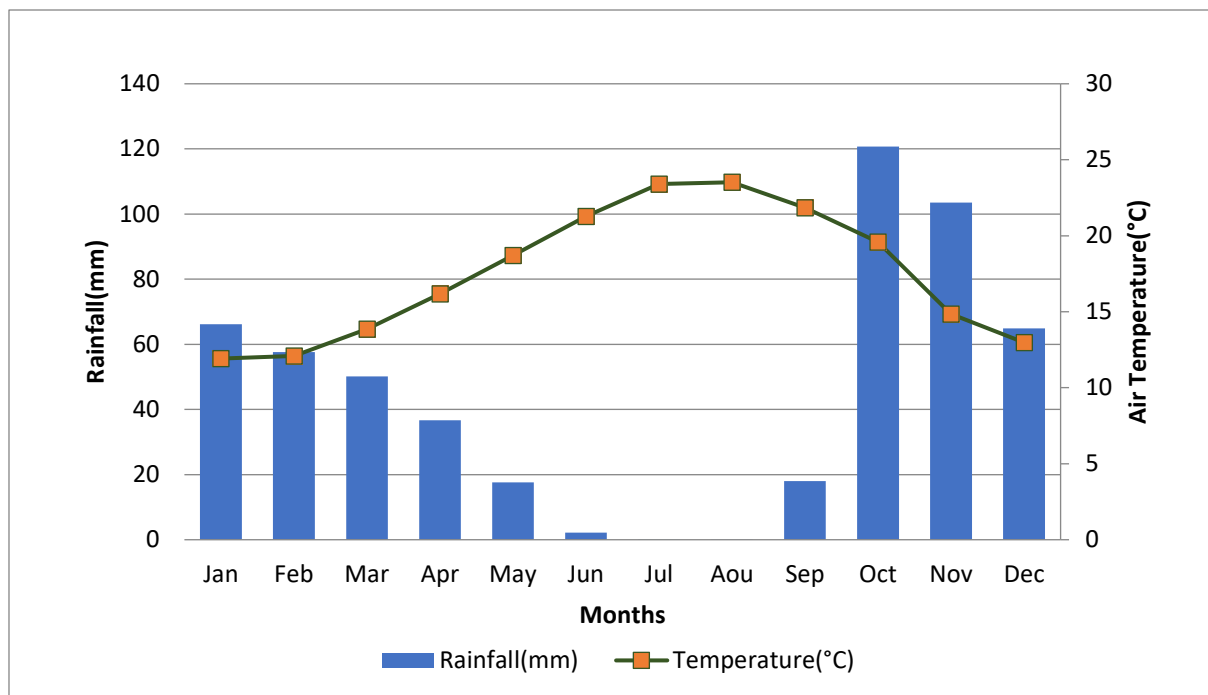


Figure 16 : Moyenne mensuelle des précipitations et des températures du 2008 au 2016 à la station Merchouch au Maroc

3. Montage expérimental du site

Cette expérimentation pilote est menée depuis 2004 sous deux pratiques de travail du sol sur 2 ha chacune. Le semis conventionnel (SC) consiste à labourer jusqu'à 30 cm de profondeur puis à procéder à un labour superficiel (10-15 cm) afin de préparer un lit de semence fin et d'enfourer les résidus végétaux. Contrairement au SC, le semis direct (SD) est une opération unique qui maintient une ouverture de 2-3 cm du sol avec un semoir spécial SD permettant de semer les graines à 5 cm de profondeur. La rotation blé d'hiver -légumineuses et la gestion des cultures étaient similaires dans les pratiques SC et SD. Les essais ont été installés mi-novembre pour le blé et mi-décembre pour la lentille avec des taux de semis respectifs de 140 et 40 kg ha⁻¹. Avant semis, le blé et la lentille ont reçu respectivement un taux de 150 et 100 kg ha⁻¹ d'un engrais complexe NPK 14-18-14 (14% N- 28% P₂O₅ -14% K₂O). Fin février, le blé a reçu 100 kg ha⁻¹ d'urée. Selon les pratiques agricoles conventionnelles de la région, tous les résidus de culture ont été retirés du champ après la récolte sous SC, tandis qu'environ 30 % des résidus de culture ont été maintenus à la surface sous la pratique SD.

4. Modèle DNDC

Le modèle DeNitrification-DeComposition (DNDC) a été initialement développé pour prédire les cycles biogéochimiques du carbone (C) et de l'azote (N) dans les agroécosystèmes (Li *et al.*, 1992; Li *et al.*, 1994). Il intègre les facteurs moteurs de l'environnement écologique (paramètres climatiques, propriétés du sol et pratiques agricoles) et vise à simuler le cycle du carbone et de l'azote dans l'écosystème terrestre. Le modèle se compose de six sous-modèles en interaction (figure. 17), décrivant la génération, la décomposition, la transformation de la matière organique et les sorties des composantes dynamiques du COS et des flux de gaz à effet de serre [90]. Les six sous-modèles comprennent : 1) une composante du climat du sol utilisant les propriétés physiques du sol, la température de l'air et les précipitations, des données pour calculer la température du sol, l'humidité, les profils de potentiel redox (Eh) et les flux d'eau du sol dans le temps ; 2) un composant de nitrification ; 3) un module de dénitrification, qui calcule les taux horaires de dénitrification, la production de N₂O, NO et N₂ ; 4) simulation de la dynamique du COS et de la production de CO₂ ; 5) un composant de croissance des plantes, qui calcule la respiration quotidienne des racines, l'eau, l'absorption d'azote par les plantes et la croissance des plantes ; et 6) un module de fermentation, qui calcule la production et l'oxydation quotidiennes de méthane (CH₄) [91]–[94].

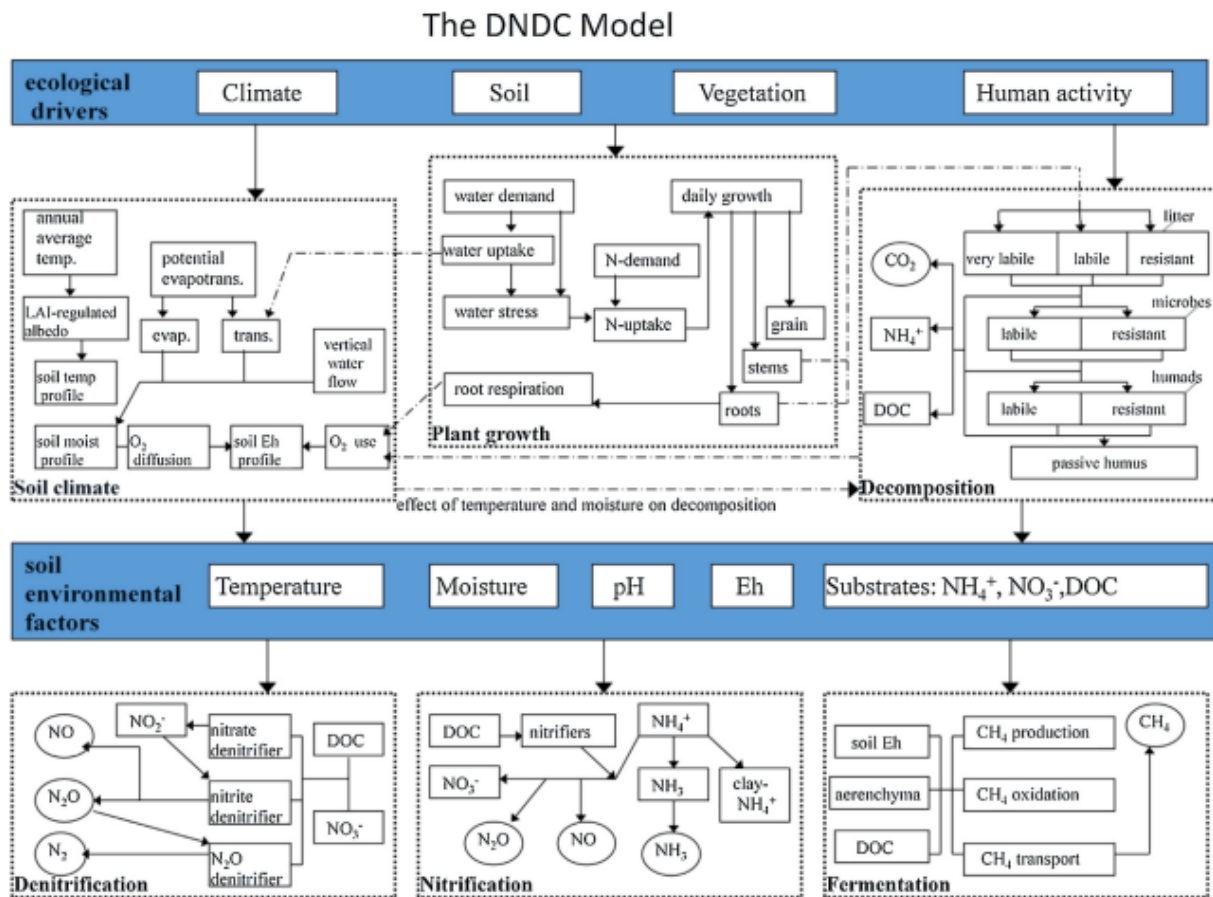


Figure 17 : Structure du modèle DNDC (adapté de [95])

Au cours des dernières années, le DNDC a été testé et utilisé par plusieurs chercheurs dans le monde (Chine, Italie, Allemagne, Canada, Royaume-Uni et États-Unis) pour simuler la température et l'humidité du sol, la dynamique du carbone du sol, la lixiviation d'azote et les émissions de gaz à effet de serre, dont le protoxyde d'azote (N₂O), le monoxyde d'azote (NO), le diazote (N₂), l'ammoniac (NH₃), le méthane (CH₄) et le dioxyde de carbone (CO₂), avec des résultats prometteurs [96]–[107]. Le modèle DNDC a été recommandé comme outil principal pour étudier les changements du COS dans la région Asie-Pacifique lors de la conférence internationale sur le changement global dans les zones Asie-Pacifique en 2000 (Qui et al., 2005). Les entrées requises pour le modèle DNDC comprennent des données sur les conditions météorologiques quotidiennes, les propriétés du sol, l'utilisation des terres et les pratiques de gestion agricole.

4.1 Développement du modèle DNDC

Depuis son développement initial, de nombreuses modifications ont été apportées au modèle DNDC par ses développeurs en réponse aux commentaires et aux demandes d'utilisateurs du monde entier visant à combler les lacunes dans les fonctions ou les régions. De nombreux travaux de collaboration ont été menés avec des groupes de recherche individuels pour développer des modèles spécifiques aux pays ou aux besoins. Plusieurs de ces modifications ont été incorporées dans les versions ultérieures du modèle DNDC. Ce changement continu de DNDC a entraîné une documentation limitée existant sur les différences entre les mises à jour successives du modèle DNDC et les différentes versions utilisées par les principaux groupes de recherche dans le monde. Pour cette raison, les utilisateurs ne connaissent pas les versions plus appropriées du modèle pour leurs besoins. Le développement successif de DNDC parallèlement au développement d'autres versions a été décrit en détails par Gilhespy *et al.* (2014). Un arbre généalogique schématique des versions du modèle illustre le développement de la version du modèle et comment les différentes versions de DNDC sont liées les unes aux autres (figure. 18).

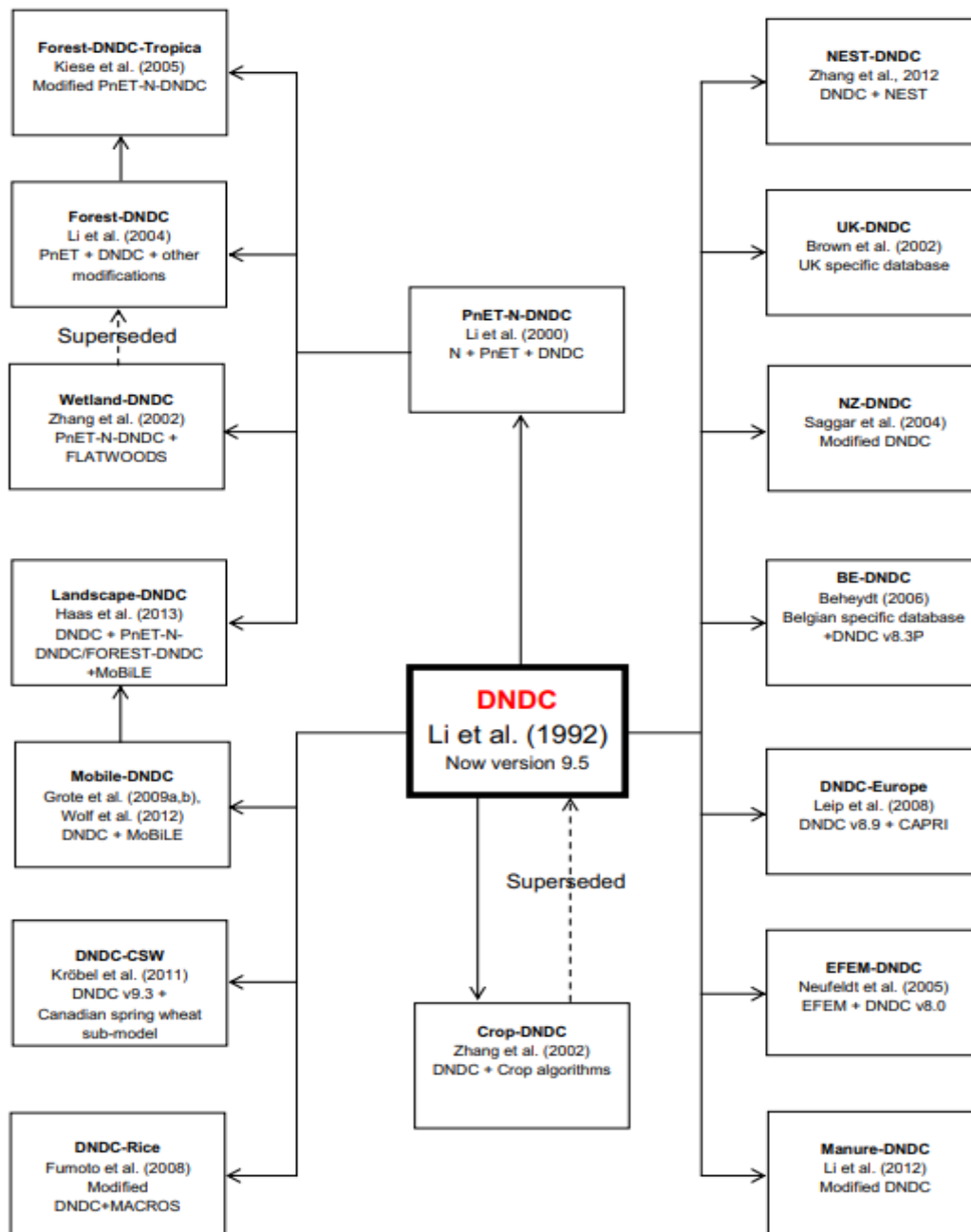


Figure 18 : diagramme schématique de la famille étendue du modèle DNDC (adopté de [108])

4.2 Le sous-modèle de dynamique du carbone dans DNDC

La teneur en carbone organique du sol (COS) est un indicateur crucial de la fertilité du sol. Dans le modèle DNDC, les résidus de carbone organique du sol dans l'agro-écosystème se divisent en 4 bassins principaux : résidus, microbe, humads et carbone passif (figure. 19). Chaque bassin a 2 ou 3 sous-bassins avec des taux de décomposition par défaut spécifiques, qui sont affectés

par la température du sol, l'humidité du sol, la texture du sol et la concentration du substrat, etc. Le COS est utilisé par les plantes et les micro-organismes et participe finalement au cycle C et N. L'accumulation de résidus de récolte, de fumier, de biochar et de résidus microbiens dans le sol constitue une source critique de réservoir de COS du sol. Selon leurs propriétés physiques et chimiques, les sources de carbone exogène sont attribuées à différents sous-bassins de COS avec des taux de décomposition par défaut. Le processus de décomposition est affecté par de nombreux facteurs, tels que les conditions climatique, la texture du sol, et les pratiques agricoles [109]. Le modèle DNDC peut simuler avec précision le COS et son changement dynamique sous des climats spécifiques ($R^2 = 0,96$) et peut également compléter l'estimation à long terme [110], [111].

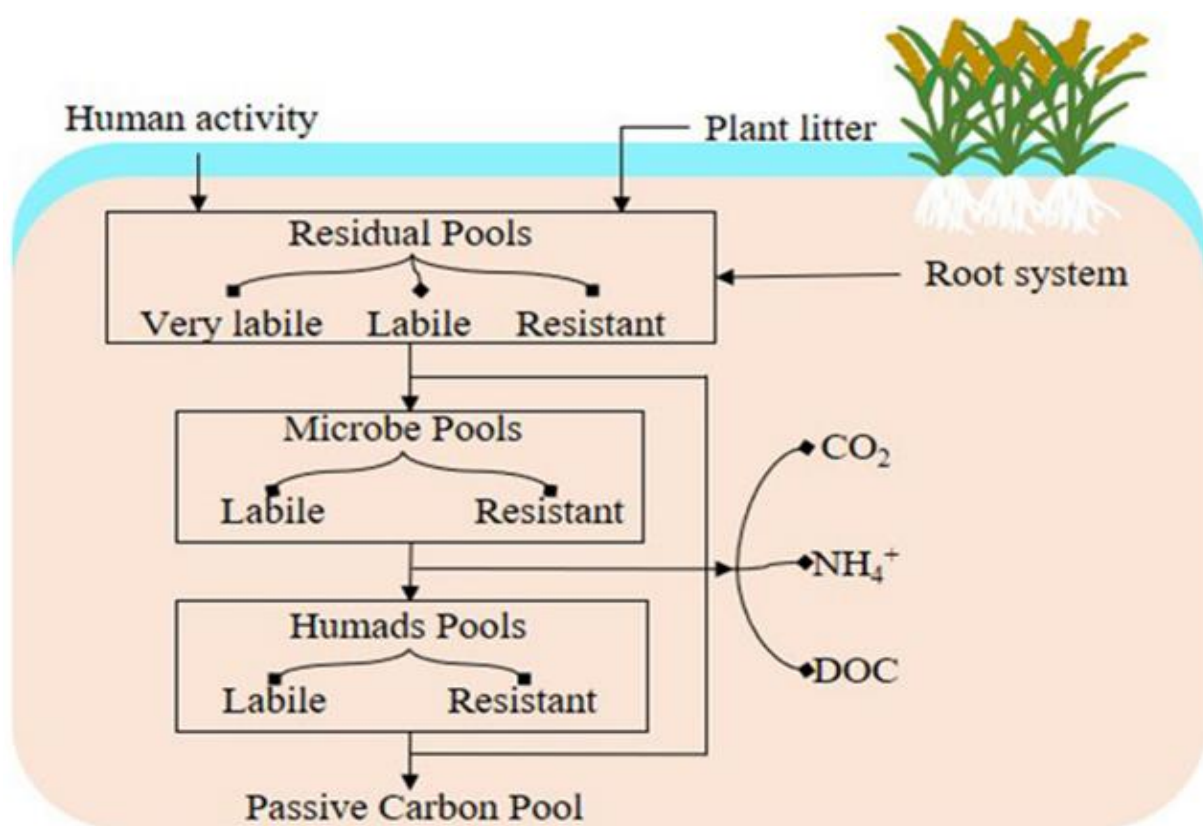


Figure 19 : Sous modèle du dynamique du carbone dans le modèle DNDC

4.3 Paramètres d'entrée

DNDC peut être exécuté en deux modes ; site ou régional. Les principaux paramètres d'entrée requis par la DNDC et donc les modèles basés sur la DNDC sont résumés dans le tableau 3. Les paramètres d'entrée obligatoires pour lesquels les valeurs par défaut ne sont pas fournies sont l'emplacement (latitude), les données météorologiques (moyennes quotidiennes des températures de l'air et précipitations), la densité apparente du sol, le pH et COS en surface (0–10 cm). La saisie de ces paramètres, ainsi que la sélection de l'utilisation des terres et du type de culture, de la texture du sol et des pratiques de gestion agricole, adaptés au mieux à la situation de modélisation, fourniront suffisamment de détails pour exécuter le modèle, bien qu'il existe de nombreux paramètres qui peuvent et doivent être définis par l'utilisateur. Lorsque la DNDC est utilisée pour les estimations régionales des émissions de gaz à l'état de traces, le modèle a besoin des données d'entrée différenciées spatialement et temporellement stockées dans des bases de données de type système d'information géographique (SIG) à l'avance.

Tableau 3: Principaux paramètres d'entrée requis par le DNDC

Catégorie d'entrée	Entrée
Emplacement et climat	Site; latitude; nombre total d'années simulées ; données météorologiques quotidiennes pour chaque année simulée (température de l'air (°C) et précipitations (cm), vitesse moyenne du vent (m/s), humidité (%), rayonnement solaire (les valeurs par défaut sont calculées en fonction de latitude)(MJ/m ² /jour)); Concentration de N dans les précipitations (mg N/l ou ppm)* ;Concentration de CO ₂ de fond atmosphérique (ppm)* ; Concentration de fond atmosphérique en NH ₃ (mg N/m ³)* ; Taux d'augmentation annuel de la concentration de CO ₂ atmosphérique (ppm/an)*.
Propriétés du sol	Type d'utilisation du sol* ; texture du sol* ; densité apparente (0-10 cm) (g/cm ³) ; pH du sol ; teneur en argile (0-1)* ; capacité de

	<p>champ (WFPS;0-1)* ; Point de flétrissement (WFPS ; 0-1)* ; Hydro-conductivité (m/h)* ; Porosité (0-1)* ; Débit de dérivation (0-1)* ; profondeur de la couche de rétention d'eau (m); COS à la surface du sol (0-10 cm) (kg C/kg) ; Profil du COS : redéfinir* ; Contenu COS (m); Taux de diminution du COS sous la couche arable (0,5-5) ; Répartition du COS (fraction et rapport C/N de la litière, des humads, de l'humus et de l'omble C)* ; concentration initiale de NO₃ à la surface du sol (mgN/Kg)* ; concentration initiale de NH⁴⁺ à la surface du sol (mgN/Kg ;)* ; Indice d'activité microbienne (0-1)* ; slop (%)*;Indice de salinité du sol (0-100)*; Utiliser les fonctions SCS et MUSLE (oui/non).</p>
Gestion Agricole	<p>Nombre total d'années ; Nombre de systèmes de culture appliqués pendant le total des années simulées ; Système de culture ; Durée de ce système de culture (années) ; Durée d'un cycle dans ce système de culture (ans) ; Année dans le cycle dans ce système de culture.</p>
Culture	<p>Type de culture (62 types par défaut)* ; Culture pérenne (oui/non); Rotation des cultures (nombre de cultures par an) ; Date de plantation et de récolte ; Fraction de feuilles et de tiges laissées dans le champ après la récolte (0-1)* ; Production maximale de biomasse (kg/C/ha/an)* ; Fraction de biomasse et rapport C/N du grain, de la feuille, de la tige et de la racine ; demande totale en N (kg N/ha/an)* ; Degrés-jours thermiques (°C)* ; Demande en eau (g eau/g matière sèche)* ; Indice de fixation de N (culture N/N du sol)* ; Indice de vascularisation des plantes des zones humides (0-1)* ; Température optimale pour la croissance des cultures (°C)*</p>
Labour	<p>Méthode de labour ; date et nombre d'applications de labour dans l'année ; numéro séquentiel de chaque demande.</p>
Fertilisation	<p>Type et méthode d'engrais; date et nombre d'applications dans l'année; profondeur; numéro séquentiel de chaque demande.</p>
Fumier	<p>Type, méthode et taux de fumier ; date et nombre d'applications dans l'année; profondeur; Rapport C/N du fumier*.</p>

Irrigation	Méthode et taux d'irrigation ; date et nombre d'applications dans l'année
Inondations	Méthode d'inondation ; date des applications dans l'année ; N reçu avec l'eau d'inondation (kg N/ha) ; taux de fuite d'eau (mm/jour).
Plastique	Méthode de plastique (deux options : serre ou paillis de film) ; nombre d'applications en serre ou en film paillis par an; date; % de couverture plastique.
Pâturage et tonte de l'herbe	Nombre de périodes de pâturage

*Valeurs par défaut fournies par le modèle DNDC. Les valeurs par défaut peuvent être modifiées par les utilisateurs du modèle.

4.4 Paramètres de sortie.

Les paramètres de sortie fournis par les exécutions du modèle DNDC comprennent des rapports quotidiens sur la météo, le climat du sol, les stocks/flux de C et N du sol, la croissance des cultures et la gestion des champs. En plus des rapports quotidiens, la DNDC produit un rapport annuel à la fin de chaque année simulée pour résumer la croissance/le rendement des cultures, les stocks/flux de C et N du sol et le bilan hydrique du site simulé. Lorsqu'une simulation pluriannuelle est effectuée, un fichier de résultats pluriannuel est produit par la DNDC permettant un examen en un coup d'œil des principaux stocks ou flux annuels au cours des années simulées. Les sorties des analyses régionales sont enregistrées en tant que données géographiquement explicites dans une base de données SIG.

4.5 Avantages

Selon une enquête que nous avons effectué en contactant plusieurs chercheurs qui ont déjà utilisé le modèle et selon notre expérience, l'une des forces de DNDC est qu'il est relativement facile à utiliser et qu'il possède une interface utilisateur attrayante. Une autre force identifiée est que DNDC dispose d'une bibliothèque complète de paramètres par défaut pour 62 cultures et 12 types de sols, permettant aux utilisateurs de modéliser un large éventail de sites et de

situations sans saisir de données. La majorité des paramètres de sortie sont rapportés sur un pas de temps quotidien, offrant aux utilisateurs une flexibilité considérable non seulement dans les situations modélisées, mais dans la sortie disponible pour l'évaluation.

4.6 Inconvénients

Il y a un besoin pour un manuel d'instructions plus détaillé avec une bonne description des processus derrière le modèle DNDC et des explications détaillées des paramètres d'entrée et de sortie. Le manque de validation sur le terrain et l'incertitude des paramètres du modèle sont des obstacles majeurs à leur applicabilité aux zones où les bases de données locales sont très rares.

4.7 Brève description d'autres modèles

4.7.1 *Le modèle DayCent*

Le modèle DayCent utilise un pas de temps quotidien, un profil de sol hétérogène et des sous-modèles pour la croissance et le développement des plantes régulés par des paramètres du sol et de l'environnement, notamment la température, l'eau du sol et la disponibilité des nutriments. Le transport de l'eau est conceptualisé en utilisant une approche combinée de l'eau en cascade qui lixivie l'eau jusqu'à la capacité du champ dans des conditions saturées et une approche de la loi de Darcy pour simuler l'écoulement non saturé. Le modèle estime potentielle ET en utilisant l'équation de Penman-Monteith. La décomposition du carbone du sol est conceptualisée en divisant le COS en trois bassins de sol (actif, lent et passif) et deux bassins de matière organique de surface (active et lent). Chaque bassin se décompose à un rythme différent, et le flux de C provenant des intrants de culture est suivi au fur et à mesure de sa décomposition, des résidus actifs au C passif du sol. Le modèle estime un renouvellement plus rapide du COS actif pour les sols à texture plus grossière et une stabilisation plus efficace du SOC actif en SOC stable avec un renouvellement plus lent pour les teneurs en argile plus élevées.

4.7.2 *Le modèle CENTURY*

Le modèle CENTURY est un modèle général du cycle des nutriments plante-sol qui a été utilisé pour simuler la dynamique du carbone et des nutriments pour différents types d'écosystèmes, notamment les prairies, les terres agricoles, les forêts et les savanes. CENTURY est composé d'un sous-modèle de matière organique/décomposition du sol, d'un modèle de bilan hydrique, d'un sous-modèle de prairies/cultures, d'un sous-modèle de production forestière et de fonctions de gestion et de planification d'événements. Il calcule le flux de carbone, d'azote, de phosphore et de soufre à travers les compartiments du modèle. La configuration minimale des éléments est C et N pour tous les compartiments du modèle. La structure de la MOS pour C, N, P et S est identique, les composants inorganiques sont calculés pour le composé inorganique spécifique.

4.7.3 *Le modèle DSSAT*

Le modèle DSSAT est un modèle dynamique mécaniste combiné au Crop System Model (CSM), à deux modèles de C & N du sol (le modèle de sol basé sur CERES et le modèle de sol basé sur CENTURY) et à un modèle de bilan hydrique du sol. Le module basé sur CENTURY a été intégré à DSSAT, en tant qu'option utilisateur, pour améliorer la simulation à long terme des processus de C& N du sol

4.7.4 *DAISY model*

Daisy est un modèle de simulation mécaniste des processus physiques et biologiques d'un champ agricole. Il retrace le devenir de l'eau, de l'énergie, du carbone, de l'azote et des pesticides, à la fois au-dessus et au-dessous du sol. Le modèle est capable de prédire la production, l'impact environnemental sous forme de lessivage et l'évolution de la qualité du sol (carbone) au fil du temps. Une autre utilisation courante est comme limite supérieure pour un modèle d'eau souterraine.

5. Conclusion

La description détaillée du modèle DNDC fournie par ce chapitre permet une bonne compréhension de ses sous modèles ainsi que ses entrées et ses sorties. Ceci va nous permettre de l'exécuter correctement et de le valider pour prédire les changements des stocks du COS sous différents scénarios afin de définir des scénarios de séquestration du C.

***Chapitre III : Evaluation de la performance du modèle
DNDC et modélisation de l'impact des pratiques
agricoles alternatives sur les stocks du carbone organique
du sol sous deux types de travail du sol dans une région
semi-aride au Maroc***

1. Introduction

Les stratégies d'amélioration du COS, suggérées par les pédologues du monde entier, impliquent généralement l'optimisation des pratiques de gestion alternatives par la modification des apports de C provenant des résidus de culture retournés à la surface sous forme de paillis, et/ou l'application d'engrais organiques, y compris le fumier et le compost. La gestion des résidus de culture est une composante importante du COS [112]. S'ils étaient retournés à la surface, les résidus de récolte constitueraient un apport direct de C et, par conséquent, rempliraient une double fonction, face au réchauffement climatique et à la sécurité alimentaire, en augmentant le potentiel de séquestration de C dans le sol, ainsi améliorer les rendements des cultures. Plusieurs études antérieures ont rapporté que l'amélioration des stocks de COS est généralement attendue lorsque les résidus de récolte retournés à la surface après la récolte sont augmentés [113], [114]. Au cours des dernières années, la gestion des résidus de culture au Maroc a considérablement changé en revenant jusqu'à 30% des résidus de culture sous le système SD. Cette approche est considérée comme l'une des pratiques les plus importantes qui améliore l'apport photosynthétique de C dans le sol, augmente les stocks de COS et séquestre considérablement le C de l'atmosphère [55], [115].

D'autre part, les apports d'engrais peuvent modifier la biodisponibilité relative du COS [116]. La productivité est généralement contrôlée par le niveau de nutriments du sol, en particulier la concentration en azote (N) [117]. Avant les années 1970, les engrais organiques, tels que le

fumier et le compost, étaient utilisés comme source principale de nutriments du sol au Maroc. Cependant, ces apports organiques ont été progressivement remplacés par engrais minéraux, afin d'assurer la sécurité alimentaire locale, menacée par l'augmentation rapide de la demande alimentaire due à l'augmentation constante de la population.

Dans ce chapitre, le modèle basé sur les processus, Dénitrification-Décomposition (DNDC), a été vérifié et validé du 2008 au 2016, et utilisé en fonction du climat local, du sol et des gestions agricoles adoptés dans la ligne de base (conditions actuelles), pour évaluer l'impact des pratiques agricoles alternatives sur les stocks de COS sous deux systèmes de travail du sol (SD et SC), dans une région semi-aride du Maroc.

2. Matériels et méthodes

2.1 Site d'étude

L'essai sur cette station a subi une pratique sous semis direct depuis 2004, sur la base d'une rotation blé-légumineuses utilisée par les agriculteurs de la région. L'essai a été installé dans le but d'observer l'impact à long terme du semis direct sur la qualité du sol et la production agricole. Il a été réalisé sur une parcelle de 4 ha. Les parcelles ont été différenciées avec deux modalités de travail du sol : SD et SC. Ce dispositif a fait l'objet de suivre l'effet du SD sur les caractéristiques principales du sol à savoir la stabilité structurale, la densité apparente et la matière organique. Plus d'informations sur le site d'étude, ses caractéristiques et son montage expérimental sont détaillés dans le chapitre II.

2.2 Préparation des données pour le modèle DNDC

Le collecte de données d'entrée appropriées pour exécuter le modèle DNDC sur un site de recherche est une tâche cruciale. Les données climatiques, les propriétés du sol et les pratiques de gestion agricole pour la zone d'étude ont été recueillies par plusieurs sources.

2.2.1 Données climatiques

Les données météorologiques de 2008 à 2016 pour le site d'étude ont été obtenues auprès de la Direction générale marocaine de la météorologie, notamment les précipitations quotidiennes et les températures maximales et minimales de l'air.

2.2.2 Données pédologiques

Les données du sol ont été recueillies par notre analyse au laboratoire (voir annexe B) et à partir de la base de données de l'Institut national de la recherche agronomique. Cette base de données contient de nombreuses informations sur le sol telles que les teneurs en COS, les valeurs du pH du sol, la densité apparente, les teneurs en argile.

2.2.3 Données des pratiques agricoles

L'ensemble de données sur les pratiques agricoles, y compris la méthode de travail du sol, les taux d'engrais azotés appliqués, les dates de plantation et de récolte et les taux de résidus de récolte retournés aux surfaces après la récolte, ont été collectés à partir de la base de données des pratiques agricoles de l'Institut National de la Recherche Agronomique. L'ensemble de données de culture pour la station Merchouch pour le blé d'hiver et les légumineuses, y compris les paramètres physiologiques et phénologiques (par exemple, les besoins en eau, les partitions de la biomasse, le rapport C/N, les degrés-jours thermiques cumulés et le rendement maximal) est essentiels pour l'exécution du DNDC.

2.3 Exécution du DNDC en mode site

Lorsque la procédure de saisie des données est terminée, nous pouvons exécuter le modèle sous le mode "Site". Pendant la simulation, sept fenêtres apparaissent à l'écran pour démontrer la dynamique quotidienne des conditions météorologiques simulées (figure. 20), le climat et la

chimie du sol, la croissance des cultures, les activités microbiennes du sol, les émissions de gaz et les profils C et N du sol .

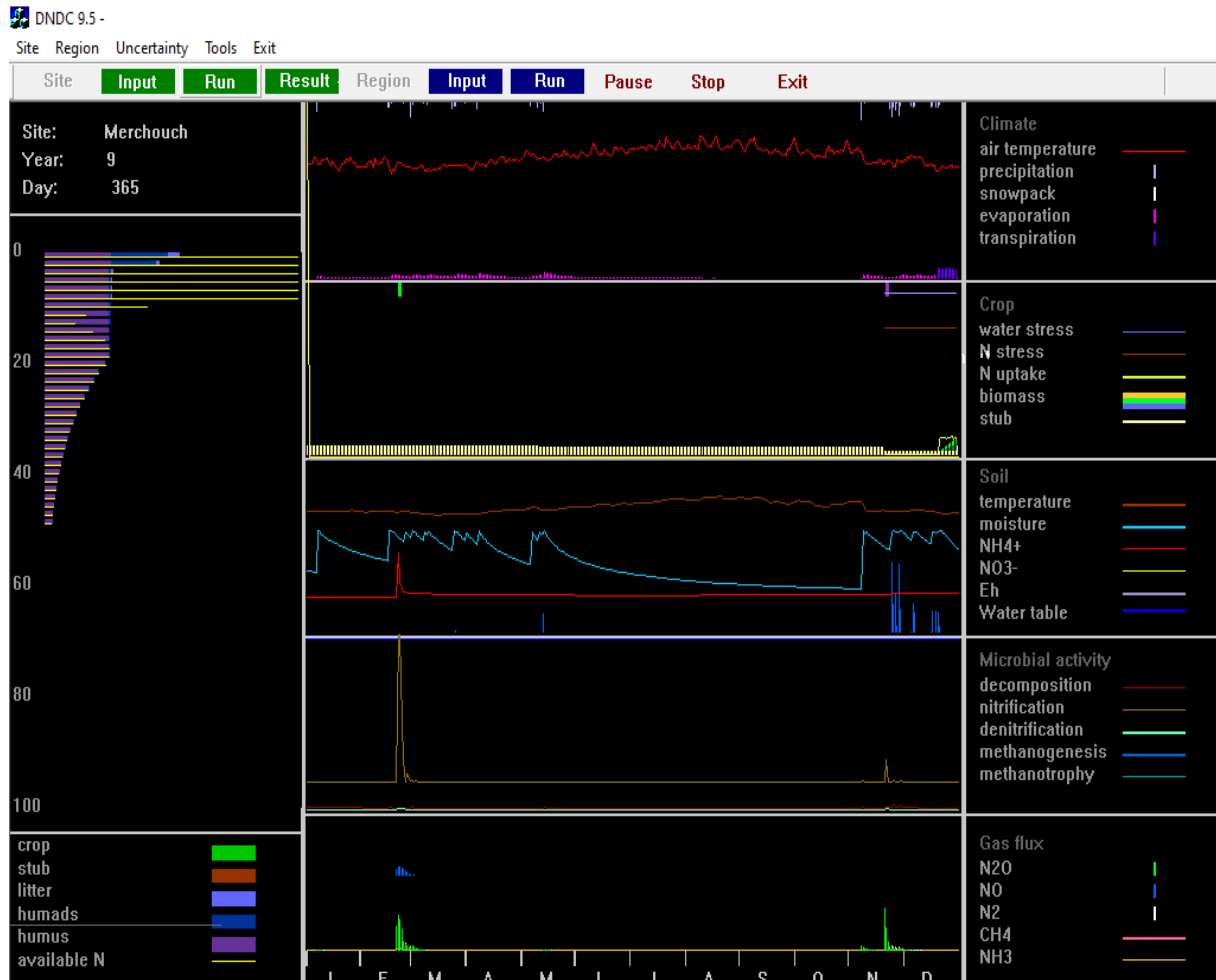


Figure 20 : Surveillance de la dynamique quotidienne des principaux facteurs simulés pendant l'exécution du modèle dans la station de Merchouch.

Cette figure montre les sept fenêtres qui permettent de surveiller la dynamique quotidienne des facteurs simulés pendant l'exécution du modèle dans la station de Merchouch.

- ✚ La fenêtre 1 (coin supérieur gauche) affiche le nom du site, l'année simulée
- ✚ La fenêtre 2 (au milieu à gauche) montre les profils de carbone et d'azote du sol pour 0-50 cm.
- ✚ La fenêtre 3 (en haut au milieu) affiche la température quotidienne de l'air, les précipitations, le manteau neigeux, l'évaporation et la transpiration.

- ✚ La fenêtre 4 (deuxième au milieu) montre la biomasse des cultures, l'absorption d'azote, le stress hydrique et l'azote stress.
- ✚ La fenêtre 5 (troisième au milieu) affiche la température du sol, l'humidité, Eh, la teneur en glace, N disponible et débit de lixiviation de l'eau.
- ✚ La fenêtre 6 (en avant au milieu) affiche les taux quotidiens de décomposition, de nitrification, dénitrification, méthanogenèse et méthanotrophie.
- ✚ La fenêtre 7 (en bas au milieu) affiche les flux quotidiens de NH_3 , CH_4 , N_2O , NO et N_2 .

Ces fenêtres permettent aux utilisateurs d'observer la dynamique générale de plusieurs facteurs clés pendant les courses du modèle.

2.4 Mesures du terrain pour la vérification du modèle DNDC

La validation du modèle par rapport aux données expérimentales est essentielle pour vérifier que le modèle simule correctement les processus sous-jacents. La méthodologie d'application des modèles pour améliorer leur utilisation a été défini par [104]. ainsi que pour quantifier la performance environnementale des systèmes agricoles. La validation du modèle DNDC dans cette étude a été menée en suivant les instructions étape par étape détaillées par Li. (2012). Les valeurs du COS mesurées combinées à d'autres données pertinentes du site (climat, propriétés du sol, type de culture, rotation et pratiques culturales) ont été collectées par analyse au laboratoire. Des prélèvements à 0-20 cm en profondeur, ont été déterminés par parcelle avec 12 répétitions pour chaque modalité de travail du sol. Chaque échantillon a été mis ensuite dans une boîte en carton. Ils ont été séchés à l'air puis tamisés à 0.2 mm pour la détermination de la teneur en C. Le calcul et l'expression des résultats de la teneur en COS ont été détaillés dans l'annexe B. Une partie de données est collectée partir de la base de données de l'institut National de la Recherche Agronomique et de la Direction générale marocaine de la météorologie. Ces données ont été utilisées pour la validation du modèle DNDC pendant 9 ans (de 2008 à 2016).

Les valeurs de COS modélisées ont été comparées au COS observées collectées à partir de la base de données de l'institut national de la recherche agronomique et la littérature [118], [119]. Plusieurs métriques ont été développées pour évaluer la « qualité de l'ajustement ». Deux indicateurs statistiques ont été couramment utilisés pour vérifier les performances du modèle DNDC et l'acceptabilité des résultats modélisés : l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation de Pearson (r). Au cours de la période 2008-2016, les observations sur le terrain ont indiqué que la teneur moyenne en COS sous système SD était 30 % plus élevée (12,2 g C/kg) que sous SC (9,3 g C/kg sol) aux 20 premiers cm de profondeur du sol.

2.4.1 Expression de Coefficient corrélation de Pearson (r)

Le coefficient de corrélation de Pearson (r) (équation 1) est utile pour évaluer à qu'elle point la forme de la simulation correspond à la forme de la mesure. Ce coefficient varie de -1 à 1, avec des valeurs proches de 1 indiquant un bon accord.

$$r = \left[\frac{\sum(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2 \sum(P_i - \bar{P})^2}} \right] \quad (1)$$

Où, O_i et P_i sont respectivement les observations et les prédictions, \bar{O} and \bar{P} représentent leurs moyennes respectives.

2.4.2 Expression de L'erreur quadratique moyenne (RMSE)

Le biais dans la différence totale entre les simulations et les mesures a été déterminé en calculant le RMSE (équation 2). Le RMSE est l'un des indicateurs statistiques les plus largement utilisés qui mesure l'amplitude moyenne de la différence entre les prédictions (P) et les observations (O). Il va de 0 (bonnes performances du modèle) à l'infini positif (mauvaises performances du modèle). Le RMSE a le pouvoir de résumer la différence moyenne en unités P et O [120].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \times 100/\bar{O} \quad (2)$$

Où, n le nombre d'observations. Une valeur RMSE plus petite indique une simulation plus précise. Il est plus intéressant de normaliser le RMSE pour que cet indicateur soit exprimé comme un pourcentage de la valeur moyenne des observations (\bar{O}). Cela peut être utilisé pour donner plus de sens à l'indicateur.

Une grille d'évaluation de la performance du modèle DNDC pour les deux indicateurs statistiques utilisés dans cette étude a été récapitulée dans le tableau 4.

Tableau 4 : Critère d'évaluation de la performance du modèle DNDC recommandés pour un pas de temps annuel

Valeur pour r	Valeur pour RMSE	Evaluation de la performance du modèle DNDC
≥ 0.90	$\leq 5\%$	Très bonne
0.80 – 0.89	6 – 15%	Bonne
0.70 – 0.79	16 – 25%	Modérée bonne
0.50 – 0.69	26 – 35%	Modérée faible
0 – 0.49	36 – 45%	Faible
< 0	$> 46\%$	Très faible

2.5 Scénarios de la ligne de référence et de pratiques agricoles alternatives

Les pratiques de gestion agricoles alternatives sont parmi les principales stratégies largement discutées par de nombreux chercheurs dans le monde, en ce qui concerne leur potentiel

d'amélioration du rendement des cultures, de séquestration du COS, d'atténuation du lessivage d'azote et des émissions de GES. Le COS est relativement dynamique et peut être fortement influencé par les pratiques agricoles.

Deux scénarios de référence ont été principalement conçus pour SD et SC. Les deux scénarios partageaient des conditions climatiques et des propriétés du sol similaires. Les parcelles ont reçu les mêmes pratiques agricoles (rotation, variété, taux de semis, dose et type d'engrais). Seules les méthodes de travail du sol différenciaient les deux parcelles. En effet, en système SD, environ 30 % des résidus de culture étaient restitués à la surface après la récolte (figure. 21).

Les scénarios alternatifs consistent des changements dans les taux de résidus de récolte retournés à la surface, d'application des engrais et de fumier, selon les deux pratiques de travail du sol. En pratique, le taux d'application de fumier alternatif était de 500 ou 1000 kg/ha. Le taux de résidus de cultures retourné alternatif était de 50 %, 70 % ou 90 % au lieu de 30 % sous SD et de 0 % sous SC (taux adopté dans la ligne de référence). De plus, le taux d'application d'engrais alternatif a été augmenté et diminué de 30%, 50% ou 80% du taux d'engrais appliqué dans les conditions de référence à Merchouch station. La figure. 21 résume les scénarios de gestion de référence et alternatifs utilisés pour la simulation. Le modèle DNDC a été exécutée sous les scénarios de référence et tous les scénarios alternatifs illustrés dans le tableau. 6 pendant 9 ans selon la méthode One -factor-at-a-time (OFAT) [121]. Dans cette méthode, une seule entrée a été modifiée pour chaque simulation, et tous les autres paramètres sont restés inchangés par rapport au niveau de référence. La méthodologie générale de l'utilisation du modèle DNDC dans ce chapitre a été brièvement expliquée sur figure. 22

2.6 Le potentiel de séquestration du COS

Le potentiel de séquestration du COS (PSC) a été calculé dans ce travail pour déterminer le potentiel du sol à séquestrer le COS pour chaque scénario alternatif au cours des 9 années simulées. Il peut être défini comme la différence entre la valeur moyenne des stocks de COS prévus dans chaque scénario alternatif (SCP) et la valeur moyenne des stocks de COS initiaux (SCI) (sous gestion de référence). Le PSC a été calculée à l'aide de l'équation (3) [122]. Les valeurs positives et négatives se réfèrent respectivement aux gains et pertes de COS.

$$\text{PSC} = \text{SCP} - \text{SCI} \quad (3)$$

L'unité pour les trois éléments est le kg C/ha. Le PSC a été calculé pour les deux pratiques de travail du sol.

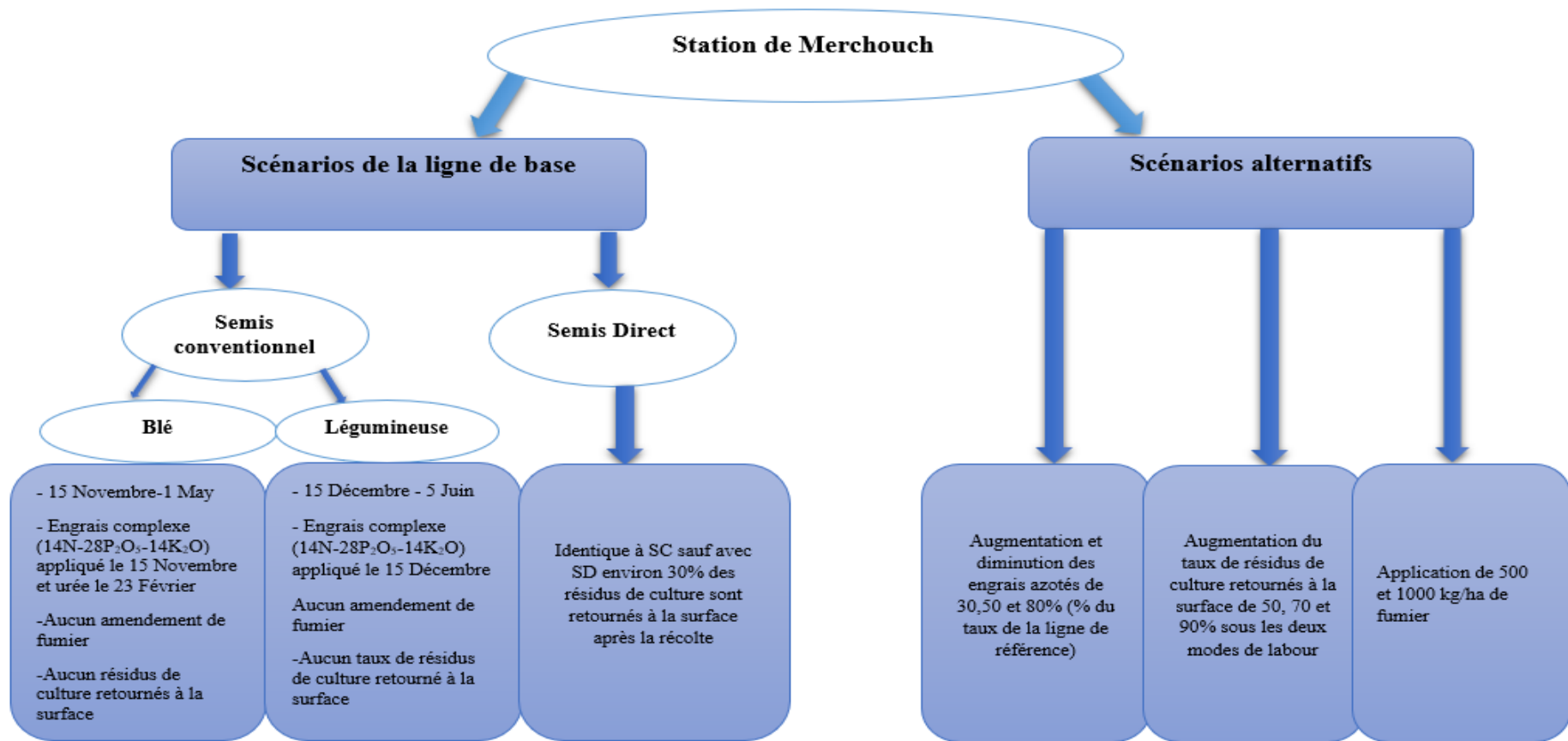


Figure 21 : Pratiques de gestion actuelles (Référence) et scénarios de gestion alternatifs pour le site d'étude, Merchouch, Maroc

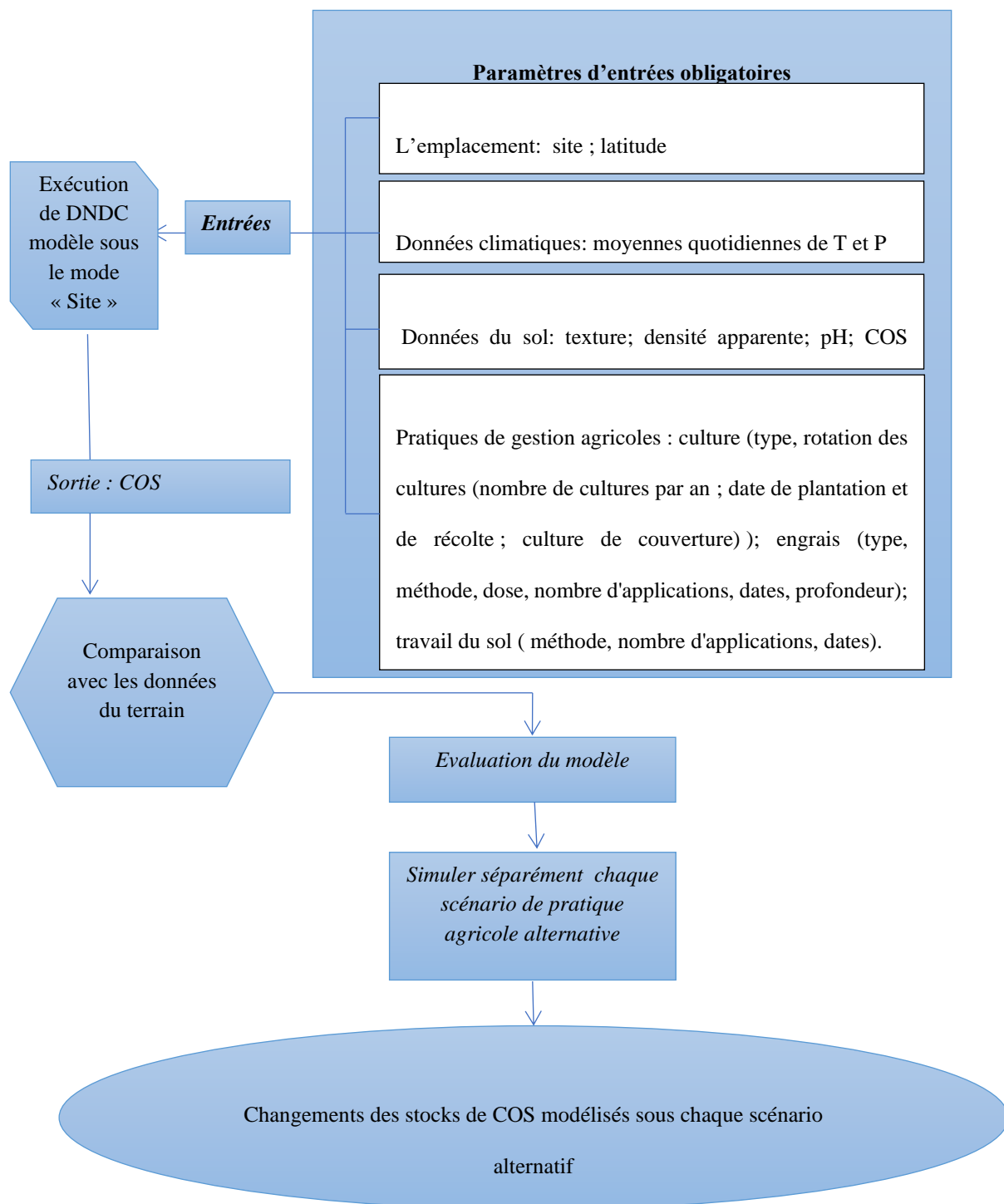


Figure 22 : Organigramme représente la méthodologie générale d'utilisation du modèle DNDC dans cette étude

3. Résultats et discussions

3.1 Vérification de la performance du modèle DNDC

Les résultats modélisés ont démontré que le système SD montrait une tendance avec une augmentation de la teneur en COS par rapport au SC au cours des 9 années simulées (figure. 23). De 2008 à 2016, la teneur moyenne simulée en COS était de 12,5 g C / kg de sol sous SD et de 9,6 g C / kg de sol sous SC. Ces valeurs sont proches de celles rapportées par les observations (12,2 g C / kg de sol, et 9,3 g C / kg de sol respectivement sous SD et SC). D'une part, le r entre les valeurs de teneurs en COS simulées et observées sont de 0,83 sous SD et de 0,98 sous SC. D'autre part, le RMSE était de 0,33 sous SD et de 0,28 sous SC, tous <5 . Le r élevé et le RMSE bas entre les valeurs mesurées et modélisées indiquent que les prédictions du modèle avaient un bon niveau de précision.

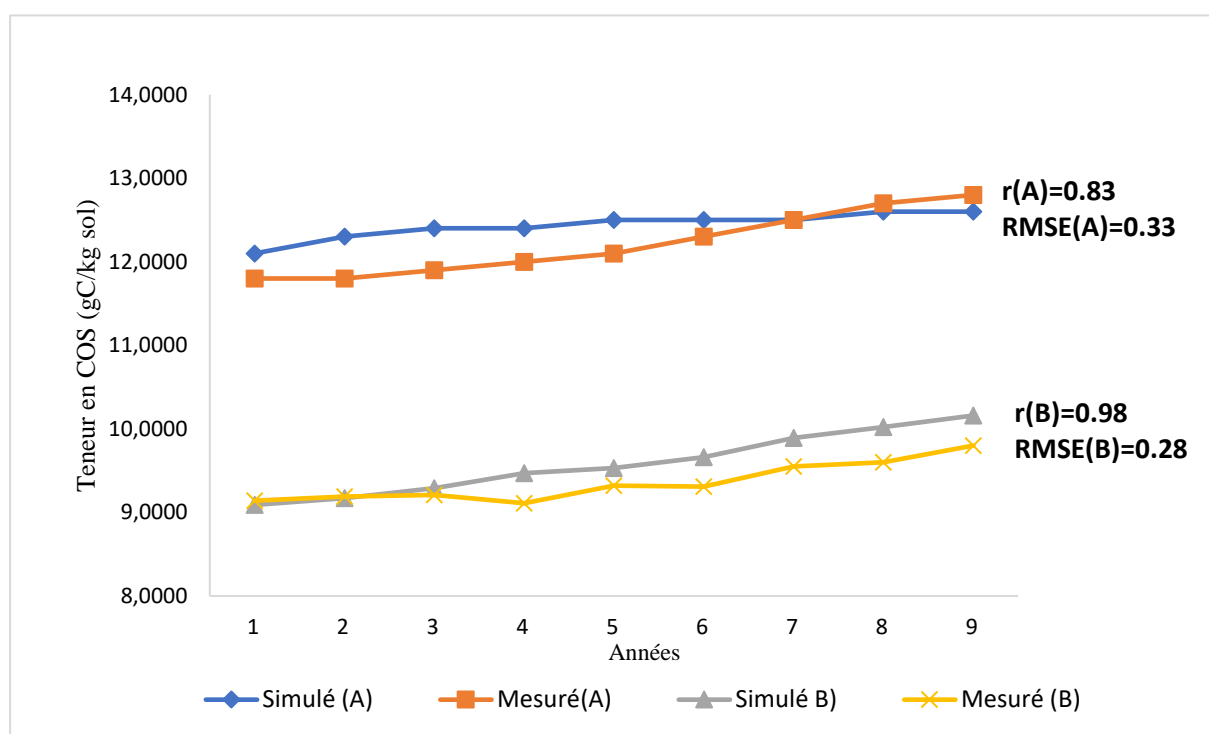


Figure 23 : Dynamique du COS observé et modélisé en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch, en 2008-2016.

3.2 Teneurs en COS dans les conditions de gestion actuelles (ligne de base).

Dans les conditions de ligne de base, les résultats modélisés ont montré une augmentation continue de la teneur en COS sous SD au cours des 9 années simulées (figure. 23). Une augmentation de 30% a été observée par rapport au SC dans la couche supérieure (0-20cm) du sol. Cette amélioration du COS peut être attribuée à l'effet des résidus de culture retournés à la surface après la récoltes, la teneur importante d'argile et également au faible taux de décomposition dû à une activité microbienne réduite. D'autres études réalisées sur le même site ont révélé l'effet positif du SD sur la teneur en COS par rapport au SC après de nombreuses années de pratique. Par exemple, Moussadek et al. [118] ont indiqué qu'après cinq ans de pratique continu de système SD, le COS a augmenté de 10% dans la couche arable. De même, Laghrour et al.[119] ont souligné une augmentation de 30% à la surface du sol sous le système SD par rapport au SC après 11 ans d'adoption.

Par ailleurs, Mrabet [123] a rapporté une observation similaire indiquant que les teneurs du COS dans le Vertisol a augmenté de 13,6% sous SD après 11 ans d'adoption par rapport au SC dans des conditions plus sèches. Nos résultats sont en accord avec d'autres études menées dans des conditions méditerranéennes semi-arides [124]–[130]. En outre, d'autres études ont indiqué que la teneur en COS augmentait continuellement sous des sols à haute teneur en argile par rapport aux sols pauvres considérant une utilisation des terres et des conditions climatiques similaires [131], [132]. De plus, un grand potentiel de séquestration du COS caractérise les sols à texture fine comme la station Merchouch. Sous SD, les vertisols sont des sols «actifs» grâce à leur teneur en argile importante ce qui peut conduire à un potentiel important de stock de COS [133]. Cet effet d'argile est dû à ses propriétés stabilisantes sur la MOS. En effet Six et al.[29] ont déjà expliqué le processus d'agrégation médiée par accumulation de COS. La MOS

peut être piégée dans de très petits espaces entre les particules d'argile diminuant ainsi l'accessibilité du micro-organisme et réduisant la décomposition du COS. La texture du sol peut perturber la capacité d'agrégation et d'adsorption du sol, alors que cette dernière peut réduire le processus de décomposition [134]

3.3 Effets des pratiques de gestion des résidus de culture et du fumier sur les stocks de COS

Selon les résultats de la simulation, les stocks de COS augmentent successivement pendant 9 ans sous les gestions alternatives de résidus de culture et de fumier en tenant compte les pratiques SC et SD (figures. 24 et 25). Une augmentation du taux de résidus de culture retournés à la surface du sol du 30% (ligne de base) au 50%, 70% et 90% ont tendance à augmenter les stocks de COS de 1 à 4% sous SD et de 0,4 à 0,9% sous SC (figure. 24). La figure. 25 présentait l'effet de fumier sur les stocks de COS sous deux pratiques de travail du sol (SD et SC). Les résultats modélisés ont indiqué que l'engrais organique peut améliorer efficacement les stocks de COS du site d'étude. En augmentant le taux d'application de fumier de 0 (ligne de base) à 500 et 1000 kg/ ha, le COS a augmenté de 1% et 3% sous SD, et de 0,9% et 2% sous SC pendant la période 2008-2016 (figure. 25).

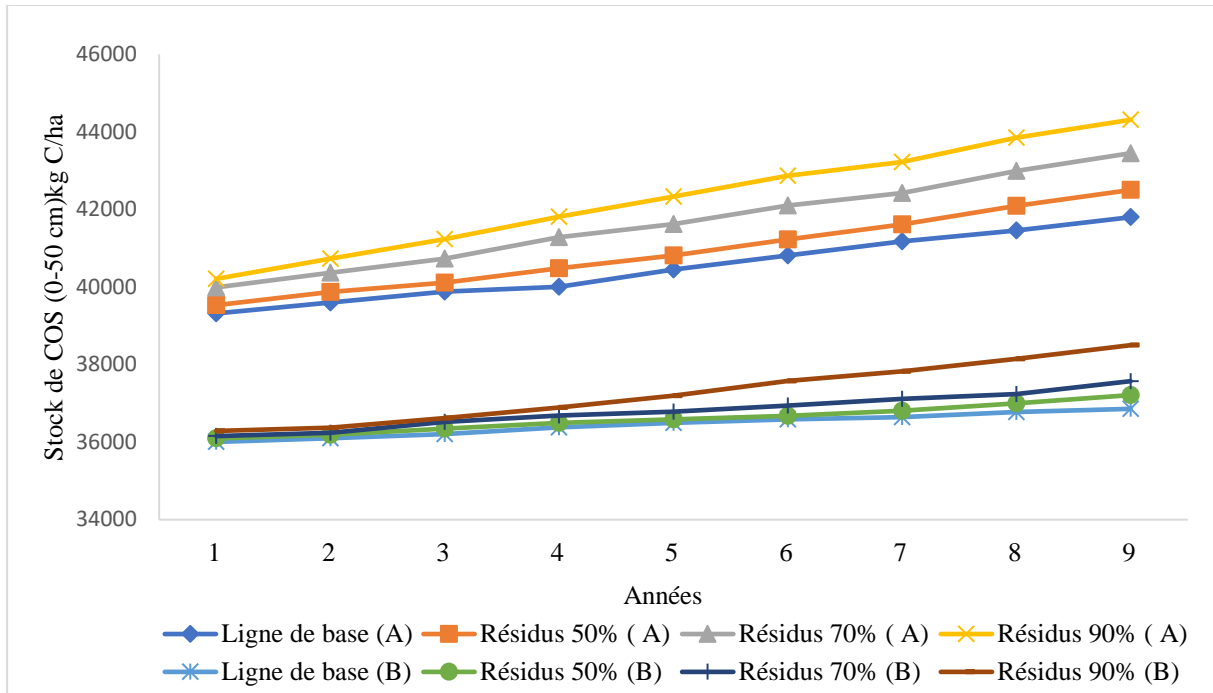


Figure 24 : Impact modélisé des résidus de culture alternatifs retournés en surface sur le COS en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch

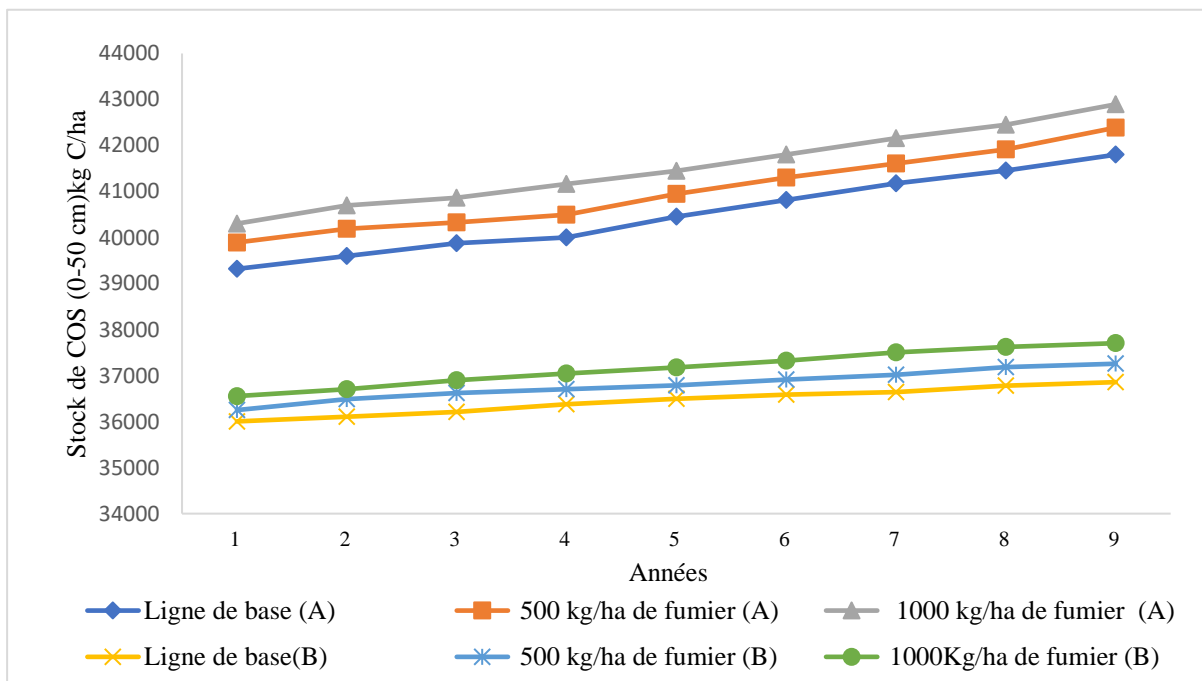


Figure 25 : Impact modélisé du taux d'amendement du fumier sur le COS en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch.

En comparant l'impact de la gestion des résidus de culture et de fumier sous SD contre SC (figure. 26), nos résultats modélisés ont indiqué que les stocks de COS ont augmenté de 12 à 14% sous les scénarios alternative de résidus de culture (50%, 70% et 90%) sous SD par rapport au SC. De même, les stocks de COS ont été amélioré sous SD de 11% et 12% par rapport au SC en ajoutant respectivement 500 et 1000 kg / ha d'engrais organique.

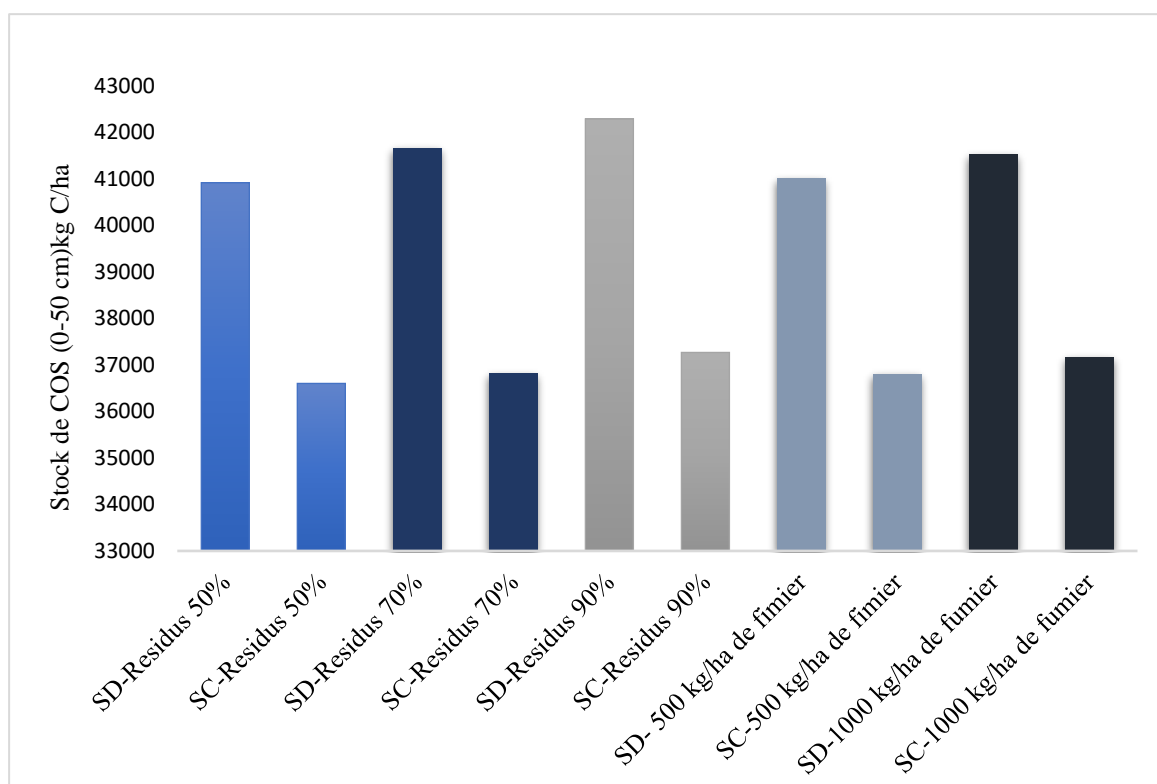


Figure 26 : Moyenne annuelle modélisée sur 9 ans des stocks de COS, selon les pratiques SD et SC, avec la variation du taux des résidus de culture et de fumier

le PSC varierait de 415 kg C / ha à 1787 kg C / ha sous SD, et entre 150 kg C / ha et 495 kg C / ha sous le système SC (tableau 5), lorsque le taux de résidus de culture a été modifié. En outre, considérant 500 kg / ha de fumier, le PSC atteint 497 kg C / ha sous SD et 352 kg C / ha sous SC. Cependant, le PSC est estimé à 1019 kg C / ha et 818 kg C / ha respectivement sous les systèmes SD et SC lors de l'ajout de 1000 kg / ha de fumier (tableau 5).

Tableau 5 : Potentiels de séquestration du COS modélisés par le DNDC modèle sous des conditions de gestion alternatives pour les systèmes SD et SC à la station Merchouch, Maroc

Scenario Alternative	Potentiel de séquestration du COS (kg C/ha)	
	SD	SC
50% des résidus de culture retournés	415	150
70% des résidus de culture retournés	1162	355
90% des résidus de culture retournés	1787	495
500 kg/ha de fumier	497	352
1000 kg/ha de fumier	1019	818
+ 30% * de N-Fert	5	9
+ 50% de N-Fert	-14	12
+ 80% de N-Fert	20	33
- 30% de N-Fert	-107	-177
- 50% de N-Fert	-304	-269
- 80% de N-Fert	-535	-354

Par conséquent, Notre étude a conclu qu'une augmentation du taux de résidus de culture, ou l'application de fumier, en particulier en conjonction avec le système SD, augmente considérablement les stocks de COS par l'ajout de la matière organique dans le sol et améliore la capacité du sol à séquestrer plus de COS. Cette constatation est cohérente avec d'autres études [79], [94], [96], [135], qui ont révélé que l'application de fumier et l'augmentation du taux de résidus de culture retournés à la surface après la récolte conduisaient à une amélioration significative des stocks de COS. De même, Zhang et al. [94] ont rapporté qu'une augmentation

des résidus de culture retournés dans la ligne de base à 50% ou 90%, et l'application de fumier à un taux de 500 kg / ha a converti les terres agricoles d'une source à un puits de C. plusieurs chercheurs [136]–[138] ont souligné que la perte de COS diminuait d'environ 70% ou 80%, en augmentant le taux de résidus de culture retournés par rapport au niveau adopté dans la ligne référence d'au moins 50%. Wang et al. [139] ont attribué une augmentation du stock de COS avec l'application de 1000 kg / ha d'engrais organique et une augmentation du taux de résidus de culture retourné à la surface après la récolte de 30%, 50% et 80%. De plus, Chen et al. [140] ont montré que des apports plus élevés de fumier et de litière en fonction de l'application initial de fumier ou des résidus de culture utilisés, respectivement, conduisaient à un stock de COS simulé plus élevé. Les résultats modélisés ont également indiqué que le bénéfice le plus élevé serait obtenu si des pratiques de gestion agricole alternatives étaient appliquées aux sols pauvres à faible teneur en COS, en particulier les sols des régions semi-arides. Powelson et al. [141] et Pezzuelo et al. [142], ont rapporté que les pratiques de conservation ont la capacité d'augmenter la fertilité des sols grâce à une accumulation accrue de COS et peuvent agir comme un mécanisme d'atténuation du changement climatique. Une étude précédente menée au Nigéria [143] a indiqué que l'adoption des pratiques de gestion conservatrice des sols telles que l'application de fumier, le paillage et le travail de conservation du sol a été suggéré pour empêcher la dégradation des terres agricoles en améliorant le COS. Nos résultats sont en ligne avec d'autres études réalisées dans des conditions semi-arides [144]–[146]. Ces chercheurs ont rapporté que l'utilisation de pratiques de gestion améliorées, telles que le SD, et l'augmentation du taux des résidus de culture retournés à la surface, peuvent freiner le déclin du COS et le préserver de manière durable, en particulier dans les régions semi-arides.

3.4 Effets des pratiques de gestion des engrais sur les stocks de COS

La présente étude vise également à évaluer l'effet du changement du taux d'engrais azoté sur les stocks de COS dans la station de Merchouch. Les résultats modélisés ont montré que, sous SD, le stock de COS a augmenté de 0,014% et 0,04% lorsque le taux d'engrais azoté a été augmenté de 30% et 80% respectivement, tandis que le COS diminue de 0,03%, avec une augmentation du taux d'engrais azoté de 50% par rapport à la ligne de base (figure. 27). Il y a eu une augmentation de 0,02 à 0,09% du stock de COS sous SC lorsque le taux d'engrais azoté a été augmenté de 30%, 50% et 80%. Comme le montrent nos résultats simulés, l'augmentation du taux d'engrais azoté a une augmentation négligeable (0,014–0,09%) du stock de COS au cours des 9 années. En outre, la diminution du taux d'engrais azoté de 30%, 50% et 80% tend à diminuer le stock de COS de 0,2 à 1,3% sous SD, tandis qu'une diminution de 0,4 à 0,9% sous SC (figure. 28).

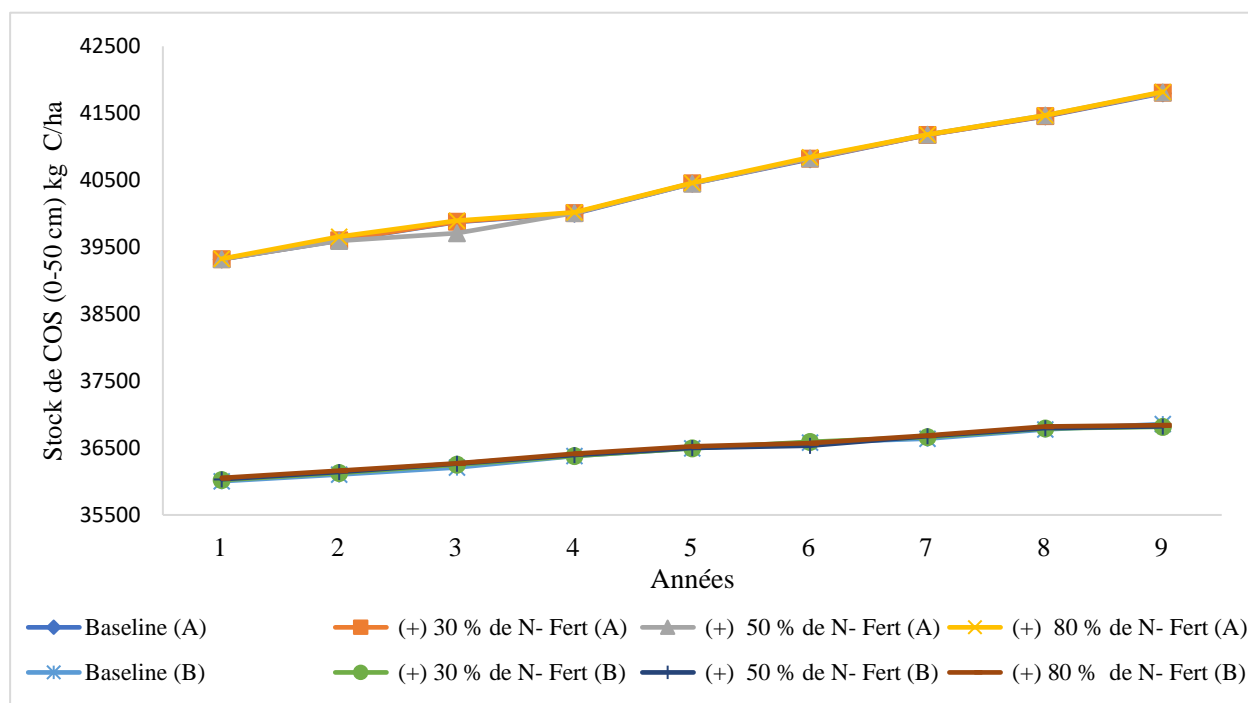


Figure 27: Impact modélisé de l'augmentation du taux d'engrais de 30 %, 50 % et 80 % (% du taux de référence) sur le COS en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch.

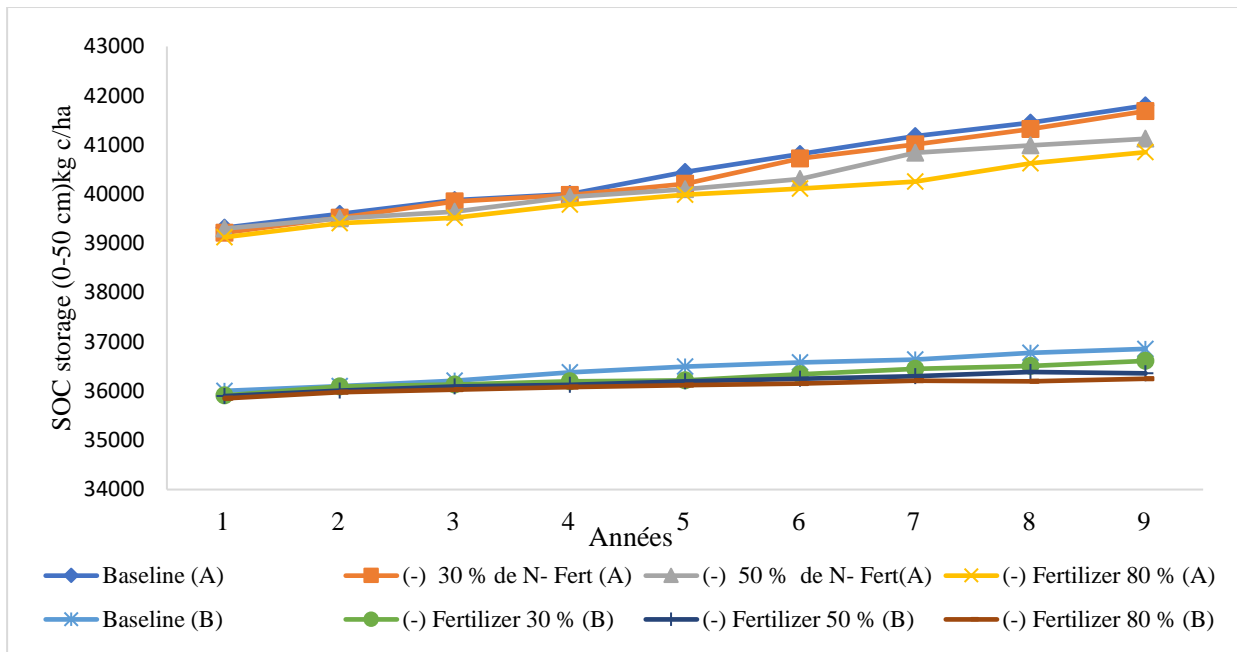


Figure 28 : Impact modélisé de diminution du taux d'engrais de 30 %, 50 % et 80 % (% du taux de référence) sur le COS en SD (A) et en SC (B) à la station Merchouch.

Selon nos résultats modélisés, le PSC variait de -14 kg C / ha à 20 kg C / ha en SD et de 9 kg C / ha à 33 kg C / ha en SC (tableau 5) en augmentant le taux d'engrais azoté. En revanche, le PSC a diminué de 107 à 535 kg C / ha et de 177 à 354 kg C / ha respectivement sous SD et SC, lors de la diminution du taux d'engrais azoté (tableau 5). Ces résultats ont clairement montré que notre site d'étude était correctement fertilisé et que le taux adopté dans les scénarios de référence était déjà atteint. Par conséquent, une nouvelle augmentation a conduit à un impact peu ou négligeable sur le stock de COS au cours des années simulées.

Plusieurs études précédentes [111], [139], [147] appuient nos résultats et confirment l'absence d'effet considérable sur le stock de COS lors de l'augmentation du taux de fertilisation azotée. Dou et al. [148] ont également acquis les mêmes résultats dans le centre-sud des États-Unis en utilisant le modèle DNDC. De plus, Segoli et al. [149] ont déclaré qu'une augmentation du taux

de N, par le biais de la fertilisation, stimulerait le renouvellement du COS et pourrait le réduire. D'un autre côté, nos résultats indiquent que la diminution du taux de fertilisation azotée diminuera le stock de COS et la capacité du sol à séquestrer le COS. En fait, les taux d'engrais azotés peuvent réduire le stock de COS en augmentant la minéralisation de la MOS selon le mécanisme expliqué par plusieurs chercheurs [150]–[153]. Ces chercheurs démontrent que l'azote inorganique diminue dans le sol dans des conditions de faibles taux d'engrais azotés. Dans le même temps, les microbes accélèrent la décomposition de la MOS pour répondre à la demande d'azote pour le métabolisme de croissance. Cet investissement énergétique dans l'acquisition de N peut réduire l'efficacité d'utilisation du C microbien. En effet, la plus grande partie de la MOS décomposée, issue de l'extraction de N, est constituée de biomolécules à énergie faible ou nulle (comme la lignine) [153], [154]. Ce résultat est également en accord avec [140], [155] qui indiquent que, si N est une ressource limitante, les apports de N inorganique augmenteront la biomasse microbienne et l'activité augmentant ainsi la minéralisation de la MOS. De plus, [156]–[159] ont indiqué que les taux d'engrais azotés peuvent entraîner une diminution des stocks de COS, grâce à l'accélération du taux de minéralisation de la MOS et à une diminution de l'efficacité de séquestration du C dans le sol. Notre site d'étude a déjà atteint un bon niveau d'engrais azoté et, par conséquent, toute future modification des taux n'améliorera pas les stocks de COS. De plus, une augmentation du taux d'engrais azoté serait coûteuse par rapport à leurs avantages pour amender les stocks de COS.

4. Conclusion

La présente étude a montré comment le modèle DNDC peut être utilisé pour déterminer explicitement le stock de COS, selon différentes pratiques de gestion et systèmes de travail du sol, à la station de Merchouch au Maroc. Les résultats de la validation ont montré que le modèle DNDC avait de bonnes performances pour simuler le stock de COS. Les résultats de la

simulation ont indiqué que: 1) la teneur en COS a augmenté continuellement sous SD par rapport à SC au cours des 9 années simulées, 2) Les ajouts de C, via une augmentation du taux de résidus de culture ou l'application d'engrais organique, ont augmenté le stock de COS, en particulier dans sols qui ont souffert de la dégradation du COS, 3) La station de Merchouch a été correctement fertilisée, et par conséquent, le stock de COS n'a pas augmenté de manière significative avec l'augmentation du taux de fertilisation azotée, alors que la diminution de ces taux a effectivement diminué le stock de COS. À la lumière de ces résultats, nous pouvons conclure qu'une combinaison du système SD avec des ajouts de C par amendement du fumier et des résidus de culture sont les pratiques de gestion optimisées pour améliorer le stock de COS, en particulier dans les zones semi-arides.

Toutefois, d'autres travaux sont encore nécessaires pour minimiser les incertitudes de certains paramètres d'entrées importants du DNDC notamment les conditions climatiques et les propriétés du sol, et d'améliorer ainsi la précision des résultats modélisés. Nous allons traiter ce volet dans le chapitre IV qui suit.

Chapitre IV : Sensibilité du COS dans le modèle DNDC aux changement des scénarios climatiques et aux propriétés du sol en conditions Méditerranéennes

1. Introduction

Le stockage du COS est fortement influencé par des facteurs environnementaux, notamment les conditions climatiques, et les propriétés du sol [160]–[165]. La température régionale (T) et les précipitations (P) influencent le rôle du COS en tant que source ou puits [166], [167]. Field et al. [168] ont souligné que la température moyenne augmentera considérablement d'ici la fin de ce siècle. Pour cette raison, une grande connaissance a récemment été perçue sur les effets du changement climatique sur les changements de COS au Maroc. Les zones agricoles méditerranéennes ont généralement des teneurs en COS inférieur à celui des zones tempérées en fonction de la sécheresse saisonnière et des caractéristiques climatiques particulières [169], [170]. Ces zones sont souvent dégradées et très vulnérables au changement climatique en raison de la rareté de l'eau et de l'augmentation du risque de désertification.

D'autre part, le COS dans les agroécosystèmes est simultanément influencé par les propriétés du sol (pH du sol, le COS initial et la teneur en argile) [171]. La texture représente l'une des variables clés du sol compte tenu de sa corrélation étroite avec la croissance des racines, la conductivité thermique, les échanges gazeux et les agrégats. En outre, les particules d'argile stabilisent la MOS contre la minéralisation microbienne, améliorent la rétention d'eau du sol et ont une capacité d'échange cationique élevée [29], [172]. Par conséquent, les sols à faible teneur en argile sont généralement associés à une faible disponibilité des nutriments et de l'eau pour la croissance des plantes [173]. Le pH du sol régule aussi la biodisponibilité des nutriments du sol, le renouvellement de la MOS et influence ainsi les niveaux de COS [174], [175].

Comme indiqué dans les chapitres précédents, les modèles biogéochimiques basés sur les processus ont été développés et largement utilisés par les chercheurs pour évaluer les impacts des nombreux facteurs de stockage du carbone dans les sols et pour générer des scénarios d'étude de la dynamique du COS. Cependant, l'incertitude associée à ces modèles basé sur les processus est inévitable, car la connaissance des paramètres d'entrée du modèle dérivés de données éparses est imparfaite. Par conséquent, les résultats de la modélisation sans représentation de l'incertitude ont une valeur très insuffisante pour la prise de décision [176]. Afin de minimiser les incertitudes des paramètres des modèles et d'améliorer ainsi la précision des résultats modélisés, l'analyse de sensibilité est généralement utilisée pour évaluer la sensibilité des paramètres de sortie du modèle aux paramètres d'entrée [177], et identifier les paramètres cruciaux contrôlant les sorties du modèle [178].

Récemment, nous avons assisté à une augmentation des connaissances sur les impacts du changement climatique sur la dynamique des stocks du COS. Néanmoins, les connaissances actuelles sont principalement basées sur un seul facteur climatique, tel qu'un réchauffement de la température ou un changement des précipitations [179]–[181]. Malgré tous les efforts consacrés aux effets des différents facteurs climatiques, l'application de leurs effets individuels pour prédire les changements du COS peut entraîner des biais importants. Ce résultat est observé parce qu'en réalité, tous les facteurs climatiques agissent collectivement, simultanément et de manière non linéaire, plutôt que séparément, pour affecter le COS. Par conséquent, la connaissance de leurs effets combinés est nécessaire pour comprendre le cycle du carbone des écosystèmes terrestres en réponse au changement climatique [182].

Dans le présent chapitre, nous avons utilisé le modèle DNDC sous le système SD pour évaluer la sensibilité du COS simulé à plusieurs paramètres d'entrée, notamment la température, les

précipitations, la teneur en argile, le pH du sol et le COS initial dans le modèle DNDC, et identifier à travers cette analyse de sensibilité les principaux facteurs qui affectent le COS au cours des neuf années simulées, révélant ainsi des scénarios de séquestration du COS. D'autre part, nous avons examiné l'impact combiné des deux facteurs climatiques les plus critiques (P et T) qui n'ont pas été élucidés en profondeur jusqu'à présent. Cette étude représente une étape importante vers une compréhension approfondie du devenir du COS dans le contexte du changement climatique.

2. Matériels et Méthodes

2.1 Test de sensibilité

Le modèle a été d'abord exécuté avec un scénario de base dans un système SD avec des conditions climatiques et pédologiques similaires à la station de Merchouch. Les données météorologiques et de gestion agricoles de 2008 à 2016 ont été sélectionnés pour composer le scénario de base avec les précipitations annuelles de 450 mm, la température de 23 °C, la fraction d'argile du sol de 0,50%, la teneur initiale en COS de 1,2%, et le pH du sol de 7,6 basé sur les conditions du site expérimental au cours des 9 années simulées. Afin de tester la sensibilité du modèle DNDC (version 9.5) à la variabilité des facteurs influençant le COS tels que les précipitations, la température, la teneur initial en COS, la teneur en argile et le pH du sol, une analyse de sensibilité a été réalisée dans le modèle. Des scénarios alternatifs ont été compilés à cette fin en modifiant les cinq facteurs sélectionnés. La température maximale et minimale de chaque jour a été fixée pour augmenter ou diminuer de 2 °C et 4 °C, respectivement. Les précipitations pour chaque événement pluvieux a été fixée pour augmenter ou diminuer de 10 % et 20 %. Les propriétés du sol, y compris le COS initial, la teneur en argile et le pH du sol, ont été construites dans les plages de 0,5-3 %, 0,19-0,63 % et 5,3-9,6,

respectivement. Le modèle DNDC a été exécuté sous chaque scénario alternatif tout en gardant les autres constants. Les détails des scénarios climatiques de base et alternatifs sont présentés dans le tableau 6.

Il est à noter que les scénarios de base et alternatifs ont utilisé les mêmes pratiques de gestion agricole. Les fourchettes testées pour les facteurs environnementaux variables constituant les scénarios alternatifs ont été pour la plupart sélectionnées selon [118], [183], [184] et sont basées sur une enquête menée par l'Institut National de Recherche Agronomique.

Tableau 6 : Scénarios de référence et alternatif pour les tests de sensibilité.

Scenario	Conditions ou Variations
Ligne de base (SR)	Moyenne annuelle de Température 23°C Moyenne annuelle de Précipitation 450 mm Teneur en argile: 0.50 % COS: 1.2 % pH: 7.6 Système de labour: SD
Changement de température (SA)	Augmentation et diminution par 2°C et 4°C
Changement de précipitation (SA)	Augmentation et diminution par 10% et 20%
Changement de teneur en argile % (SA)	0.19, 0.34, 0.40, 0.63
Changement de teneur en COS initial (kg C/kg) (SA)	0.005, 0.02, 0.03
Changement de pH du sol (SA)	5.3, 6.5, 8.9, 9.6

SR : Scénario de référence ; **SA** : Scénario alternatif

Après les exécutions du modèle avec les scénarios, les changements moyens de COS sur 9 ans ont été calculés dans la couche de sol 0-50 cm pour chaque scénario alternatif afin d'évaluer leur augmentation ou leur diminution par rapport au scénario de base.

2.2 Taux de séquestration du C

Le taux de séquestration du C a été calculé selon l'équation (4) [185] pour le scénario de base et chaque scénario alternatif climatique et pédologique.

$$\text{Taux de séquestration du C} = \frac{C_f - C_d}{t} \quad (4)$$

où C_f et C_d sont les stocks du COS (kg C ha^{-1}) à la fin et au début de l'expérience, respectivement, et t est la durée de l'expérience (années).

2.3 Calcul de INDICE de sensibilité

Dans cette étude, la sensibilité des stocks de COS modélisés aux variations des paramètres d'entrée a été déterminée avec la méthode de l'indice de sensibilité [186]–[188] (Eq. (5)).

$$SI = \frac{\frac{(O_2 - O_1)}{O_{\text{moy}}}}{\frac{(I_2 - I_1)}{I_{\text{moy}}}} \quad (5)$$

où S est l'indice de sensibilité relative, I_1 , I_2 sont les valeurs d'entrée minimale et maximale pour un paramètre spécifique, I_{moy} est la moyenne de I_1 et I_2 , O_1 , O_2 sont les valeurs de sortie du modèle correspondant à I_1 et I_2 , et O_{moy} est la moyenne de O_1 et O_2 . Une valeur SI positive fait référence à une corrélation positive entre les résultats simulés et le paramètre d'entrée sélectionné, tandis qu'une valeur négative indique une relation négative. Une valeur absolue

plus élevée de l'indice (S) correspond à un impact d'entrée plus important sur la sortie. De plus, une valeur négative indique une association inverse entre l'entrée et la sortie.

2.4 Scénarios des facteurs climatiques individuels et combinés

Pour quantifier davantage l'effet combiné des facteurs climatiques sur la séquestration du COS, huit scénarios combinés ont été construits basé sur des scénarios alternatifs individuels. Deux paramètres d'entrée sont nécessaires (Température et Précipitation) et leurs valeurs dans les scénarios alternatifs individuels et combinés sont décrites ci-dessous (Tableaux 7 et 8).

Le modèle DNDC a été exécutée pour chaque scénario alternatif combiné pendant 9 ans pour observer leurs impacts sur le stock du COS par rapport au scénarios alternatifs individuels à la station Merchouch. Pour chaque exécution, deux entrées ont été modifiées (précipitation et température) et tous les autres paramètres sont restés inchangés par rapport au niveau de référence.

Tableau 7: Ligne de base et scénarios individuels alternatives des facteurs climatiques

Scénario	Description
A	Augmenter de 2 °C la température et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 % (T2A1)
B	Augmenter de 2 °C la température et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 % (T2A2)
C	Augmenter de 4°C la température et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 % (T4A1)

D	Augmenter de 4 °C la température et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 % (T4A2)
----------	--

Tableau 8: Scénarios alternatifs combinés de l'augmentation de la température et diminution des précipitations

Scénario	Description
A	Augmenter de 2 °C la température et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 % (T2A1)
B	Augmenter de 2 °C la température et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 % (T2A2)
C	Augmenter de 4°C la température et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 % (T4A1)
D	Augmenter de 4 °C la température et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 % (T4A2)

3. Résultats et discussion

3.1 Variations des stocks du COS sous différentes propriétés du sol

Les propriétés du sol ont un rôle majeur dans la régulation du cycle biogéochimique du C dans les agroécosystèmes [147]. En faisant varier la teneur initiale en COS, la teneur en argile et le pH du sol, onze scénarios alternatifs ont été considérées pour représenter la gamme de pH, de COS et de teneur en argile couramment observée sur le site d'étude.

l'indice de sensibilité calculé pour les impacts des propriétés du sol répertoriés dans le tableau 9 indique que le COS était positivement corrélé avec la teneur en argile du sol et le pH du sol, et négativement associé au COS initial.

Tableau 9 : Indices de sensibilité calculés pour quantifier l'impact des paramètres d'entrée testés sur les stocks de COS de sortie

Paramètre	Ligne de base	Gamme testée	Indice de sensibilité (IS) de Stocks de COS
Température annuelle (°C)	23	Diminution par 2°C and 4°C et augmentation par 2°C et 4°C	-0.2
Précipitations annuelles (mm)	450	Diminution par 10% and 20% et augmentation par 10% et 20%	0.04
Teneur en argile %	50.5	0.19, 0.34, 0.4, 0.63	0.03
Teneur initiale en COS (kg C/kg)	0.01	0.005, 0.02, 0.03	-0.03
pH du sol	7.6	5.3, 6.5, 8.9, 9.6	0.003

3.1.1 Effet de la teneur initial en COS sur les stocks du COS

Les résultats modélisés ont indiqué qu'au cours des années simulées, le stock annuel moyen de COS dans une couche de sol de 0-50 cm a diminué de 3 % et de 4 % lorsque la teneur initiale en COS est passée de 0,012 kg C/kg (ligne de référence) à 0,02 kg C/kg. et 0,03 kg C/kg respectivement. Cependant, le stock de COS a augmenté de 2 % lorsque la teneur initiale en COS a diminué à 0,005 kg C/kg (figure. 29). Ces résultats impliquent que les sols avec une teneur initiale en COS plus élevée ont tendance à perdre plus de stock de COS, probablement

en raison du taux de décomposition élevé. Une teneur initiale plus élevée en COS peut fournir un environnement favorable à la communauté microbienne, ce qui influence négativement l'accumulation de C. De plus, une augmentation de la teneur en COS par rapport à la ligne de base à 0,02 kg C/ha et 0,03 kg C/ha tend à diminuer le taux de séquestration du C de 90 kg C ha⁻¹ an⁻¹ et 111 kg C ha⁻¹ an⁻¹ respectivement, tandis que la diminution de la teneur en COS à 0,005 kg C/ha augmente ce taux de 96 kg C ha⁻¹ an⁻¹ (figure. 30). Le COS initial est identifié dans cette étude, comme étant le paramètre le plus sensible parmi les propriétés du sol testées.

Nos résultats obtenus dans le présent travail sont cohérents avec plusieurs études précédentes [189]–[191]. Les composants organiques labiles du carbone sont une source d'énergie importante pour les microbes, ce qui entraîne une plus grande respiration du sol et donc une réduction de la quantité de carbone stockée dans le sol [154], [192]–[196]. Les sols avec une teneur initiale élevée en COS fournissent un bon environnement pour les communautés microbiennes, ce qui augmente les activités et la croissance microbiennes, et accélère le taux de décomposition ; ce qui conduit à une diminution du taux de séquestration du C [197]. Une autre étude réalisée dans des conditions environnementales similaires en utilisant le DNDC, a souligné que des conditions initiales de COS faibles étaient apparemment favorables à l'accumulation de COS [198]. De même, Matus et al. [199] et Paul et al. [200] ont souligné que les sols avec une teneur initiale en COS plus faible permettent une plus grande capacité à améliorer l'accumulation du pool de carbone. Des taux de séquestration de COS plus élevés ont été observés sur des sites à faible teneur initiale en COS dans des conditions semi-arides [201].

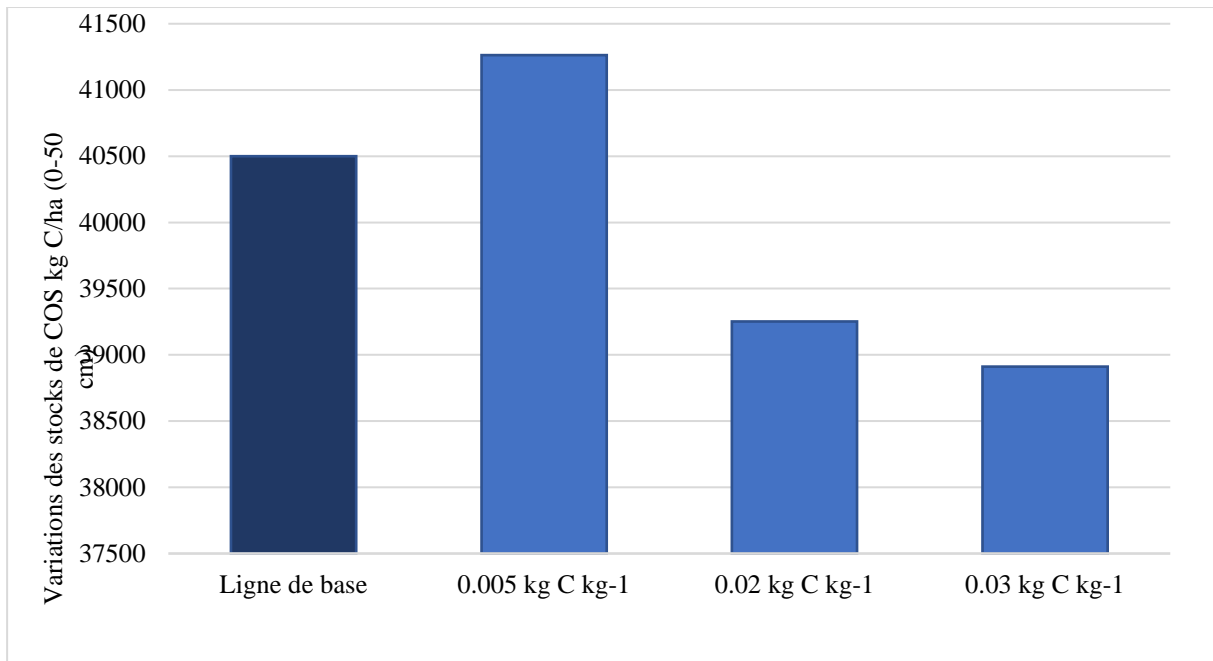


Figure 29 : Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent contenu initial de COS dans la station Merchouch

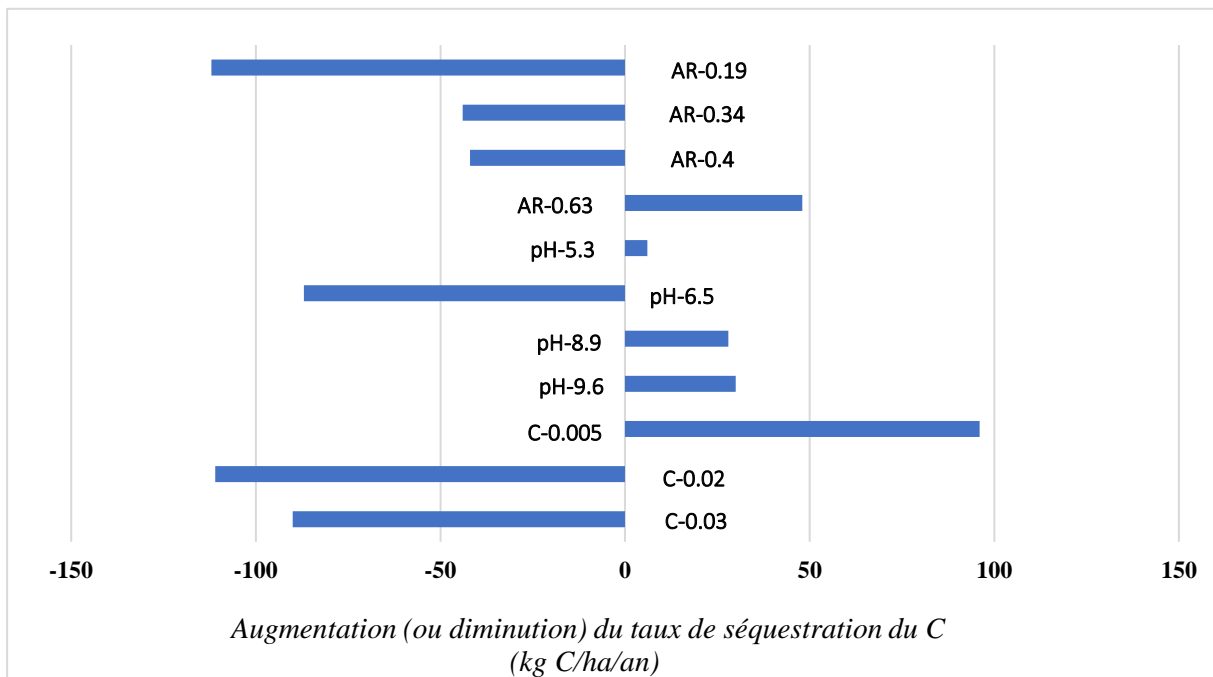


Figure 30: Augmentation (ou diminution) du taux de séquestration du C sous les propriétés du sol alternative dans le site de Merchouch : AR-0.19, AR-0.34, AR-0.4 and AR-0.63; diminution en contenu en argile de la ligne de référence (0.50 %) à 0.19%, 0.34%, 0.4%, et augmentation à 0.63%; C-0.005, C-0.02 et C-0.03- diminution en contenu de COS de la ligne de base (0.01 kg C/ha) à 0.005 kg C/ha, et augmentation à 0.02 kg C/ha and 0.03 kg C/ha.

3.1.2 Effet de la teneur en argile sur les stocks du COS

Les résultats montrent que si la teneur en argile passe de 0,50 % (ligne de référence) à 0,19 %, 0,34 %, 0,40 % et 0,63 %, le stock du COS diminue de 3 %, 1 %, 0,6 % et augmente de 1 % respectivement (figure. 31). Il y a eu une diminution de 42 à 112 kg C ha⁻¹ an⁻¹ du taux de séquestration du C lorsque la teneur en argile a été réduite de 0,19 à 0,40 % par rapport à la ligne de base. De plus, ce taux augmente de 48 kg C ha⁻¹ an⁻¹ sous 0,63 % de teneur en argile (figure .30). Nos simulations montrent clairement que le COS modélisé dans le DNDC est également sensible à la teneur en argile après le COS initial. Une corrélation positive a été obtenue à partir de l'IS calculé entre la teneur en argile et les changements de COS (tableau 7). Avec une teneur en argile de 0,63 %, le taux de séquestration du carbone augmente de 48 kg C ha⁻¹ an⁻¹ (figure. 30). Cet effet de l'argile peut être expliqué par le mécanisme proposé par Six et al. [202], qui explique que les très petits espaces entre les particules d'argile peuvent piéger la matière organique du sol à l'intérieur, ce qui limite l'accessibilité des microorganismes et réduit ainsi la décomposition du COS. La grande surface des fractions fines d'argile favorise la génération de complexes organo-minéraux qui protègent le C contre l'oxydation microbienne [203]–[205]. Nos résultats sont en accord avec les travaux précédents. Par exemple, [206], [132], et [207] ont mis en évidence une grande association entre l'accumulation de COS et les sols à haute teneur en argile par rapport aux sols pauvres dans des conditions environnementales similaires. Il a été conclu que la station de Merchouch a un potentiel plus élevé pour la séquestration de COS dans des conditions de haute teneur en argile. Ce résultat est en accord avec les résultats obtenus par [118].

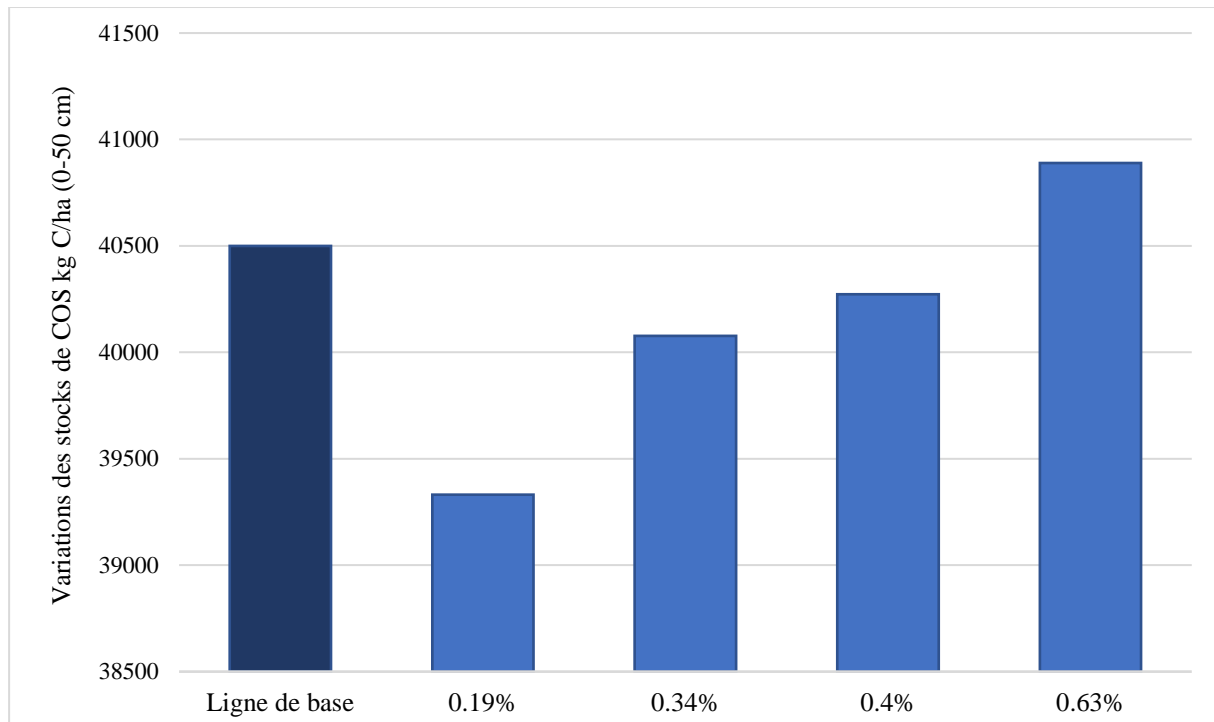


Figure 31: Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent teneur en argile dans la station Merchouch

3.1.3 Effet de la teneur du pH du sol sur les stocks du COS

D'autre part, nos simulations ont démontré que le stock de COS augmente de 0,7%, 0,5% et 1%, lorsque le pH du sol est passé de 7,6 (ligne de Référence) à 5,3, 8,9 et 9,6 respectivement (figure. 32). Cependant, il diminue de 0,9% lorsque le pH du sol diminue à 6,5. Cela peut s'expliquer par les activités microbiennes limitées dans des conditions de pH alcalines et acides. De plus, l'augmentation du pH du sol de 7,6 à 9,6 et 8,9 entraîne une augmentation du taux de séquestration du C de $30 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et $28 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ respectivement (tableau.7). De même, en diminuant le pH du sol de 5,3, le taux de séquestration du C augmente de $27 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$. Cependant, une diminution du pH du sol par rapport au niveau de référence à 6,5 a tendance de diminuer le taux de séquestration du C de $87 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$.

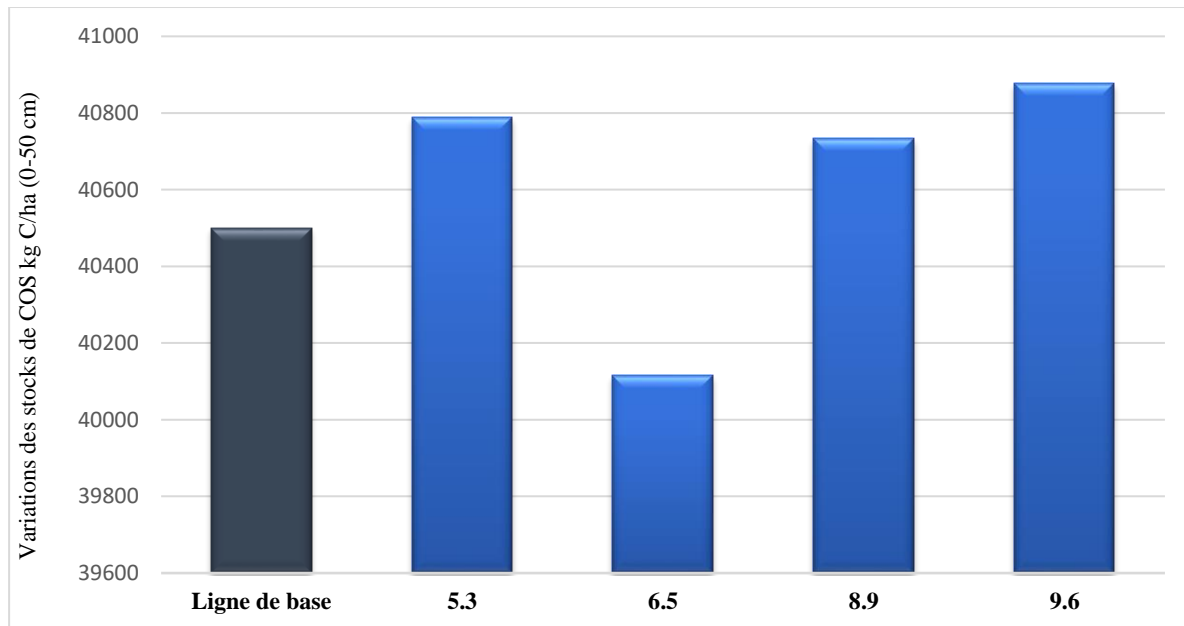


Figure 32: Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent pH du sol dans la station Merchouch

Le pH du sol est identifié dans cette étude, comme étant le paramètre le moins sensible parmi les facteurs testés. Ces résultats sont en accord avec d'autres études [208]–[210]. Les sols dont le pH est alcalin produisent un environnement défavorable à la croissance microbienne [52], [192], ce qui favorise la séquestration du COS. De plus, les micro-organismes ont des difficultés à survivre et à se développer dans des conditions de pH de sol acide, ce qui représente un environnement antipathique [49]. D'autre part, une valeur de pH presque neutre pour les sols fournit un environnement de vie favorable pour les communautés de microbes, qui accélèrent la décomposition du COS, ce qui entraîne un faible taux de séquestration du carbone [97].

3.2 Effets des scénarios climatiques sur les stocks de COS

Les précipitations et la température sont des déterminants clés de la décomposition du COS [41], [211], [212]. Quatre scénarios alternative du T ont été exécutés pour le site sélectionné à Merchouch pendant neuf ans. L'indice de sensibilité présenté dans le tableau 7 indiquait une corrélation négative entre COS et la T, et positive avec les P. Les résultats de notre modèle ont révélé que le COS était plus sensible à T que P dans la station Merchouch.

3.2.1 Effets de la température sur les stocks de COS

Les résultats de la simulation ont montré que les changements des moyens de COS sur 9 ans augmenteraient de 1 % et 3,4 % et diminueraient de 1,3 % et 4 % en diminuant et en augmentant la T de 2 °C et 4 °C respectivement (figure. 33). Nos simulations ont montré également que le taux de séquestration du C était plus lent sous une T plus élevée dans ce site d'étude. En détail, augmenter la T de l'air de 2 °C et 4 °C par rapport à la ligne de base, diminue le taux de séquestration du C de 99 kg C ha⁻¹ an⁻¹ et 93 kg C ha⁻¹ an⁻¹ respectivement (figure. 34). En revanche, le taux de séquestration du C a augmenté de 39 kg C ha⁻¹ an⁻¹ et de 161 kg C ha⁻¹ an⁻¹ lorsque la T diminuait respectivement de 2 °C et 4 °C.

La perte de COS sous une température élevée peut être expliquée par plusieurs mécanismes candidats. D'une part, les activités microbiennes sont denses sous une température élevée du sol, ce qui conduit à une accélération du taux de décomposition du COS [213]–[217]. D'autre part, la respiration élevée du sol, positivement corrélée à l'augmentation de la température, diminue l'accumulation du COS, en particulier dans les environnements semi-arides [218]. Des études à l'échelle mondiale ont également révélé que les fonctions et les activités des micro-organismes, y compris la respiration, la croissance et l'absorption du substrat, dépendent fortement des variations de température [219]–[221]. Certaines études quantitatives ont également indiqué que dans des conditions de réchauffement, la décomposition du COS est principalement contrôlée par les changements structurels et fonctionnels de la communauté microbienne [222]. Une autre étude [214] a évalué qu'une augmentation de la température de l'air causerait effectivement une perte de COS, ce qui confirme nos résultats.

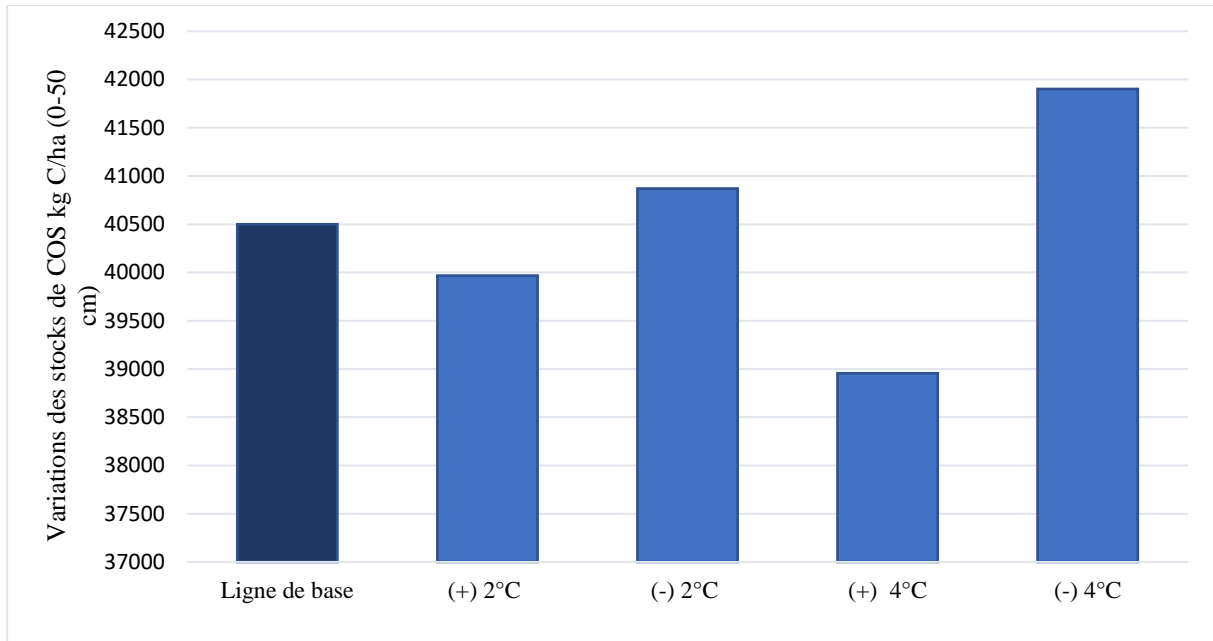


Figure 33: Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différents scénarios de température dans la station Merchouch

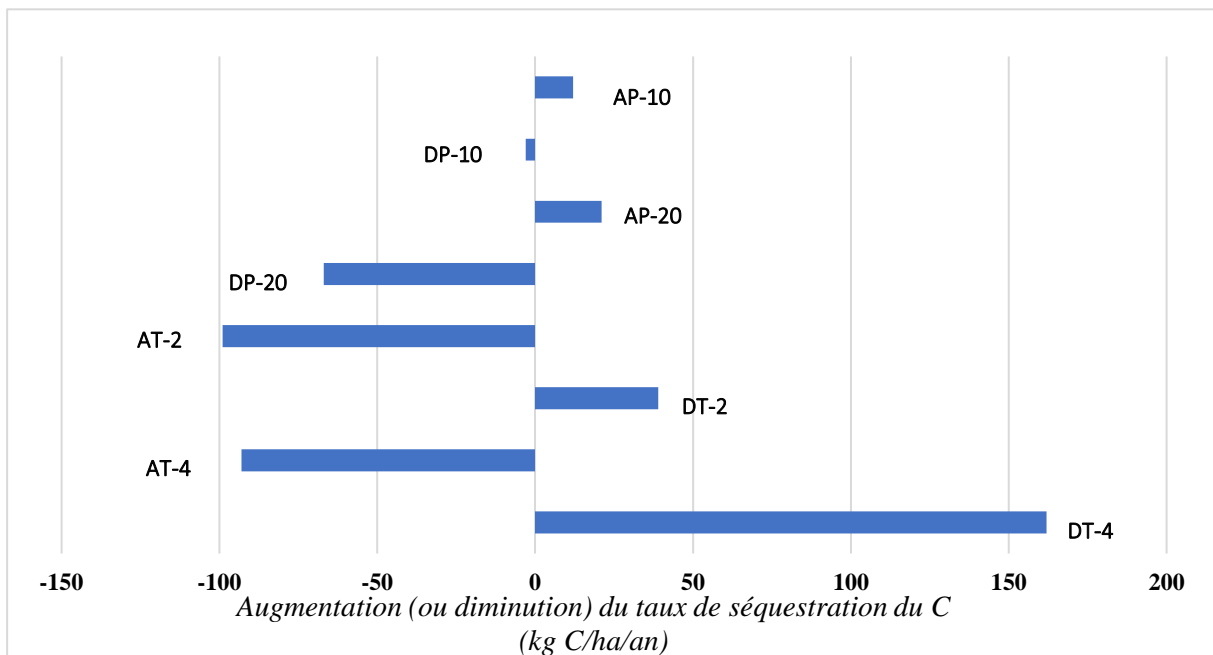


Figure 34: Augmentation (ou diminution) du taux de séquestration du C sous différents scénarios climatiques dans le site de Merchouch : AP-10, AP-20, DP-10 et DP-20 – Augmentation et diminution des précipitations par 10% et 20%, respectivement; AT-2, AT-4, DT-2 et DT-4 – Augmentation et diminution de la température par 2 °C et 4 °C, respectivement.

3.2.2 Effets des précipitations sur les stocks de COS

De même, quatre scénarios ont été définis pour P en considérant un pourcentage de diminution ou d'augmentation de 10 % et 20 % pour chaque événement pluvieux au pas de temps quotidien. D'une part, nos résultats modélisés indiquent qu'une augmentation des précipitations de 10 % et 20 % par rapport à la ligne de base augmenterait le stock de COS de 0,1 % et 0,5 % respectivement (figure. 35). D'autre part, une diminution de P de 10 % et 20 % diminue le stock de COS de 0,1 % et 1,4 % respectivement. De plus, la différence de taux de séquestration de C entre les scénarios de référence et alternatifs pour le P varierait de $-67 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ à $21 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (figure. 34). Ce résultat a souligné l'importance du climat sur l'accumulation de COS.

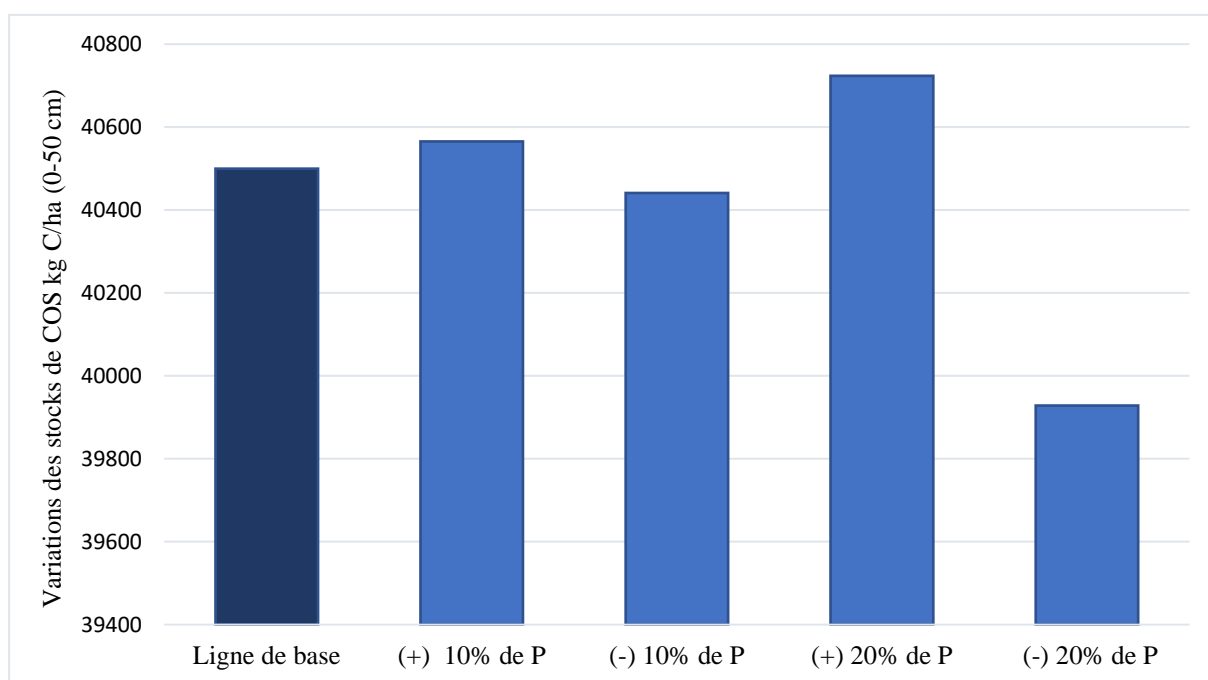


Figure 35: Variations des moyens de COS simulés sur 9 ans sous différent scénario de précipitation dans la station Merchouch.

Dans les régions agricoles semi-arides où les cultures pluviales dominent, les changements dans les modèles de précipitation ont une influence potentielle sur le contenu du COS et sa dynamique [218]. Nos résultats ont montré que la température était plus sensible que les

précipitations sur le site étudié ; cependant, l'impact des précipitations sur le COS ne peut être ignoré. Il est connu que les précipitations sont l'un des facteurs les plus importants contrôlant le cycle du COS [223]. En revanche, la perte de COS est possible en raison de la réduction de l'humidité du sol due à une diminution des précipitations. Cette constatation est cohérente avec d'autres études [209], [224]–[226], qui ont révélé que le taux de séquestration du C augmente avec les précipitations. D'une part, l'accumulation de COS peut être affectée par l'humidité du sol en influençant la quantité de C apportée par les plantes aux sols, ainsi que le taux de décomposition de ces apports de C [227]. D'autre part, la disponibilité de l'eau et sa distribution spatiale dans la matrice du sol peuvent affecter l'accessibilité spatiale et la dégradabilité du COS pour les décomposeurs, et ensuite changer le processus de décomposition du COS [228]. De nombreuses études antérieures de modélisation ont établi une relation entre l'accumulation de COS et l'humidité du sol, en accord avec nos résultats. Par exemple, [229] et [230] ont souligné que la densité de carbone du sol augmente en raison de l'amélioration de la production agricole dans les systèmes de culture pluviale caractérisés par une humidité élevée du sol. De même, Zhang et al. [198] ont indiqué que l'accumulation du COS devrait être plus lente dans les zones à forte demande en eau souterraine exploitée. De même, [231] ont obtenu les mêmes résultats en utilisant le modèle DNDC. Des études antérieures menées dans des régions présentant des conditions environnementales similaires à celles de notre zone d'étude, ont prouvé qu'une moindre disponibilité de l'eau due à des périodes de sécheresse dans les régions semi-arides limite l'augmentation des apports de carbone, et conduit donc à l'épuisement du COS [218], [232], [233].

Cependant, les résultats de l'étude actuelle ne confirment pas certaines recherches antérieures. Peinetti et al. [234] ont montré que l'excès d'eau provenant de fortes précipitations entraîne le lessivage de l'azote de la couche supérieure du sol vers les couches plus profondes, et diminue

ainsi la biomasse des cultures. Par conséquent, les faibles retours au sol des résidus de culture diminuent les stocks de COS. Notre résultat est également contraire à celui de Meier et al. [34], qui ont trouvé que le COS diminue continuellement avec des précipitations annuelles élevées (>900 mm par an) par rapport aux faibles précipitations (<600 mm par an).

3.3 Scénarios alternatifs combinés de l'augmentation de la température et des précipitations

3.3.1 Scénarios A et B : T2A1 et T2A2

Selon les simulations, les changements annuels moyens du COS montrent des réponses différentes au scénarios alternatifs combinés. Sous les scénarios A (T2A1) et B (T2A2), les moyennes annuelles des stocks du COS augmenteraient de 0.07% et 0.4% par rapport au scénario individuel T2, et diminueraient de 1.3% et 1.4 par rapport aux scénarios individuels A1 et A2 respectivement (figures. 36 et 37). De même, sous les scénarios A et B le taux de séquestration du C a augmenté de 1 kg C/ha/an et 15 kg C/ha/an par rapport à T2 et diminué de 77 kg C/ha/an et de 83 kg C/ha/an par rapport aux A1 et A2 respectivement (tableau 10).

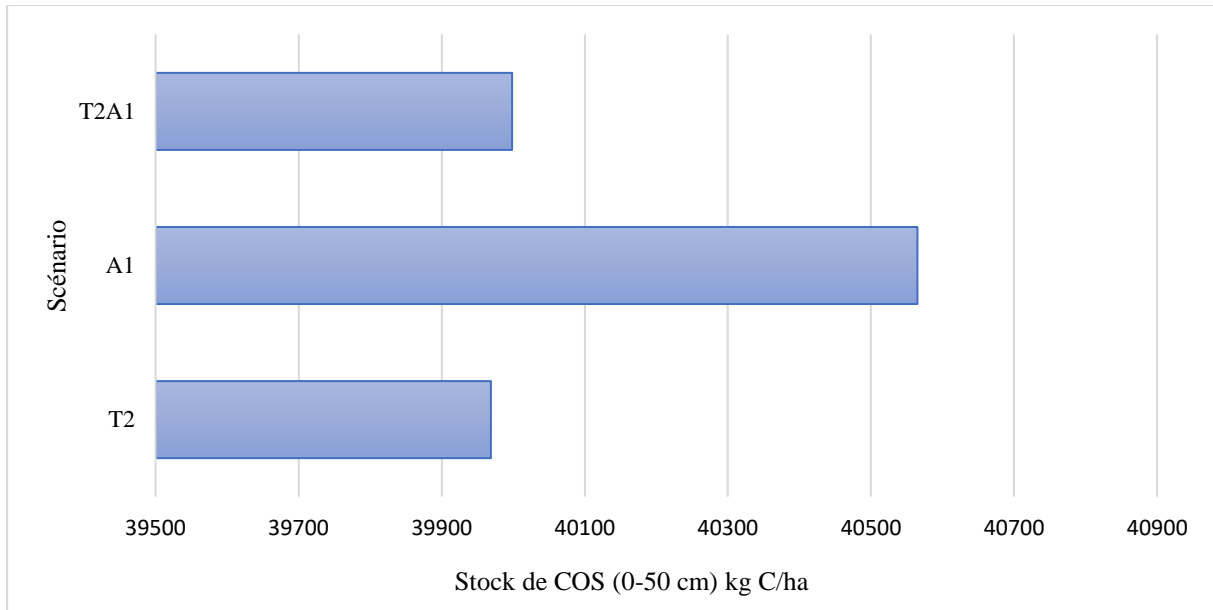


Figure 36: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scénario combiné T2A1 (augmentation de la température de 2°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 %) et les scénarios individuels T2 et A1 dans la station Merchouch.

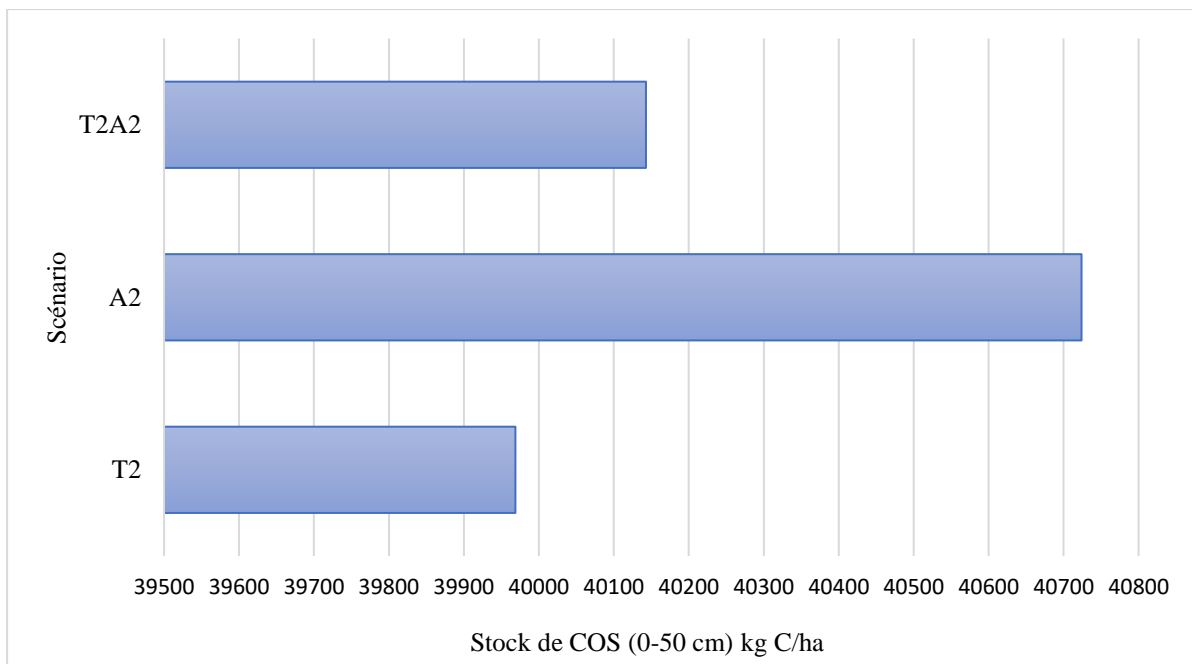


Figure 37: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scénario combiné T2A2 (augmentation de la température de 2°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 %) et les scénarios individuels T2 et A2 dans la station Merchouch.

Tableau 10: Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C des scénarios combinés T2A1 et T2A2 par rapport au scénarios individuels T2 , A1 et A2.

Scénario	Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C (kg C/ha/an)
T2A1/T2	1
T2A1/A1	-77
T2A2/T2	15
T2A2/A2	-83

3.3.2 Scénarios C et D : T4A1 et T4A2

Les résultats modélisés indiquent qu'une combinaison entre l'augmentation de la température de 4°C et des précipitations de 10% et 20% selon les scénarios C et D tend à augmenter légèrement les moyennes annuelles du COS de 0.01% et 0.05% par rapport au scénario T4, et les diminuer de 3% et 4% par rapport aux scénarios alternatifs individuels A1 et A2 respectivement (figures. 38 et 39). En revanche, le taux de séquestration du C a diminué de 21 kg C/ha/an et 28 kg C/ha/an par rapport aux T4, et de 93 kg C/ha/an et 119 kg C/ha/an par rapport aux A1 et A2 respectivement (tableau 11).

Nos résultats ont montré que le COS était plus sensible au changement de la température que les précipitations. Ces résultats sont cohérents avec les études précédentes [213], [215], [216], [235], dans lesquelles la température a joué un rôle majeur dans la réduction du COS. Un grand nombre d'études montre que les activités et les processus microbiennes, par exemple l'absorption du substrat, la croissance et la respiration, dépendent de la température [37], [236]. D'une autre part, plusieurs études précédentes [209], [224]–[226], attestent que le taux de séquestration du carbone augmente avec l'augmentation des précipitations. Cependant, nos simulations montrent que le taux de séquestration du C a été augmenté sous les scénarios combinés (T2A1, T4A1, T2A2 et T4A2) par rapport au scénarios individuels de température (T2 et T4) et diminué par rapport au scénarios individuels des précipitations (A1 et A2) ce qui

confirme que la température joue toujours un rôle majeur dans la réduction du COS. Nos simulations sont conformes à ceux obtenus par Luo et al. [237]. Ces chercheurs ont modélisé les effets interactifs des précipitations et de la température sur la dynamique du COS des écosystèmes et ont montré que le réchauffement et l'augmentation des précipitations ont généralement des effets positifs sur les stocks du COS par rapport au scénarios individuels de l'augmentation de la température. Nos résultats suggèrent que le taux de séquestration du C est plus lent lorsque les températures sont élevées dans cette région. Néanmoins, il est important de noter que le sol du site étudié est continué à être un puits pour le CO₂ atmosphérique avec l'augmentation des précipitations de 10% et 20%, même si la T a augmenté de 2 °C et 4°C.

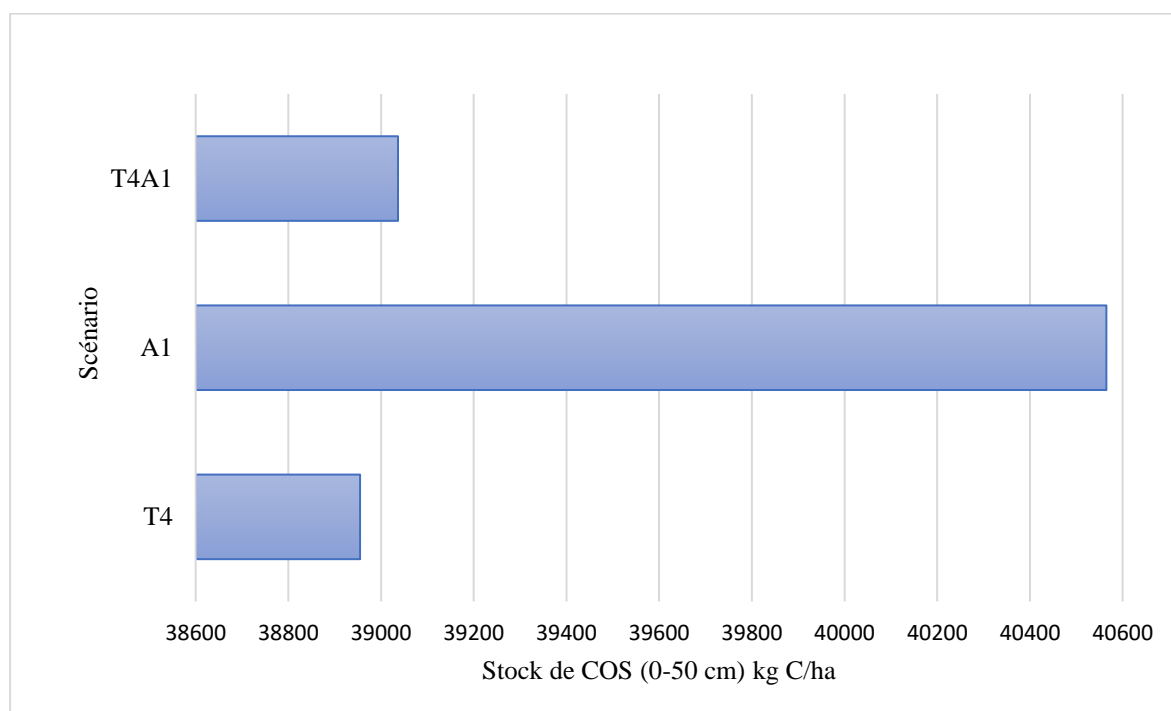


Figure 38: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scénario combiné T4A1 (augmentation de la température de 4°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 %) et les scénarios individuels T4 et A1 dans la station Merchouch

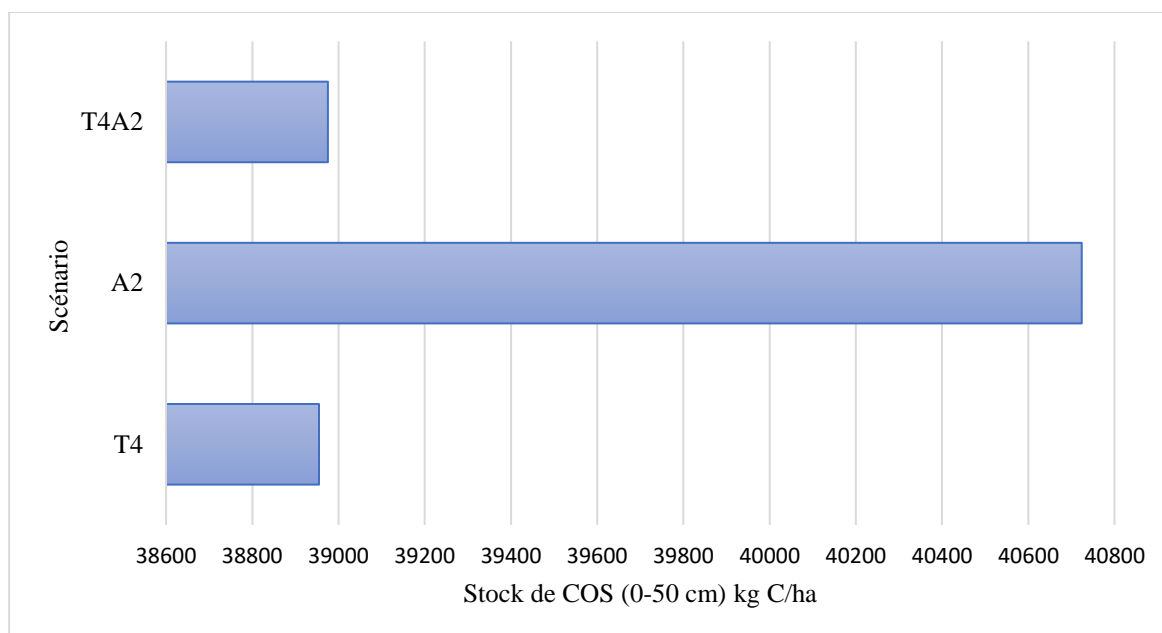


Figure 39: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scénario combiné T4A2 (augmentation de la température de 4°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 %) et les scénarios individuels T4 et A2 dans la station Merchouch.

Tableau 11: Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C des scénarios combinés T4A1 et T4A2 par rapport au scénarios individuels T4, A1 et A2.

Scénario	Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C (kg C/ha/an)
T4A1/T4	-21
T4A1/A1	-93
T4A2/T4	-28
T4A2/A2	-119

3.4 Scénarios alternatives combinés de l'augmentation de la température et diminution des précipitations

3.4.1 Scénarios A et B : T2D1 et T2D2

En faisant augmenter la température de 2°C et diminuer les précipitation de 10% et 20%, nous avons créé deux scénarios alternatifs combinés dont le but de tester leurs impacts sur les changements des stocks du COS par rapport au scénarios individuels. Comme indiqué dans les figures. 40 et 41, les stocks du COS étaient inférieurs de 0.2 % et 2 % sous les scénarios C

(T4D1) et D (T4D2) par rapport à l'effet individuel de la température selon le scénario T2, de même diminuent de 1.3% et 4% par rapport aux scénarios individuels de précipitation D1 et D2 respectivement. Une diminution du taux de séquestration du C varie entre 9 kg C/ha/an et 110 kg C/ha/an sous les scénarios combinés A et B par rapport au T2, D1, et D2 (tableau 12) respectivement.

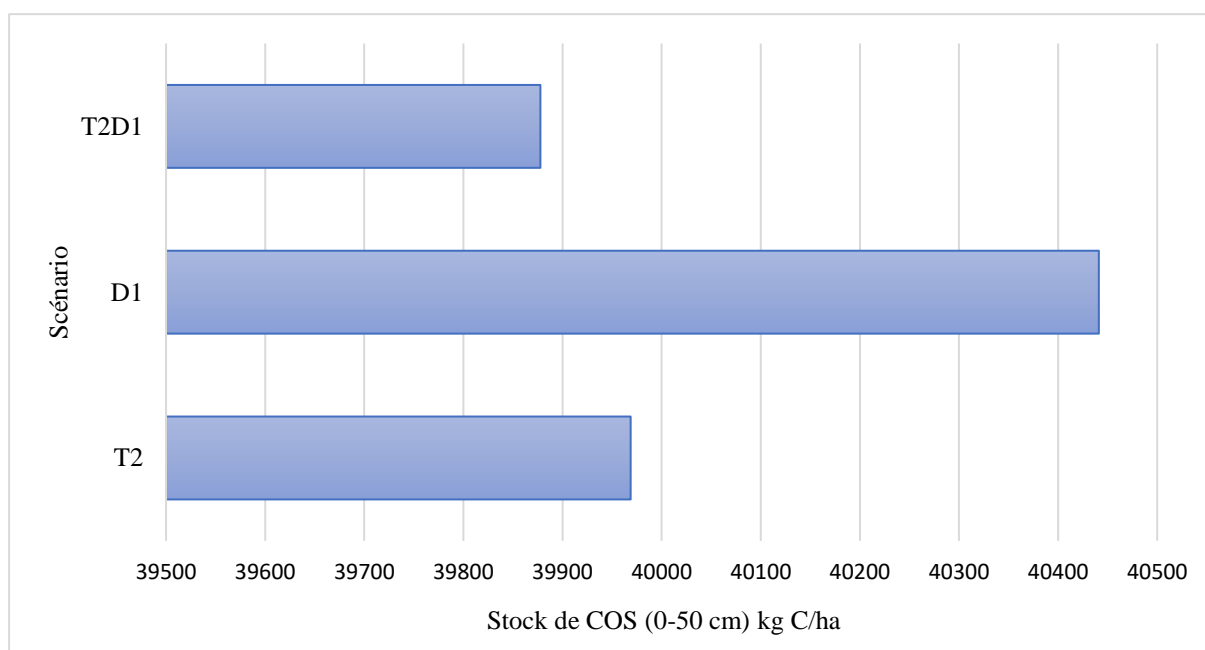


Figure 40: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scénario combiné T2D1 (augmentation de la température de 2°C et simultanément diminuer la quantité de précipitations de 10 %) et les scénarios individuels T2 et D1 dans la station Merchouch.

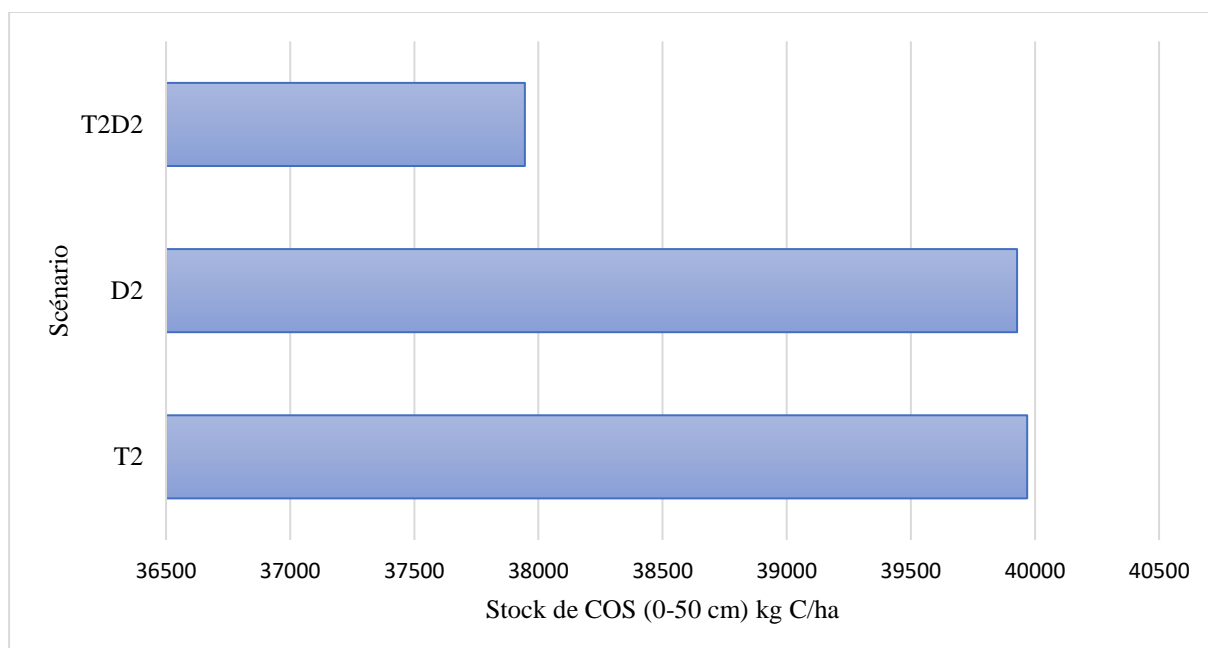


Figure 41: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scénario combiné T2D2 (augmentation de la température de 2°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 %) et les scénarios individuels T2 et D2 dans la station Merchouch.

Tableau 12: Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C des scénarios combinés T2D1 et T2D2 par rapport au scénarios individuels T2, D1 et D2.

Scénario	Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C (kg C/ha/an)
T2D1/T2	-9
T2D1/D1	-104
T2D2/T2	-78
T2D2/D2	-110

3.4.2 Scénarios C et D: T4D1 et T4D2

Nos résultats indiquent qu'une combinaison de l'augmentation de température de 4°C et diminution des précipitations selon les scénarios C (T4D1) et D (T4D2) à tendance de diminuer les stocks du COS de 0.7% et 3% par rapport à T4, et de 4% et 5% par rapport aux scénarios D1 et D2 respectivement (figures. 42 et 43). Le taux de séquestration du C induite par les effets combinés de l'augmentation de température et la diminution des précipitations par 10% et 20%

était inférieure de leurs effets individuels. En détails, une diminution des taux de séquestration du C variait de 37 kg C/ha/an à 131 kg C/ha/an sous les scénarios C et D par rapport à T4 , D1 et D2 (Tableau 13). Cette constatation est cohérente avec d'autres études [176], [213], [238] qui ont révélé que les stocks du COS sous les scénarios combinés de l'augmentation de la température et diminution des précipitations est inférieure par rapport aux stocks sous les scénarios individuels de température et précipitations. De même, Luo et al. [237] ont modélisé les effets interactifs des précipitations et de la température sur le changements des stocks du COS et ont montré que le réchauffement et la diminution des taux des précipitations ont généralement des effets négatives sur les stocks du C. Ces résultats ont été observé parce que les effets du réchauffement et des changements des précipitations sur la température et l'humidité du sol ne sont pas indépendants, mais présentent plutôt des effets interactifs [238]. D'une autre part, autres études antérieures qui ont simulé à la fois les effets interactifs de la température et précipitations [213], [237], [239], ont montré que les réponses de l'écosystème à la combinaison du réchauffement et de la modification des précipitations avaient tendance à être plus faibles que celles attendues à partir des réponses à un seul facteur.

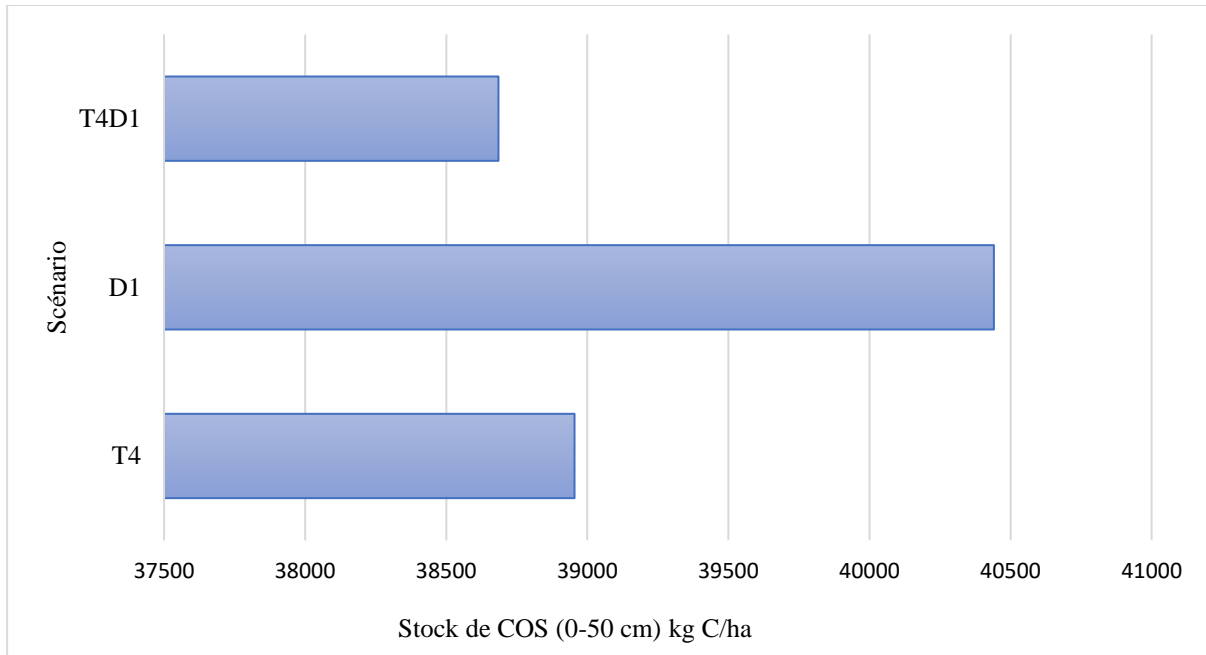


Figure 42: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scénario combiné T4D1 (augmentation de la température de 4°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 10 %) et les scénarios individuels T4 et D1 dans la station Merchouch

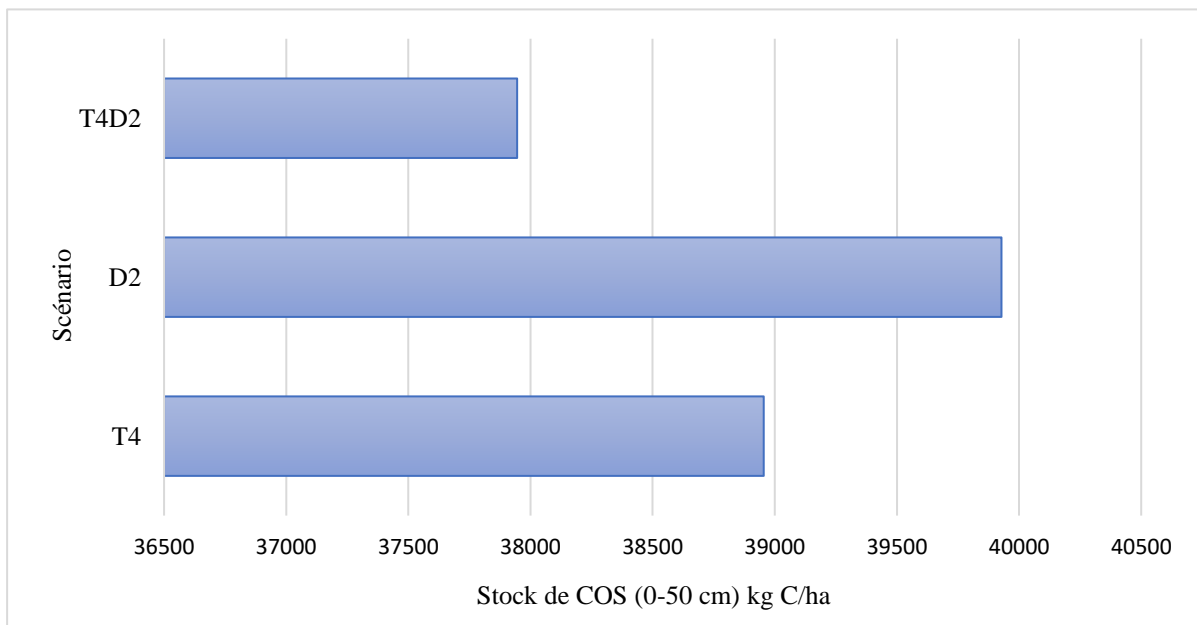


Figure 43: Moyennes annuelles des stocks du COS sous le scénario combiné T4D2 (augmentation de la température de 4°C et simultanément augmenter la quantité de précipitations de 20 %) et les scénarios individuels T4 et D2 dans la station Merchouch

Tableau 13: Augmentation ou diminution du taux de séquestration du C des scénarios combinés T4D1 et T4D2 par rapport au scénarios individuels T4, D1 et D2.

Scénario	Augmentation ou diminution du taux de séquestration du COS (kg C/ha/an)
T4D1/T4	-37
T4D1/D1	-123
T4D2/T4	-105
T4D2/D2	-131

4. Conclusion

Une analyse de sensibilité au sein du DNDC a été réalisée, avec la priorité de chaque paramètre d'entrée séparément, afin d'identifier les paramètres les plus impactant sur la dynamique du COS. L'utilisation efficace de cette analyse de sensibilité peut donner un aperçu de la qualité de la prédiction du modèle. Les simulations ont montré que la température est le paramètre le plus influent pour simuler les changements de COS dans le DNDC. La séquestration du C était importante pendant les années simulées où les températures étaient faibles, et vice versa. En outre, diverses propriétés variables du sol jouent également un rôle crucial dans la séquestration du carbone. Le COS initial et la teneur en argile peuvent être considérés comme des facteurs sensibles dans les paramètres des propriétés du sol après la température dans les facteurs climatiques. Cependant, le pH du sol est moins sensible au COS modélisé. Grâce à l'analyse de sensibilité, des politiques plus scientifiques et des mesures raisonnables pourraient être appliquées pour une séquestration efficace du carbone, afin d'atténuer l'effet négatif de plusieurs scénarios. La présente étude représente les changements modélisés du COS qui sont attribuables à chaque paramètre d'entrée séparément.

Les simulations du modèle ont également indiqué que les effets combinés de l'augmentation de la température de l'air et le changement simultanée des précipitations sont inférieurs à leurs

effets individuels sur le taux de séquestration du C (sauf pour les scénarios combinés T1A1 et T4A2 par rapport aux scénarios individuels T2 et T4). L'étude fournit des scénarios possibles de séquestration du C dans le sol dans la région, ce qui améliore la compréhension du devenir du COS dans le contexte du changement climatique.

Conclusion générale et perspectives

1. Conclusions

Pour cette thèse de doctorat, trois objectifs principaux ont été développés. Le premier objectif était d'évaluer les performances du modèle DNDC, proposer des pratiques agricoles alternatives et analyser leurs effets sur la dynamique des stocks du COS par rapport aux conditions réelles. Le deuxième objectif était d'évaluer la sensibilité du COS simulé en utilisant plusieurs paramètres d'entrée, notamment la température, les précipitations, la teneur en argile, le pH du sol et le COS initial dans le modèle DNDC, et ainsi identifier les principaux facteurs qui affectent le COS au cours des neuf années simulées, révélant ainsi des scénarios de séquestration du COS. Le troisième objectif était de quantifier l'effet combiné des facteurs climatiques les plus critiques (température et précipitation) sur la séquestration du COS, et qui agissent collectivement, simultanément et de manière non linéaire, pour affecter le COS.

Des conclusions spécifiques concernant les résultats des différentes parties de cette étude sont résumées ci-dessous :

- i) Le modèle DNDC a été exécuté en premier sous une ligne de base (conditions réelles) en fonction du climat local, des propriétés du sol et des gestions agricoles adoptés sous deux types de travail du sol dans le site étudié. La performance du modèle DNDC a été vérifié et validé en utilisant des données historiques s'étalant sur 9 années (de 2008 à 2016). Cette étape de validation du modèle est essentielle pour vérifier que le modèle simule correctement les processus sous-jacents. Pour ce faire, deux indicateurs statistiques ont été utilisés: l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de corrélation de Pearson (r). Les résultats montrent un r élevé et une RMSE basse entre

les valeurs mesurées et modélisées et confirment que les prédictions du modèle avaient un bon niveau de précision.

- ii) Les scénarios de gestion des pratiques agricoles alternatives testées consistent en des changements dans les taux de résidus de récolte retournés à la surface et d'application de fumier des engrais azotés en considérant les deux pratiques de travail du sol semis conventionnel (SC) et semis direct (SD). Selon les résultats des simulations, les stocks de COS augmentent successivement pendant 9 ans sous l'effet des pratiques agricoles alternatives de résidus de culture et de fumier pour les deux modes de labour SC et SD. Notre étude montre que ce type de pratiques agricoles peuvent aussi freiner le déclin du COS et le préserver de manière durable, en particulier dans les régions semi-arides. Par ailleurs, nos résultats montrent que la station de Merchouch a déjà atteint un bon niveau d'engrais azoté et, par conséquent, toute modification de ces taux n'améliorera pas les potentiels de séquestration du C. De plus, toute augmentation dans les taux d'engrais azoté serait coûteuse, par rapport à leurs effets négligeables pour booster les stocks de COS.
- iii) Afin de réduire les incertitudes des paramètres du modèle DNDC et ainsi améliorer la précision des résultats de simulation, même après leur validation, une analyse de sensibilité a été conduite dont le but d'étudier la sensibilité des stocks du COS comme paramètre de sortie du modèle à certains paramètres d'entrée critiques, notamment la température, les précipitations, la teneur en argile, le pH du sol et le COS initial. Les résultats montrent que, la température de l'air et le COS initial ont eu un impact important sur l'accumulation du COS.

L'analyse de sensibilité menée dans cette étude par le modèle DNDC confirme scientifiquement les incertitudes des variables d'entrée sélectionnées qui peuvent conduire à des incertitudes sur le COS dans le site d'étude.

- iv) La température et les précipitations influencent simultanément le COS dans les agroécosystèmes. Si les impacts individuels de ces paramètres ont été largement étudiés, leurs effets combinés restent mal connus. Dans cette recherche, nous avons quantifié l'influence combinée de la température et des précipitations sur le COS dans la station de Merchouch. Cette quantification a toujours été réalisée par approche de modélisation en utilisant le modèle DNDC (version 9.5) avec une base de données bien détaillée pour le site étudié. Les scénarios alternatifs combinés combinent l'augmentation de la température (T) et les changements dans les précipitations (P) .

Les résultats obtenus montrent que le taux de séquestration du C induit par les effets des scénarios climatiques combinés, où la température de l'air augmentait de 2 °C et 4°C et les précipitations diminuaient de 10% et 20%, était inférieure à leurs effets individuels. D'autre part, ces scénarios combinés tendent à augmenter légèrement les stocks du COS.

Notre analyse des effets combinés de T et P sur les changements de COS a suggéré que le réchauffement futur et les changements des précipitations pourraient entraîner une diminution de la séquestration de COS dans cette région. Pour cette raison, des décisions concernant la gestion des pratiques agricoles sont nécessaires pour contribuer à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique.

Ce résultat a souligné aussi l'importance de l'approche de modélisation afin de comprendre les subtilités du potentiel de séquestration du carbone dans les sols à l'échelle d'un site dans un climat changeant.

2. Limites de l'étude et perspectives

Cette étude contribue à la compréhension de l'effet des différents scénarios climatiques, propriétés du sol, et pratiques agricoles sur la dynamique du COS, et peut être utile pour les scientifiques et les décideurs politiques, qui sont intéressés par des régions avec des conditions environnementales similaires à celles de Merchouch. Elle ouvre également de nouvelles perspectives pour l'utilisation de l'approche de modélisation pour l'identification des scénarios alternatifs de séquestration du carbone dans le sol. Elle ouvre également la voie à l'analyse des impacts du changement climatique sur la séquestration du C dans les sols agricoles.

Comme déjà mentionné à plusieurs reprises, la modélisation de la dynamique du COS est toujours un problème compliqué avec une disponibilité limitée des données, en particulier lors de l'utilisation d'un modèle hautement paramétré comme le modèle DNDC. La combinaison de ces deux facteurs ne peut que donner des résultats discutables. Parmi les limites de cette recherche, la plus importante était l'insuffisance des données des teneurs en COS dans les autres sites, qui permet de vérifier la performance et l'acceptabilité des résultats du modèle DNDC, ainsi que l'absence de plusieurs données auxiliaires telles que les données climatiques, du sol, et itinéraires des pratiques agricoles. Il faut également noter que ce manque de données oblige les chercheurs à utiliser certaines données alternatives, ce qui peut affecter tous les résultats des processus de la biogéochimie du carbone du modèle.

À cause des contraintes liées au manque de données, notre étude a été limitée à un seul site, Merchouch, une région semi-aride au Maroc. De plus, l'absence de certaines études antérieures a limité la possibilité de discuter des résultats relatifs aux effets combinés des précipitations et de la température sur les stocks du COS.

Au terme de cette étude, plusieurs pistes de recherche s'ouvrent et offrent des perspectives à plusieurs niveaux :

- i) La qualité et la disponibilité des données d'entrée ont prouvé leur efficacité pour valider un modèle. Il paraîtrait intéressant alors d'établir des bases de données bien détaillées au centres de recherche qui peut contenir des informations sur plusieurs sites de recherche, ayant différentes conditions climatiques et types de sol, et d'installer plus de stations météorologiques pour surveiller les paramètres climatiques (précipitations, température, etc..).
- ii) Il serait aussi pertinent d'effectuer des mesures des teneurs en COS régulièrement chaque année pour toutes les stations de recherche afin de pouvoir exécuter le modèle, vérifier leur performance, et le valider dans plusieurs régions marocaines .
- iii) Modéliser l'effet d'autres pratiques alternatives de gestion agricole dans plusieurs conditions climatiques, types du sol et sous différentes cultures, pour réduire l'épuisement des stocks du COS afin de planifier et mettre en œuvre avec succès des pratiques appropriées de séquestration du COS, et ainsi contribuer à la conservation des sols pour s'adapter aux changements climatiques et atténuer les impacts environnementaux négatifs.
- iv) Simuler les changements des stocks du COS sous des pratiques de gestion agricole bénéfiques dans des scénarios climatiques futurs afin d'identifier l'effet de ces gestions sur l'amélioration de la capacité du sol à séquestrer plus de COS dans le contexte du changement climatique.

ANNEXES

Annexe A : Mesure de la granulométrie

1. Peser dans un erlen-meyer de 500ml une prise d'essais (10g) du sol (tamisé à 2mm).
2. Ajouter le volume nécessaire d'une solution d'acide chlorhydrique 3N pour attaquer le calcaire présent dans la prise d'essais :
3. $V = (\%CaCO_3 * p/15) + 5mL$ soit $V = (\%CaCO_3 * 0.67) + 5mL$ pour $p = 10g$
4. laisser agir ; en agitant de temps en temps ; pendant une heure.
5. Remplir l'erlen -meyer avec de l'eau distillée, laisser décanté et siphonner.
6. ajouter 20 ml d'eau oxygénée (50%) (ou 35 ml du 30%) agiter et laisser agir une nuit.
7. Chauffer ; en agitant énergiquement de temps en temps (mais sans porter à ébullition) jusqu' à arrêt de la réaction (environ entre 1 heure et 2 heures).
8. Ajouter si c'est nécessaire 2ml ml d'eau oxygénée 50%. (ou 5 ml du 30%)
9. Répéter l'addition d'eau oxygénée jusqu'à fin de la réaction (1/2 heure minimum entre deux répétitions).
À la fin de la réaction, la couleur de la solution doit être claire et le surnageant doit être limpide.
10. Porter à ébullition pendant 10 minutes.
11. Le lavage des sels solubles se fait soit par siphonage soit par filtration

Le siphonage : Remplir l'erlen avec l'eau distillée ; laisser décanter et siphonner le surnageant, ajouter une demi cuillerée de KCL et remplir jusqu'à 200 ml (laver bien les bords intérieurs et extérieurs de l'erlen) bien agiter et remplir à 300 ml; laisser décanter et siphonner le surnageant (répéter le lavage avec l'eau distillée jusqu'à ce que les particules du sol reste en suspension au moins une heure après l'ajout de l'eau distillée et l'agitation. Ajouter 12.5ml du pyrophosphate du sodium (50g/ L) ; fermer l'erlen à

l'aide d'un bouchon en caoutchouc ; agiter énergiquement à la main 20 fois ; transvaser dans une éprouvette de 500ml et remplir avec l'eau distillée jusqu'à 480ml.

La filtration :

1. Transvaser le contenu de l'eren dans Buchner muni d'un filtre posé sur une fiole à vide liée à une pompe à vide , laver 2 fois par 25 ml d'eau distillée une fois par KCl (50g/L) et trois fois par 25 ml d'eau distillée (vérifier à l'aide d'un papier pH (la solution doit être neutre) et la présence du chlorure par le nitrate d'argent). Transvaser le contenu du Buchner dans une bouteille en polyéthylène (Ne dépasser pas 350 ml) et agiter 30 minutes sur agitateur rotatif; transvaser dans une éprouvette de 500ml et remplir avec l'eau distillée jusqu'à 480ml.
12. Agiter par retournement ou à l'aide d'une baguette menée d'une rondelle en caoutchouc. (Juste à la fin de l'agitation, déclencher le chronomètre).
13. Effectuer une lecture avec densimètre boyocoss au bout de 6 min (**R1**) puis une 2^{ème} lecture après 5 heures (**R2**).
14. Laver sur tamis (diamètre = 0.05 mm).
15. Mettre le contenu du tamis dans une capsule.
16. Sécher a' l'étuve à 105 °c pendant une nuit.
17. Laisser refroidir et peser le contenu de la capsule (**ST**).
18. Passer sur tamis (diamètre = 0. 2 mm).
19. Peser le contenu du tamis (**SG**).

NB (Le calcaire total et l'humidité de l'échantillon doivent être mesurés).

Annexe B : Détermination de la matière organique et le carbone total

1. Réactifs :

- Bichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$ 1N
- Sel de Mohr, solution 0,5 N
- Acide sulfurique concentré p.a H_2SO_4
- Diphénylamine
- Acide phosphorique p.a H_3PO_4 85% ou fluorure de sodium NaF 3%

2. Matériel :

- Pipette graduée de 5ml
- Pipette jaugée de 50 ml
- Erlenmeyers de 250 ml
- Eprouvette graduée de 100 ml
- Fiole jaugée de 1000 ml
- Dessiccateur à chlorure de calcium ($CaCl_2$) ou à l'acide sulfurique (H_2SO_4)

3. Préparation des solutions

a) Bichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$ 1N

- Peser 49,035 g de bichromate de potassium p.a et dissoudre dans environ 800 ml d'E. distillée
- Jauger à 1000 ml avec de l'E. Distillée.

b) Sel de Mohr, solution 0,5 N

- Dissoudre 196,05 g de sel Mohr $SO_4Fe, SO_4(NH_4)_2, 6H_2O$
- Ajouter 20 ml de H_2SO_4 concentré et compléter à 1000 ml avec de l'E. distillée

c) Diphénylamine

- Dissoudre 0,5 g de diphénylamine dans 100 ml de H₂SO₄ concentré
- Verser avec précaution dans 20 ml d'E. distillée
- Conserver dans un flacon de verre brun.

d) Fluorure de sodium NaF 3%

- Dissoudre 3g de NaF dans 100 ml d'E. distillée.
- Bien homogénéiser.

e) Florure de sodium NaF 3%

- Dissoudre 3g de NaF dans 100 ml d'E. distillée.
- Bien homogénéiser.

4. Mode opératoire :

a) Extraction

- Peser (0,5g à 2g) de sol (ça dépend de la couleur du sol) broyé et tamisé à 0,2mm
- Introduire la prise du sol dans un erlenmeyer de 250 ml
- Ajouter 15 ml de bichromate de potassium 1N
- Agiter doucement
- Ajouter 20 ml de H₂SO₄ concentré en agitant doucement
- Laisser reposer une demi-heure
- Ajouter 115 ml d'E. distillée
- Bien homogénéiser et laisser reposer pendant 2 heures
- Prélever ensuite 50 ml (pipette de 50 ml) de solution surnageante dans un erlenmeyer de 250 ml
- Ajouter 5 ml de H₃PO₄ concentré ou bien 5 ml de NaF 3%
- Ajouter 3 à 4 gouttes de diphénylamine

- Titrer ensuite l'excès de bichromate par la solution de sel de Mohr. La couleur passe du bleu foncé au vert claire

N.B : Effectuer un témoin (sans sol) dans les mêmes conditions :

- 15 ml de bichromate de potassium ;
- 20 ml de H₂SO₄ concentré ;
- 115 ml d'eau distillée
 - ✓ Prélever 50 ml de la solution
 - ✓ ajouter 5 ml de H₃PO₄ concentré ou bien 5 ml de NaF 3%
 - ✓ Ajouter 3 à 4 gouttes de diphénylamine
 - ✓ Titrer par la solution de sel de Mohr jusqu'au virage de couleur du bleu foncé au vert claire.

1. Calcul et expression des résultats

- Considérant que 1 ml de dichromate de potassium 1 N = 4 mg de carbone

$$\% C = \frac{\text{ml de dichromate potassium 1 N en excès } 0,004 \times 100}{\text{Poids du sol (g)}}$$

- Considérant que la matière organique (M. O.) = C × 1,724

$$\% M.O = \frac{\text{ml de dichromate potassium 1 N en excès } 0,0069 \times 100}{\text{Poids du sol (g)}}$$

où ml de dichromate en excès = ml de sulfate ferreux utilisé comme témoin –
ml de sulfate ferreux utilisé comme échantillon

Remarque :

Si après addition du bichromate et de l'acide sulfurique la solution devient directement verte, il faut prendre une prise de sol plus faible.

Annexe C : Analyse du pH dans le sol

I. Réactifs :

- Chlorure de potassium KCl
- Eau distillée
- Solutions tampons de pH = 4,0 et de pH = 7,0 : préparées à partir d'un titrisol.

II. Matériel :

- pH-mètre
- Bêchers en polyéthylène de 100 ml
- Agitateur magnétique non chauffant

III. Mode opératoire :

- Allumer le pH-mètre
- Régler le zéro mécanique de l'appareil avant la mesure
- Faire l'étalonnage des électrodes à l'aide des solutions tampons, à pH=4,0 et à pH=7,0.
- Appuyer sur le bouton 0,00/0,000 si la lecture s'affiche de trois chiffres après la virgule.

1. pH dans l'eau :

- Peser 20 g de sol tamisé à 2,0 mm dans un bêcher de polyéthylène de 100 ml.
- Ajouter 50ml d'eau distillée
- Bien remuer la suspension
- Laisser en contact pendant 16 heures

- Passer au pH-mètre et faire la lecture

2. pH dans KCl :

- Ajouter dans la suspension du sol (après la détermination du pH dans l'eau), environ 3,80g de KCl en poudre.

- Agiter quelques instants par l'agitateur
- Faire la lecture au pH-mètre

Annexe D : Analyse du Phosphore assimilable (Méthode OLSEN)

I. Réactifs :

- Hydrogénocarbonate de sodium NaHCO_3 0,5 N à pH 8,5
- Charbon actif p.a, sans phosphore
- Molybdate d'ammonium p.a $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24},4\text{H}_2\text{O}$
- Acide sulfurique concentré p.a
- Acide ascorbique
- Phosphate monopotassique (KH_2PO_4) p.a.

II. Matériel :

- Flacons en polyéthylène de 250 ml
- Erlenmeyers de 100 ml
- Agitateur va et vient
- Entonnoirs en polypropylène de $\Phi 71$ mm
- Fioles jaugée de 25 ml
- Bain marie
- Pipettes jaugées de 5 ml
- Pipettes graduées de 10 ml
- Spectrocolorimètre

III. Préparation des solutions

a) Hydrogénocarbonate de sodium NaHCO_3 0,5N à pH 8,5

- Dissoudre 42g de NaHCO_3 p.a dans 900 ml d'E. Distillée
- Ajuster le pH à 8,5 avec NaOH 2,5N
- Compléter à 1000 ml avec de l'E. Distillée.

b) Solution sulfo-molybdique

- B1) Dissoudre 25g de Molybdate d'ammonium p.a dans 200 ml d'eau distillée chauffée à 60 °C. Filtrer si nécessaire.
- B2) Un volume de 280 ml de H₂SO₄ concentré p.a est dilué à 600 ml avec de l'eau distillée, les mettre à refroidir dans un bain d'eau (Lavabo du laboratoire).
- Verser lentement la solution B2(l'acide) dans la solution B1(l'eau). La solution finale est complétée à 1000 ml avec de l'eau distillée après refroidissement et gardée dans un flacon en verre brun.

c) Solution d'acide ascorbique à 1%

- Dissoudre 1g d'acide ascorbique p.a dans 100 ml d'E.distillée.

IV. Mode opératoire :

a) Extraction

- Peser 5g de sol broyé et tamisé à 2mm
- Ajouter 100 ml de NaHCO₃ 0,5 N à pH 8,5
- Ajouter 0,5 g de charbon actif (une demi-cuillère)
- Agiter sur agitateur va et vient pendant 1h à 140t/min
- Filtrer dans un erlenmeyer de 100 ml.

b) Dosage colorimétrique

- prélever 5ml de la solution d'extraction dans une fiole jaugée de 25 ml
- Ajouter 6 ml de solution sulfo-molybdique
- Bien agiter pour dégazer la solution
- Ajouter quelque ml d'E. distillée
- Ajouter 1ml d'acide Ascorbique à 1%
- Compléter à 25 ml avec l'E. distillée

- Placer les fioles jaugées au bain marie à 80°C pendant 15min
- Colorimétrer à 825 nm

Annexe E : Analyse du Potassium assimilable

V. Réactifs :

- Acétate d'ammonium $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1 N à pH 7
- Chlorure de potassium p.a

VI. Matériel :

- Flacons en polyéthylène de 250 ml
- Fioles jaugées de 100 ml
- Fiole jaugée de 1000 ml
- Agitateur va et vient
- Entonnoirs en polypropylène de $\Phi 71$ mm
- Photomètre à flamme
- Etuve
- Dessiccateur

VII. Préparation des solutions

d) Acétate d'ammonium $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1 N à pH 7

- Dissoudre 77 g d'acétate d'ammonium $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ p.a dans 900 ml d'E. Distillée
- Ajuster le pH avec CH_3COOH ou NH_4OH 1/2
- Compléter à 1000 ml avec de l'E. Distillée.

e) Solution mère de 100 méq/l de K

- Peser 7,455 g de chlorure de potassium KCl p.a
- La faire sécher à l'étuve à 105°C pendant 2h
- La faire refroidir en dessiccateur
- Le dissoudre dans l'eau distillée et la diluer à 1000 ml en fiole jaugée.

f) Solution standard de 10 méq/l de K

- Prélever 100 ml de la solution mère et la diluer à 1000 ml avec de l'E. distillée.

VIII. Mode opératoire :

c) Extraction

- Peser 2g de sol broyé et tamisé à 2mm dans le flacon en polyéthylène de 250 ml
- Ajouter 50 ml de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N
- Agiter sur agitateur va et vient pendant 1h
- Filtrer dans une fiole jaugée de 100 ml
- Passer la solution d'extraction au photomètre à flamme

Références

- [1] N. Akesbi, « La nouvelle stratégie agricole du Maroc annonce-t-elle l'insécurité alimentaire du pays ? », *Conflu. Mediterr.*, vol. 78, n° 3, p. 93-105, sept. 2011.
- [2] R. Mrabet, R. Moussadek, A. Fadlaoui, et E. van Ranst, « Conservation agriculture in dry areas of Morocco », *Field Crops Res.*, vol. 132, p. 84-94, juin 2012, doi: 10.1016/j.fcr.2011.11.017.
- [3] J. L. Sarmiento et M. Bender, « Carbon biogeochemistry and climate change », *Photosynth. Res.*, vol. 39, n° 3, p. 209-234, mars 1994, doi: 10.1007/BF00014585.
- [4] D. A. Martens, W. Emmerich, J. E. T. McLain, et T. N. Johnsen, « Atmospheric carbon mitigation potential of agricultural management in the southwestern USA », *Soil Tillage Res.*, vol. 83, n° 1, p. 95-119, août 2005, doi: 10.1016/j.still.2005.02.011.
- [5] E. Madejón, F. Moreno, J. M. Murillo, et F. Pelegrín, « Soil biochemical response to long-term conservation tillage under semi-arid Mediterranean conditions », *Soil Tillage Res.*, vol. 94, n° 2, p. 346-352, juin 2007, doi: 10.1016/j.still.2006.08.010.
- [6] S. Filahi, Y. Trambly, L. Mouhir, et E. P. Diaconescu, « Projected changes in temperature and precipitation indices in Morocco from high-resolution regional climate models », *Int. J. Climatol.*, vol. 37, n° 14, p. 4846-4863, 2017, doi: 10.1002/joc.5127.
- [7] V. Barbera, I. Poma, L. Gristina, A. Novara, et M. Egli, « Long-term cropping systems and tillage management effects on soil organic carbon stock and steady state level of C sequestration rates in a semiarid environment », *Land Degrad. Dev.*, vol. 23, n° 1, p. 82-91, 2012, doi: 10.1002/ldr.1055.
- [8] G. M. Kanyenji, W. Oluoch-Kosura, C. M. Onyango, et S. K. Ng'ang'a, « Prospects and constraints in smallholder farmers' adoption of multiple soil carbon enhancing practices in Western Kenya », *Heliyon*, vol. 6, n° 3, mars 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03226.
- [9] U. Franko, « Modelling approaches of soil organic matter turnover within the CANDY system », in *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, Berlin, Heidelberg, 1996, p. 247-254. doi: 10.1007/978-3-642-61094-3_18.
- [10] D. S. Jenkinson, « The turnover of organic carbon and nitrogen in the soil », *Philos. Trans. R. Soc. B-Biol. Sci.*, vol. 329, n° 1255, Art. n° 1255, 1990, doi: 10.1098/rstb.1990.0177.

- [11] W. J. Parton, « The CENTURY model », in *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, Berlin, Heidelberg, 1996, p. 283-291. doi: 10.1007/978-3-642-61094-3_23.
- [12] T. Mueller, L. S. Jensen, S. Hansen, et N. E. Nielsen, « Simulating soil carbon and nitrogen dynamics with the soil-plant-atmosphere system model DAISY », in *Evaluation of Soil Organic Matter Models*, Berlin, Heidelberg, 1996, p. 275-281. doi: 10.1007/978-3-642-61094-3_22.
- [13] C. Li, S. Frohling, et T. A. Frohling, « A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 2. Model applications », *J. Geophys. Res. Atmospheres*, vol. 97, n° D9, p. 9777-9783, 1992, doi: 10.1029/92JD00510.
- [14] J. a. E. Molina, C. E. Clapp, M. J. Shaffer, F. W. Chichester, et W. E. Larson, « NCSOIL, A Model of Nitrogen and Carbon Transformations in Soil: Description, Calibration, and Behavior », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 47, n° 1, p. 85-91, 1983, doi: 10.2136/sssaj1983.03615995004700010017x.
- [15] M. Hulme, R. Doherty, T. Ngara, M. New, et D. Lister, « African climate change: 1900-2100 », *Clim. Res.*, vol. 17, n° 2, p. 145-168, août 2001, doi: 10.3354/cr017145.
- [16] F. Driouech, « Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes », phd, 2010. Consulté le: 13 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00001300/>
- [17] A. Nefzi-Bouzidi, « Evaluation économique de l'impact du changement climatique sur l'agriculture : étude théorique et application au cas de la Tunisie », phdthesis, AgroParisTech, 2012. Consulté le: 13 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-01056525>
- [18] A. François, É. Gauché, et A. Génin, « L'adaptation des territoires aux changements climatiques dans l'Oriental marocain : la vulnérabilité entre action et perceptions », *VertigO - Rev. Électronique En Sci. Environ.*, n° Volume 16 Numéro 1, Art. n° Volume 16 Numéro 1, avr. 2016, doi: 10.4000/vertigo.17177.
- [19] E. G. Jobbágy et R. B. Jackson, « The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation », *Ecol. Appl.*, vol. 10, n° 2, p. 423-436, 2000, doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2.
- [20] L. B. Guo et R. M. Gifford, « Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis », *Glob. Change Biol.*, vol. 8, n° 4, p. 345-360, 2002, doi: 10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x.

- [21] M. U. F. Kirschbaum, « Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming? », *Biogeochemistry*, vol. 48, n° 1, p. 21-51, janv. 2000, doi: 10.1023/A:1006238902976.
- [22] E. A. Davidson et I. A. Janssens, « Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change », *Nature*, vol. 440, n° 7081, p. 165-173, mars 2006, doi: 10.1038/nature04514.
- [23] S. Trumbore, « Radiocarbon and Soil Carbon Dynamics », *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 37, n° 1, p. 47-66, 2009, doi: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124300.
- [24] S. Fontaine, S. Barot, P. Barré, N. Bdioui, B. Mary, et C. Rumpel, « Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply », *Nature*, vol. 450, n° 7167, p. 277-280, nov. 2007, doi: 10.1038/nature06275.
- [25] A. van der Wal et W. de Boer, « Dinner in the dark: Illuminating drivers of soil organic matter decomposition », *Soil Biol. Biochem.*, vol. 105, p. 45-48, 2017, doi: 10.1016/j.soilbio.2016.11.006.
- [26] C. Gougoulias, J. M. Clark, et L. J. Shaw, « The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems », *J. Sci. Food Agric.*, vol. 94, n° 12, p. 2362-2371, 2014, doi: 10.1002/jsfa.6577.
- [27] J. A. Baldock et J. O. Skjemstad, « Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack », *Org. Geochem.*, vol. 31, n° 7, p. 697-710, juill. 2000, doi: 10.1016/S0146-6380(00)00049-8.
- [28] K. R. Olson, S. A. Ebelhar, et J. M. Lang, « Cover Crop Effects on Crop Yields and Soil Organic Carbon Content », *Soil Sci.*, vol. 175, n° 2, p. 89-98, févr. 2010, doi: 10.1097/SS.0b013e3181cf7959.
- [29] J. Six, R. T. Conant, E. A. Paul, et K. Paustian, « Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils », *Plant Soil*, vol. 241, n° 2, p. 155-176, avr. 2002, doi: 10.1023/A:1016125726789.
- [30] J. Six, S. D. Frey, R. K. Thiet, et K. M. Batten, « Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 70, n° 2, p. 555-569, 2006, doi: 10.2136/sssaj2004.0347.
- [31] M. L. Jat *et al.*, « Carbon sequestration potential, challenges, and strategies towards climate action in smallholder agricultural systems of South Asia », *Crop Environ.*, vol. 1, n° 1, p. 86-101, mars 2022, doi: 10.1016/j.crope.2022.03.005.

- [32] V. Chaplot, B. Bouahom, et C. Valentin, « Soil organic carbon stocks in Laos: spatial variations and controlling factors », *Glob. Change Biol.*, vol. 16, n° 4, p. 1380-1393, 2010, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02013.x.
- [33] S. Doetterl *et al.*, « Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate », *Nat. Geosci.*, vol. 8, n° 10, p. 780-783, oct. 2015, doi: 10.1038/ngeo2516.
- [34] I. C. Meier et C. Leuschner, « Variation of soil and biomass carbon pools in beech forests across a precipitation gradient », *Glob. Change Biol.*, vol. 16, n° 3, p. 1035-1045, 2010, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02074.x.
- [35] D. Schimel *et al.*, « Contribution of Increasing CO₂ and Climate to Carbon Storage by Ecosystems in the United States », *Science*, vol. 287, n° 5460, p. 2004-2006, mars 2000, doi: 10.1126/science.287.5460.2004.
- [36] M. von Lützw et I. Kögel-Knabner, « Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition—what do we know? », *Biol. Fertil. Soils*, vol. 46, n° 1, p. 1-15, nov. 2009, doi: 10.1007/s00374-009-0413-8.
- [37] R. T. Conant *et al.*, « Temperature and soil organic matter decomposition rates – synthesis of current knowledge and a way forward », *Glob. Change Biol.*, vol. 17, n° 11, p. 3392-3404, 2011, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x.
- [38] S. Sleutel, S. De Neve, et G. Hofman, « Assessing causes of recent organic carbon losses from cropland soils by means of regional-scaled input balances for the case of Flanders (Belgium) », *Nutr. Cycl. Agroecosystems*, vol. 78, n° 3, p. 265-278, juill. 2007, doi: 10.1007/s10705-007-9090-x.
- [39] C. D. Koven, G. Hugelius, D. M. Lawrence, et W. R. Wieder, « Higher climatological temperature sensitivity of soil carbon in cold than warm climates », *Nat. Clim. Change*, vol. 7, n° 11, p. 817-822, nov. 2017, doi: 10.1038/nclimate3421.
- [40] T. W. Crowther *et al.*, « Quantifying global soil carbon losses in response to warming », *Nature*, vol. 540, n° 7631, Art. n° 7631, déc. 2016, doi: 10.1038/nature20150.
- [41] M. A. Gabarrón-Galeote, S. Trigalet, et B. van Wesemael, « Soil organic carbon evolution after land abandonment along a precipitation gradient in southern Spain. », *Agric. Ecosyst. Amp Environ.*, vol. 199, p. 114-123, 2015.
- [42] D. Gerten *et al.*, « Modelled effects of precipitation on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones », *Glob. Change Biol.*, vol. 14, n° 10, p. 2365-2379, 2008, doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01651.x.

- [43] S. Wang, M. Huang, X. Shao, R. A. Mickler, K. Li, et J. Ji, « Vertical Distribution of Soil Organic Carbon in China », *Environ. Manage.*, vol. 33, n° 1, p. S200-S209, juill. 2004, doi: 10.1007/s00267-003-9130-5.
- [44] D. E. Allen *et al.*, « What determines soil organic carbon stocks in the grazing lands of north-eastern Australia? », *Soil Res.*, vol. 51, n° 8, p. 695-706, déc. 2013, doi: 10.1071/SR13041.
- [45] E. Hobbey, B. Wilson, A. Wilkie, J. Gray, et T. Koen, « Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia », *Plant Soil*, vol. 390, n° 1, p. 111-127, mai 2015, doi: 10.1007/s11104-015-2380-1.
- [46] E. U. Hobbey, J. Baldock, et B. Wilson, « Environmental and human influences on organic carbon fractions down the soil profile », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 223, p. 152-166, mai 2016, doi: 10.1016/j.agee.2016.03.004.
- [47] C. Augustin et L. Cihacek, « Relationships Between Soil Carbon and Soil Texture in the Northern Great Plains », 2016, doi: 10.1097/SS.0000000000000173.
- [48] J. Hassink, L. A. Bouwman, K. B. Zwart, J. Bloem, et L. Brussaard, « Relationships between soil texture, physical protection of organic matter, soil biota, and C and N mineralization in grassland soils », in *Soil Structure/Soil Biota Interrelationships*, L. Brussaard et M. J. Kooistra, Éd. Amsterdam: Elsevier, 1993, p. 105-128. doi: 10.1016/B978-0-444-81490-6.50059-5.
- [49] S. Andersson et S. I. Nilsson, « Influence of pH and temperature on microbial activity, substrate availability of soil-solution bacteria and leaching of dissolved organic carbon in a mor humus », *Soil Biol. Biochem.*, vol. 33, p. 1181-1191, juill. 2001, doi: 10.1016/S0038-0717(01)00022-0.
- [50] J. C. Aciego Pietri et P. C. Brookes, « Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil », *Soil Biol. Biochem.*, vol. 40, p. 1856-1861, avr. 2008, doi: 10.1016/j.soilbio.2008.03.020.
- [51] P. F. van Bergen, I. D. Bull, P. R. Poulton, et R. P. Evershed, « Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted Classical Experiments—I. Total lipid extracts, solvent insoluble residues and humic acids from Broadbalk Wilderness », *Org. Geochem.*, vol. 26, n° 1, p. 117-135, janv. 1997, doi: 10.1016/S0146-6380(96)00134-9.
- [52] P. P. Motavalli, C. A. Palm, W. J. Parton, E. T. Elliott, et S. D. Frey, « Soil pH and organic C dynamics in tropical forest soils: Evidence from laboratory and simulation studies », *Soil Biol. Biochem.*, vol. 27, n° 12, p. 1589-1599, déc. 1995, doi: 10.1016/0038-0717(95)00082-P.

- [53] C. C. Rhoades, G. E. Eckert, et D. C. Coleman, « Soil Carbon Differences Among Forest, Agriculture, and Secondary Vegetation in Lower Montane Ecuador », *Ecol. Appl.*, vol. 10, n° 2, p. 497-505, 2000, doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0497:SCDAFA]2.0.CO;2.
- [54] A. Sombrero et A. de Benito, « Carbon accumulation in soil. Ten-year study of conservation tillage and crop rotation in a semi-arid area of Castile-Leon, Spain », *Soil Tillage Res.*, vol. 107, n° 2, p. 64-70, avr. 2010, doi: 10.1016/j.still.2010.02.009.
- [55] R. Lal, « Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security », *Science*, vol. 304, n° 5677, p. 1623-1627, juin 2004, doi: 10.1126/science.1097396.
- [56] P. K. Sharma *et al.*, « Crop-water relations in rice-wheat cropping under different tillage systems and water-management practices in a marginally sodic, medium-textured soil. », *Water-Wise Rice Prod.*, p. 223-235, 2002.
- [57] D. C. Reicosky, « Conservation Agriculture: Global Environmental Benefits of Soil Carbon Management », in *Conservation Agriculture: Environment, Farmers Experiences, Innovations, Socio-economy, Policy*, L. García-Torres, J. Benites, A. Martínez-Vilela, et A. Holgado-Cabrera, Éd. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003, p. 3-12. doi: 10.1007/978-94-017-1143-2_1.
- [58] D. A. Angers et N. S. Eriksen-Hamel, « Full-Inversion Tillage and Organic Carbon Distribution in Soil Profiles: A Meta-Analysis », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 72, n° 5, p. 1370-1374, 2008, doi: 10.2136/sssaj2007.0342.
- [59] J. J. Bond et W. O. Willis, « Soil Water Evaporation: Surface Residue Rate and Placement Effects », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 33, n° 3, p. 445-448, 1969, doi: 10.2136/sssaj1969.03615995003300030031x.
- [60] D. E. Smika, « Soil Water Change as Related to Position of Wheat Straw Mulch on the Soil Surface », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 47, n° 5, p. 988-991, 1983, doi: 10.2136/sssaj1983.03615995004700050029x.
- [61] L. R., « Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. », *Adv. Agron.*, 1989, Consulté le: 22 mai 2022. [En ligne]. Disponible sur:
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Conservation+tillage+for+sustainable+agriculture%3A+tropics+versus+temperate+environments.&author=Lal+R.&publication_year=1989
- [62] R. Derpsch, T. Friedrich, A. Kassam, et H. Li, « Current Status of Adoption of No-till Farming in the World and Some of its Main Benefits », *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 3, n° 1, Art. n° 1, mars 2010, doi: 10.25165/ijabe.v3i1.223.

- [63] R. Lal, « Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems », *Food Policy*, vol. 36, p. S33-S39, janv. 2011, doi: 10.1016/j.foodpol.2010.12.001.
- [64] R. D. Bowden, E. A. Davidson, K. E. Savage, C. Arabia, et P. Steudler, « Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest », *For. Ecol. Manag.*, vol. 196, p. 43, 2004, doi: 10.1016/j.foreco.2004.03.011.
- [65] K. S. Ramirez, J. M. Craine, et N. Fierer, « Consistent effects of nitrogen amendments on soil microbial communities and processes across biomes », *Glob. Change Biol.*, vol. 18, n° 6, p. 1918-1927, 2012, doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02639.x.
- [66] S. D. Frey *et al.*, « Chronic nitrogen additions suppress decomposition and sequester soil carbon in temperate forests », *Biogeochemistry*, vol. 121, n° 2, p. 305-316, nov. 2014, doi: 10.1007/s10533-014-0004-0.
- [67] G. Verma, R. P. Sharma, S. P. Sharma, S. K. Subehia, et S. Shambhavi, « Changes in soil fertility status of maize-wheat system due to long-term use of chemical fertilizers and amendments in an alfisol », *Plant Soil Environ.*, vol. 58 (2012), n° No. 12, p. 529-533, nov. 2012, doi: 10.17221/133/2012-PSE.
- [68] S. K. Tanveer, X. Lu, S.-S. Shah, I. Hussain, et M. Sohail, « Soil Carbon Sequestration through Agronomic Management Practices », *CO2 Sequestration*, 2019, Consulté le: 4 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.semanticscholar.org/paper/Soil-Carbon-Pools%2C-Carbon-and-Nitrogen-Storage-in-A-Yadav-Naresh/63ab35f8d8ea99ad9832c007fb69405319f2dcad>
- [69] Z. Chen *et al.*, « Soil carbon storage and stratification under different tillage/residue-management practices in double rice cropping system », *J. Integr. Agric.*, vol. 14, n° 8, p. 1551-1560, août 2015, doi: 10.1016/S2095-3119(15)61068-1.
- [70] J. L. Vicente-Vicente, R. García-Ruiz, R. Francaviglia, E. Aguilera, et P. Smith, « Soil carbon sequestration rates under Mediterranean woody crops using recommended management practices: A meta-analysis », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 235, p. 204-214, nov. 2016, doi: 10.1016/j.agee.2016.10.024.
- [71] W. H. Schlesinger, « Carbon Sequestration in Soils », *Science*, vol. 284, n° 5423, p. 2095-2095, juin 1999, doi: 10.1126/science.284.5423.2095.
- [72] J. M. Baker, T. E. Ochsner, R. T. Venterea, et T. J. Griffis, « Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 118, n° 1, p. 1-5, janv. 2007, doi: 10.1016/j.agee.2006.05.014.

- [73] C. E. Stewart, K. Paustian, R. T. Conant, A. F. Plante, et J. Six, « Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation », *Biogeochemistry*, vol. 86, n° 1, p. 19-31, oct. 2007, doi: 10.1007/s10533-007-9140-0.
- [74] A. K. Misra, « Climate change and challenges of water and food security », *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 3, n° 1, p. 153-165, juin 2014, doi: 10.1016/j.ijse.2014.04.006.
- [75] E. Baldi *et al.*, « Effect of compost application on the dynamics of carbon in a nectarine orchard ecosystem », *Sci. Total Environ.*, vol. 637-638, p. 918-925, oct. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.093.
- [76] W. Zhang *et al.*, « Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China », *J. Soils Sediments*, vol. 12, n° 4, p. 457-470, avr. 2012, doi: 10.1007/s11368-011-0467-8.
- [77] T. Ren, J. Wang, Q. Chen, F. Zhang, et S. Lu, « The Effects of Manure and Nitrogen Fertilizer Applications on Soil Organic Carbon and Nitrogen in a High-Input Cropping System », *PLOS ONE*, vol. 9, n° 5, p. e97732, mai 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0097732.
- [78] K. Wickings, A. S. Grandy, S. C. Reed, et C. C. Cleveland, « The origin of litter chemical complexity during decomposition », *Ecol. Lett.*, vol. 15, n° 10, p. 1180-1188, 2012, doi: 10.1111/j.1461-0248.2012.01837.x.
- [79] G. B. De Deyn *et al.*, « Additional carbon sequestration benefits of grassland diversity restoration », *J. Appl. Ecol.*, vol. 48, n° 3, p. 600-608, 2011, doi: 10.1111/j.1365-2664.2010.01925.x.
- [80] K. Descheemaeker, S. J. Oosting, S. Homann-Kee Tui, P. Masikati, G. N. Falconnier, et K. E. Giller, « Climate change adaptation and mitigation in smallholder crop–livestock systems in sub-Saharan Africa: a call for integrated impact assessments », *Reg. Environ. Change*, vol. 16, n° 8, p. 2331-2343, déc. 2016, doi: 10.1007/s10113-016-0957-8.
- [81] W. J. Parton, D. S. Schimel, C. V. Cole, et D. S. Ojima, « Analysis of Factors Controlling Soil Organic Matter Levels in Great Plains Grasslands », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 51, n° 5, p. 1173-1179, 1987, doi: 10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x.
- [82] K. Coleman *et al.*, « Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3 », *Geoderma*, vol. 81, n° 1, p. 29-44, déc. 1997, doi: 10.1016/S0016-7061(97)00079-7.
- [83] C. Li, S. Frolking, et R. Harriss, « Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils », *Glob. Biogeochem. Cycles*, vol. 8, p. 237-254, sept. 1994, doi: 10.1029/94GB00767.

- [84] J. R. Williams, C. A. Jones, et P. T. Dyke, « A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity [EPIC, Erosion-Productivity Impact Calculator, mathematical models] », *Trans. ASAE Am. Soc. Agric. Eng. USA*, 1984, Consulté le: 10 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=A+modeling+approach+to+determining+the+relationship+between+erosion+and+soil+productivity+%5BEPIC%2CErosion-Productivity+Impact+Calculator%2C+mathematical+models%5D&author=Williams%2C+J.R.&publication_year=1984
- [85] J. W. Jones *et al.*, « The DSSAT cropping system model », *Eur. J. Agron.*, vol. 18, n° 3, p. 235-265, janv. 2003, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00107-7.
- [86] E. E. Campbell et K. Paustian, « Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: a review », *Environ. Res. Lett.*, vol. 10, n° 12, p. 123004, déc. 2015, doi: 10.1088/1748-9326/10/12/123004.
- [87] J. C. Refsgaard, H. J. Henriksen, W. G. Harrar, H. Scholten, et A. Kassahun, « Quality assurance in model based water management – review of existing practice and outline of new approaches », *Environ. Model. Softw.*, vol. 20, n° 10, p. 1201-1215, oct. 2005, doi: 10.1016/j.envsoft.2004.07.006.
- [88] G. Bellocchi, M. Rivington, M. Donatelli, et K. Matthews, « Validation of biophysical models: issues and methodologies. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 30, n° 1, p. 109-130, mars 2010, doi: 10.1051/agro/2009001.
- [89] null I. W. G. WRB, *World reference base for soil resources 2006 : a framework for international classification, correlation and communication*. FAO, 2006. Consulté le: 22 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://research.wur.nl/en/publications/world-reference-base-for-soil-resources-2006-a-framework-for-inte>
- [90] G. Zhao *et al.*, « Impact of agricultural management practices on soil organic carbon: simulation of Australian wheat systems », *Glob. Change Biol.*, vol. 19, n° 5, p. 1585-1597, 2013, doi: 10.1111/gcb.12145.
- [91] C. S. Li, « Modeling Trace Gas Emissions from Agricultural Ecosystems », *Nutr. Cycl. Agroecosystems*, vol. 58, n° 1, p. 259-276, nov. 2000, doi: 10.1023/A:1009859006242.
- [92] M. Abdalla, M. Wattenbach, P. Smith, P. Ambus, M. Jones, et M. Williams, « Application of the DNDC model to predict emissions of N₂O from Irish agriculture », *Geoderma*, vol. 151, n° 3-4, p. 327-337, juill. 2009, doi: 10.1016/j.geoderma.2009.04.021.
- [93] F. Cui, X. Zheng, C. Liu, K. Wang, Z. Zhou, et J. Deng, « Assessing biogeochemical effects and best management practice for a wheat–maize cropping system using the

- DNDC model », *Biogeosciences*, vol. 11, n° 1, p. 91-107, janv. 2014, doi: 10.5194/bg-11-91-2014.
- [94] J. Zhang *et al.*, « Increased greenhouse gas emissions intensity of major croplands in China: Implications for food security and climate change mitigation », *Glob. Change Biol.*, vol. 26, n° 11, p. 6116-6133, 2020, doi: 10.1111/gcb.15290.
- [95] C. Li, N. Farahbakhshazad, D. B. Jaynes, D. L. Dinnes, W. Salas, et D. McLaughlin, « Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa », *Ecol. Model.*, vol. 196, n° 1, p. 116-130, juill. 2006, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2006.02.007.
- [96] C. Li et J. Cui, « Modeling impacts of management on carbon sequestration and trace gas emissions in forested wetland ecosystems », *Environ. Manag. 33Supplement 1 S176-S186*, 2004, Consulté le: 15 novembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/21358>
- [97] C. Li *et al.*, « Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling », *Glob. Biogeochem. Cycles*, vol. 18, n° 1, 2004, doi: 10.1029/2003GB002045.
- [98] D. L. Giltrap, C. Li, et S. Saggarr, « DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 136, n° 3, p. 292-300, mars 2010, doi: 10.1016/j.agee.2009.06.014.
- [99] E. Lugato *et al.*, « Application of DNDC biogeochemistry model to estimate greenhouse gas emissions from Italian agricultural areas at high spatial resolution », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 139, n° 4, p. 546-556, déc. 2010, doi: 10.1016/j.agee.2010.09.015.
- [100] K. C. Uzoma *et al.*, « Assessing the effects of agricultural management on nitrous oxide emissions using flux measurements and the DNDC model. », *Agric. Ecosyst. Amp Environ.*, vol. 206, p. 71-83, 2015.
- [101] Q. Deng *et al.*, « Assessing the impacts of tillage and fertilization management on nitrous oxide emissions in a cornfield using the DNDC model », *J. Geophys. Res. Biogeosciences*, vol. 121, n° 2, p. 337-349, 2016, doi: 10.1002/2015JG003239.
- [102] S. Balasubramanian *et al.*, « Evaluation of DeNitrification DeComposition model for estimating ammonia fluxes from chemical fertilizer application », *Agric. For. Meteorol.*, vol. 237-238, p. 123-134, mai 2017, doi: 10.1016/j.agrformet.2017.02.006.
- [103] E. Brandes, A. Plastina, et E. A. Heaton, « Where can switchgrass production be more profitable than corn and soybean? An integrated subfield assessment in Iowa, USA », *GCB Bioenergy*, vol. 10, n° 7, p. 473-488, 2018, doi: 10.1111/gcbb.12516.

- [104] C. Tonitto, P. B. Woodbury, et E. L. McLellan, « Defining a best practice methodology for modeling the environmental performance of agriculture », *Environ. Sci. Policy*, vol. 87, p. 64-73, sept. 2018, doi: 10.1016/j.envsci.2018.04.009.
- [105] A. M. Schroeck, V. Gaube, E. Haas, et W. Winiwarter, « Estimating nitrogen flows of agricultural soils at a landscape level – A modelling study of the Upper Enns Valley, a long-term socio-ecological research region in Austria », *Sci. Total Environ.*, vol. 665, p. 275-289, mai 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.071.
- [106] J. Nasielski, B. Grant, W. Smith, C. Niemeyer, K. Janovicek, et B. Deen, « Effect of nitrogen source, placement and timing on the environmental performance of economically optimum nitrogen rates in maize », *Field Crops Res.*, vol. 246, p. 107686, févr. 2020, doi: 10.1016/j.fcr.2019.107686.
- [107] W. Hwang, C. Kim, K. Cho, et S. Hyun, « Characteristics of greenhouse gas emissions from rice paddy fields in South Korea under climate change scenario RCP-8.5 using the DNDC model », *Pedosphere*, vol. 31, n° 2, p. 332-341, avr. 2021, doi: 10.1016/S1002-0160(20)60068-6.
- [108] S. L. Gilhespy *et al.*, « First 20 years of DNDC (DeNitrification DeComposition): Model evolution », *Ecol. Model.*, vol. 292, p. 51-62, nov. 2014, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2014.09.004.
- [109] S. Liu *et al.*, « Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis », *GCB Bioenergy*, vol. 8, n° 2, p. 392-406, 2016, doi: 10.1111/gcbb.12265.
- [110] Z. Lin et S. Jing'an, « Dynamic simulation of farmland SOC in parallel ridge valley area in eastern Sichuan in the next 30 years. », *Zhongguo Shengtai Nongye Xuebao Chin. J. Eco-Agric.*, vol. 25, n° 12, p. 1848-1857, 2017.
- [111] H.-H. Ku, J.-H. Ryu, H.-S. Bae, C. Jeong, et S.-E. Lee, « Modeling a long-term effect of rice straw incorporation on SOC content and grain yield in rice field », *Arch. Agron. Soil Sci.*, vol. 65, n° 14, p. 1941-1954, déc. 2019, doi: 10.1080/03650340.2019.1583330.
- [112] C. Li *et al.*, « Modeling Soil Organic Carbon Change in Croplands of China », *Ecol. Appl.*, vol. 13, n° 2, p. 327-336, 2003, doi: 10.1890/1051-0761(2003)013[0327:MSOCCI]2.0.CO;2.
- [113] B. N. Moebius-Clune *et al.*, « Long-Term Effects of Harvesting Maize Stover and Tillage on Soil Quality », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 72, n° 4, p. 960-969, 2008, doi: 10.2136/sssaj2007.0248.
- [114] A. L. Hammerbeck, S. J. Stetson, S. L. Osborne, T. E. Schumacher (Retired), et J. L. Pikul Jr. (Retired), « Corn Residue Removal Impact on Soil Aggregates in a No-Till

- Corn/Soybean Rotation », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 76, n° 4, p. 1390-1398, 2012, doi: 10.2136/sssaj2011.0421.
- [115] R. F. Follett, « Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils », *Soil Tillage Res.*, vol. 61, n° 1, p. 77-92, août 2001, doi: 10.1016/S0167-1987(01)00180-5.
- [116] F. Z. El Hassani, A. Fadile, M. Faouzi, A. Zinedine, M. Merzouki, et M. Benlemlih, « The long term effect of Olive Mill Wastewater (OMW) on organic matter humification in a semi-arid soil », *Heliyon*, vol. 6, n° 1, p. e03181, janv. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03181.
- [117] S. Z. Czóbel *et al.*, « Short-term effects of extensive fertilization on community composition and carbon uptake in a Pannonian loess grassland », *Photosynthetica*, vol. 51, n° 4, p. 490-496, déc. 2013, doi: 10.1007/s11099-013-0052-z.
- [118] R. Moussadek, R. Mrabet, R. Dahan, A. Zouahri, M. El Mourid, et E. V. Rans, « Tillage System Affects Soil Organic Carbon Storage and Quality in Central Morocco », *Appl. Environ. Soil Sci.*, vol. 2014, p. e654796, sept. 2014, doi: 10.1155/2014/654796.
- [119] M. Laghrour *et al.*, « Long and Midterm Effect of Conservation Agriculture on Soil Properties in Dry Areas of Morocco », *Appl. Environ. Soil Sci.*, vol. 2016, p. e6345765, déc. 2016, doi: 10.1155/2016/6345765.
- [120] C. P. Jacovides et H. Kontoyiannis, « Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models », *Agric. Water Manag.*, vol. 27, n° 3, p. 365-371, juill. 1995, doi: 10.1016/0378-3774(95)01152-9.
- [121] A. Saltelli et P. Annoni, « How to avoid a perfunctory sensitivity analysis », *Environ. Model. Softw.*, vol. 25, n° 12, p. 1508-1517, déc. 2010, doi: 10.1016/j.envsoft.2010.04.012.
- [122] H. Pathak, K. Byjesh, B. Chakrabarti, et P. K. Aggarwal, « Potential and cost of carbon sequestration in Indian agriculture: Estimates from long-term field experiments », *Field Crops Res.*, vol. 120, n° 1, p. 102-111, janv. 2011, doi: 10.1016/j.fcr.2010.09.006.
- [123] R. Mrabet, « Wheat yield and water use efficiency under contrasting residue and tillage management systems in a semiarid area of Morocco », *Exp. Agric.*, vol. 38, p. 237-248, avr. 2002, doi: 10.1017/S0014479702000285.
- [124] L. López-Bellido, F. J. López-Garrido, M. Fuentes, J. E. Castillo, et E. J. Fernández, « Influence of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on soil organic matter and nitrogen under rain-fed Mediterranean conditions », *Soil Tillage Res.*, vol. 43, n° 3, p. 277-293, nov. 1997, doi: 10.1016/S0167-1987(97)00018-4.

- [125] J. M. Murillo, F. Moreno, F. Pelegrín, et J. E. Fernández, « Responses of sunflower to traditional and conservation tillage under rainfed conditions in southern Spain », *Soil Tillage Res.*, vol. 49, n° 3, p. 233-241, déc. 1998, doi: 10.1016/S0167-1987(98)00177-9.
- [126] P. Bescansa, M. J. Imaz, I. Virto, A. Enrique, et W. B. Hoogmoed, « Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain », *Soil Tillage Res.*, vol. 87, n° 1, p. 19-27, mai 2006, doi: 10.1016/j.still.2005.02.028.
- [127] F. Moreno, J. M. Murillo, F. Pelegrín, et I. F. Girón, « Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃ », *Soil Tillage Res.*, vol. 85, n° 1, p. 86-93, janv. 2006, doi: 10.1016/j.still.2004.12.001.
- [128] J. Álvaro-Fuentes, M. V. López, C. Cantero-Martinez, et J. L. Arrúe, « Tillage Effects on Soil Organic Carbon Fractions in Mediterranean Dryland Agroecosystems », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 72, n° 2, p. 541-547, mars 2008, doi: 10.2136/sssaj2007.0164.
- [129] B. Lozano-García et L. Parras-Alcántara, « Land use and management effects on carbon and nitrogen in Mediterranean Cambisols », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 179, p. 208-214, oct. 2013, doi: 10.1016/j.agee.2013.07.009.
- [130] A. Fiorini, S. C. Maris, D. Abalos, S. Amaducci, et V. Tabaglio, « Combining no-till with rye (*Secale cereale* L.) cover crop mitigates nitrous oxide emissions without decreasing yield », *Soil Tillage Res.*, vol. 196, p. 104442, févr. 2020, doi: 10.1016/j.still.2019.104442.
- [131] A. J. Franzluebbers, « Tillage and residue management effects on soil organic matter. », *Soil Org. Matter Sustain. Agric.*, p. 227-268, 2004.
- [132] C. Camarotto *et al.*, « Conservation agriculture and cover crop practices to regulate water, carbon and nitrogen cycles in the low-lying Venetian plain », *CATENA*, vol. 167, p. 236-249, août 2018, doi: 10.1016/j.catena.2018.05.006.
- [133] R. Lai, « Conservation Tillage for Sustainable Agriculture: Tropics Versus Temperate Environments », in *Advances in Agronomy*, vol. 42, N. C. Brady, Éd. Academic Press, 1989, p. 85-197. doi: 10.1016/S0065-2113(08)60524-6.
- [134] E. S. Krull, J. A. Baldock, et J. O. Skjemstad, « Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover », *Funct. Plant Biol. FPB*, vol. 30, n° 2, p. 207-222, févr. 2003, doi: 10.1071/FP02085.
- [135] T. Lehtinen *et al.*, « Effect of crop residue incorporation on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in European agricultural soils », *Soil Use Manag.*, vol. 30, n° 4, p. 524-538, 2014, doi: 10.1111/sum.12151.

- [136] H. Tang, J. Qiu, E. Van Ranst, et C. Li, « Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model », *Geoderma*, vol. 134, n° 1, p. 200-206, sept. 2006, doi: 10.1016/j.geoderma.2005.10.005.
- [137] H. Tang et E. Van Ranst, *Simulation of Soil Organic Carbon Storage and Changes in Agricultural Cropland in China and its Impact on Food Security*. China Meteorological Press, 2007. Consulté le: 7 octobre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://hdl.handle.net/1854/LU-443251>
- [138] H. Blanco-Canqui et R. Lal, « Crop Residue Removal Impacts on Soil Productivity and Environmental Quality », *Crit. Rev. Plant Sci.*, vol. 28, n° 3, p. 139-163, avr. 2009, doi: 10.1080/07352680902776507.
- [139] L. Wang, J. Qiu, H. Tang, H. Li, C. Li, et E. Van Ranst, « Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China », *Geoderma*, vol. 147, n° 1, p. 47-55, sept. 2008, doi: 10.1016/j.geoderma.2008.07.009.
- [140] R. Chen *et al.*, « Soil C and N availability determine the priming effect: microbial N mining and stoichiometric decomposition theories », *Glob. Change Biol.*, vol. 20, n° 7, p. 2356-2367, 2014, doi: 10.1111/gcb.12475.
- [141] D. S. Powlson, C. M. Stirling, C. Thierfelder, R. P. White, et M. L. Jat, « Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems? », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 220, p. 164-174, mars 2016, doi: 10.1016/j.agee.2016.01.005.
- [142] A. Pezzuolo, B. Dumont, L. Sartori, F. Marinello, M. De Antoni Migliorati, et B. Basso, « Evaluating the impact of soil conservation measures on soil organic carbon at the farm scale », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 135, p. 175-182, avr. 2017, doi: 10.1016/j.compag.2017.02.004.
- [143] B. P. Akinde, A. O. Olakayode, D. J. Oyedele, et F. O. Tijani, « Selected physical and chemical properties of soil under different agricultural land-use types in Ile-Ife, Nigeria », *Heliyon*, vol. 6, n° 9, p. e05090, sept. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05090.
- [144] L. A. Sherrod, G. A. Peterson, D. G. Westfall, et L. R. Ahuja, « Cropping Intensity Enhances Soil Organic Carbon and Nitrogen in a No-Till Agroecosystem », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 67, n° 5, p. 1533-1543, 2003, doi: 10.2136/sssaj2003.1533.
- [145] R. E. Engel, P. R. Miller, B. G. McConkey, et R. Wallander, « Soil Organic Carbon Changes to Increasing Cropping Intensity and No-Till in a Semiarid Climate », *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 81, n° 2, p. 404-413, 2017, doi: 10.2136/sssaj2016.06.0194.

- [146] U. M. Sainju, A. W. Lenssen, B. L. Allen, W. B. Stevens, et J. D. Jabro, « Soil total carbon and nitrogen and crop yields after eight years of tillage, crop rotation, and cultural practice », *Heliyon*, vol. 3, n° 12, p. e00481, déc. 2017, doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00481.
- [147] N. Farahbakhshazad, D. L. Dinnes, C. Li, D. B. Jaynes, et W. Salas, « Modeling biogeochemical impacts of alternative management practices for a row-crop field in Iowa », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 123, n° 1, p. 30-48, janv. 2008, doi: 10.1016/j.agee.2007.04.004.
- [148] F. Dou, J. P. Wight, L. T. Wilson, J. O. Storlien, et F. M. Hons, « Simulation of Biomass Yield and Soil Organic Carbon under Bioenergy Sorghum Production », *PLOS ONE*, vol. 9, n° 12, p. e115598, déc. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0115598.
- [149] M. Segoli *et al.*, « AggModel: A soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies », *Ecol. Model.*, vol. 263, p. 1-9, août 2013, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2013.04.010.
- [150] D. L. Moorhead et R. L. Sinsabaugh, « A Theoretical Model of Litter Decay and Microbial Interaction », *Ecol. Monogr.*, vol. 76, n° 2, p. 151-174, 2006, doi: 10.1890/0012-9615(2006)076[0151:ATMOLD]2.0.CO;2.
- [151] C. E. Riggs, S. E. Hobbie, E. M. Bach, K. S. Hofmockel, et C. E. Kazanski, « Nitrogen addition changes grassland soil organic matter decomposition », *Biogeochemistry*, vol. 125, n° 2, p. 203-219, sept. 2015, doi: 10.1007/s10533-015-0123-2.
- [152] M. Spohn, « Microbial respiration per unit microbial biomass depends on litter layer carbon-to-nitrogen ratio », *Biogeosciences*, vol. 12, n° 3, p. 817-823, févr. 2015, doi: 10.5194/bg-12-817-2015.
- [153] M. Spohn, E. M. Pötsch, S. A. Eichorst, D. Wuebken, W. Wanek, et A. Richter, « Soil microbial carbon use efficiency and biomass turnover in a long-term fertilization experiment in a temperate grassland », *Soil Biol. Biochem.*, vol. 97, p. 168-175, juin 2016, doi: 10.1016/j.soilbio.2016.03.008.
- [154] Q. Tian, H. He, W. Cheng, Z. Bai, Y. Wang, et X. Zhang, « Factors controlling soil organic carbon stability along a temperate forest altitudinal gradient », *Sci. Rep.*, vol. 6, n° 1, p. 18783, janv. 2016, doi: 10.1038/srep18783.
- [155] R. W. Sterner et J. J. Elser, *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*. Princeton University Press, 2017. doi: 10.1515/9781400885695.

- [156] R. L. Mulvaney, S. A. Khan, et T. R. Ellsworth, « Synthetic Nitrogen Fertilizers Deplete Soil Nitrogen: A Global Dilemma for Sustainable Cereal Production », *J. Environ. Qual.*, vol. 38, n° 6, p. 2295-2314, 2009, doi: 10.2134/jeq2008.0527.
- [157] A. E. Russell, C. A. Cambardella, D. A. Laird, D. B. Jaynes, et D. W. Meek, « Nitrogen fertilizer effects on soil carbon balances in Midwestern U.S. agricultural systems », *Ecol. Appl.*, vol. 19, n° 5, p. 1102-1113, 2009, doi: 10.1890/07-1919.1.
- [158] X. G. Li, B. Jia, J. Lv, Q. Ma, Y. Kuzyakov, et F. Li, « Nitrogen fertilization decreases the decomposition of soil organic matter and plant residues in planted soils », *Soil Biol. Biochem.*, vol. 112, p. 47-55, sept. 2017, doi: 10.1016/j.soilbio.2017.04.018.
- [159] N. K. Mahal *et al.*, « Nitrogen Fertilizer Suppresses Mineralization of Soil Organic Matter in Maize Agroecosystems », *Front. Ecol. Evol.*, vol. 7, p. 59, 2019, doi: 10.3389/fevo.2019.00059.
- [160] I. Lembaid, R. Moussadek, R. Mrabet, A. Douaik, et A. Bouhaouss, « Modeling the effects of farming management practices on soil organic carbon stock under two tillage practices in a semi-arid region, Morocco », *Heliyon*, vol. 7, n° 1, janv. 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05889.
- [161] L. C. Gomes, R. M. Faria, E. de Souza, G. V. Veloso, C. E. G. R. Schaefer, et E. I. F. Filho, « Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil », *Geoderma*, vol. 340, p. 337-350, avr. 2019, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.01.007.
- [162] J. Navarro-Pedreño, M. B. Almendro-Candel, et A. A. Zorpas, « The Increase of Soil Organic Matter Reduces Global Warming, Myth or Reality? », *Sci*, vol. 3, n° 1, Art. n° 1, mars 2021, doi: 10.3390/sci3010018.
- [163] M. J. Carpio, M. J. Sánchez-Martín, M. S. Rodríguez-Cruz, et J. M. Marín-Benito, « Effect of Organic Residues on Pesticide Behavior in Soils: A Review of Laboratory Research », *Environments*, vol. 8, n° 4, Art. n° 4, avr. 2021, doi: 10.3390/environments8040032.
- [164] K. R. Sistani, J. R. Simmons, M. Jn-Baptiste, et J. M. Novak, « Poultry Litter, Biochar, and Fertilizer Effect on Corn Yield, Nutrient Uptake, N₂O and CO₂ Emissions », *Environments*, vol. 6, n° 5, Art. n° 5, mai 2019, doi: 10.3390/environments6050055.
- [165] J. Sanderman, R. Farquharson, et J. Baldock, « Soil carbon sequestration potential: a review for Australian agriculture. », *Soil Carbon Sequestration Potential Rev. Aust. Agric.*, 2009, Consulté le: 4 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20103268710>

- [166] I. Drebenstedt *et al.*, « Do Soil Warming and Changes in Precipitation Patterns Affect Seed Yield and Seed Quality of Field-Grown Winter Oilseed Rape? », *Agronomy*, vol. 10, n° 4, Art. n° 4, avr. 2020, doi: 10.3390/agronomy10040520.
- [167] C. Poll, S. Marhan, F. Back, P. A. Niklaus, et E. Kandeler, « Field-scale manipulation of soil temperature and precipitation change soil CO₂ flux in a temperate agricultural ecosystem », *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 165, p. 88-97, janv. 2013, doi: 10.1016/j.agee.2012.12.012.
- [168] C. B. Field *et al.*, « Summary for Policymakers », in *Climate Change 2014*, C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, et L. L. White, Éd. Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2015, p. 1-32.
- [169] Y. Trambly *et al.*, « Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios », *Earth-Sci. Rev.*, vol. 210, p. 103348, nov. 2020, doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103348.
- [170] C. Jones *et al.*, « Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil », *Glob. Change Biol.*, vol. 11, n° 1, p. 154-166, 2005, doi: 10.1111/j.1365-2486.2004.00885.x.
- [171] A. Ochs et A. A. H. Siddig, « Response of Red-Backed Salamanders (*Plethodon Cinereus*) to Changes in Hemlock Forest Soil Driven by Invasive Hemlock Woolly Adelgid (*Adelges Tsugae*) », *Environments*, vol. 4, n° 1, Art. n° 1, mars 2017, doi: 10.3390/environments4010008.
- [172] T.-T. Nguyen et P. Marschner, « Retention and loss of water extractable carbon in soils: effect of clay properties », *Sci. Total Environ.*, vol. 470-471, p. 400-406, févr. 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.10.002.
- [173] R. Zornoza *et al.*, « Greenhouse gas emissions and soil organic matter dynamics in woody crop orchards with different irrigation regimes », *Sci. Total Environ.*, vol. 644, p. 1429-1438, déc. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.398.
- [174] W. Zhou *et al.*, « Determining the Distribution and Interaction of Soil Organic Carbon, Nitrogen, pH and Texture in Soil Profiles: A Case Study in the Lancangjiang River Basin, Southwest China », *Forests*, vol. 11, n° 5, Art. n° 5, mai 2020, doi: 10.3390/f11050532.
- [175] S. J. Kemmitt, D. Wright, K. W. T. Goulding, et D. L. Jones, « PH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils », *Soil Biol. Biochem.*, vol. 38, p. 898-911, 2006, doi: 10.1016/j.soilbio.2005.08.006.

- [176] F. Qin, Y. Zhao, X. Shi, S. Xu, et D. Yu, « Uncertainty and Sensitivity Analyses for Modeling Long-Term Soil Organic Carbon Dynamics of Paddy Soils Under Different Climate-Soil-Management Combinations », *Pedosphere*, vol. 27, n° 5, p. 912-925, oct. 2017, doi: 10.1016/S1002-0160(17)60436-3.
- [177] K. P. Sudheer, G. Lakshmi, et I. Chaubey, « Application of a pseudo simulator to evaluate the sensitivity of parameters in complex watershed models », *Environ. Model. Softw.*, vol. 26, n° 2, p. 135-143, févr. 2011, doi: 10.1016/j.envsoft.2010.07.007.
- [178] Y. Tang, P. Reed, T. Wagener, et K. van Werkhoven, « Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation », *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 11, n° 2, p. 793-817, févr. 2007, doi: 10.5194/hess-11-793-2007.
- [179] G. Sakurai, M. Jomura, S. Yonemura, T. Iizumi, Y. Shirato, et M. Yokozawa, « Inversely estimating temperature sensitivity of soil carbon decomposition by assimilating a turnover model and long-term field data », *Soil Biol. Biochem.*, vol. 46, p. 191-199, mars 2012, doi: 10.1016/j.soilbio.2011.11.005.
- [180] A. Ghosh *et al.*, « Temperature sensitivity of soil organic carbon decomposition as affected by long-term fertilization under a soybean based cropping system in a sub-tropical alfisol. », *Agric. Ecosyst. Amp Environ.*, vol. 233, p. 202-213, 2016.
- [181] A. Mureva et D. Ward, « Soil microbial biomass and functional diversity in shrub-encroached grasslands along a precipitation gradient. », *Pedobiologia*, vol. 63, p. 37-45, 2017.
- [182] J. Zhao *et al.*, « Precipitation alters temperature effects on ecosystem respiration in Tibetan alpine meadows », *Agric. For. Meteorol.*, vol. 252, p. 121-129, avr. 2018, doi: 10.1016/j.agrformet.2018.01.014.
- [183] R. Moussadek, « Impacts de l'Agriculture de Conservation sur les Propriétés et la Productivité des Vertisols du Maroc Central (Thèse de doctorat) (p.231) », Université de Gent Belgique, 2012.
- [184] IPCC, « Climate Change 2013: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA ». 2013.
- [185] A. Morugán-Coronado, C. Linares, M. D. Gómez-López, Á. Faz, et R. Zornoza, « The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies », *Agric. Syst.*, vol. 178, p. 102736, févr. 2020, doi: 10.1016/j.agry.2019.102736.
- [186] A. D. Friend, H. H. Schugart, et S. W. Running, « A Physiology-Based Gap Model of Forest Dynamics », *Ecology*, vol. 74, n° 3, p. 792-797, 1993, doi: 10.2307/1940806.

- [187] F. Qin, Y. Zhao, X. Shi, S. Xu, et D. Yu, « Sensitivity and uncertainty analysis for the DeNitrification–DeComposition model, a case study of modeling soil organic carbon dynamics at a long-term observation site with a rice–bean rotation », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 124, p. 263-272, juin 2016, doi: 10.1016/j.compag.2016.04.017.
- [188] C. Werner, K. Butterbach-Bahl, E. Haas, T. Hickler, et R. Kiese, « A global inventory of N₂O emissions from tropical rainforest soils using a detailed biogeochemical model », *Glob. Biogeochem. Cycles*, vol. 21, n° 3, 2007, doi: 10.1029/2006GB002909.
- [189] P. H. Bellamy, P. J. Loveland, R. I. Bradley, R. M. Lark, et G. J. D. Kirk, « Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003 », *Nature*, vol. 437, n° 7056, p. 245-248, sept. 2005, doi: 10.1038/nature04038.
- [190] N. P. A. Saby *et al.*, « Changes in soil organic carbon in a mountainous French region, 1990–2004 », *Soil Use Manag.*, vol. 24, n° 3, p. 254-262, 2008, doi: 10.1111/j.1475-2743.2008.00159.x.
- [191] E. Goidts, B. van Wesemael, et K. V. Oost, « Driving forces of soil organic carbon evolution at the landscape and regional scale using data from a stratified soil monitoring », *Glob. Change Biol.*, vol. 15, n° 12, p. 2981-3000, 2009, doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01940.x.
- [192] D. Gaumont-Guay, T. A. Black, T. J. Griffis, A. G. Barr, R. S. Jassal, et Z. Nestic, « Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand », *Agric. For. Meteorol.*, vol. 140, n° 1-4, p. 220-235, nov. 2006, doi: 10.1016/j.agrformet.2006.08.003.
- [193] R. Lefèvre *et al.*, « Higher temperature sensitivity for stable than for labile soil organic carbon – Evidence from incubations of long-term bare fallow soils », *Glob. Change Biol.*, vol. 20, n° 2, p. 633-640, 2014, doi: 10.1111/gcb.12402.
- [194] Y. Liu *et al.*, « Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store according to a global synthesis », *Commun. Earth Environ.*, vol. 2, n° 1, p. 1-9, août 2021, doi: 10.1038/s43247-021-00229-0.
- [195] V. L. Bailey, C. H. Pries, et K. Lajtha, « What do we know about soil carbon destabilization? », *Environ. Res. Lett.*, vol. 14, n° 8, p. 083004, juill. 2019, doi: 10.1088/1748-9326/ab2c11.
- [196] A. R. Desyatkin, S. Iwasaki, R. V. Desyatkin, et R. Hatano, « Changes of Soil C Stock under Establishment and Abandonment of Arable Lands in Permafrost Area—Central Yakutia », *Atmosphere*, vol. 9, n° 8, Art. n° 8, août 2018, doi: 10.3390/atmos9080308.

- [197] M.-F. Dignac *et al.*, « Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 37, n° 2, p. 14, avr. 2017, doi: 10.1007/s13593-017-0421-2.
- [198] K. Zhang, H. Dang, Q. Zhang, et X. Cheng, « Soil carbon dynamics following land-use change varied with temperature and precipitation gradients: evidence from stable isotopes », *Glob. Change Biol.*, vol. 21, n° 7, p. 2762-2772, juill. 2015, doi: 10.1111/gcb.12886.
- [199] F. J. Matus, « Fine silt and clay content is the main factor defining maximal C and N accumulations in soils: a meta-analysis », *Sci. Rep.*, vol. 11, n° 1, p. 6438, mars 2021, doi: 10.1038/s41598-021-84821-6.
- [200] E. A. Paul, « Chapter 1 - Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry: An Exciting Present and Great Future Built on Basic Knowledge and Unifying Concepts », in *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry (Fourth Edition)*, E. A. Paul, Éd. Boston: Academic Press, 2015, p. 1-14. doi: 10.1016/B978-0-12-415955-6.00001-3.
- [201] I. Kämpf, N. Hölzel, M. Störrle, G. Broll, et K. Kiehl, « Potential of temperate agricultural soils for carbon sequestration: A meta-analysis of land-use effects », *Sci. Total Environ.*, vol. 566-567, p. 428-435, oct. 2016, doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.067.
- [202] J. Six, R. T. Conant, E. A. Paul, et K. Paustian, « Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils », *Plant Soil*, vol. 241, n° 2, p. 155-176, avr. 2002, doi: 10.1023/A:1016125726789.
- [203] F. De Mastro, C. Coccozza, G. Brunetti, et A. Traversa, « Chemical and Spectroscopic Investigation of Different Soil Fractions as Affected by Soil Management », *Appl. Sci.*, vol. 10, n° 7, Art. n° 7, janv. 2020, doi: 10.3390/app10072571.
- [204] K. I. Paul, P. J. Polglase, J. G. Nyakuengama, et P. K. Khanna, « Change in soil carbon following afforestation », *For. Ecol. Manag.*, vol. 168, n° 1, p. 241-257, sept. 2002, doi: 10.1016/S0378-1127(01)00740-X.
- [205] M. Reichenbach, P. Fiener, G. Garland, M. Griepentrog, J. Six, et S. Doetterl, « The role of geochemistry in organic carbon stabilization against microbial decomposition in tropical rainforest soils », *SOIL*, vol. 7, n° 2, p. 453-475, août 2021, doi: 10.5194/soil-7-453-2021.
- [206] J. Chellappa, K. L. Sagar, U. Sekaran, S. Kumar, et P. Sharma, « Soil organic carbon, aggregate stability and biochemical activity under tilled and no-tilled agroecosystems », *J. Agric. Food Res.*, vol. 4, p. 100139, juin 2021, doi: 10.1016/j.jafr.2021.100139.

- [207] M. Liu, G. Han, et Q. Zhang, « Effects of Soil Aggregate Stability on Soil Organic Carbon and Nitrogen under Land Use Change in an Erodible Region in Southwest China », *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, n° 20, p. E3809, oct. 2019, doi: 10.3390/ijerph16203809.
- [208] B. S. Brar, K. Singh, G. S. Dheri, et Balwinder-Kumar, « Carbon sequestration and soil carbon pools in a rice–wheat cropping system: Effect of long-term use of inorganic fertilizers and organic manure », *Soil Tillage Res.*, vol. 128, p. 30-36, avr. 2013, doi: 10.1016/j.still.2012.10.001.
- [209] X. Chen *et al.*, « Effects of precipitation on soil organic carbon fractions in three subtropical forests in southern China », *J. Plant Ecol.*, vol. 9, n° 1, p. 10-19, févr. 2016, doi: 10.1093/jpe/rtv027.
- [210] S. Chowdhury *et al.*, « Chapter Two - Role of cultural and nutrient management practices in carbon sequestration in agricultural soil », in *Advances in Agronomy*, vol. 166, D. L. Sparks, Éd. Academic Press, 2021, p. 131-196. doi: 10.1016/bs.agron.2020.10.001.
- [211] J. Grace, J. S. José, P. Meir, H. S. Miranda, et R. A. Montes, « Productivity and carbon fluxes of tropical savannas », *J. Biogeogr.*, vol. 33, n° 3, p. 387-400, 2006, doi: 10.1111/j.1365-2699.2005.01448.x.
- [212] L. Zhang *et al.*, « Toward optimal soil organic carbon sequestration with effects of agricultural management practices and climate change in Tai-Lake paddy soils of China », *Geoderma*, vol. 275, p. 28-39, août 2016, doi: 10.1016/j.geoderma.2016.04.001.
- [213] L.-M. Zhang *et al.*, « Combined effects of temperature and precipitation on soil organic carbon changes in the uplands of eastern China », *Geoderma*, vol. 337, p. 1105-1115, mars 2019, doi: 10.1016/j.geoderma.2018.11.026.
- [214] F. Zhao, Y. Wu, J. Hui, B. Sivakumar, X. Meng, et S. Liu, « Projected soil organic carbon loss in response to climate warming and soil water content in a loess watershed », *Carbon Balance Manag.*, vol. 16, n° 1, p. 24, août 2021, doi: 10.1186/s13021-021-00187-2.
- [215] K. Karhu *et al.*, « Temperature sensitivity of soil respiration rates enhanced by microbial community response », *Nature*, vol. 513, n° 7516, p. 81-84, sept. 2014, doi: 10.1038/nature13604.
- [216] M. E. Guntiñas, F. Gil-Sotres, M. C. Leirós, et C. Trasar-Cepeda, « Sensitivity of soil respiration to moisture and temperature », *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 13, n° 2, p. 445-461, juin 2013, doi: 10.4067/S0718-95162013005000035.
- [217] P. Zhao *et al.*, « SOC stabilization mechanisms and temperature sensitivity in old terraced soils », *Biogeosciences Discuss.*, p. 1-24, août 2021, doi: 10.5194/bg-2021-205.

- [218] A. Jebari, A. Del Prado, G. Pardo, J. A. Rodríguez Martín, et J. Álvaro-Fuentes, « Modeling Regional Effects of Climate Change on Soil Organic Carbon in Spain », *J. Environ. Qual.*, vol. 47, n° 4, p. 644-653, juill. 2018, doi: 10.2134/jeq2017.07.0294.
- [219] L. G. de O. Denardin *et al.*, « How different soil moisture levels affect the microbial activity », *Ciênc. Rural*, vol. 50, mai 2020, doi: 10.1590/0103-8478cr20190831.
- [220] Y. Qiao *et al.*, « Global variation of soil microbial carbon-use efficiency in relation to growth temperature and substrate supply », *Sci. Rep.*, vol. 9, n° 1, p. 5621, avr. 2019, doi: 10.1038/s41598-019-42145-6.
- [221] G. Wang, M. A. Mayes, L. Gu, et C. W. Schadt, « Representation of Dormant and Active Microbial Dynamics for Ecosystem Modeling », *PLOS ONE*, vol. 9, n° 2, p. e89252, févr. 2014, doi: 10.1371/journal.pone.0089252.
- [222] J. M. Melillo *et al.*, « Long-term pattern and magnitude of soil carbon feedback to the climate system in a warming world », *Science*, vol. 358, n° 6359, p. 101-105, oct. 2017, doi: 10.1126/science.aan2874.
- [223] J. L. Heisler et J. F. Weltzin, « Variability matters: towards a perspective on the influence of precipitation on terrestrial ecosystems », *New Phytol.*, vol. 172, n° 2, p. 189-192, 2006, doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01876.x.
- [224] G. Mishra, A. Sarkar, K. Giri, A. J. Nath, R. Lal, et R. Francaviglia, « Changes in soil carbon stocks under plantation systems and natural forests in Northeast India », *Ecol. Model.*, vol. 446, p. 109500, avr. 2021, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2021.109500.
- [225] W. Huang, C. Ye, W. C. Hockaday, et S. J. Hall, « Trade-offs in soil carbon protection mechanisms under aerobic and anaerobic conditions », *Glob. Change Biol.*, vol. 26, n° 6, p. 3726-3737, 2020, doi: 10.1111/gcb.15100.
- [226] G. Saiz *et al.*, « Variation in soil carbon stocks and their determinants across a precipitation gradient in West Africa », *Glob. Change Biol.*, vol. 18, n° 5, p. 1670-1683, 2012, doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02657.x.
- [227] G. Zhou *et al.*, « Factors influencing leaf litter decomposition: an intersite decomposition experiment across China », *Plant Soil*, vol. 311, n° 1, p. 61, juin 2008, doi: 10.1007/s11104-008-9658-5.
- [228] M.-O. Goebel, J. Bachmann, M. Reichstein, I. A. Janssens, et G. Guggenberger, « Soil water repellency and its implications for organic matter decomposition – is there a link to extreme climatic events? », *Glob. Change Biol.*, vol. 17, n° 8, p. 2640-2656, 2011, doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02414.x.

- [229] W. M. Post, W. R. Emanuel, P. J. Zinke, et A. G. Stangenberger, « Soil carbon pools and world life zones », *Nature*, vol. 298, n° 5870, p. 156-159, juill. 1982, doi: 10.1038/298156a0.
- [230] M. Tayebi *et al.*, « Drivers of Organic Carbon Stocks in Different LULC History and along Soil Depth for a 30 Years Image Time Series », *Remote Sens.*, vol. 13, n° 11, Art. n° 11, janv. 2021, doi: 10.3390/rs13112223.
- [231] D. S. Grogan *et al.*, « Quantifying the link between crop production and mined groundwater irrigation in China », *Sci. Total Environ.*, vol. 511, p. 161-175, avr. 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.11.076.
- [232] Y. Wan, E. Lin, W. Xiong, Y. Li, et L. Guo, « Modeling the impact of climate change on soil organic carbon stock in upland soils in the 21st century in China », *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2011, Consulté le: 19 septembre 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.004>
- [233] K. Zhang, H. Dang, Q. Zhang, et X. Cheng, « Soil carbon dynamics following land-use change varied with temperature and precipitation gradients: evidence from stable isotopes », *Glob. Change Biol.*, vol. 21, n° 7, p. 2762-2772, juill. 2015, doi: 10.1111/gcb.12886.
- [234] H. R. Peinetti, R. S. C. Menezes, H. Tiessen, et A. M. Perez Marin, « Simulating plant productivity under different organic fertilization practices in a maize/native pasture rotation system in semi-arid NE Brazil », *Comput. Electron. Agric.*, vol. 62, n° 2, p. 204-222, juill. 2008, doi: 10.1016/j.compag.2008.01.001.
- [235] I. Lembaid, R. Moussadek, R. Mrabet, et A. Bouhaouss, « Modeling Soil Organic Carbon Changes under Alternative Climatic Scenarios and Soil Properties Using DNDC Model at a Semi-Arid Mediterranean Environment », *Climate*, vol. 10, n° 2, Art. n° 2, févr. 2022, doi: 10.3390/cli10020023.
- [236] K. Streit *et al.*, « Soil warming alters microbial substrate use in alpine soils », *Glob. Change Biol.*, vol. 20, n° 4, p. 1327-1338, 2014, doi: 10.1111/gcb.12396.
- [237] Y. Luo *et al.*, « Modeled interactive effects of precipitation, temperature, and [CO₂] on ecosystem carbon and water dynamics in different climatic zones », *Glob. Change Biol.*, vol. 14, n° 9, p. 1986-1999, 2008, doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01629.x.
- [238] G. Li, S. Kim, M. Park, et Y. Son, « Short-Term Effects of Experimental Warming and Precipitation Manipulation on Soil Microbial Biomass C and N, Community Substrate Utilization Patterns and Community Composition », *Pedosphere*, vol. 27, n° 4, p. 714-724, août 2017, doi: 10.1016/S1002-0160(17)60408-9.

- [239] Z. Wu, P. Dijkstra, G. W. Koch, J. Peñuelas, et B. A. Hungate, « Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation », *Glob. Change Biol.*, vol. 17, n° 2, p. 927-942, 2011, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02302.x.