

Faculté des bioingénieurs

Évaluation des pratiques d'agriculture de conservation sur la culture cotonnière : analyse expérimentale et modélisation avec DSSAT

Étude de cas à Parakou (Bénin)

Auteur :	Ombeline NEUJEAN
Promoteurs :	Pr. Charles BIELDERS (UCLouvain/ELI/ELIE) Pr. Pierre TOVIHOUDJI (Université de Parakou)
Lecteurs :	Pr. Marnik VANCLOOSTER (UCLouvain/ELI/ELIE) Pr. Guillaume LOBET (UCLouvain/ELI/ELIA)
Année Académique :	2024 - 2025
Bioingénieur :	sciences agronomiques

Remerciements

Tout d'abord, je souhaite remercier mon promoteur, Monsieur Bielders, pour son aide, sa patience et ses précieux conseils tout au long de ce mémoire. Je remercie également très chaleureusement Kamarou Dine Seydou, pour sa disponibilité, son accompagnement scientifique et ses conseils, que ce soit en Belgique ou au Bénin.

Je souhaite remercier l'HydroModELab de l'Université de Parakou, dirigé par le Pr. Pierre Irenikatché Akponikpè, pour son accueil et son appui scientifique durant mon séjour. Merci également au Pr. Pierre Tovihoudji pour sa présence et l'organisation de visites lors de mon passage à Parakou.

Je remercie les étudiants de l'Université de Parakou, Chérif Idrissou, Adam Mohamed Samari et Djiman Issiakou Babatounde, pour leur aide précieuse et les discussions enrichissantes sur le terrain, ainsi que Monsieur Cyrille Gbaguidi, chef du CPE à Okpara, pour la coordination des travaux aux champs et pour avoir répondu à mes questions techniques.

Je suis reconnaissante envers Frère Vincent pour la visite inspirante de son exploitation agricole et de son centre de formation à Sokonou. Merci également à Laurine Leyen et à Anas Idrissi pour les moments partagés et les bons plats dégustés ensemble à Parakou.

Mon séjour au Bénin a été rendu possible grâce à la bourse octroyée par l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Belgique, fondation que je remercie également pour son précieux soutien.

Merci à mes parents et à ma grande sœur pour leurs encouragements et conseils durant la rédaction de ce travail. Je suis aussi très reconnaissante d'avoir rencontré, au sein de notre promotion, des personnes formidables (Zoé, Guillaume, Luna, Sebastian et tant d'autres) avec qui j'ai partagé bien plus que des repas au Resto U : des moments de qualité, des vacances, des soirées à thème et des week-ends d'auditoire.

Un immense merci à toutes et tous les membres de mon kot à projet, le Kotextile. Après près de trois années partagées ensemble, vous avez rendu la vie universitaire plus joyeuse et pleine de rires, en incarnant l'importance du vivre-ensemble.

Enfin, je souhaite remercier les lecteurs de mon mémoire, Monsieur Lobet et Monsieur Vanclooster, pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce travail.

Table des matières

1	Introduction	6
2	État de l'art	8
2.1	L'agriculture de conservation en Afrique de l'Ouest	8
2.1.1	Contexte, définition et grands principes	8
2.1.2	Techniques de travail du sol	9
2.1.3	Rotation des cultures	11
2.1.4	Associations culturales	12
2.1.5	Nouvelles approches de fertilisation	13
2.1.6	Synthèse des effets attendus de l'AC sur les propriétés du sol et les performances agronomiques de la culture	15
2.2	La culture cotonnière	16
2.2.1	Le cotonnier (<i>Gossypium hirsutum</i> L.) : morphologie et exigences agro-écologiques	16
2.2.2	La culture cotonnière au Bénin	18
2.3	Modélisation de la culture de coton	21
2.3.1	Revue des différents modèles de culture	21
2.3.2	Description générale du fonctionnement du modèle DSSAT	23
2.4	CROPGRO-Cotton	25
3	Objectifs	27
4	Matériels et méthodes	28
4.1	Site expérimental et conduite de l'essai au champ	28
4.1.1	Conditions édaphiques et climatiques du site expérimental	28
4.1.2	Plan expérimental	30
4.1.3	Stratégies de travail du sol	32
4.1.4	Stratégies de semis	32
4.1.5	Stratégies de fertilisation	32
4.1.6	Dispositif des associations culturales (S2 et S3) et gestion des résidus	33
4.1.7	Stratégies de gestion des adventices et des nuisibles	34
4.2	Caractérisation des propriétés physico-chimiques du sol	34
4.2.1	Description de l'échantillonnage	34
4.2.2	Méthodes analytiques	35
4.3	Suivi de la croissance du coton et performances agronomiques	37
4.3.1	Suivi de la biomasse aérienne	37
4.3.2	Mesure de l'Indice de Surface Foliaire (LAI)	37
4.3.3	Récolte et détermination du rendement (grain + fibre)	39
4.4	Traitements statistiques	39
4.5	Modélisation des systèmes de culture avec DSSAT	40
4.5.1	Présentation générale du protocole de modélisation	40
4.5.2	Données d'entrée du modèle DSSAT	41
4.6	Calibration	46

4.6.1	Calibration génétique	46
4.6.2	Ajustement des paramètres d'espèce	48
4.6.3	Analyse de sensibilité	49
4.7	Analyse statistique des simulations	50
5	Résultats	51
5.1	Distribution spatiale et caractéristiques des propriétés du sol sur le site d'étude. . .	51
5.2	Corrélation entre les variables chimiques, physiques et hydrodynamiques et la teneur en C_{tot}	53
5.3	Effets des systèmes de culture et de la fertilisation microdose sur le sol et la culture	54
5.3.1	Paramètres chimiques	54
5.3.2	Paramètres physiques et hydrodynamiques	54
5.3.3	Croissance de la culture	56
5.3.4	rendement (grain + fibre)	57
5.3.5	Phénologie	58
5.4	Paramétrage du modèle DSSAT et analyse de sensibilité	59
5.4.1	Optimisation des coefficients génétiques	59
5.4.2	Analyse de sensibilité des paramètres d'entrée relatifs à la gestion des résidus	60
5.4.3	Analyse de sensibilité des paramètres d'entrée relatifs à la fertilisation et au travail du sol	61
5.4.4	Effet de l'hétérogénéité en carbone du site sur les sorties du modèle	62
5.5	Calibration du modèle (2022 et 2023)	64
5.5.1	Performances agronomiques	64
5.5.2	Phénologie	65
5.5.3	Dynamique de croissance (LAI et biomasse aérienne)	66
5.5.4	Modélisation du bilan hydrique net (2022)	68
5.6	Validation du modèle (2024)	71
5.6.1	Performances agronomiques	71
5.6.2	Phénologie	72
5.6.3	Dynamique de croissance (LAI et biomasse aérienne)	73
6	Discussion et perspectives	75
6.1	Contraste entre la réponse du sol et celle de la culture	75
6.1.1	Inertie des propriétés du sol	75
6.1.2	Effets immédiats des traitements sur les performances agronomiques	76
6.2	Fertilisation microdose : une croissance ralentie sans pénaliser les rendements	78
6.3	Performance du modèle DSSAT : forces et limites	79
6.3.1	Analyse de sensibilité	79
6.3.2	Calibration et validation du modèle : des performances globalement satisfaisantes	79
6.3.3	Faiblesses et biais systématiques du modèle	80
6.4	Perspectives	81
7	Conclusion	83
8	Annexes	85
	Bibliographie	118

Liste des abréviations

Abréviation	Définition
AC	Agriculture de conservation
CEC	Capacité d'échange cationique
EL	Entre les lignes de semis
ET	Évapotranspiration réelle
JAS	Jour(s) après semis
LAI	Leaf Area Index
LC	Labour conventionnel
MO	Matière organique
REU	Réserve en eau utile
SD	Semis direct
SL	Sur les lignes de semis
ST	Strip-till
S1, S2, S3	Système de culture n° 1, 2, 3
SLOC	Teneur en C_{org} dans le profil de sol DSSAT

Chapitre 1

Introduction

L'agriculture constitue un pilier socio-économique essentiel en Afrique de l'Ouest, assurant la subsistance et les revenus d'une grande partie de la population (ALLEN, 2017 ; HEISS et al., 2025). Toutefois, ce secteur fait aujourd'hui face à trois défis majeurs interconnectés : la dégradation des terres arables, une importante vulnérabilité face aux changements climatiques et une insécurité alimentaire persistante (SULTAN et al., 2019 ; WILLAGRI, 2024). La dégradation des sols se traduit notamment par une diminution de la teneur en matière organique, une érosion hydrique et une acidification (NEPAD, 2023). Parallèlement, les projections climatiques indiquent une hausse des températures et une diminution des précipitations, menaçant directement les rendements des systèmes agricoles, majoritairement pluviaux dans la région (SULTAN & GAETANI, 2016).

Face à ces problématiques, l'agriculture de conservation (AC) est envisagée comme une alternative intéressante pour permettre une production agricole durable. Fondée sur trois principes, à savoir *la perturbation minimale du sol, le maintien permanent d'une couverture végétale et la diversification des cultures par rotations et associations culturales* (« FAO », 2025), l'AC vise à renforcer la résilience des systèmes agricoles. Dans le contexte des exploitations familiales ouest-africaines, où l'accès aux intrants est souvent limité, ces principes peuvent être associés à des approches alternatives de fertilisation, comme la fertilisation microdose (MD), qui consiste à appliquer de faibles quantités d'engrais au plus près des plants afin de maximiser leur efficacité (BLESSING et al., 2017).

Au Bénin, la culture du coton reflète bien ces enjeux. Secteur clé pour l'économie rurale, elle constitue la principale source de revenus pour plus de 300 000 ménages (ALIDOU & NIEHOF, 2020). Son intensification depuis les années 90, caractérisée par une monoculture en labour conventionnel fortement dépendante d'intrants chimiques, a cependant conduit à une dégradation progressive des sols et à une stagnation des rendements nationaux, nettement en dessous du potentiel agronomique estimé (IGUE et al., 2013). Face à ce constat, l'adoption de pratiques agricoles plus durables, telles que les techniques culturales de conservation et la fertilisation microdose, apparaît comme une voie intéressante pour concilier économie et préservation des ressources naturelles.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce mémoire, issu d'une collaboration entre l'Université de Parakou et l'Université catholique de Louvain. Ce travail s'appuie sur les recherches initiées en 2022 par Kamarou DINE SEYDOU, sur l'impact des techniques culturales de conservation sur diverses cultures dans la région cotonnière du centre du Bénin. Ce travail cible en particulier la culture cotonnière, avec pour objectif principal d'évaluer si une transition vers ces pratiques peut améliorer la qualité du sol, mais également maintenir ou même améliorer les rendements dans le contexte spécifique du Nord Bénin. La question centrale étudiée est formulée ainsi : « *Quels sont les effets d'une transition vers des pratiques culturales de conservation sur la qualité du sol et les rendements cotonniers au Bénin ?* »

Afin de répondre à cette question, ce mémoire poursuit deux objectifs. Le premier est d'évaluer expérimentalement l'influence de trois systèmes de culture allant du plus conservatif au moins conservatif et de la fertilisation microdose, sur les propriétés chimiques, physiques et hydrodynamiques du sol ainsi que sur les performances agronomiques du cotonnier. Le second consiste

à calibrer et valider le modèle *DSSAT/CROPGRO-Cotton* à partir des données collectées sur le terrain, afin de disposer d'un modèle calibré pour de futures analyses de scénarios.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 L'agriculture de conservation en Afrique de l'Ouest

2.1.1 Contexte, définition et grands principes

L'agriculture, pilier socio-économique de l'Afrique de l'Ouest, constitue la principale source d'emplois et de revenus. À titre d'illustration, les petites exploitations (< 2 ha), qui fournissent environ 42% de l'emploi total (HEISS et al., 2025), contribuent significativement à l'économie régionale, avec près de 35% du PIB de la région (ALLEN, 2017). Cette forte dépendance souligne l'importance de maintenir la productivité du secteur en Afrique de l'Ouest.

Or, l'agriculture ouest-africaine est confrontée à des défis majeurs interdépendants, au premier rang desquels figure la dégradation des terres. Ce problème, alarmant à l'échelle continentale, concerne 70 à 80% des zones cultivées (WILLAGRI, 2024). En Afrique de l'Ouest, cette dégradation est responsable de 38% de la baisse de productivité avec une acuité particulière au Nigeria, au Bénin et en Gambie (MECHICHE-ALAMI & ABDI, 2020). Les facteurs contribuant à cette dégradation incluent la diminution de la teneur en matière organique du sol, l'érosion hydrique et éolienne, l'acidification, la perte de biodiversité et la salinisation (NEPAD, 2023). Un autre phénomène qui accélère la dégradation des sols est le "*nutrient-mining*" qui correspond à un équilibre négatif entre l'apport (naturel ou artificiel) et la production d'éléments nutritifs (MAJUMDAR et al., 2016; SANCHEZ et al., 2015). Ce bilan négatif en nutriments résulte souvent d'un manque d'accès aux engrais dans les exploitations familiales, d'une faible restitution de la matière organique au sol ainsi que d'une mise en culture continue (ONDURU et al., 2005). De surcroît, des processus tels que la volatilisation ou la lixiviation de l'azote, ainsi que l'érosion du sol accentuent ce fléau (MAJUMDAR et al., 2016).

En parallèle, la région fait face à une variabilité climatique croissante. Les projections climatiques pour 2100 (scénario RCP¹ 4.5) indiquent une diminution moyenne des précipitations saisonnières de 4% (référence 1986-2005), une augmentation des températures minimales et maximales de +2,0 °C, et une baisse du rayonnement solaire d'environ $0,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (AMOUZOU et al., 2018). Ces changements climatiques attendus devraient entraîner des pertes de rendement significatives et intensifier les vulnérabilités existantes, notamment la dégradation des terres agricoles (SULTAN et al., 2019). L'Afrique de l'Ouest est ainsi identifiée comme une région très vulnérable aux variations climatiques du fait d'une agriculture essentiellement pluviale et de capacités institutionnelles et économiques limitées. (SULTAN & GAETANI, 2016).

1. Les Representative Concentration Pathways (RCP) sont des scénarios standardisés développés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) afin de modéliser les trajectoires climatiques futures en fonction de différents niveaux d'émissions de gaz à effet de serre. Le chiffre correspond au forçage radiatif qu'ils prévoient pour 2100, mesuré en watts par mètre carré (W/m^2).

Outre les défis environnementaux et climatiques, la sécurité alimentaire demeure un autre enjeu majeur en Afrique de l'Ouest, en raison, principalement, d'une productivité agricole qui peine à suivre la croissance démographique. De plus, l'approvisionnement en denrées alimentaires en Afrique de l'Ouest est fortement dépendant des marchés extérieurs avec, en moyenne, des ménages qui dépendent des importations pour les deux tiers de leur approvisionnement alimentaire (ALLEN, 2017). Cette dépendance rend les populations ouest-africaines très vulnérables à une distorsion du marché (MOSELEY et al., 2010). Les fortes hausses des prix alimentaires consécutives à des conflits politiques (atteignant jusqu'à 40% au Nigeria et 50% au Ghana) ont exacerbé l'insécurité alimentaire et menacent la stabilité économique régionale (« SWAC », 2024).

Face à ces trois défis interconnectés, l'agriculture de conservation (AC) est de plus en plus promue en Afrique pour accroître durablement la production agricole. L'AC se base sur les trois piliers suivants : *une perturbation minimale du sol (1), la diversification des espèces végétales (2) et le maintien d'une couverture végétale permanente (3)* (« FAO », 2025).

Le premier principe, la perturbation minimale (non-labour ou travail réduit), limite les interventions mécaniques sur le sol (ex. semis direct). Le deuxième, la diversification, se traduit par des rotations et associations d'au moins trois espèces différentes (« FAO », 2025). Finalement, le troisième, la couverture permanente (paillage de résidus de culture ou cultures de couverture), nécessite une couverture d'au moins 30% de la surface cultivée pour être efficace (FRANCAVIGLIA et al., 2023).

Avec ces trois grands principes, il a été démontré que l'AC améliore les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (FRANCAVIGLIA et al., 2023). Cependant, des barrières socio-économiques et techniques spécifiques à l'Afrique de l'Ouest freinent encore son adoption à grande échelle (NANA et al., 2015).

2.1.2 Techniques de travail du sol

En Afrique de l'Ouest, la préparation conventionnelle implique un binage manuel à la houe (5 à 7 cm de profondeur), un labour intensifié par la traction animale ou mécanisé, bien que plus coûteux et moins répandu (HULUGALLE & MAURYA, 1991). En effet, une étude réalisée sur 11 pays d'Afrique, avance qu'en moyenne 48% des ménages échantillonnés ont accès à des machines légères (ex. : houe), contre 35% qui ont accès à la traction animale, et seulement 18% qui utilisent des outils mécanisés (KIRUI, 2019). Bien qu'efficace pour préparer le lit de semence (aération, gestion des adventices et incorporation des résidus), son action mécanique répétée dégrade la structure du sol : elle perturbe les agrégats, expose la matière organique du sol à la minéralisation (CARSKY et al., 2002) et peut induire une compaction du sol en profondeur ("semelle de labour") (DEJONG, 2018). Il en résulte une érosion accrue, une perte de carbone organique et une diminution de l'infiltration de l'eau en cas de battance et de compaction (MAHDI AL-KAISI, 2004).

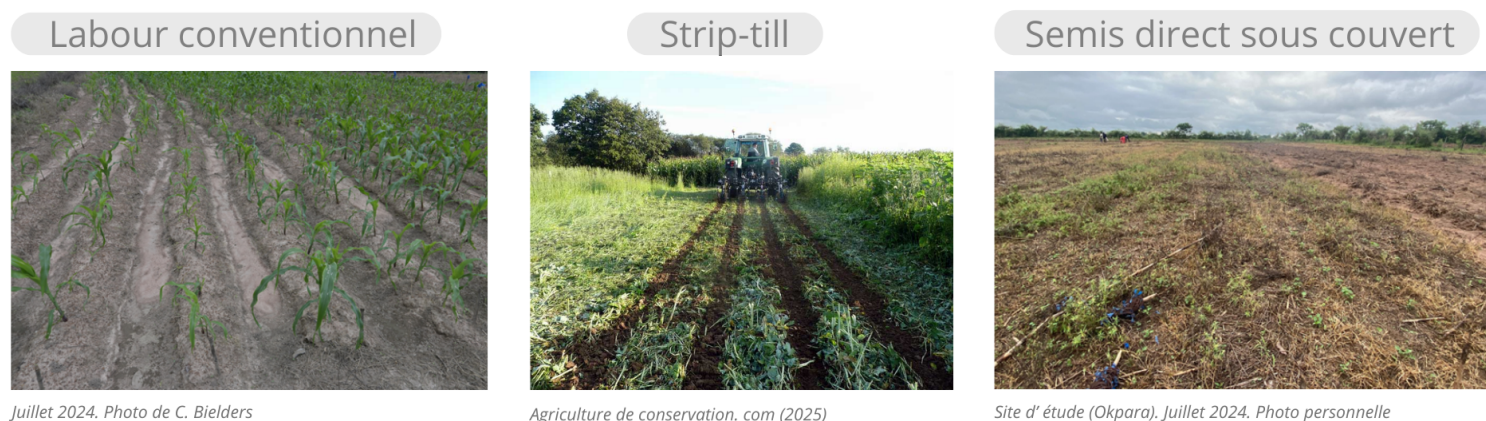


Figure 2.1 – Illustration des trois grandes techniques de travail du sol (labour conventionnel, strip-till et semis direct sous couvert).

L'agriculture de conservation propose ainsi plusieurs techniques visant à limiter cette perturbation mécanique du sol, avec des degrés de réduction variables. La technique dite la plus « conservatrice » est le semis direct (SD) sous couvert. Il consiste à semer sans aucun travail préalable du sol, généralement entre 2 et 6 cm de profondeur sur les résidus de culture. Ses bénéfices sur la physico-chimie du sol sont bien documentés. ZIBILSKE et al. (2002) rapportent ainsi avec le SD sous couvert une augmentation du carbone organique du sol de 58% dans les 4 premiers centimètres et de 15% entre 4 et 8 cm par rapport au labour conventionnel. Des résultats analogues ont été avancés par ASSEFA et al. (2020). Les propriétés hydrodynamiques sont également améliorées. Ainsi, le SD sous couvert peut augmenter la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) entre 0-5 cm de profondeur jusqu'à 15% comparé au labour conventionnel (LC) (OSUNBITAN et al., 2005). Le SD, surtout avec un couvert végétal, améliore significativement la réserve en eau : KARLEN et al. (1994) ont ainsi mesuré une teneur en eau de 32,4% dans les 5 premiers centimètres après 12 ans, contre 25,5% et 23,1% pour des systèmes labourés. Cette meilleure gestion de l'eau se traduit par une réduction de 88% du ruissellement et une perte en terre quasi nulle (passant de 3,8 t/ha à 0,002 t/ha) en SD sous couvert (ROMÁN-VÁZQUEZ et al., 2025). Ces améliorations des propriétés hydriques du sol en SD sous couvert, sont principalement attribuables au fait qu'il permet la conservation des macropores créés par les racines et les organismes du sol, essentiels à la circulation de l'eau (WATSON & LUXMOORE, 1986).

Cependant, le SD sous couvert présente des défis majeurs. Sur le plan agronomique, plusieurs études rapportent des baisses de rendement par rapport au labour conventionnel (BAUDRON et al., 2012; THIERFELDER et al., 2013; VERHULST et al., 2011). Au Bénin, par exemple, NICOU et CHARREAU (1986) notent des chutes de 25% pour le sorgho, 60% pour le maïs et 17% après un cycle de culture pour le coton en SD sous couvert par rapport au LC. Sur le plan physique, l'absence de travail du sol peut entraîner une compaction, avec une hausse de la densité apparente (ρ_b) en surface (OSUNBITAN et al., 2005), par exemple, FOHRER et al. (1999) ont observé sur sol sablo-limoneux une augmentation de 22% de la ρ_b en surface en semis-direct. Pour limiter ces effets néfastes, la couverture végétale doit être suffisante (NANA et al., 2015), seulement la disponibilité des résidus, souvent valorisés en fourrage, reste un frein majeur à son adoption en Afrique de l'Ouest (BATONNO et al., 2007).

Malgré son potentiel, le semis direct reste ainsi peu adopté en Afrique de l'Ouest. Il gagne toutefois du terrain grâce au soutien d'organisations comme l'African Conservation Tillage Network (ACTN).

Dans certains contextes, le SD pose également des limites techniques, notamment sur les sols peu drainants où le labour reste un outil de correction pour améliorer l'humidité, la température et réduire la résistance à la pénétration (AL-KAISI & KWAW-MENSAH, 2020).

Une voie intermédiaire, le strip-till (ST) ou travail en bandes offre un compromis entre semis direct et labour conventionnel. Il consiste à ne travailler que les lignes de semis sur une largeur de 15–20 cm et une profondeur de 15-20 cm en laissant l'inter-rang couvert (VYN & RAIMBULT, 1993). Bien que peu étudiée en Afrique, cette pratique a montré, en Amérique du Nord, un impact positif sur les propriétés physiques du sol. De ce fait, JABRO et al. (2009) notent une hausse de 23% de la K_{sat} (0-10 cm) après un cycle de culture, et HANDISO et al. (2023) une augmentation relative de 35,5% de l'humidité du sol (0-30 cm) par rapport au labour conventionnel après deux années de mise en place. Si les gains de rendement sont souvent marginaux (JASKULSKA et al., 2020), le ST permet une réduction du temps de travail de 50 à 65% (LEE et al., 2011) par rapport au LC. Ces résultats pour le strip-till, issus de contextes tempérés, doivent cependant être interprétés avec prudence pour une application en Afrique de l'Ouest.

2.1.3 Rotation des cultures

Au-delà des techniques de travail du sol, la diversification temporelle des cultures est un pilier fondamental pour restaurer la fertilité. Historiquement, l'agriculture itinérante la garantissait par de longues jachères (10–25 ans) (SAUERBORN et al., 2000). Cependant, la pression démographique de la région ouest-africaine, avec une croissance de 3% contre une hausse de la production céréalière de seulement 1% entre 1980 et 2000, a imposé une culture continue qui a dégradé les sols (SUBBARAO et al., 2000). Dans ce contexte, la rotation culturale est devenue une stratégie essentielle.

En Afrique de l'Ouest, les rotations biennales sont les plus répandues, alternant typiquement une céréale comme le mil (*Pennisetum glaucum*), le sorgho (*Sorghum bicolor*) ou le maïs (*Zea mays*), avec une légumineuse telle que le niébé (*Vigna unguiculata*), l'arachide (*Arachis hypogaea*) ou le soja (*Glycine max*) (ALVEY et al., 2003; BAGAYOKO et al., 2000). L'atout majeur de cette pratique est l'amélioration des rendements céréaliers grâce à la fixation d'azote par les légumineuses (NAAB et al., 2017). Une revue de littérature de STEPHEN MASON et al. (2015) sur les rotations sorgho-niébé a ainsi montré que les rendements du sorgho en rotation augmentent jusqu'à 100%, en particulier lorsque les conditions environnementales ne sont pas favorables (rendements témoins < 1 t/ha), et jusqu'à 20% lorsque les conditions sont plus favorables (rendements témoins > 1 t/ha). De manière similaire, dans les zones cotonnières, l'intégration d'une légumineuse ou d'une céréale en rotation peut doubler le rendement du coton, passant de 572 kg/ha en monoculture à 1155 kg/ha (AGALATI et al., 2022).

L'efficacité de ces rotations dépend de plusieurs facteurs précis. Premièrement, la gestion des résidus de culture est déterminante. La Valeur fertilisante (VF)² en azote pour un maïs suivant une légumineuse (soja) est de 5 kg/ha si les résidus sont exportés, monte à 10 kg/ha s'ils sont laissés en surface, et atteint un maximum de 20 kg/ha lorsqu'ils sont incorporés au sol (CARSKY et al., 2002; HENDRIKS et al., 2021). Le choix des espèces est également déterminant dans l'efficacité des rotations : une association avec une légumineuse fourragère comme le *Stylosanthes fruticosa*

2. La nitrogen fertilizer replacement value, valeur fertilisante en français (VF), se définit comme la quantité d'engrais minéral N que les résidus de culture (issus de la culture i-1) permettent d'économiser lors de la saison suivante (culture i).

peut augmenter les rendements du mil de 8% à 74%, par rapport à la culture non-associée mais les légumineuses à grains comme le niébé ou le soja, mieux valorisées sur les marchés, sont plus largement adoptées malgré une moindre restitution d'azote au sol (CARSKY et al., 2002 ; LEEUW et al., 1994 ; SUBBARAO et al., 2000). De plus, certaines rotations, comme coton-maïs, peuvent générer un ratio C/N de la matière organique du sol supérieur à 20, induisant une "faim d'azote"³ pour les micro-organismes du sol (OUÉDRAOGO et al., 2006).

Moins fréquentes, les rotations triennales intègrent une troisième culture (engrais vert, jachère courte) pour des bénéfices agronomiques suivants : amélioration de la structure du sol, meilleure rétention en eau et une rupture plus marquée des cycles de ravageurs. L'introduction de *Crotalaria* entre une culture de niébé et de maïs, par exemple, peut quadrupler la VF en azote (CARSKY et al., 2002). Néanmoins, l'adoption de rotations, qu'elles soient biennales ou triennales, reste un défi en Afrique de l'Ouest en raison de contraintes structurelles comme l'accès aux semences, les coûts en intrants, la demande en main-d'œuvre et le délai de plusieurs cycles avant que leurs bénéfices ne deviennent apparents (CARSKY et al., 2002 ; SUBBARAO et al., 2000).

2.1.4 Associations culturelles

Si les rotations culturelles assurent une diversification temporelle, l'agriculture de conservation privilégie également la diversification spatiale à l'échelle de la parcelle. Cette diversification se manifeste notamment à travers des techniques comme l'association des cultures. Cette technique traditionnelle en Afrique de l'Ouest, consiste à cultiver simultanément deux espèces ou plus, aux cycles de développement se chevauchant, sur la même parcelle durant la même saison (MBAYE et al., 2014 ; ZONGO, 2013). Cette pratique vise une sécurisation de la production agricole et des systèmes fourragers intégrés, tout en améliorant la fertilité du sol, la maîtrise des adventices et l'utilisation efficace des terres disponibles (FÉLIX et al., 2018).

L'agencement spatial des cultures associées est variable : cultures en rangs distincts ou alternés au sein d'un même rang, distribution aléatoire sans organisation géométrique spécifique, ou encore semis d'une culture principale et associée dans le même poquet (JOSIAS SANOU et al., 2016 ; MBAYE et al., 2014 ; SARR et al., 2013). En Afrique de l'Ouest, les associations les plus fréquentes combinent des céréales (sorgho, mil ou maïs) avec des légumineuses à grains (niébé, arachide) ou fourragères (*Mucuna pruriens*, *Stylosanthes hamata*) (BAYALA et al., 2012).

TRAIL et al. (2016) ont démontré au Sénégal que l'association mil-niébé augmentait la production de grains de 20 à 55%, par rapport au mil en monoculture (1500 kg ha¹), avec des CET⁴ variant de 1,34 à 1,95. Une étude pluriannuelle (2013-2016) de FÉLIX et al. (2018) au Burkina Faso a également mis en évidence l'amélioration du CET par l'association sorgho-niébé comparativement à la monoculture, avec des CET supérieurs à 1 observés dans 50% des cas.

3. Phénomène de compétition entre les besoins de la plante en N et la dégradation des résidus par les micro-organismes du sol qui immobilise de l'azote.

4. Coefficient d'Équivalence des Terres (CET) : somme des rendements de chaque culture en association (pondérés par surface) divisée par leurs rendements respectifs en monoculture. Un CET > 1 indique un gain de productivité.

Au-delà de l'amélioration de la productivité, les associations culturales, notamment maïs-légumineuses, améliorent les propriétés physico-chimiques du sol. Une étude nigériane a montré que l'association maïs-légumineuses, avec incorporation des résidus, favorise la formation de macro-agrégats (106 μm – 250 μm) stables dans l'eau (OGUNWOLE et al., 2010). En Côte d'Ivoire, l'association niébé-maïs a entraîné une augmentation significative des teneurs en carbone (de 0,93% à 1,51%, soit +62,36%) et en azote (de 0,05% à 0,087%, soit +74%) du sol entre 0-20 cm de profondeur par rapport à la monoculture de maïs (ANTOINE et al., 2019) après un cycle cultural. Des augmentations similaires en azote et carbone du sol ont été observées avec l'association maïs-niébé (KIMOU et al., 2023) et une meilleure conservation de l'humidité du sol a été notée au Burkina Faso avec cette même association (COULIBALY et al., 2024).

En contraste avec les effets bénéfiques des associations cités plus haut, AGBOGIDI et EGHO (2012) ont constaté une forte baisse du pH en association, ce qui concorde avec les travaux d'AMADJI et AHOLOUKPÈ (2008) qui mentionnent une diminution du pH (de 6,7 à 6,4 en association) sous culture répétée de niébé au Bénin.

2.1.5 Nouvelles approches de fertilisation



Figure 2.2 – Illustration de la fertilisation microdose dans un poquet aux pieds d'un plant de maïs (site d'étude - Okpara, Juillet 2024, photos personnelles)

La productivité agricole en Afrique de l'Ouest est intrinsèquement limitée par la faible fertilité des sols (OKEBALAMA et al., 2016). Les systèmes agricoles de la région sont ainsi souvent caractérisés par des carences en nutriments essentiels tels que l'azote (N), le phosphore et une faible disponibilité de résidus organiques (DUTTA et al., 2020). Cette situation est amplifiée par un accès restreint aux intrants. Dans ce contexte, VANLAUWE et al. (2014) ont souligné la nécessité d'intégrer un quatrième principe à l'agriculture de conservation, insistant sur l'importance d'une fertilisation appropriée pour optimiser la production.

La fertilisation microdose (MD) se présente comme une technique d'agriculture de précision prometteuse pour les petites exploitations d'Afrique de l'Ouest (OKEBALAMA et al., 2016). Elle consiste en l'application de petites quantités d'engrais minéraux directement dans le poquet ou très près des jeunes plants (Fig. 2.2), généralement dans les 2 à 4 semaines suivant la plantation (BLESSING et al., 2017). Cette application localisée maximise l'efficacité de l'absorption des nutriments par les racines en développement, contrastant avec l'épandage à la volée traditionnel, source de pertes importantes

par ruissellement, lessivage et volatilisation (ADJOGBOTO et al., 2023; WALE et al., 2025). Adaptée aux ressources souvent limitées des agriculteurs ouest-africains, elle utilise des outils simples comme la "*technique Coca-Cola*" pour doser l'engrais, avec un volume de capsule correspondant à 2 à 6 grammes selon le type et la densité de l'engrais (BLESSING et al., 2017). L'application au moment du semis pour un accès immédiat aux nutriments est préconisée, favorisant une croissance précoce, bien qu'une application différée puisse également être efficace, comme démontré au Niger pour le mil (HAYASHI et al., 2008).

Une étude au Ghana a montré une efficacité d'utilisation de l'engrais supérieure de 44% pour le maïs cultivé avec la MD (1,5 g/poquet de NPK (15-15-15)) par rapport à la dose recommandée (MD/2) (INTERFACES, 2008). Cette efficacité augmentée résulte entre autres d'une concentration plus élevée de nutriments (P et N) à proximité des plants au moment de la germination, stimulant la croissance racinaire et l'absorption des nutriments (INTERFACES, 2008). Cela corrobore avec les observations de TOVIHOUDJI et al. (2017) au Bénin et OKEBALAMA et al. (2016) au Ghana qui indiquent que la productivité partielle des facteurs N, P et K fournis par la fertilisation MD est supérieure à celle obtenue avec la fertilisation sous dose recommandée. L'application localisée favorise également un développement racinaire précoce et profond, améliorant l'accès à l'humidité et donc la résilience au stress hydrique de la culture (TABO et al., 2011). Cette amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'engrais en fertilisation microdose résulte généralement en des rendements équivalents entre la fertilisation MD et la dose recommandée, que ce soit sur le sorgho (OUEDRAOGO et al., 2022) ou le maïs (TOVIHOUDJI, AKPONIKPÈ et al., 2019).

Cependant, l'adoption de la fertilisation microdose reste limitée en raison de sa forte intensité en main-d'œuvre (48 heures/hectare contre 8 heures pour l'application à la volée) (INTERFACES, 2008). Un usage continu de la fertilisation microdose peut entraîner une diminution progressive du pH du sol et des niveaux de potassium, comme observé dans des études sur le maïs au Sénégal (RABI et al., 2022). Pour optimiser son efficacité et son adoption, il est suggéré d'appliquer la fertilisation microdose sur des parcelles précédemment fertilisées ou cultivées avec des légumineuses (OUEDRAOGO et al., 2022) ou/et de la combiner avec des amendements organiques (IBRAHIM et al., 2015; TOVIHOUDJI et al., 2017).

2.1.6 Synthèse des effets attendus de l'AC sur les propriétés du sol et les performances agronomiques de la culture

Table 2.1 – Effets des pratiques d'agriculture de conservation (AC) sur le sol et la performance agronomique des cultures par rapport au S1 en conventionnel. Légende : ↑ = augmentation ; ↓ = diminution ; ↔ = effet nul/variable ; CET = Coefficient d'Équivalence des Terres (>1 = gain de productivité).

Principe d'AC	Traitement	Propriétés physiques	Propriétés chimiques / hydrodynamiques	Performance de la culture
(1) Travail du sol	Semis direct (SD) sous couvert	↑ C _{org} ^{1,2} ↓ densité apparente ³ ↓ ruissellement, érosion quasi nulle ⁵	↑ K _{sat} ³ ↑ REU ⁴	Rendement ^{6,7} : ↓
	Strip-till (ST)	↑ humidité du sol ⁹	↑ K _{sat} ¹⁰	Rendement ↔ ou léger gain ¹¹
(2) Rotations	Céréale / Légumineuse (biennale)	Amélioration de la structure du sol ¹²	↑ N disponible ¹³ ↑ rétention en eau ¹⁴	↑ rendements céréales et coton ¹⁵
	Rotation triennale (avec engrais vert)	—	↑ valeur fertilisante en N ¹³	—
(3) Associations	Céréale / Légumineuse	↑ stabilité macro-agrégats ¹⁶ ↑ humidité du sol ¹⁷	↑ C et N ^{18,19} ↓ pH ^{20,21}	↑ production de grains ; CET > 1 ^{22,23}
("4") Fertilisation	Microdose (MD)	↑ développement racinaire précoce ²⁴	↓ pH et K à long terme ²⁵	↑ efficience engrais ; résilience de la culture au stress hydrique ²⁶ ; Rendement (grain + fibre) ↔ (vs DR) ²⁷

Sources : [1] Zibilske, Bradford & Smart (2002) ; [2] Assefa et al. (2020) ; [3] Osunbitan et al. (2005) ; [4] Karlen et al. (1994) ; [5] Román-Vázquez et al. (2025) ; [6] Nicou & Charreau (1986) ; [7] Baudron et al. (2012) ; [8] Nana et al. (2015) ; [9] Handiso et al. (2023) ; [10] Jabro et al. (2009) ; [11] Vyn & Raimbult (1993) ; [12] Bagayoko et al. (2000) ; [13] Gentile et al. (2011) ; [14] Naab et al. (2017) ; [15] Bayala et al. (2012) ; [16] Ogunwale et al. (2010) ; [17] Coulibaly et al. (2024) ; [18] Antoine et al. (2019) ; [19] Kimou et al. (2023) ; [20] Agbogidi & Egho (2012) ; [21] Amadji & Aholoukpè (2008) ; [22] Trail et al. (2016) ; [23] Félix et al. (2018) ; [24] Hayashi et al. (2008) ; [25] Okebalama et al. (2016) ; [26] Blessing et al. (2017) ; [27] Ouédraogo et al. (2022) et Tovihoudji et al. (2019)

2.2 La culture cotonnière

2.2.1 Le cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) : morphologie et exigences agro-écologiques

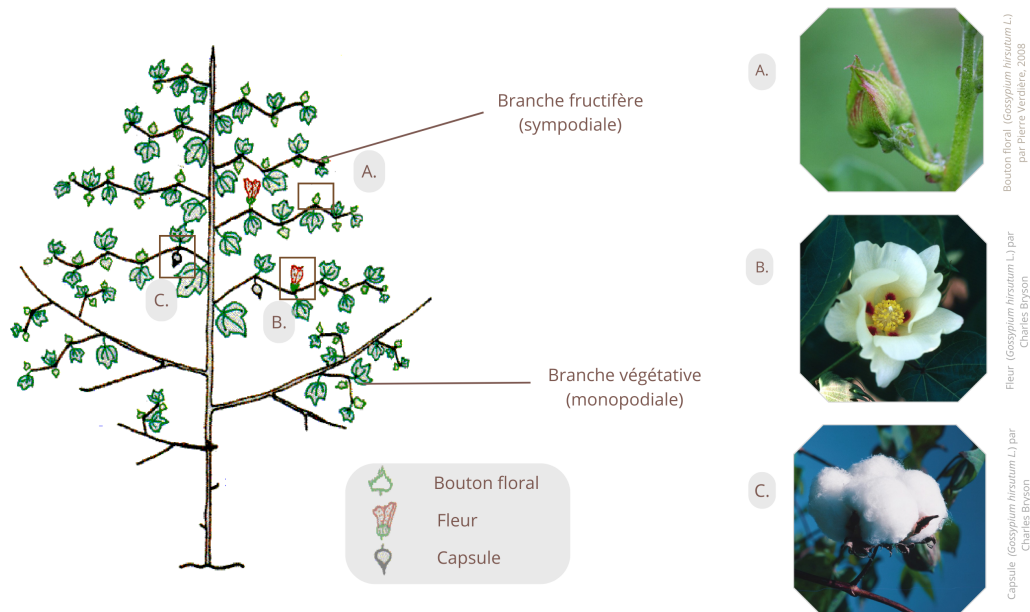


Figure 2.3 – Structure d'un plant de cotonnier montrant les nœuds de la tige principale, les branches végétatives, les branches fructifères, les boutons floraux, fleurs et capsules (modifié d'après DUSSERE (2001)).

Le cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) (Fig. 2.3), une plante arbustive pérenne, est principalement cultivée annuellement pour sa fibre (CONSTABLE & BANGE, 2015 ; REHMAN & FAROOQ, 2019). Son cycle de développement, qui s'étend sur 130 à 170 jours (Fig. 2.4), est fortement dépendant des conditions du milieu.

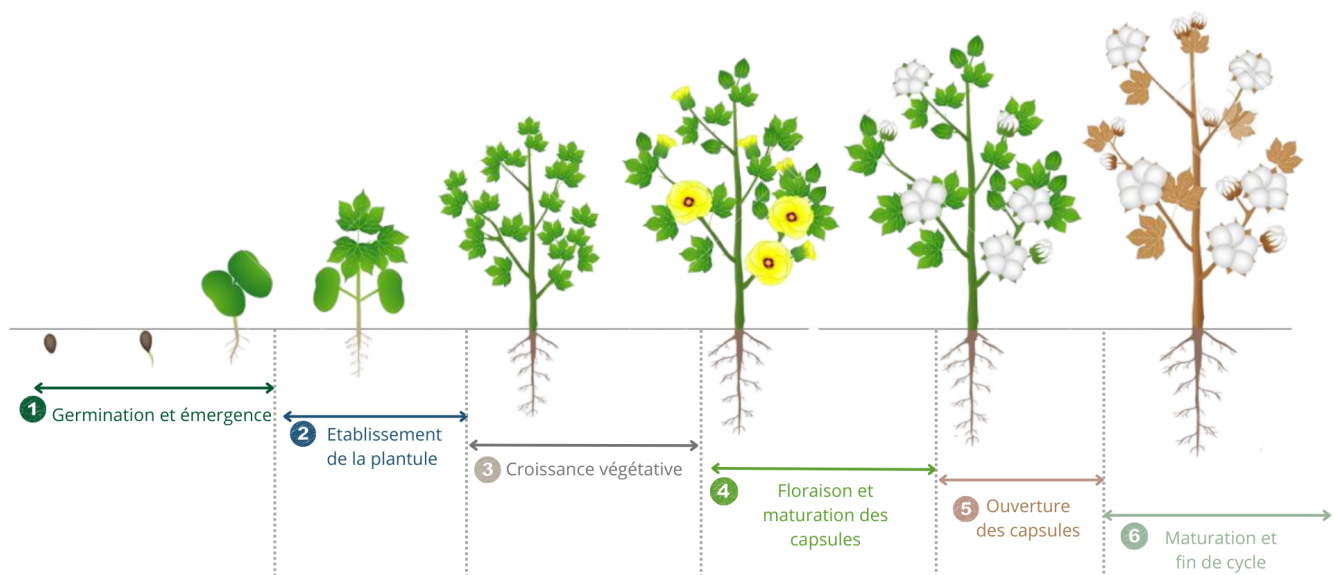


Figure 2.4 – Illustration des six grandes étapes de développement du coton (réalisation personnelle).

La culture se développe préférentiellement sur des sols profonds, perméables, avec un pH optimal entre 6 et 7, et ne tolère pas l'engorgement (EZANM et al., 1998). La germination (3-9 jours après semis - JAS) est une étape critique, sensible aux stress abiotiques (températures extrêmes, déficit hydrique) et physiques comme la compaction du sol (BRADOW & BAUER, 2010). Une température

de sol de 35 °C est idéale pour le développement du système racinaire pivotant (NABI & MULLINS, 2008 ; NILES, 1958). Ce dernier, d'abord concentré dans l'horizon de surface (0-30 cm), s'étend progressivement en profondeur pour atteindre jusqu'à 100 cm, explorant les réserves en eau plus profondes au fil du cycle (LI-ZHEN et al., 2005).

La structure aérienne se compose d'une tige principale qui émet des branches végétatives (monopodiales) et, après 4 à 5 semaines, des branches fructifères (sympodiales) qui porteront les organes reproducteurs (Fig. 2.3) (NATIONAL COTTON COUNCIL AMERICA, 2025). La phase de floraison et de maturation des capsules (environ 50-70 JAS) est la plus décisive pour le rendement. C'est à ce moment que les besoins en eau et nutriments (MULLINS & BURMESTER, 2010) de la plante sont maximaux, requérant 40% du besoin total, estimé à 700 mm en culture pluviale (DATTA et al., 2019 ; HAUCHART, 2005). L'évolution du coefficient cultural (K_c) illustre clairement ce pic de consommation (Fig. 2.5).

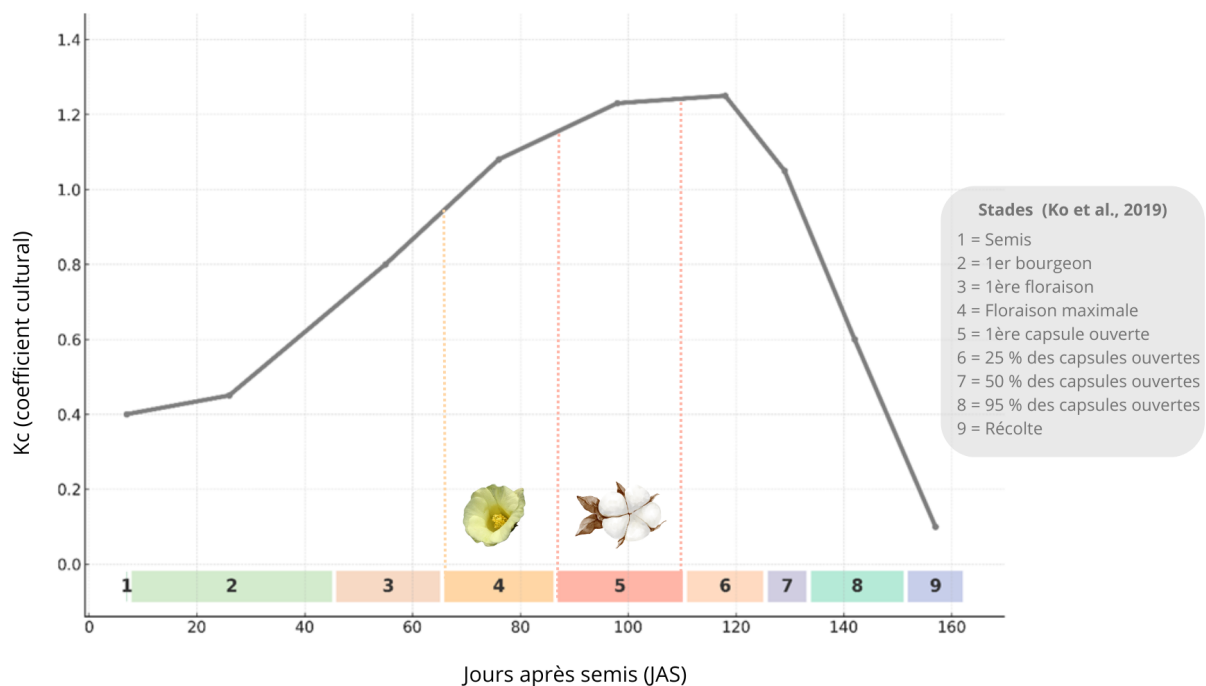


Figure 2.5 – Évolution de la demande en eau. Quantifiée par la valeur du coefficient cultural (K_c) (« FAO », 2025), graphe réalisé sur la base des valeurs de KO et al. (2009).



Figure 2.6 – Grandes étapes du développement de la fleur et de la capsule du coton, en jours après floraison. Modifiée d'après BAI et SCHEFFLER (2024).

Un stress hydrique durant cette période critique peut réduire le rendement de 50 à 80%, alors qu'un déficit en début de cycle ou après l'ouverture des premières capsules a un impact bien plus limité (DATTA et al., 2019 ; ZONTA et al., 2017). De même, des températures supérieures à 36 °C inhibent le développement des branches fructifères (REDDY et al., 1992). La formation de la

fibres (Fig. 2.6), qui s'initie dès la floraison à partir d'une cellule de l'épiderme de la graine, est un processus sensible aux déficiences nutritives et aux attaques parasitaires (ABOE, 2012; BAI & SCHEFFLER, 2024). Le rendement final dépend d'une allocation efficace des photo-assimilats vers les capsules en développement (PETTIGREW & GERIK, 2007).

La phase finale inclut l'ouverture des capsules (100-115 JAS). À maturité, les fibres sèchent, se vrillent et sont constituées d'environ 95% de cellulose et mesurent entre 28 et 32 mm pour les variétés ouest-africaines (EZANM et al., 1998).

2.2.2 La culture cotonnière au Bénin

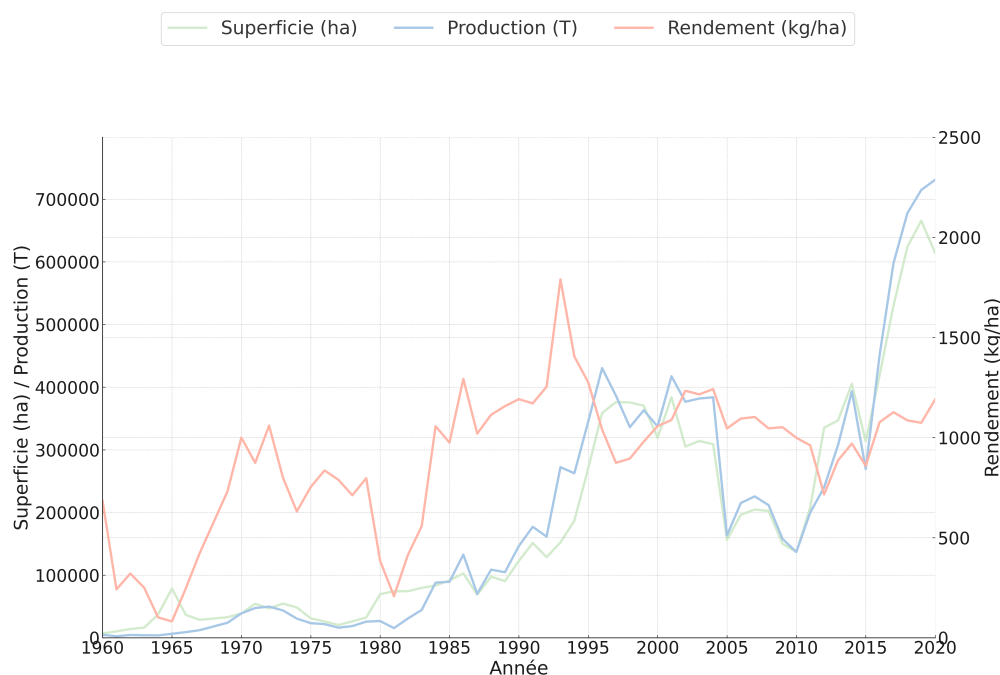


Figure 2.7 – Évolution des rendements (kg/ha), de la superficie (ha) et du niveau de production du coton (t/an) depuis les années 1960. Sur base de données de la Direction de la Statistique Agricole (DSA) et l'Association Interprofessionnelle du Coton (AIC) du Bénin.

La culture de coton : élément socio-économique structurant au Bénin. Le secteur cotonnier béninois constitue une source de revenus substantielle pour plus de 300 000 ménages (ALIDOU & NIEHOF, 2020; CIRAD, 2024) et contribue à plus de 40% de l'emploi en milieu rural (AIHOUNTON, ANGE & JACOB, 2022). La production cotonnière (Fig. 2.7) a connu une augmentation notable dans les années 1990, due aux réformes de privatisation du secteur et a été suivie d'une phase de stagnation des rendements.

L'intensification de la culture cotonnière depuis les années 1990 a causé une importante dégradation des sols. Une étude évaluant la fertilité des sols sur la base de leurs caractéristiques chimiques (CEC, C_{org} et pH_{H_2O}) a ainsi démontré que 68% des sols des régions du sud et du centre du Bénin ont subi une diminution de leur potentiel agronomique (IGUE et al., 2013). Cette situation met en évidence une stagnation des rendements qui induit une expansion des surfaces cultivées en coton afin de maintenir un volume de production compétitif sur le marché international (Fig. 2.7).

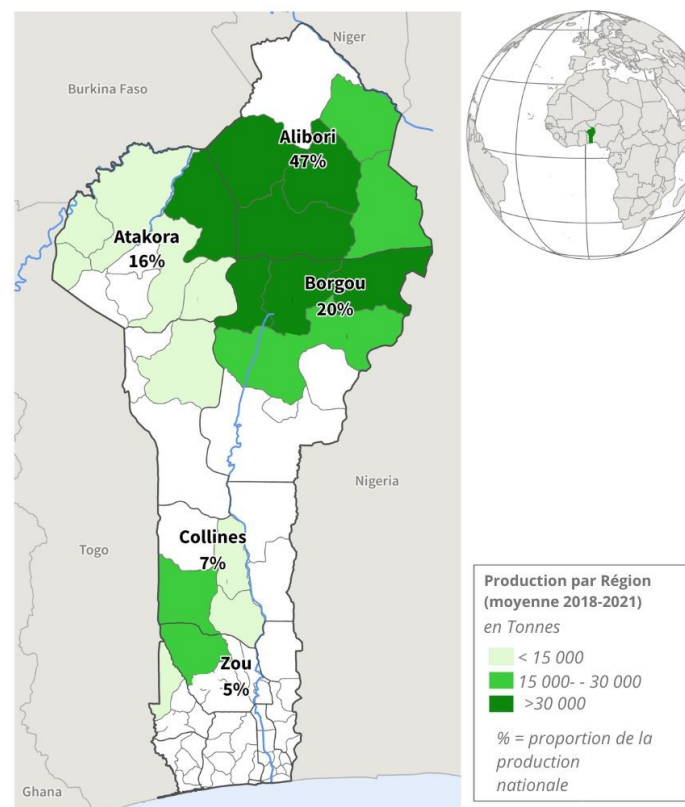


Figure 2.8 – Carte des grandes zones de production du coton au Bénin, leur part (%) respective de la production nationale et leur niveau de production (exprimé en Tonnes). Données issues du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAEP, 2021).

La culture du coton béninoise est principalement localisée dans les régions de l'Atakora, l'Alibori, le Borgou et le Centre (notamment autour de Parakou) (N'GOYE et al., 2022) (Fig. 2.8). Ces zones présentent des conditions climatiques favorables, avec une saison des pluies bien marquée (mai à octobre) permettant l'implantation du coton, suivie d'une saison sèche idéale pour la maturation et la récolte de la fibre. Du point de vue édaphique, les sols sont majoritairement sableux à sablo-limoneux, bien drainés, et légèrement acides, soit des conditions idéales pour la croissance du coton, qui est sensible à l'excès d'eau (REHMAN & FAROOQ, 2019).

Temporalité typique d'une campagne cotonnière béninoise. Après un ameublissement du sol, les graines de coton sont semées à partir de juin, avec le début de la saison des pluies. Après quatre ou cinq mois, la récolte a lieu et s'étale d'octobre à novembre. La phase d'égrenage⁵ débute ensuite en décembre pour durer jusqu'en février (ABOUA et al., 2024). La fibre récoltée et les graines (destinées à la semence ou à la transformation en huile ou en aliments pour bétail) sont ensuite commercialisées (ABOUA et al., 2024).

Techniques de travail du sol. La mécanisation, facilitée par des programmes nationaux, subventionnant à 50% l'acquisition de tracteurs équipés de charrues à disque (KARIMOU et al., 2024), se développe progressivement dans les zones cotonnières du nord Bénin. Toutefois, seules 35% des exploitations recourent au labour motorisé, le reste pratiquant encore un labour manuel ou attelé (SALIOU et al., 2020).

5. Action de séparer mécaniquement la fibre et la graine (CIRAD, 2023).

Le labour, qu'il soit motorisé ou manuel, n'est pas sans conséquences. Les travaux d'HAUCHART (2005) ont montré que le labour, lorsqu'il est mal conduit et peu profond, cause, sur les sols ameublés, un ruissellement intense en début de saison des pluies (mai-juin), une désagrégation mécanique et un appauvrissement chimique du sol. Cette dégradation est particulièrement néfaste pour le coton, dont les jeunes plants sont très sensibles aux carences en nutriments nécessaires à leur développement initial (REHMAN & FAROOQ, 2019).

Face à ces enjeux, des alternatives telles que le semis direct (SD) et le travail réduit du sol (strip-tillage, ST) font l'objet d'expérimentations dans les principales régions cotonnières du Bénin. Par exemple, YEMADJE et al. (2022) ont étudié l'impact de ces techniques sur les rendements et le système racinaire du coton implanté sur sols dégradés. Après deux ans, le semis direct a montré des rendements et une biomasse inférieure de 6 à 20% (soit une perte de 100 à 400 kg/ha). À l'inverse, le strip-till a permis d'obtenir des rendements supérieurs à ceux du système conventionnel et du semis direct (YEMADJE et al., 2022). Ces résultats suggèrent que le labour réduit constitue un compromis intéressant pour améliorer les performances agricoles tout en préservant la qualité des sols.



Figure 2.9 – Intrants vendus par la société béninoise SODECO : semences, engrais, herbicides. Photos personnelles prises en Juillet 2024 sur le site d'Okpara

Intrants et engrais. La culture cotonnière béninoise se caractérise aussi par une forte dépendance aux intrants chimiques, notamment les fertilisants et pesticides (herbicides, insecticides et fongicides) (ALIDOU & NIEHOF, 2020). L'usage intensif de ces intrants génère plusieurs impacts environnementaux. En cas de fertilisation effectuée au mauvais moment ou excessive, l'azote libéré dans l'environnement contribue à la contamination des ressources en eau et à l'eutrophisation. Concernant les pesticides, de nombreux cas de contamination des eaux ont été rapportés, engendrant des problèmes sanitaires majeurs (AIHOUNTON, EDJA & YABI, 2022 ; WESTERBERG et al., 2017).

L'approvisionnement en intrants (semences, engrais et herbicides) est encadré par la Société pour le Développement du Coton (SODECO), qui détient le monopole de leur commercialisation (INSAE, 2020). Comme illustré à la figure 2.9, les principaux fertilisants utilisés sont des formules de N-P-K minéral et de l'urée, complétés par des herbicides spécifiques. Ces intrants sont distribués aux agriculteurs sous forme de crédits (AIHOUNTON, EDJA & YABI, 2022). Par ailleurs, quelques producteurs disposant de cheptels recourent à la fumure organique avant le labour, mais cela reste

marginal.

Cependant, la forte dépendance aux intrants expose les producteurs aux fluctuations des marchés mondiaux (NELSON & SMITH, 2011). Sous contrainte financière, certains producteurs se tournent vers des engrais ou des produits phytosanitaires issus de circuits informels, souvent de qualité inférieure, non homologués, et présentant des risques sanitaires accrus.

Pratiques de rotations et d'associations du coton. La culture cotonnière béninoise actuelle repose principalement sur une rotation coton/maïs, parfois avec d'autres céréales telles que le sorgho ou le mil, tandis que les associations culturales sont devenues marginales (GUO et al., 2023). Cette situation contraste avec les pratiques traditionnelles observées dans les années 1960, où 21% du coton était cultivé en associations, contre seulement 1% en culture pure dans certaines régions de l'Afrique de l'Ouest (BASSETT, 2002). L'intensification industrielle, la mécanisation et l'homogénéisation des pratiques agricoles ont largement contribué à l'essor de la culture pure dans les filières modernisées.

C'est ainsi qu'aujourd'hui, l'usage répété de pesticides dans la production conventionnelle rend l'association culturale quasi impossible. Comme le soulignent des producteurs interrogés par AIHOUNTON, EDJA et YABI (2022) dans les communes béninoises de Kandi, Pehunco, Glazoué et Banikoara : « *En raison des pesticides chimiques que nous appliquons fortement dans la production du coton conventionnel, il n'est pas possible d'associer d'autres cultures pour éviter les risques d'intoxication alimentaire* ». En conséquence, les cultures se font en rotation biennale, sans cultures intercalaires sur la parcelle, avec des successions de céréales et de légumineuses telles que le soja, l'arachide ou le niébé.

Dans les systèmes conventionnels, les résidus de coton sont rarement restitués au sol pendant la saison sèche (octobre à mai). Ce manque de restitution organique limite les bénéfices pour les cultures suivantes et contribue à la dégradation progressive de la fertilité des sols. En conséquence, malgré les efforts de sélection variétale, le rendement moyen en coton graine se maintient autour de 1,2 t/ha (Fig. 2.7), soit un rendement bien inférieur au potentiel théorique de 4,5 t/ha (ABOUA et al., 2021 ; AMONMIDE et al., 2019).

2.3 Modélisation de la culture de coton

2.3.1 Revue des différents modèles de culture

La modélisation de cultures à l'aide de logiciels de simulation est devenue une pratique courante, permettant de prédire l'évolution des variables culturales (croissance, développement) et pédologiques (par exemple la teneur en C_{org}), en fonction du climat et des pratiques agricoles (« Models Overview », 2025). Ces modèles sont utilisés pour des objectifs variés, notamment l'optimisation de l'irrigation et de la fertilisation azotée, la prévision des rendements, ou encore l'évaluation de la vulnérabilité des cultures aux changements climatiques (Z. LI et al., 2018a).

Développés principalement au cours des trente dernières années, les modèles de culture et de systèmes agricoles permettent d'estimer divers paramètres agronomiques, physiologiques, environnementaux et économiques à l'échelle de la parcelle, avec une résolution journalière. Ils utilisent comme variables d'entrée le climat, les caractéristiques du sol et les pratiques culturales. Parmi les modèles en accès

libre, on peut noter AquaCrop (FAO), STICS (INRAE), EPIC (Environmental Policy Integrated Climate), DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) et APSIM (Agricultural Production Systems Simulator).

Table 2.2 – Comparaison des modèles de simulation de culture selon les principales sorties.

Sorties	AQUACROP	APSIM	DSSAT	EPIC	STICS
Agronomiques	✓	✓	✓	✓	✓
Environnementales (azote)	✓	✓	✓	✓	✓
Gestion de l’eau	✓	✓	✓	✓	✓
Économiques	×	×	✓	✓	×
Simulation des rotations	×	✓	✓	✓	✓
Simulation des associations	×	✓	×**	×	✓
Simulation sur le long terme	✓	✓	✓	✓	×***
Pathogènes	×	×*	×	×	✓

³ Sources : [1] (« AquaCrop | Food and Agriculture Organization of the United Nations », s. d.); [2] (« What is APSIM? », s. d.); [3] (JONES et al., 2003); [4] (« EPIC & APEX Models », s. d.); [5] (ILM, s. d.)

* APSIM peut modéliser des indicateurs économiques via des modules complémentaires.

** DSSAT peut simuler quelques associations (milpa par exemple, maïs–haricot) seulement.

*** STICS est conçu pour des modélisations sur 1–5 ans.

Afin de choisir l’outil adapté, il est essentiel de prendre en considération les possibilités de sorties et fonctionnalités de chaque modèle en fonction des objectifs de l’étude. Le tableau 2.2 présente une comparaison des principales sorties et fonctionnalités des modèles de culture les plus courants. Il est admis qu’un modèle fournit des sorties agronomiques s’il simule au moins le rendement, la biomasse et l’indice de surface foliaire (LAI). Les aspects environnementaux, quant à eux, renvoient aux pertes d’azote (lixiviation de NO_3^- , émissions de N_2O) (ZHANG et al., 2025).

D’un point de vue environnemental, EPIC se distingue notamment par sa capacité à estimer l’érosion, la perte en phosphore et la dynamique de la matière organique, bien qu’il fournisse des informations agronomiques moins détaillées que STICS ou DSSAT. À l’inverse, Aquacrop est principalement axé sur la modélisation des ressources en eau et des pratiques d’irrigation, bien qu’il génère également des estimations de rendement. Le modèle australien APSIM, quant à lui, simule les systèmes de culture, en particulier ceux liés à la production et aux résultats écologiques des pratiques de gestion face aux risques climatiques (KEATING et al., 2003). Le modèle DSSAT a été retenu pour cette étude car il propose un module intégré dédié au coton et est largement employé en Afrique de l’Ouest, ce qui permet une documentation accessible. Sa principale limite réside dans l’absence de module dédié aux associations culturales. Des ajustements sont donc nécessaires pour contourner cette contrainte et permettre des simulations adaptées aux pratiques de conservation étudiées dans cette étude.

2.3.2 Description générale du fonctionnement du modèle DSSAT

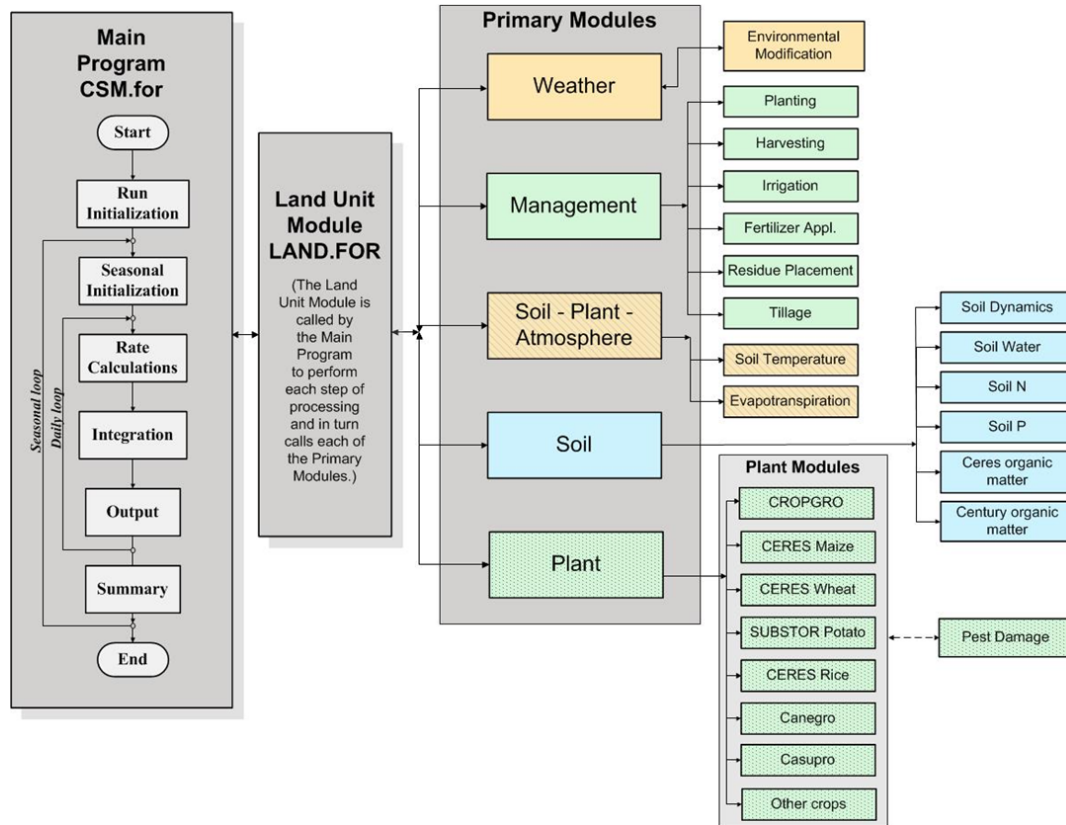


Figure 2.10 – Vue d'ensemble des différentes composantes et modules du modèle DSSAT (JONES et al., 2003)

La figure 2.10 représente de façon simplifiée les différentes composantes, modules et sous-modules de DSSAT.

Le **Main Program** (Fig. 2.10) est le cœur du logiciel DSSAT. Il orchestre l'ensemble du processus de simulation en coordonnant les différents modules (JONES et al., 2003). La section suivante détaille les différents modules de DSSAT et leurs rôles principaux :

Weather module : données climatiques. La simulation commence par l'intégration des données climatiques via le *Weather Module*. Les données météorologiques journalières minimales incluent les métadonnées de la station (latitude, longitude, altitude, hauteur du capteur) ainsi que les températures maximales et minimales quotidiennes [°C], les précipitations [mm] et le rayonnement solaire [W/m²] (« Weather module », 2025). La radiation solaire sert à calculer l'énergie disponible pour la plante, à l'aide de modèles d'interception de lumière basés sur l'indice foliaire (LAI) et le coefficient d'extinction du couvert végétal (K_{EP}) (SAU et al., 2004).

Une variable climatique optionnelle mais pertinente, surtout pour étudier l'impact de scénarios climatiques futurs, est la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone (CO₂). Elle influence en effet les taux de photosynthèse et l'efficacité de l'utilisation de la radiation. DSSAT utilise par défaut une valeur de 380 ppm, inférieure aux concentrations actuelles (> 410 ppm (OTT, 2023) et correspondant plutôt à la moyenne mondiale de 2005 (WEJS, 2021).

Soil module : composition et processus dynamiques du sol. Le module principal du sol, le *Soil Module*, décrit les caractéristiques et processus du sol de la parcelle étudiée, que le logiciel

modélise comme une succession de couches homogènes d'épaisseur définie. Il intègre à la fois les données physico-chimiques du sol (teneur en azote, phosphore, potassium, évolution de la densité apparente et de la capacité de rétention en eau) et sa dynamique hydrique (teneur actuelle en eau, évaporation, ruissellement et infiltration) (PORTER et al., 2010).

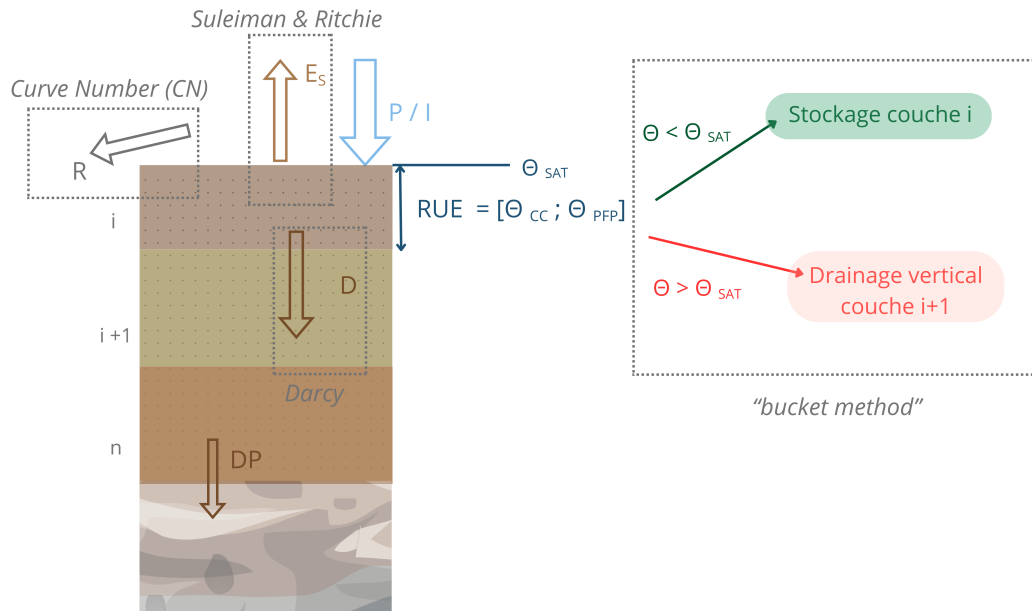


Figure 2.11 – Schéma simplifié des principaux flux hydriques et méthodes de calcul considérées dans le bilan hydrique du *Soil Water Module* de DSSAT. Avec P/I : précipitation/irrigation ; R : ruissellement ; Es : évaporation du sol ; D : drainage vertical ; DP : drainage profond, θ_{cc} : teneur en eau à la capacité au champ ; θ_{sat} : teneur en eau à saturation ; θ_{pfp} : teneur en eau au point de flétrissement permanent.

Trois sous-modules principaux analysent et combinent ces informations : le *Soil Water Module* pour l'hydrologie (ruissellement, infiltration, écoulement saturé, nappe phréatique), le *Soil Nitrogen and Carbon Module* pour les cycles du carbone et de l'azote (fertilisation, décomposition, flux de nutriments), et le *Soil Dynamics* pour les propriétés physiques par couche.

Le *Soil Water Module* réalise le bilan hydrique du sol et est basé sur le modèle de Ritchie, qui utilise une approche unidimensionnelle du bilan hydrique (RITCHIE, 1972). Ainsi, l'eau disponible dans le sol par couche est déterminée par la limite supérieure drainée (DUL), la limite inférieure (LL) et la teneur en eau à saturation (SAT), définies pour chaque couche du profil du sol (SOLDEVILLA-MARTINEZ et al., 2013). L'eau de la couche supérieure s'écoule en cascade vers les couches inférieures (« *Bucket Method* »), imitant le processus d'une série de réservoirs linéaires. Le ruissellement est estimé par la méthode du curve number (CN) (UNITED STATES. SOIL CONSERVATION SERVICE, 1985). L'évaporation suit une approche en deux phases : initialement rapide, limitée par l'énergie disponible, puis ralentie par la réduction de l'humidité en surface, modélisée selon Suleiman-Ritchie (JORDAN & RITCHIE, 1971 ; THORP et al., 2020). Le drainage est calculé à l'aide de l'équation de Darcy pour l'écoulement vertical, tenant compte des gradients de potentiels matriciels, hydrostatiques et gravitationnels.

Parallèlement, le *Soil Nitrogen and Carbon Module* simule la dynamique du carbone et de l'azote du sol. Deux modèles sont proposés dans DSSAT pour la matière organique : CENTURY, qui répartit la matière organique en plusieurs compartiments (actif, lent, passif) et ajuste les taux de décomposition en fonction de la température, de l'humidité et de la texture du sol et CERES-

Godwin, au fonctionnement plus simple, qui utilise une dynamique linéaire entre résidus de surface et humus (GIJSMAN et al., 2002). Le cycle de l'azote est modélisé en intégrant les processus de minéralisation, de nitrification, de dénitrification, de volatilisation ammoniacale et de pertes par ruissellement, selon des cinétiques dépendant des conditions hydriques, thermiques et de l'aération du sol.

Plant module : croissance et développement des plantes. Le *Plant Module* permet la simulation de la croissance et du développement des cultures. Les modèles spécifiques, tels que CROPGRO-Cotton, employé pour le coton, reposent sur une intégration préalable des connaissances physiologiques et morphologiques de la culture. Cependant, la paramétrisation doit être adaptée au cultivar étudié s'il n'est pas déjà inclus dans le modèle. Cette étape cruciale correspond à la calibration génétique.

Soil Plant Atmosphere : interactions entre le sol, la culture et l'atmosphère. Ce module relie les données climatiques, de la culture et les processus hydriques du sol. Il calcule l'évapotranspiration (ET), paramètre clé pour simuler le développement des cultures et la compétition pour l'eau et l'énergie entre sol, plante et atmosphère. L'évapotranspiration potentielle (ET_O) est calculée selon FAO-56 (PEREIRA, 1998) ou PRIESTLEY et TAYLOR (1972), intégrant le rayonnement net, la température, l'humidité. L'ET spécifique de la culture (ET_c) est obtenue en multipliant l' ET_O par un coefficient cultural (K_c) dynamique, qui varie avec l'indice de surface foliaire (LAI) simulé (Fig. 2.5). L' ET_c est ensuite divisée en transpiration végétale (T_c), liée au LAI, et évaporation du sol (E_s), calculée en fonction de la disponibilité en eau du sol selon RITCHIE (1972).

Management Module : gestion de la culture. Les pratiques agricoles (semis, labour, apport de fertilisants) sont gérées par le *Management Module*. Chaque intervention est datée, quantifiée et automatisée. Ces opérations interagissent directement avec l'état du sol (*Soil Module*) et la croissance des plantes (*Plant Module*). Tout au long de la simulation, l'interaction entre les modules (*Weather, Soil, Plant, Management*) est assurée par le Land Unit Module, qui centralise l'état de la parcelle à chaque pas de temps, initie les calculs, transmet les flux d'information entre les modules et ajuste les processus en réponse aux stress hydriques, nutritionnels ou thermiques.

2.4 CROPGRO-Cotton

Dans le cadre de cette étude sur le coton, le modèle CSM-CROPGRO-Cotton (DSSAT v4.8 2.0) est employé. Son principal avantage réside dans sa large calibration et évaluation pour les conditions spécifiques de l'Afrique subsaharienne.

Le tableau 2.3 reprend une brève revue de travaux ayant utilisé le modèle DSSAT dans divers contextes ouest-africains et pour différents objectifs. Les performances des modélisations réalisées lors de ces travaux sont également résumées grâce au RMSE et indice d (voir définitions section 4.7).

Comme illustré dans le tableau 2.3, les études qui ont utilisé le modèle Cotton-CROPGRO en Afrique de l'Ouest montrent généralement de bons résultats, que ce soit lors de la phase de calibration ou de validation. Si l'on considère les critères de RAVELOJAONA et al. (2023)⁶, la plupart des

6. Ces auteurs estiment qu'une simulation est "excellente" si son erreur quadratique moyenne relative (nRMSE)

études reprises dans le tableau ont une précision bonne à moyenne. Les erreurs de simulation sont généralement faibles ($< 10\%$) pour les variables phénologiques (anthèse, ouverture des capsules). Par contre, la qualité de modélisation des performances agronomiques (rendement (grain + fibre)) et de croissance (LAI, biomasse) sont moins bonnes, avec des erreurs ($nRMSE$) qui se situent entre 20 et 46%. Enfin, l'indice de concordance (d), dans tous les cas supérieur à 0,75, indique une bonne correspondance entre les prédictions et observations.

Table 2.3 – Revue des différents travaux ouest-africains utilisant le modèle Cotton-GROPGRO, avec leurs objectifs respectifs et performances des simulations ($nRMSE$ et d) obtenues.

Auteur	Lieu	Objectif	$nRMSE$ (%) / d (-)
(DEMBÉLÉ et al., 2024)	Sotuba, Mali	Déterminer la dose optimale de compost dans un contexte de changement climatique.	— Anthèse : $< 4\%$ — Seed yield : 26% (calib.) et $20,3\%$ (valid.)
(AMOZOU et al., 2018)	Savane sèche au Nord du Bénin (Atakora)	Évaluer les impacts climatiques sur la production de coton.	— Water Stock : 12–27 %, $d = 0,78$ – $0,88$ — Biomasse : 31–46 %, $d = 0,91$ – $0,97$ — Seed yield : 24–39 %, $d = 0,81$
(CHARLEMAGNE et al., 2024) – En cours d'évaluation	Nord-Bénin (soudano et soudano-sahélien)	Évaluer l'effet de certains traits génétiques sur la croissance du coton.	— LAI : $3,2\%$, $d = 0,75$
(LOISON et al., 2016)	Nord du Cameroun	Sélectionner un idéotype coton pour l'environnement (soudano-sahélien).	— Anthèse : $5,8\%$ — Boll opening : $4,3\%$ — LAI _{max} : 28% — Seed cotton yield : $25,7\%$

est inférieure ou égale à 10%, "bonne" entre 10 et 20%, "moyenne" entre 20 et 30%, et "médiocre" au-delà de 30%

Chapitre 3

Objectifs

Ce mémoire vise à comprendre l'impact de l'agriculture de conservation sur la fertilité du sol et la croissance des cultures, en se basant sur une approche expérimentale et de modélisation. Les deux objectifs spécifiques sont les suivants :

1. Evaluer l'influence de différents systèmes de culture basés sur l'agriculture de conservation et de la fertilisation microdose sur divers paramètres physiques, chimiques et hydrodynamiques du sol.
2. Utiliser le modèle de simulation de croissance des cultures DSSAT (JONES et al., 2003) pour modéliser les effets des pratiques culturales de conservation sur la croissance des cultures. Les données expérimentales obtenues lors du premier objectif serviront de base à cette modélisation, permettant à la fois la calibration et la validation du modèle DSSAT.

Chapitre 4

Matériels et méthodes

4.1 Site expérimental et conduite de l'essai au champ

4.1.1 Conditions édaphiques et climatiques du site expérimental

Le site d'étude se situe au niveau de la station de recherche d'Okpara (9° 21' 14.42 N, 2° 41' 3.21 E) dans le village de Kokoma à ± 10 km du centre-ville de Parakou (Bénin) (Fig. 4.1). L'altitude moyenne du terrain est de 327 m et la pente de 1,3%.



Figure 4.1 – Localisation du site expérimental d'Okpara, de la station météo (carte principale) et du dispositif en blocs. Les systèmes de culture S1, S2 et S3 sont différenciés par trame de couleur. Les points orange correspondent aux zones de prélèvement des profils de sol et le numéro à droite (en jaune), au numéro de la parcelle correspondante.

La ville de Parakou, située dans la zone cotonnière du centre du Bénin, a un climat tropical humide de type soudanien (YEMADJE et al., 2022). Ce climat est caractérisé par une unique saison des pluies (entre mai et octobre) et une saison sèche (de novembre à avril). Les températures moyennes mensuelles varient entre 22 °C et 35 °C, pour une moyenne annuelle d'environ 27 °C. (YEMADJE et al., 2022) (Fig. 4.2). Dans le Borgou (Parakou et région environnante, voir Fig. 2.8), la pluviométrie annuelle moyenne est de 900 à 1200 mm (OYDE, 2023).

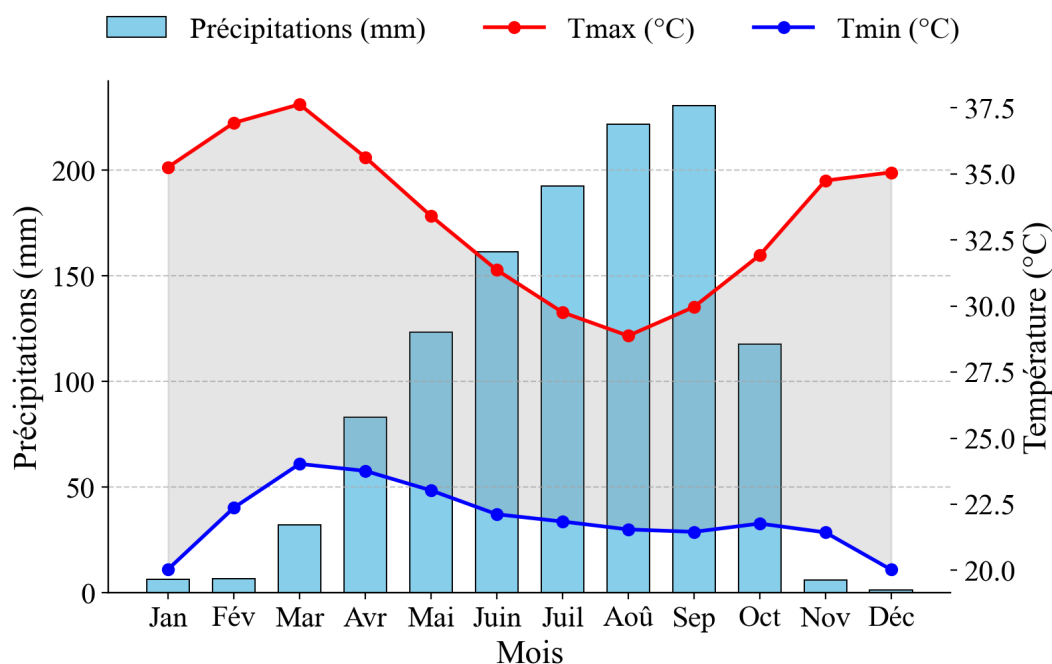


Figure 4.2 – Moyennes climatiques historiques (1994-2024) mensuelles des précipitations (mm), températures maximales et minimales (°C) de l'Aérodrome de Parakou (9° 21' 22" N 2° 36' 32" E, altitude = 393 m)

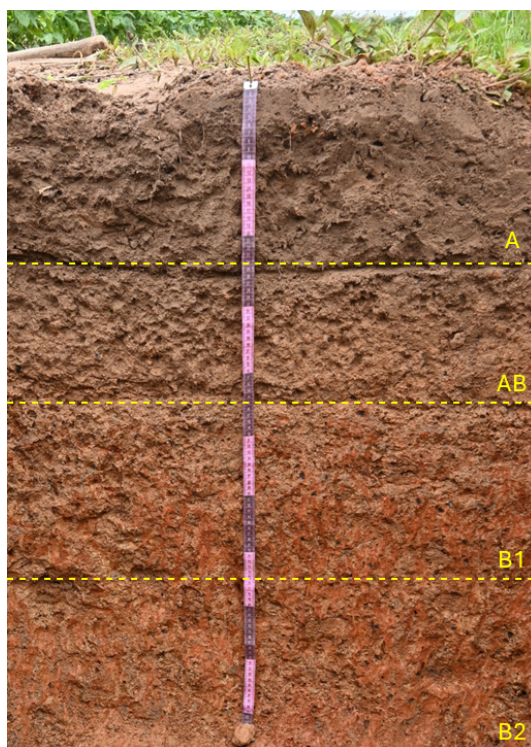


Figure 4.3 – Photographie du profil pédologique (voir point orange sur la Figure 4.1) avec délimitation des horizons A à B2.

La majorité des sols de la région de Parakou sont de type ferrugineux tropical (système français de classification), bien drainés et structurés (ORSTOM, 1977). Ces sols correspondent aux Lixisols selon le système de classification des sols de la FAO (YOUSSEF & LAWANI, 2000). Dans la zone du site d'étude, les sols sont de texture sablo-limoneuse. (LAIBI et al., 2017). Ce type de sol présente plusieurs contraintes lors de sa mise en culture : il est sujet à l'érosion hydrique, possède un pH faiblement acide et une faible réserve en eau utile (REU) ainsi que des déficiences en éléments nutritifs tels que le phosphore, le potassium et l'azote (MÉNARD, 2018).

Table 4.1 – Description de la morphologie et des propriétés chimiques (Corg, N_{tot}, C/N, pH eau et KCl) par horizon du profil.

Horizon	Prof. (cm)	Morphologie	Corg (%)	N _{tot} (%)	C/N	pH H ₂ O (/)	pH KCl (/)
A	0–25	Brun clair, sableux, peu d'agrégats, racines abondantes	0.43	0.040	10.7	6.1	5.7
AB	25–45	Brun plus clair, concrétions Fe/Mg, peu de racines	0.27	0.031	8.5	5.5	5.3
B1	45–75	Rouge clair, nodules à taches noires, très peu de racines	0.18	0.020	8.0	5.8	5.5
B2	75–100	Rouge vif, mêmes propriétés que B	0.14	0.028	5	5.9	5.9

Trois profils de sol ont été creusés à différents endroits du site d'étude (Fig. 4.1 (points oranges)). Les caractéristiques morphologiques et les propriétés chimiques des horizons du profil pris au niveau de la parcelle n°6 sont détaillées à la figure 4.3 et dans le tableau 4.1. Les propriétés et les photographies des deux autres profils, réalisés dans les parcelles 16 et 21, se trouvent en annexes (Annexe A).

4.1.2 Plan expérimental

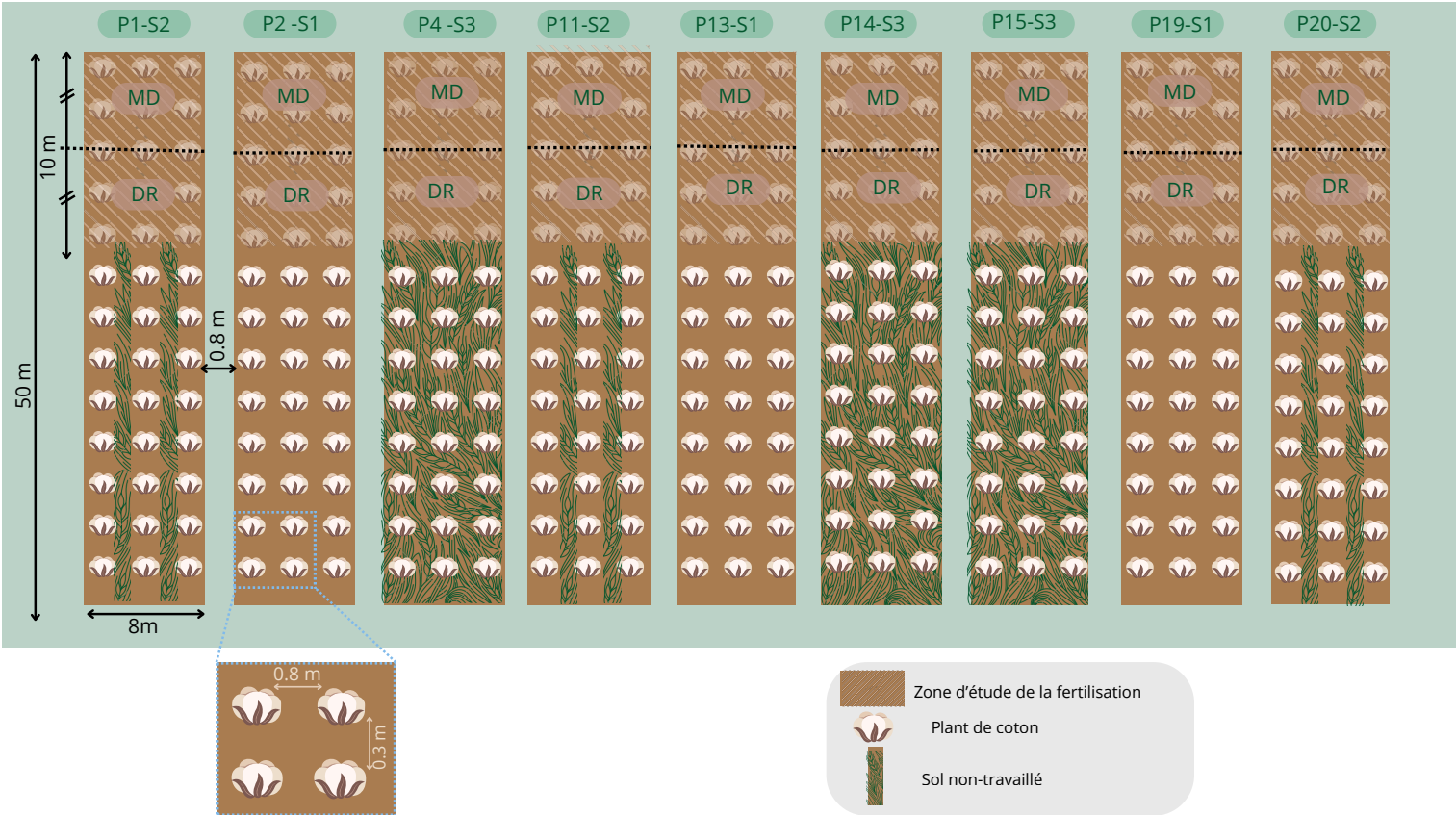


Figure 4.4 – Dispositif expérimental des neuf parcelles de coton échantillonnées en 2024. La zone hachurée indique la zone d'étude de la fertilisation, comprenant deux modalités : DR (dose recommandée) et MD (microdose). Sur cette zone, les cinq premiers mètres sont en DR, les cinq suivants en MD. Les plants de coton sont espacés de 0,8 m (entre les lignes) × 0,3 m (sur la ligne). Les zones en vert représentent les bandes de sol non travaillé mécaniquement.

L’essai a été mis en place en 2017. Dans le cadre de ce mémoire, seules les données relatives aux parcelles de coton sont exploitées. Pour les données de rendement (et autres paramètres liés à la croissance du coton), les années 2022, 2023 et 2024 sont prises en compte. Des campagnes d’échantillonnage de sol ont par ailleurs eu lieu en 2024 afin d’évaluer l’impact des systèmes étudiés sur la qualité des sols.

L’essai comprend 21 parcelles (Fig. 4.1). Chaque parcelle mesure 50 m de long et 8 m de large. Dix rangs de semis sont présents sur chaque parcelle et espacés de 80 cm. Seules neuf¹ parcelles de coton sont retenues (Fig. 4.4). Deux facteurs sont étudiés : l’effet du système de culture et, depuis 2022, celui de la dose de fertilisant appliquée.

Table 4.2 – Caractéristiques agronomiques des systèmes S1, S2 et S3 : cultures, travail du sol et type de rotation.

Système	Culture ¹	Travail du sol	Rotation
S1	Coton (année 1), Maïs (année 2)	Labour conventionnel (LC)	Biennale
S2	Coton (année 1), Maïs + niébé (année 2)	Strip-till (ST)	Biennale
S3	Coton (année 1), Maïs + <i>Stylosanthes guianensis</i> et <i>Crotalaria retusa</i> (année 2), Sorgho + soja et <i>Crotalaria juncea</i> (année 3)	Semis direct et ST sur les dix derniers mètres dans la partie fertilisation	Triennale

¹ Un tableau reprend la succession des cultures par parcelles de 2017 à 2024 (Annexe B).

L’étude compare trois systèmes de culture, définis par des modalités spécifiques de travail du sol, d’associations culturales et de rotation (table 4.2). Des photos illustrant chacun des trois systèmes sont présentées en annexe (Annexe C). Le système témoin (S1) se caractérise par un travail du sol conventionnel, l’absence d’association et une rotation biennale coton/maïs. Les systèmes S2 et S3 se caractérisent, respectivement, par un travail du sol limité au strip-till avec une rotation biennale coton/maïs et une association dans le cas du maïs (S2), et par l’absence de travail du sol (semis direct) avec une rotation triennale coton/maïs/sorgho et des associations dans le cas du maïs et du sorgho (S3) (tableau 4.2). Le coton est cultivé en culture pure dans chacun des trois systèmes. Un dispositif expérimental en blocs randomisés, avec trois répétitions par système, a été mis en place.

L’effet de la fertilisation microdose (MD) est étudié sur les dix derniers mètres de chaque parcelle de coton, en comparaison avec la dose recommandée (DR) (Fig. 4.4). Ce facteur a été introduit en 2022. Dans cette zone, les cinq premiers mètres reçoivent la DR, tandis que les cinq derniers mètres sont fertilisés avec la microdose (DR/2) (voir § 4.1.5). Dans le système S3, ces dix derniers mètres ont été travaillés en ST plutôt qu’en SD.

L’étude comprend ainsi six traitements (Système × Fertilisation) pour le coton : S1-DR, S2-DR, S3-DR, S1-MD, S2-MD et S3-MD. Les effets de la fertilisation MD sont évalués sur les paramètres de croissance (indice de surface foliaire, LAI, biomasse) ainsi que sur le rendement (grain + fibre) du coton. Quant aux effets du système, ils sont analysés à la fois sur les paramètres de croissance et sur le rendement, mais également sur les propriétés chimiques, physiques et hydrodynamiques

1. À la figure 4.4, seules sont représentées les parcelles avec du coton en 2024. La succession des cultures de 2017 à 2024 est reprise en Annexe B.

du sol.

4.1.3 Stratégies de travail du sol

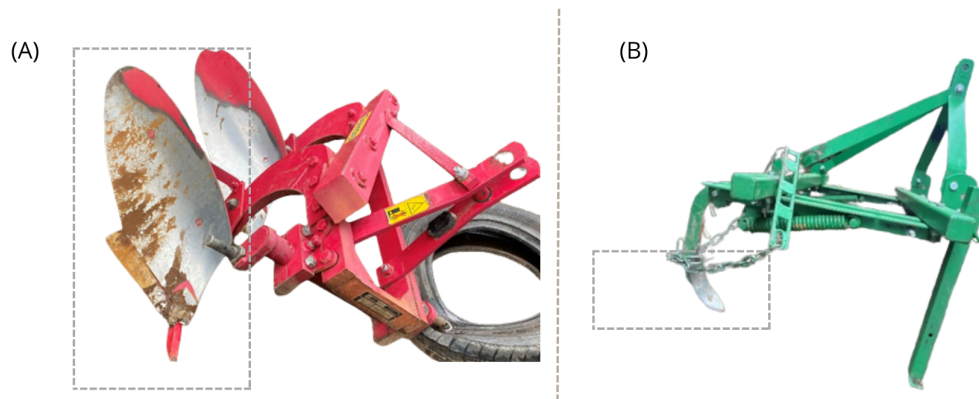


Figure 4.5 – charrue à socs (A) employée en labour conventionnel (S1) et cultivateur léger à dents employé (B) pour le strip-till (S2).

Les opérations de travail du sol pour le S1 ont été réalisées entre un jour et une semaine avant le semis, selon les précipitations. Elles avaient pour objectif d’assurer un ameublissement suffisant du sol après la saison sèche, période durant laquelle sa cohésion élevée rendait toute intervention mécanique impraticable. Contrairement au labour conventionnel, qui requiert un sol meuble et humide, le strip-till (S2) peut être pratiqué sur un sol sec. Cette différence de contraintes hydriques a entraîné un décalage de 7 à 15 jours entre le semis des S2 et S3 et celui du S1.

4.1.4 Stratégies de semis

Le semis du coton (cultivar : OKP 768, variété locale) a été effectué manuellement à la fin du mois de juin (les dates de semis par traitement et par année sont présentées dans le tableau A.5). Quatre graines ont été déposées par poquet, selon un espacement de 80 cm entre les lignes et de 30 cm entre les plants sur la ligne (Fig. 4.4). Une éclaircie a été réalisée 15 jours après semis (JAS) pour ne conserver qu’un seul plant par poquet, permettant d’atteindre une densité initiale de 41 666 plants/ha, tous systèmes confondus.

4.1.5 Stratégies de fertilisation

L’étude de la fertilisation a comparé l’approche en microdose (MD) à la dose recommandée (DR) pour le coton. Sur l’ensemble des parcelles, un engrais granulaire NPK (14-18-18) ainsi que de l’urée (46% N) ont été utilisés.

Le dispositif expérimental (détaillé dans la section 4.1.2) était le suivant :

- ***Zone d’étude de la fertilisation*** (les 10 derniers mètres de chaque parcelle) :
 - Subdivisée en deux sous-parcelles de 5 mètres.
 - La première moitié a reçu la microdose (MD), à savoir 2,4 g/poquet de NPK et 0,6 g/poquet d’urée, ce qui correspond à 25,5 ; 7,8 et 14,9 kg/ha de N, P, K + urée.

- La seconde moitié a reçu la dose recommandée (DR), soit 4,8 g/poquet du même engrais NPK que pour la MD et 1,2 g/poquet d'urée.

Dans cette zone, pour les deux modalités (DR et MD), l'engrais a été appliqué en poquets à environ 4 cm de profondeur, puis recouvert de terre. Les applications se sont effectuées à 10 JAS pour le NPK et ont été complétées par de l'urée à 40 JAS.

- **Reste de la parcelle** (les 40 premiers mètres, en dehors de la zone d'étude) : L'engrais NPK et l'urée ont été épandus à la volée selon la dose recommandée de 200 et 50 kg/ha respectivement. L'engrais NPK a été épandu à 15 JAS et l'urée à 40 JAS.

4.1.6 Dispositif des associations culturales (S2 et S3) et gestion des résidus

Dans le S2, le niébé a été semé 20 jours après le maïs en double ligne dans les interlignes du maïs, alors que dans le S3, le *Stylosanthes guianensis* (ligne continue) et la *Crotalaria retusa/juncea* (0,3 m entre poquets) ont été semés 20 jours après le maïs, à 0,2 m de la culture principale. Enfin, le soja a été associé au sorgho selon un dispositif alternant quatre rangs de soja alternant avec deux rangs de sorgho (0,4 m × 0,2 m) (Fig. 4.6).

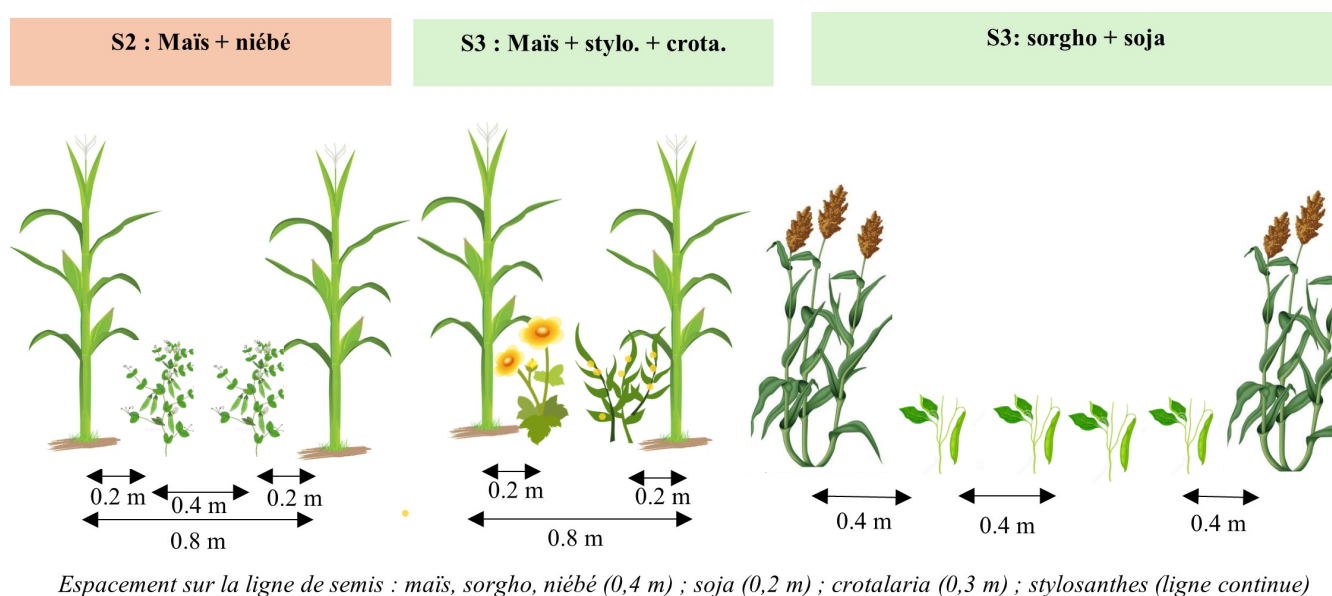


Figure 4.6 – Illustration des associations culturales testées dans les systèmes de culture : S2 (maïs + niébé), S3 (maïs + *Stylosanthes guianensis* + *Crotalaria retusa/juncea*) et S3 (sorgho + soja). Les espacements du schéma correspondent aux espacements entre lignes de semis.

Dans tous les systèmes, afin de maintenir une couverture du sol, les tiges de coton ont été laissées sur les rangées de maïs au cours de la saison suivante sans être enfouies. Concernant la gestion des autres résidus de culture, ceux du maïs ont été enfouis dans le sol dans le S1. En revanche, dans les S2 et S3, les résidus de maïs et de niébé et/ou de sorgho ont été dispersés à la surface des parcelles après la récolte. Par ailleurs, pour enrichir le sol, au début de chaque saison, la biomasse fraîche provenant des cultures de couverture (crotalaria et stylosanthes) a été fauchée et épandue à la surface de la parcelle deux semaines avant le semis. Il convient de noter une exception à ces pratiques, en 2020, où un incident de pâturage s'est produit en raison de la rupture de la clôture

du site, permettant à des bœufs d'entrer dans les parcelles.

4.1.7 Stratégies de gestion des adventices et des nuisibles

Un herbicide sélectif de pré-levée (COTOCHEM G 560 SC, à base de prométhrine, fluométuron et glyphosate, 3 L/ha) a été appliqué juste après le semis dans le système conventionnel (S1) et localisé sur la ligne de strip-till en S2 et S3, suivi d'un herbicide post-levée (DEAL 110D, trifloxysulfuron-sodium, 1 L/ha) à 28 JAS.

Pour la protection phytosanitaire, sept traitements insecticides ont été effectués entre 37 et 121 JAS, à intervalles de deux semaines : trois passages au THALIS 112 EC (emamectine benzoate + acétamipride, 500 mL/ha), un traitement au BELLA FTE 424 EC (deltaméthrine + chlorpyrifos-éthyl, 500 mL/ha), puis trois passages alternant BELT EXPERT (flubendiamide + thiaclopride, 100 mL/ha) et THUNDER 145 O-TEQ (imidaclopride + bêta-cyfluthrine, 200 mL/ha).

4.2 Caractérisation des propriétés physico-chimiques du sol

4.2.1 Description de l'échantillonnage

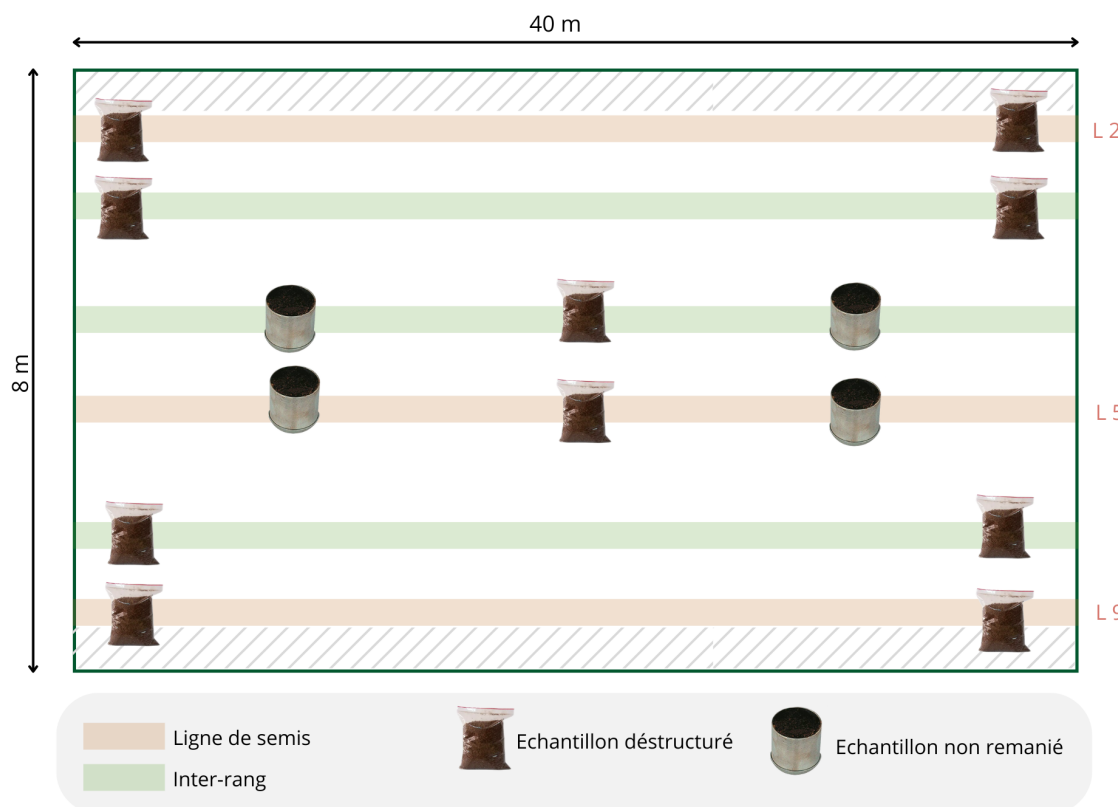


Figure 4.7 – Schéma d'échantillonnage des sols sur une parcelle type (40 m × 8 m) : position des échantillons destructurés et non remaniés sur les lignes de semis et interlignes (L2, L5 et L9). La ligne L5 correspond à la zone centrale de la parcelle.

Afin de caractériser les propriétés chimiques, physiques et hydrodynamiques du sol des trois systèmes, des échantillons de sol perturbés et non perturbés ont été collectés en 2024 dans les 40 premiers mètres de chaque parcelle, donc à l'exclusion de la partie consacrée à la comparaison fertilisation DR et MD. L'effet de la fertilisation sur ces paramètres ne sera donc pas étudié. L'échantillonnage du sol a été effectué de la façon suivante et est illustré à la figure 4.7 :

- **Échantillons déstructurés / composites (analyses chimiques)** : sur chaque parcelle, dix points de prélèvement ont été répartis selon un schéma présenté à la figure 4.7 (correspondent aux sachets). À chaque point, des prélèvements ont été effectués sur la ligne de semis (ligne verte) et sur l’interligne (ligne orange), à deux profondeurs (0–20 cm et 20–40 cm). Ces sous-échantillons ont été mélangés pour former un échantillon composite par parcelle et par profondeur. Ces échantillons ont servi aux analyses chimiques (pH, C_{tot} , N, CEC).
- **Échantillons non remaniés (propriétés physiques et hydrodynamiques)** : quatre échantillons de sol non remaniés ont été prélevés entre 0 et 5 cm de profondeur à l’aide de cylindres de Kopecky (100 cm^3) au centre de chaque parcelle. Parmi eux, deux ont été prélevés sur la ligne de semis et deux dans l’interligne pour chaque parcelle du S2 et S3. Pour le S1, les échantillons ont été prélevés uniquement entre les rangs. Ces échantillons ont servi à l’étude des propriétés hydrodynamiques : conductivité hydraulique à saturation (K_{sat} en mm/h), courbe de rétention et densité apparente (ρ_b , en g/cm^3).
- **Fosses pédologiques** : trois fosses d’un mètre de profondeur ont été creusées (voir position des fosses à la figure 4.1). Pour chaque horizon, un échantillon non remanié et trois échantillons déstructurés ont été collectés pour une caractérisation pédologique plus détaillée (tableau 4.1 et Annexe A).

4.2.2 Méthodes analytiques

Paramètres chimiques. Le carbone et l’azote total ont été analysés par l’analyseur élémentaire CHNS *Vario El Cube* (ELEMENTAR, 2025), qui fonctionne selon le principe de la combustion catalytique, basée sur la méthode de DUMAS (1831). Le pH du sol a été mesuré dans l’eau (pH_{H_2O}) (ratio sol :eau (1 :5)) et dans une solution 1M de chlorure de potassium (pH_{KCl}) à l’aide d’un pH-mètre de la série « 720 WTW inoLab » (WTW GMBH, 2006). Enfin, la capacité d’échange cationique potentielle (CEC) à pH 7 a été déterminée par la méthode à l’acétate d’ammonium de Metson (STORIE, 1957).

Paramètres physiques. Pour déterminer la densité apparente ρ_b (g/cm^3), les échantillons de sol non remaniés (voir section 4.2.1) ont été séchés à l’étuve à 105°C jusqu’à masse constante. La ρ_b a ensuite été calculée en divisant la masse de sol sec par le volume connu du cylindre Kopecky (100 cm^3).

Paramètres hydrodynamiques. La conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) a été déterminée à l’aide de l’appareil KSAT qui est un perméamètre à charge variable (METER GROUP, INC., 2024).

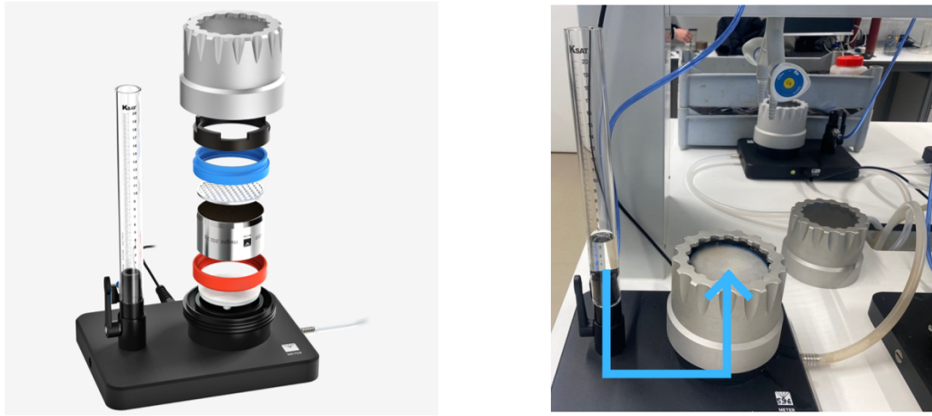


Figure 4.8 – Appareil KSAT (METER GROUP, INC., 2024).

Cet appareil injecte de l'eau par la base du cylindre (flèche bleue, Fig. 4.8) et enregistre la variation de la hauteur de la colonne d'eau. Le Kopecky a été placé de telle manière que la surface du sol² soit orientée vers le bas. Cette précaution est nécessaire car l'eau est injectée par le bas, simulant ainsi un processus d'infiltration dans le sol similaire à celui d'une pluie. Par la suite, le K_{sat} a été calculé à partir de l'évolution de la hauteur de la colonne d'eau en fonction du temps (mesurée au niveau du tube en verre - Fig. 4.8), cette valeur est directement fournie par le logiciel (*Ksat View v.1.6.5*).

La courbe de rétention en eau (θ , pF), a été établie en combinant deux techniques complémentaires, afin de couvrir l'ensemble de la gamme d'humidité. Pour caractériser le comportement du sol de la saturation jusqu'à des conditions relativement sèches, le système automatisé *HYPROP* a été employé (METER GROUP, INC., 2022a). Avant d'employer l'appareil, l'échantillon de sol est d'abord saturé en eau puis placé sur une balance (Fig. 4.9). Deux tensiomètres ont ensuite été insérés à deux profondeurs distinctes au sein de l'échantillon (Fig. 4.9). Cet appareil fonctionne sur la base de la méthode d'évaporation de SCHINDLER (1980).

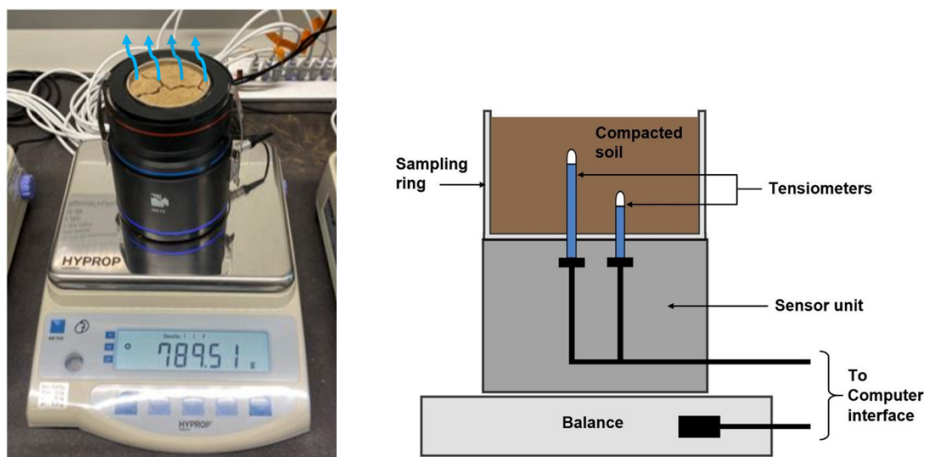


Figure 4.9 – Photo et Schéma de l'équipement *HYPROP* utilisé pour établir les courbes de rétention d'eau du sol (AZOOR et al., 2019).

Le système *HYPROP* enregistre simultanément deux paramètres au cours du temps : (1) la diminution de la masse de l'échantillon, qui est directement convertie par le logiciel en une

2. Au moment du prélèvement

diminution de la teneur en eau volumique (θ_v , en cm^3/cm^3), et (2) l’augmentation du potentiel matriciel de l’eau dans le sol, mesurée par les tensiomètres (Fig. A.5). Cette technique a une limite majeure : lorsque le sol devient trop sec, la tension de l’eau excède la capacité de mesure des tensiomètres ($pF \approx 2,9$ (/)). À ce seuil, un phénomène de *cavitation* se produit, marquant la fin de la mesure par l’appareil *HYPROP*. De ce fait, pour étendre la gamme des pF couverts, la teneur en eau au point de flétrissement permanent (θ_{pfp} , pF 4,2 (/)), a été déterminée par la méthode des plaques à haute pression.

Ensuite, les données obtenues (θ_v , pF) de l’*HYPROP* (jusqu’ au $pF \approx 3$) et le point unique (θ_{pfp}), mesuré par la méthode des plaques de pression, ont été regroupées (Fig. A.6) et le modèle bimodal PDI de van Genuchten a été ajusté sur ces données³ (Voir détails de la méthode à l’Annexe E) (PETERS et al., 2025). Ce modèle a été sélectionné en raison de ses performances statistiques supérieures (RMSE et AICc les plus faibles) et de sa bonne représentation visuelle des données expérimentales (Fig. A.6). L’utilisation d’un modèle bimodal se justifie, pour ce Lixisol à texture sablo-limoneuse, par la présence potentielle d’une double porosité due à la micro-agrégation (DECKERS et al., 2024), une approche déjà validée dans des études similaires au Bénin (DE CONDAPPA et al., 2008).

Finalement, la courbe de rétention modélisée (Fig. A.6) a permis de calculer la Réserve en Eau Utile, REU, qui est définie comme la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ (θ_{cc} , estimée à pF 2,5) et celle au point de flétrissement permanent (θ_{pfp} , à pF 4,2), deux valeurs lues directement sur la courbe ajustée (Fig. A.6).

4.3 Suivi de la croissance du coton et performances agronomiques

4.3.1 Suivi de la biomasse aérienne

L’évolution de la biomasse aérienne du coton a été déterminée par des mesures destructives. Ces mesures ont été effectuées à des intervalles de 15 jours, couvrant la période de 30 à 120 JAS.

À chaque date d’échantillonnage, deux plants ont été récoltés par parcelle pour chacune des modalités de fertilisation étudiées (DR et MD). Les échantillons récoltés ont ensuite été séchés en deux étapes. La première étant un séchage initial à 105 °C pendant 30 minutes et la deuxième un séchage à 70 °C jusqu’à ce qu’une masse constante soit atteinte. Cela a garanti l’élimination complète de l’humidité.

4.3.2 Mesure de l’Indice de Surface Foliaire (LAI)

Pour suivre l’évolution de la surface foliaire ($cm^2/plant$) de manière non destructive, une estimation indirecte via une régression linéaire avec la biomasse sèche a été privilégiée. Cette approche a nécessité deux étapes : d’abord, la mesure directe de la surface foliaire ($cm^2/plant$) d’un sous-

3. Le modèle **bimodal**, proposé par (DURNER, 1994), consiste à superposer deux courbes de Van Genuchten (van GENUCHTEN, 1980), chacune représentant une classe de pores. D’une part les macropores qui se vident rapidement à faible succion, et des micropores qui retiennent l’eau plus fortement. Le modèle **PDI** tient compte à la fois de l’eau capillaire (retenue dans les pores) et de l’eau non capillaire (retenue à la surface des particules de sol) (METER GROUP, INC., 2022a).

échantillon de dix plants (3 grands, 4 moyens et 3 petits par parcelle, par modalité de fertilisation (MD et DR) et à chaque date de collecte (30-120 JAS, tous les 15 jours)) afin d’obtenir des données de calibration (1) ; ensuite, l’élaboration d’une régression linéaire permettant d’estimer la surface foliaire (cm^2/plant) de l’ensemble des plants à partir de la biomasse aérienne sèche (g/plant) collectée selon la méthode détaillée à la section 4.3.1(2).

(1) Détermination de la Surface Foliaire et de l’Indice Foliaire. Le poids de chaque plante a été mesuré, puis toutes les feuilles ont été retirées et pesées. Un échantillon de feuilles a été prélevé, pesé (M_{ech}) et étalé sur une surface blanche pour être photographié. Ces feuilles ont ensuite été numérisées et l’aire de cet échantillon (A_{ech}) a été déterminée à l’aide du logiciel *ImageJ* (RASBAND & NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH, 2012), par analyse d’image en la comparant à une référence de surface connue (une pièce de monnaie de $4,91 \text{ cm}^2$ — voir Annexe F). Par une règle de trois (éq. 4.1 à 4.2), la surface foliaire totale de la plante entière (LA_{tot}) a été calculée. Cette mesure a servi de point de départ à l’établissement des régressions linéaires. Les étapes de calcul de la surface foliaire ont été les suivantes : La surface foliaire spécifique de l’échantillon (SLA_{ech}) a été

calculée comme le rapport entre la surface de l’échantillon de feuilles et sa masse fraîche (Eq. 4.1) :

$$SLA_{\text{ech}} = \frac{A_{\text{ech}}}{M_{\text{ech}}} \quad (4.1)$$

En supposant que SLA_{ech} soit représentatif de l’ensemble du plant, la surface foliaire totale (LA_{tot}) a été extrapolée à partir de la masse fraîche totale des feuilles du plant (M_{tot}) :

$$LA_{\text{tot}} = SLA_{\text{ech}} \times M_{\text{tot}} = \frac{A_{\text{ech}}}{M_{\text{ech}}} \times M_{\text{tot}} \quad (4.2)$$

Où :

- LA_{tot} : Surface foliaire totale (cm^2)
- A_{ech} : Surface de l’échantillon de feuilles (cm^2)
- M_{ech} : Masse fraîche de l’échantillon de feuilles (g)
- M_{tot} : Masse fraîche totale des feuilles du plant (g)
- SLA_{ech} : Surface foliaire spécifique de l’échantillon (cm^2/g)

(2) Estimation du LAI par régression avec la biomasse. Les valeurs de surface foliaire (LA_{tot}) mesurées directement (étape 1) et les valeurs correspondantes de biomasse sèche des plants ont été utilisées pour établir une relation par régression linéaire (équations présentées en Annexe G).

Une fois le modèle de régression établi, le LAI (cm^2/cm^2) moyen pour chaque traitement et chaque date (30-120 JAS) a été estimé en utilisant uniquement la biomasse sèche des plants suivis pour la biomasse (§ 4.3.1), puis en divisant la surface foliaire estimée par la surface au sol occupée par un plant ($D = 0,24 \text{ m}^2$).

L’analyse de la qualité du modèle a montré une bonne corrélation ($R^2 > 0,8$) jusqu’à 75 JAS. Au-delà, la relation s’est avérée moins robuste. Pour améliorer la précision, des régressions spécifiques

à chaque année ont été utilisées, bien que la qualité des estimations pour les trois dernières dates (90–120 JAS) soit restée inférieure à celle des dates antérieures.

4.3.3 Récolte et détermination du rendement (grain + fibre)

La récolte du coton a été effectuée manuellement dans les sous-parcelles DR et MD : les quatre rangs centraux, formant un carré de 4,2 m sur 3,2 m (13,44 m²). Cette récolte a eu lieu lorsque les capsules de coton étaient ouvertes, signe de maturité physiologique. Le poids du coton récolté (grain + fibre) sur cette surface échantillonnée a été mesuré et ensuite extrapolé pour calculer le rendement à l’hectare.

4.4 Traitements statistiques

L’ensemble des analyses statistiques a été réalisé avec le logiciel R (v. 4.4.3). Les variables quantitatives ont été étudiées à l’aide d’un modèle linéaire mixte (LMM), implémenté via la fonction `lmer` du package `lme4` (BATES et al., 2023). Ce modèle permet de distinguer les effets fixes des facteurs étudiés (système de culture, dose de fertilisant, profondeur et année) tout en intégrant la variabilité liée au dispositif expérimental en blocs, à travers un effet aléatoire associé aux répétitions (`1|plot`). De plus, pour tenir compte de l’hétérogénéité de la teneur en carbone sur le site expérimental, sa concentration a été mesurée dans les allées aux extrémités des parcelles, zones peu influencées par les traitements, et intégrée au modèle comme covariable (`Callée`).

Avant chaque analyse, la normalité des résidus a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk (TEAM, 2019b) et l’homoscédasticité par le test de Levene (ZHOU, 2016). Seule la capacité d’échange cationique (CEC) ne suivait pas une distribution normale, nécessitant ainsi l’utilisation du test non paramétrique de Kruskal-Wallis (TEAM, 2019a).

Le tableau en Annexe H résume, pour chaque variable, le modèle statistique utilisé, et la structure des données associées se trouve en Annexe R. Une approche spécifique a été adoptée pour l’analyse longitudinale de la croissance des cultures, les mesures de biomasse aux sept dates successives (section 4.3) étant interdépendantes. Pour intégrer cette dépendance temporelle, un effet aléatoire imbriquant la date dans la répétition (`1 | rep:date`) a été inclus dans le modèle.

4.5 Modélisation des systèmes de culture avec DSSAT

4.5.1 Présentation générale du protocole de modélisation

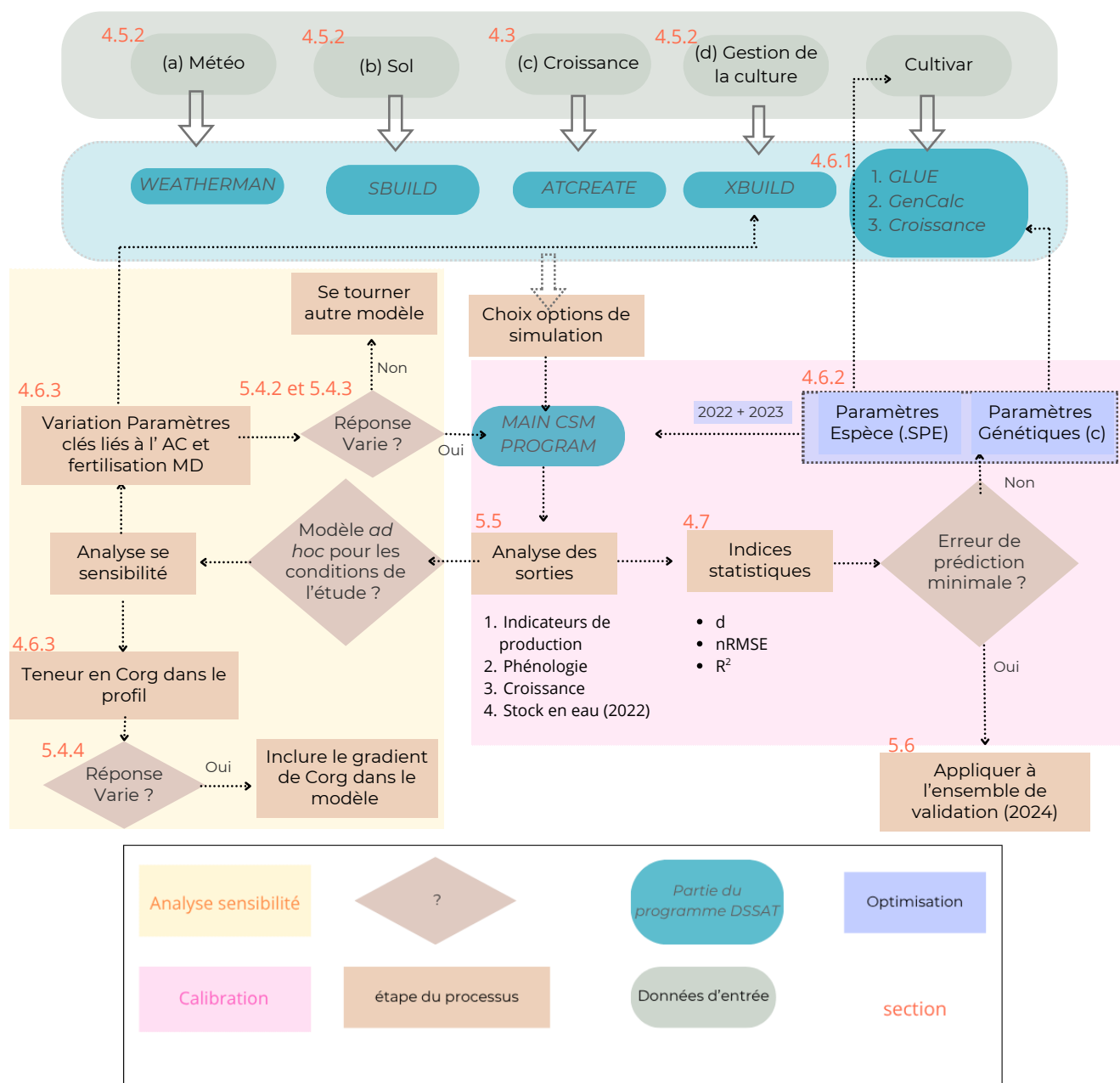


Figure 4.10 – Flowchart des grandes étapes du processus de modélisation. Les numéros en orange renvoient à la section du document concernée par l'étape.

À partir des propriétés du sol (section 4.2) et des mesures de croissance collectées (section 4.3), le protocole de modélisation s'appuie sur la séquence de la figure 4.10, lue de haut en bas :

- 1. Préparation des fichiers d'entrée :** les modules *ad hoc* de DSSAT (blocs bleus) génèrent l'ensemble d'initialisation, construit dans un premier temps à partir des données de 2022–2023 utilisés pour la calibration.
- 2. Exécution du modèle :** le *CSM MAIN PROGRAM* (voir section 2.3.2) est lancé avec cet ensemble de calibration.

3. **Optimisation des paramètres (calibration)** : deux leviers sont mobilisés pour améliorer les performances de la modélisation : l’ajustement des coefficients génétiques et celui des paramètres d’espèce. Ces deux paramètres sont calibrés conjointement afin de réduire l’erreur sur les indicateurs de croissance (LAI, biomasse), de rendement (grain + fibre) et de phénologie (anthèse, formation des capsules, maturité)
4. **Validation** : une fois l’erreur de modélisation suffisamment faible, le modèle ajusté est appliqué aux données indépendantes de 2024 pour validation.

En parallèle à la calibration et à la validation (étapes 1-4), une analyse de sensibilité vérifie la sensibilité du modèle aux facteurs qui distinguent les traitements (gestion des résidus, fertilisation, travail du sol). L’influence du gradient naturel de carbone du sol au sein du site d’étude sur les sorties du modèle est aussi étudiée (voir bloc jaune de la figure 4.10).

4.5.2 Données d’entrée du modèle DSSAT

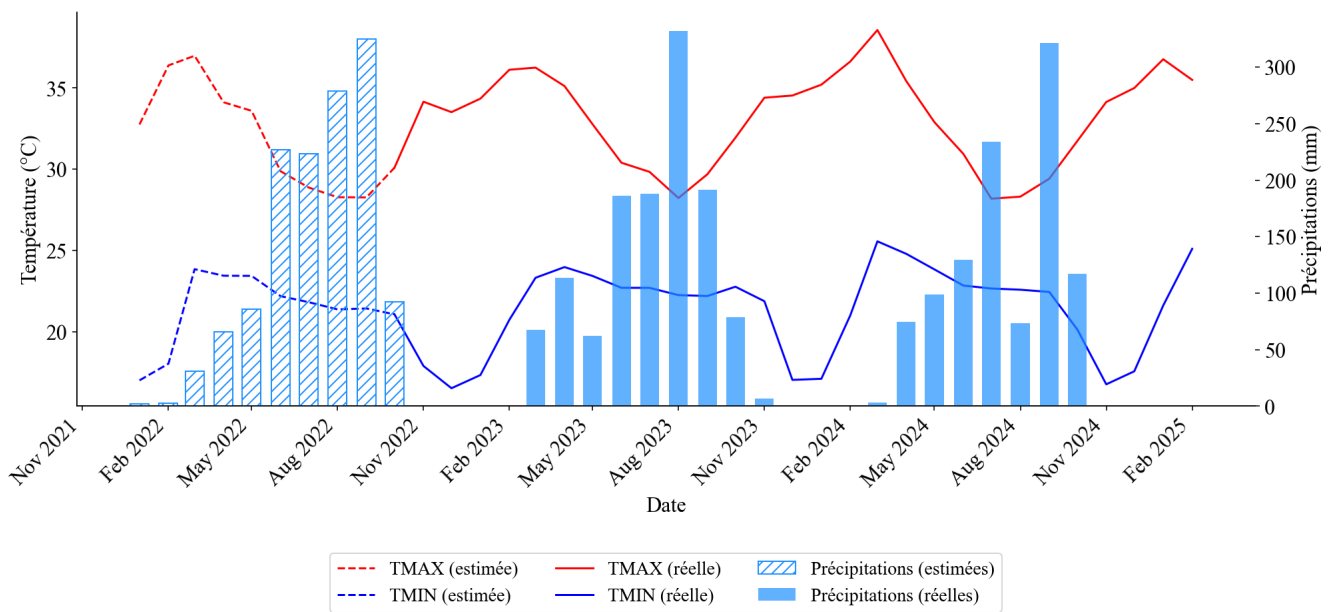


Figure 4.11 – Données météorologiques (moyennes mensuelles) collectées par la station d’Okpara et données estimées sur base de produits satellitaires (janvier à octobre 2022 inclus).

(a) Données météorologiques. Les données météorologiques proviennent de la station installée sur le site d’étude, opérationnelle depuis novembre 2022 (voir localisation de la station sur la figure 4.1). Pour la période antérieure, les données manquantes ont été complétées à l’aide de produits satellitaires (indiqués en pointillés sur la figure 4.11). La plupart des variables ont été obtenues via la plateforme NASA POWER, qui s’appuie sur la réanalyse MERRA-2 (résolution de $0,5^\circ \times 0,625^\circ$, soit 50km) (POWER, 2024). Toutefois, pour améliorer la précision des précipitations pour l’année 2022, les estimations plus fines du produit GPM IMERG (résolution de $0,1^\circ$, soit 10km) ont été privilégiées (DATA & CENTER, 2024).

La fiabilité de ces données météorologiques estimées⁴ a été évaluée en les comparant aux mesures de la station d’Okpara pour les années 2023 et 2024 (Annexe I). L’analyse graphique montre une bonne concordance pour l’évolution du rayonnement et des températures (minimales et maximales). En revanche, l’humidité relative est systématiquement surestimée, tandis que la vitesse du vent

4. La vérification de la pluviométrie journalière n’a pas été possible, l’accès aux données de 2023 et 2024 ayant expiré au moment de la vérification.

est systématiquement sous-estimée, un biais connu pour les données de réanalyse qui capturent difficilement les conditions locales (HAMAL et al., 2020).

(b) Données pédologiques. Le profil de sol utilisé comme référence pour la modélisation DSSAT est le profil détaillé dans le tableau 4.1, sélectionné en raison de sa teneur en C_{org} , plus faible que celle des deux autres profils prélevés dans une zone particulièrement riche en C_{org} , non représentative du reste du site.

Les données nécessaires pour la création du profil de sol sont détaillées dans le tableau A.4 de l’Annexe J. Ces variables incluent des mesures directement obtenues sur le terrain (C_{org} , pH, CEC, N_{tot}) ainsi que des estimations réalisées par le logiciel DSSAT lui-même, à partir de fonctions de pédotransfert basées sur des propriétés connues du sol. Ces équations et leur justification théorique sont détaillées dans l’Annexe J. Ainsi, la densité apparente, la porosité totale, les paramètres hydriques (θ_{sat} , θ_{cc} et θ_{pfp}) ont été estimés, car ces données n’étaient pas disponibles pour l’ensemble du profil.

Table 4.3 – Comparaison des paramètres hydriques estimés et mesurés à 0–5 cm entre les lignes et tous systèmes confondus (S1, S2 et S3)

Profondeur	Paramètre	Estimé	Mesuré EL	n
0–25 cm	θ_{1500} (SLLL)	0,061	$0,086 \pm 0,023$	23
	% variation (équation 4.10)		- 29 %	
	θ_{33} (SDUL)	0,11	$0,18 \pm 0,031$	23
	% variation		- 39 %	
	θ_{SAT} (SSAT)	0,412	$0,389 \pm 3,42$	16
	% variation		+ 6 %	
	K_s (SSKS en $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	21	$31,46 \pm 196,29$	57
	% variation		-33 %	

Pour vérifier la cohérence des inférences (équations 4 à 10 (Annexe J)), une comparaison a été réalisée entre les valeurs estimées par le logiciel et les valeurs observées pour la couche superficielle (0-5 cm EL) de la parcelle adjacente au profil (tableau 4.3). Bien que le logiciel sous-estime les teneurs en eau volumique à la capacité au champ (θ_{33}) et au point de flétrissement permanent (θ_{1500}), de même que la conductivité hydraulique (K_s), les estimations ont été jugées comparables aux mesures de terrain si l’on tient compte de l’écart-type. La teneur en eau volumique à saturation obtenue par inférence est quant à elle très proche de celle mesurée (une surestimation d’environ 6%).

Finalement, les données de texture complètes par horizon n’étant pas disponibles au moment de la modélisation, seules les données de texture de l’horizon superficiel issues d’une autre étude menée à Okpara étaient disponibles (ABOUA et al., 2024). Pour obtenir des estimations réalistes des textures en profondeur, une équation tenant compte de l’évolution de la texture avec la profondeur a été développée à partir d’un profil d’un autre sol béninois (à Covè). La méthode employée et les régressions ajustées sont détaillées en Annexe J (Fig. A.16).

Table 4.4 – Profil de sol pris au niveau de la parcelle n°6 reproduit sur DSSAT. Les propriétés en gris sont celles estimées par le logiciel via les différentes étapes reprises à l’Annexe J.

Propriété	Profondeur (cm)						
	5	10	15	25	45	75	100
<i>Granulométrie</i>							
Argile (%)	4.6	4.6	4.6	8.7	12.7	18.7	18.7
Limon (%)	3.4	3.4	3.4	8.2	10.6	14.2	14.2
Fragments grossiers(%)	0	0	0	0	0	0	0
<i>Propriétés chimiques</i>							
C _{org} (%)	0.45	0.45	0.45	0.43	0.27	0.18	0.14
pH _{H₂O}	6.28	6.28	6.28	6.12	5.50	5.77	5.93
CEC (cmol kg ⁻¹)	1.44	1.44	1.44	–	–	–	–
<i>Propriétés hydriques et physiques</i>							
N _{tot} (%)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03
θ_{LL}	0.06	0.06	0.06	0.08	0.09	0.12	0.12
θ_{DUL}	0.11	0.11	0.11	0.14	0.16	0.20	0.20
θ_{SAT}	0.412	0.412	0.41	0.38	0.37	0.37	0.37
ρ_b (g/cm ³)	1.49	1.49	1.49	1.58	1.61	1.60	1.60
K_{sat} (cm/h)	21.00	21.00	21.00	6.11	2.59	2.59	2.59
RGF^a	1	1	1	1	1	1	1

a. RGF = *Root Growth Factor* (0–1) utilisé par DSSAT ; 1 = pas de contrainte, 0 = croissance racinaire nulle, calculé selon l’équation 10 en Annexe J.

Le profil pédologique représentatif final employé pour la modélisation DSSAT est présenté dans le tableau 4.4. Une épaisseur de couche trop élevée peut introduire des instabilités numériques, comme documenté par PORTER (2018). Des couches supplémentaires ont été introduites. Spécifiquement, des couches de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm avec les mêmes valeurs pour l’ensemble des paramètres de la première couche.

(c) Données de gestion des cultures. Plusieurs données relatives à la gestion des cultures sont nécessaires pour la modélisation avec DSSAT : dates de semis, d’application des fertilisants, des opérations de travail du sol. Un résumé détaillé de ces données par année et par traitement est présenté en Annexe K.

Une limite importante du modèle DSSAT est son incapacité à simuler explicitement les associations culturales (tableau 2.2). Or, dans notre dispositif, les trois systèmes de culture étudiés se distinguent notamment par les espèces présentes dans les rotations et les associations culturales (tableau 4.2). Ces différences influencent directement la quantité, la composition chimique et la distribution (aérienne et racinaire) des résidus de culture, ce qui affecte la dynamique de restitution au sol en éléments nutritifs.

Pour intégrer indirectement cet effet des associations dans la modélisation, une stratégie a été élaborée. Elle est basée sur l’estimation des apports en azote (N) et en phosphore (P) issus des résidus de la culture précédente. Cette approche tient compte des espèces cultivées au cours de l’année précédente dans chaque système et de leurs proportions dans les associations (équ. 4.3).

Concrètement, la biomasse totale de résidus laissée sur le terrain après récolte a d’abord été estimée pour chaque système, en fonction des espèces présentes dans la rotation et/ou l’association. Par exemple, dans le système 3, l’association *sorgho-soja-Crotalaria juncea* en 2021 a généré une composition spécifique de résidus pour l’année suivante. À chaque type de résidu a été associée une teneur moyenne en N et P, issue d’une revue bibliographique (tableau A.11).

L’apport total en azote restitué au sol par les résidus a alors été calculé selon l’équation suivante ⁵ :

$$N_{\text{restitué}} = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\text{Biomasse}_{\text{résidu}_i}}{\text{Biomasse}_{\text{totale}}} \times \%N_i \right) \quad (4.3)$$

où k représente le nombre total de types de résidus considérés, $\text{Biomasse}_{\text{résidu}_i}$ la biomasse du résidu i (kg/ha), $\text{Biomasse}_{\text{totale}}$, la biomasse totale des résidus (kg/ha) et N_i sa teneur en azote (%).

Enfin, pour compléter cette estimation, la biomasse racinaire des résidus a été évaluée indirectement à partir de la biomasse aérienne, via des ratios de biomasse racinaire/aérienne (R :S) issus de la littérature (tableau A.12). Cette approche a permis d’obtenir une estimation plus réaliste des restitutions totales en biomasse, tenant compte des effets différenciés des associations culturales sur la production racinaire.

(d) Données de croissance et phénologiques. La calibration génétique de la culture repose sur l’intégration des mesures de rendement (grain + fibre), de biomasse aérienne finale et des observations phénologiques, organisées par traitement (*Système $\times$ Dose*).



Figure 4.12 – Méthode de mesure de la teneur en eau volumique (cm^3/cm^3) du sol avec l’humidimètre (PMS-714 de chez Lutron) (ELECTRONIC, 2024). La barre métallique permet d’enfoncer l’humidimètre aux profondeurs souhaitées des mesures (indiquées ici par des repères en bleu) : surface, 10 cm et 30 cm.

(e) Données hydriques. La teneur en eau volumique du sol a été mesurée tous les 15 jours entre 30 et 120 JAS, en parallèle des mesures de biomasse (voir section 4.3), à l’aide d’un capteur

5. Un exemple d’application de cette méthode est présenté au point 0.11.1 de l’Annexe K.

résistif (ELECTRONIC, 2024). Ces mesures ont été réalisées tous les 10 cm sur la tranche 0–30 cm (Fig. 4.12).

Afin de comparer les stocks d'eau mesurés sur le terrain avec ceux estimés par le modèle DSSAT, une harmonisation des profondeurs a été nécessaire. En effet, le profil de sol défini dans DSSAT ne comporte pas de couche exactement à 30 cm (tableau 4.4), ce qui rend impossible la comparaison directe entre les teneurs en eau simulées et mesurées. Pour remédier à cela, une interpolation linéaire (éq. 4.4, Fig. 4.13) a été appliquée aux teneurs en eau volumiques (θ) simulées par DSSAT entre 25 et 45 cm de profondeur, afin d'estimer la θ simulée à 30 cm de profondeur.

Sur cette base, les stocks en eau ont été calculés via la méthode des trapèzes, tant pour les données mesurées que pour les données simulées. Cette approche a permis d'assurer la cohérence du volume de sol intégré (0–30 cm) entre les deux sources de données (mesures de terrain (Fig. 4.12) et simulées avec DSSAT).

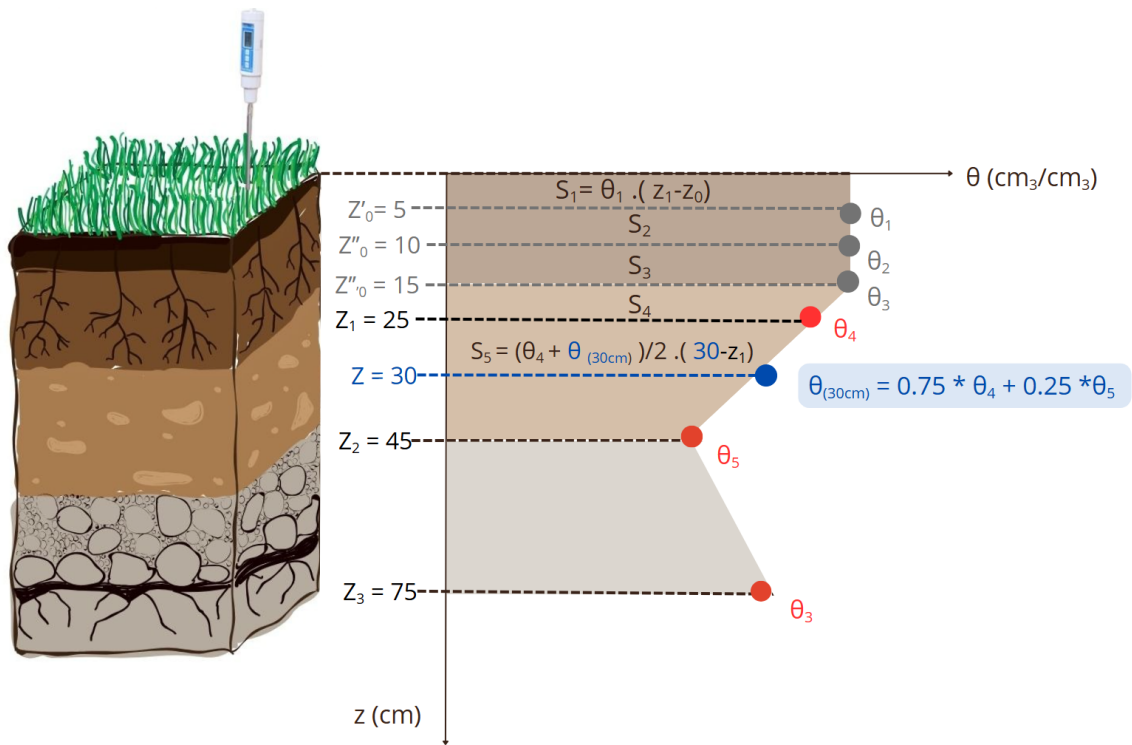


Figure 4.13 – Illustration de la méthode des trapèzes appliquée au θ obtenues avec DSSAT. Les $\bullet$ = θ mesurées aux profondeurs réelles, tandis que les $\bullet$ correspondent à des θ mesurées aux points intermédiaires ajoutés pour affiner la résolution verticale du profil de sol de DSSAT. Le stock est intégré de la surface jusqu'à 30 cm afin de rester cohérent avec la profondeur maximale des stocks mesurés sur le terrain (Fig. 4.12). Les aires S_1 à S_5 définissent alors le stock total $S_{\text{sim}} = \sum_{i=1}^5 S_i$.

$$\theta(z) = \theta_4 + \frac{\theta_{30\text{cm}} - \theta_4}{Z_{30\text{cm}} - Z_4} (Z - Z_4) \quad (4.4)$$

Stock mesuré sur le terrain

$$S_1 = 100 \theta_1$$

$$S_2 = 100 (\theta_1 + \theta_2)/2$$

$$S_3 = 50 (\theta_2 + \theta_3)$$

Stock simulé par DSSAT

$$\theta_{30\text{cm}} = 0.75 \theta_4 + 0.25 \theta_5$$

$$S_1 = 50 \theta_1$$

$$S_2 = 50 (\theta_1 + \theta_2)/2$$

$$S_3 = 25 (\theta_2 + \theta_3)$$

$$S_4 = 50 (\theta_3 + \theta_4)$$

$$S_5 = 43.75 \theta_4 + 6.25 \theta_5$$

4.6 Calibration

4.6.1 Calibration génétique

Pour simuler précisément le cultivar de coton utilisé dans cette étude (*OKP 768*), qui n'est pas directement inclus dans le logiciel DSSAT, dix coefficients génétiques ont été calibrés (tableau A.13).

Cette calibration génétique a été menée en utilisant les données de 2022 et 2023 (ensemble de calibration) et a été effectuée sur le traitement de référence (S1 en DR), car il est recommandé de réaliser la calibration génétique sur des conditions non stressées (HE et al., 2017). Les coefficients génétiques de la variété *Deltapine 77*, déjà présents dans le modèle, ont servi de valeurs initiales à la calibration génétique. Le logiciel DSSAT intègre deux méthodes automatisées pour cette calibration : GLUE (a) et GENCALC (b).

(a) Détermination des coefficients génétiques avec GLUE. L'approche GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) débute par la définition d'une distribution uniforme pour chacun des coefficients génétiques (c), ce qui permet de définir la plage des valeurs possibles pour chaque coefficient génétique (Z. LI et al., 2018b). Une valeur est ensuite sélectionnée aléatoirement au sein de cette distribution pour chaque c , constituant ainsi un vecteur ω de N coefficients génétiques ($N = 10$ pour le coton) (Annexe N). Ce processus est répété pour générer un grand nombre d'ensembles uniques de ces dix paramètres génétiques (ω). Les résultats de chaque simulation (une par ω) sont ensuite comparés aux données expérimentales, incluant la date d'anthèse, l'apparition des capsules, la biomasse aérienne finale et le rendement (grain + fibre) final (section 4.5.2).

La sélection du meilleur ensemble de paramètres (ω) s'effectue par le calcul d'une fonction de vraisemblance pour chaque ensemble ω_i , en employant une fonction de densité de probabilité gaussienne (le processus et les équations détaillées sont présentés en Annexe L). L'ensemble de paramètres génétiques (ω) qui minimise les écarts entre les données mesurées et simulées, parmi tous les ω testés, se voit attribuer la probabilité la plus élevée (équ. 17). Cet ensemble est alors désigné comme la distribution postérieure et est considéré comme l'ensemble des 10 paramètres génétiques permettant les meilleures performances de simulation.

La précision de la méthode GLUE est fortement liée au nombre d'ensembles de paramètres génétiques (ω) testés, un minimum de 6000 est généralement recommandé (HE et al., 2017). Dans le cadre de cette étude, 8000 ω uniques ont été testés. Au-delà de ce seuil, la durée de calcul devient une contrainte trop importante (BERTON FERREIRA et al., 2024a).

(b) Détermination des coefficients génétiques avec GENCALC. GENCALC est la seconde approche pour la détermination des coefficients génétiques incluse dans DSSAT (BUDDHABOON et al., 2018). Similairement à GLUE, cette méthode utilise des données expérimentales (la date d'anthèse, l'apparition des capsules, la biomasse aérienne finale et le rendement (grain + fibre) final). Le principe de GENCALC repose sur l'ajustement itératif (coefficient par coefficient) des coefficients génétiques. Les résultats simulés par le modèle sont comparés aux données expérimentales et les coefficients génétiques sont progressivement modifiés jusqu'à ce que les valeurs simulées et mesurées convergent (HUNT et al., 1993). Cette procédure est répétée afin d'atteindre le plus faible RMSE (*Root Mean Square Error*) possible. Le processus complet d'optimisation est détaillé en Annexe M.

Pour les deux méthodes (GLUE et GENCALC), un ajustement moins satisfaisant a été constaté pour les données de LAI et de biomasse aérienne par rapport aux données de rendement (grain + fibre), de biomasse aérienne finale et aux paramètres phénologiques. Cette faiblesse s'explique probablement par le fait que les deux méthodes de calibration s'appuient uniquement sur des données ponctuelles plutôt que sur des données temporelles continues comme le LAI et la biomasse aérienne. Pour contourner cette limite, une troisième méthode d'ajustement des coefficients génétiques a été développée et est détaillée ci-dessous.

(c) Calibration génétique basée sur la croissance de la culture. L'ajustement des coefficients génétiques a été réalisé en comparant les données de croissance simulées (LAI, biomasse aérienne) pour chaque valeur prise par un coefficient génétique donné (c) avec les mesures expérimentales de biomasse aérienne et de LAI effectuées entre 30 et 120 JAS (points représentés sur la Fig. 4.14). Cette méthode se déroule en cinq étapes distinctes pour chaque coefficient génétique (c) :

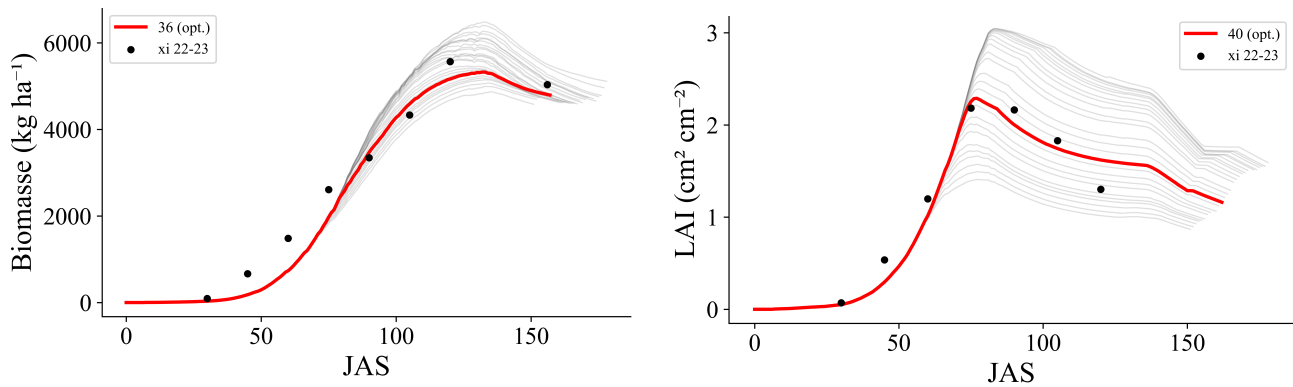


Figure 4.14 – Illustration de l'optimisation des coefficients génétiques (c) basée sur la croissance (en gris clair) et les points de mesure (•) de biomasse aérienne (à gauche) et du LAI (à droite) (moyenne 2022 et 2023).

1. **Evaluation de l'erreur associée à chaque coefficient c** : pour une variable donnée (LAI ou biomasse), la simulation ($y_i(c)$) est comparée à la mesure ($x_i(c)$) sur les m dates d'observation (ici, $m_{BIOM}=8$ et $m_{LAI}=7$). Une RMSE plus petite indique une simulation plus précise (éq. 18 - Annexe O).
2. **Optimum individuel** : un balayage de toutes les valeurs simulées de c est effectué pour identifier celle qui minimise la RMSE pour le LAI et pour la biomasse (éq. 19 - Annexe O). À l'issue de cette étape, deux "meilleurs" coefficients (c^*) sont obtenus : un pour la biomasse aérienne et un pour le LAI.

3. **Score global** $S(c)$: pour comparer simultanément le LAI et la biomasse aérienne, chaque RMSE est normalisée par la moyenne observée (nRMSE), puis une distance quadratique est calculée (équ. 20 -Annexe O). Un score global ($S(c)$) plus petit indique que le coefficient offre de meilleures performances sur les deux variables (biomasse aérienne et LAI) combinées.
4. **Restreindre la recherche** : l'objectif est d'obtenir un coefficient proche des deux valeurs optimales individuelles (c_{BIOM}^* et c_{LAI}^*), l'exploration est donc limitée à l'intervalle I défini par l'équation 21 (Annexe O).
5. **Valeur du compromis** c_{comp} : parmi les coefficients $\subset I$, celui qui minimise le score combiné est retenu (équ. 20- Annexe O). Cette valeur (c_{comp}) représente le meilleur équilibre entre les erreurs sur le LAI et la biomasse (équ. 22 -Annexe O).

Les valeurs finales obtenues via chacune des trois méthodes pour l'ensemble des coefficients génétiques sont présentées en Annexe N.

4.6.2 Ajustement des paramètres d'espèce

Le modèle a montré une sous-estimation systématique du rendement (grain + fibre) et la biomasse aérienne finale pour les traitements en fertilisation microdose. Cette sous-estimation systématique avait déjà été rapportée par TOVIHOUDJI, AKPONIKPE et al. (2019). Afin de réduire cet écart entre les traitements sous DR et MD simulés, trois paramètres liés à l'azote ont été optimisés dans le fichier CRGR0048.SPE. Ce fichier décrit la sensibilité des processus physiologiques du coton à l'environnement et contient ainsi une multitude de coefficients, dits "d'espèces", à ajuster (SASEENDRAN et al., 2010).

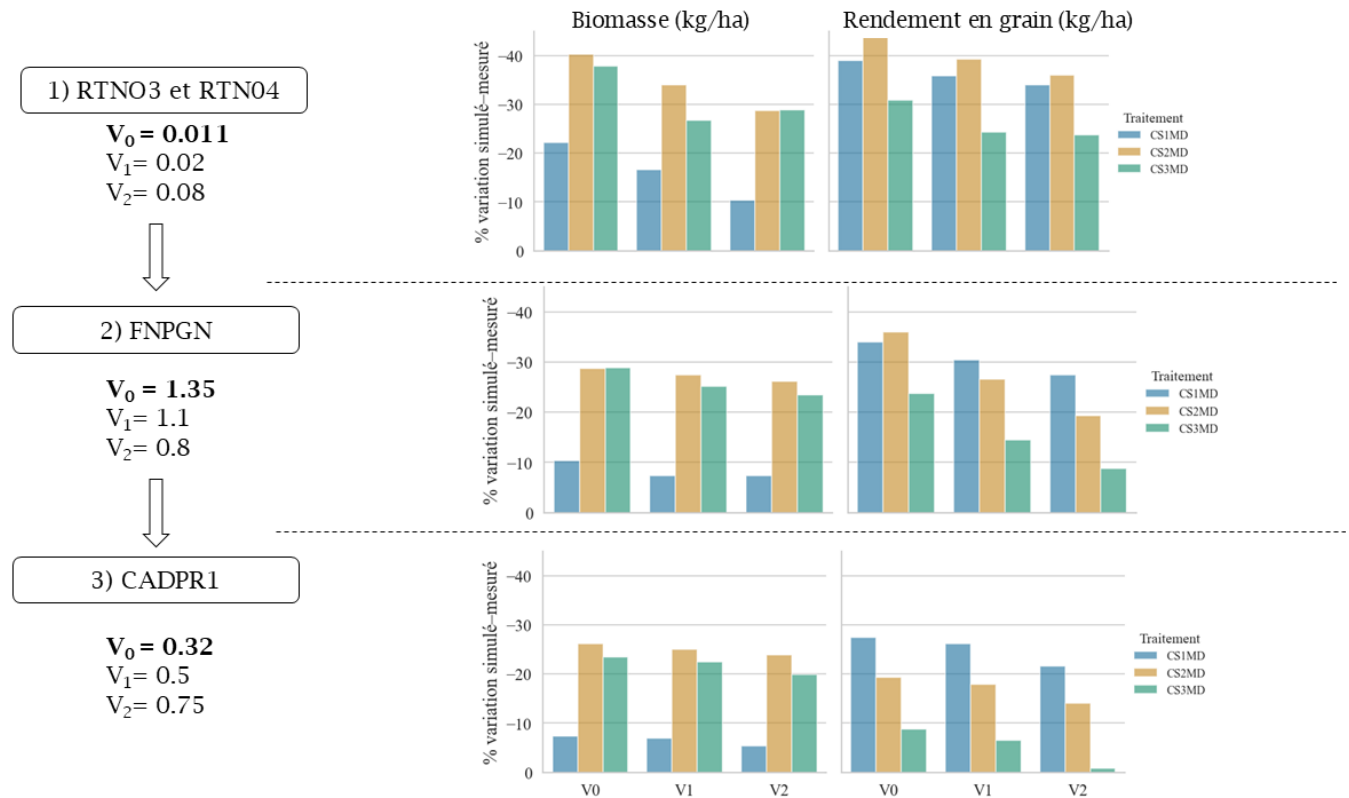


Figure 4.15 – Processus d'optimisation en trois étapes des paramètres du fichier CRGR0048.SPE dans DSSAT afin d'augmenter la représentativité des traitements en microdose simulés. Les valeurs V_0 correspondent aux valeurs initialement prises, pour un paramètre d'espèce donné (encadré), et V_1 et V_2 sont les valeurs testées afin de réduire l'écart entre les mesures et les simulations.

L'ajustement pour améliorer la représentativité de la modélisation de la microdose a été réalisé par essai-erreur. La succession (Fig. 4.15) qui a amélioré la représentativité est la suivante :

1. Ajustement des paramètres **RTN03**, **RTNH4** : correspondent à la vitesse maximale d'absorption de NO_3^-/NH_4^+ par cm de racine (MORGAN et al., 2003).
2. Ajustement du paramètre **FNPGN** : concentration critique d'azote dans les feuilles à partir de laquelle la photosynthèse est diminuée en raison d'une trop faible concentration d'azote dans les feuilles (MALIK et al., 2018).
3. Ajustement du paramètre **CADPR1** : part de la masse de tige formée avant floraison reconvertie en sucres pour être mobilisée vers les organes reproducteurs (POTOPOVÁ et al., 2023).

4.6.3 Analyse de sensibilité

(a) Paramètres liés à la gestion de la culture. Une analyse de sensibilité a été menée sur les paramètres liés à la gestion des cultures, car ce sont eux qui différencient les traitements étudiés. Cette analyse a consisté à ajuster chaque paramètre de -50% à +50% de sa valeur de base (valeur prise en 2022 pour le S1 - DR, voir tableau A.14), par incréments de 10%. Pour chaque incrément testé, les variations (%) des sorties du modèle — rendement (grain + fibre), biomasse aérienne finale, date d'anthèse et apparition des capsules — ont été représentées graphiquement.

(b) Sensibilité à l'hétérogénéité du carbone. Afin de quantifier l'impact du gradient en carbone du sol inhérent au site d'étude (Fig. 5.1), une analyse de sensibilité de la teneur en C_{org} (SLOC) dans le profil de sol a été réalisée. Pour ce faire, la teneur en carbone organique (SLOC) a été modifiée entre 0-25 cm de profondeur. Pour chaque teneur en C_{org} testée, les mêmes sorties du modèle qu'en **(a)** ont été analysées. En outre, pour chaque C_{org} testé, l'évolution de la teneur en eau de surface (0-5 cm) et du ruissellement simulé a également été comparée pour comprendre l'influence du C_{org} sur la simulation de la rétention en eau du sol.

Toute modification de la teneur en carbone organique du sol a été accompagnée d'un ajustement proportionnel de la teneur en azote, afin de maintenir un rapport C/N constant d'une simulation à l'autre. Dans ces conditions, la plante dépend presque exclusivement de la minéralisation pour ses besoins en azote.

4.7 Analyse statistique des simulations

L'évaluation de la performance du modèle se fait via divers indices statistiques. Dans chacune des formules détaillées des indices statistiques, x_i correspond à une valeur observée, y_i à une valeur prédite et n , au nombre d'observations total.

- **RMSE (Root Mean Square Error)** :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (4.5)$$

- L'erreur **Quadratique Moyenne Normalisée** (nRMSE) représente l'écart moyen relatif des valeurs prédites par rapport aux valeurs observées. Le nRMSE est particulièrement utile pour comparer les résultats de différentes études.

$$\text{nRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{x}} \times 100 \% \quad (4.6)$$

- L'**indice de Willmott** (d) est une mesure sans dimension de la précision du modèle. Cet indice est borné par 0, qui signifie aucun accord, et 1, qui signifie un ajustement parfait (H. PEREIRA et al., 2018) :

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (4.7)$$

- L'**écart-type** (σ) ajouté autour des valeurs simulées se calcule ainsi :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.8)$$

- Le **coefficient de détermination** (R^2), qui mesure la qualité de l'ajustement d'un modèle de régression, est calculé de la façon suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.9)$$

- Le **pourcentage de variation** (PV) visant à mesurer l'écart entre les simulations (y_i) et les mesures (x_i), se calcule ainsi :

$$\left(\frac{y_i - x_i}{y_i} \right) \times 100 \quad (4.10)$$

Chapitre 5

Résultats

5.1 Distribution spatiale et caractéristiques des propriétés du sol sur le site d'étude.



Figure 5.1 – Carte illustrant la teneur en carbone total du sol (C_{tot} , moyenne SL et EL) mesurée dans les parcelles du site d'étude et le profil topographique du site d'étude (réalisé sur le site <https://www.gpsvisualizer.com/> sur base de données satellitaires).

Les analyses réalisées en 2024 mettent en évidence une variabilité marquée des propriétés chimiques, physiques et hydrodynamiques du sol sur l'ensemble des 21 parcelles étudiées. Le carbone total du sol¹ (C_{tot}) varie de 0,4 à 1,6%, tandis que l'azote total se situe entre 0,02 et 0,09%. Un gradient net de carbone est observable sur le site (Fig. 5.1), avec des teneurs plus élevées (0,8–1,6% de C_{tot}) concentrées entre les parcelles 13 et 19. Cette zone correspond à la partie la plus basse du site, bien que l'écart d'altitude reste faible et peu perceptible sur le terrain.

1. légèrement supérieur au C_{org} car contient une fraction minérale (par exemple, lorsque le matériau parental est calcaire ou cas d'apports en $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$).

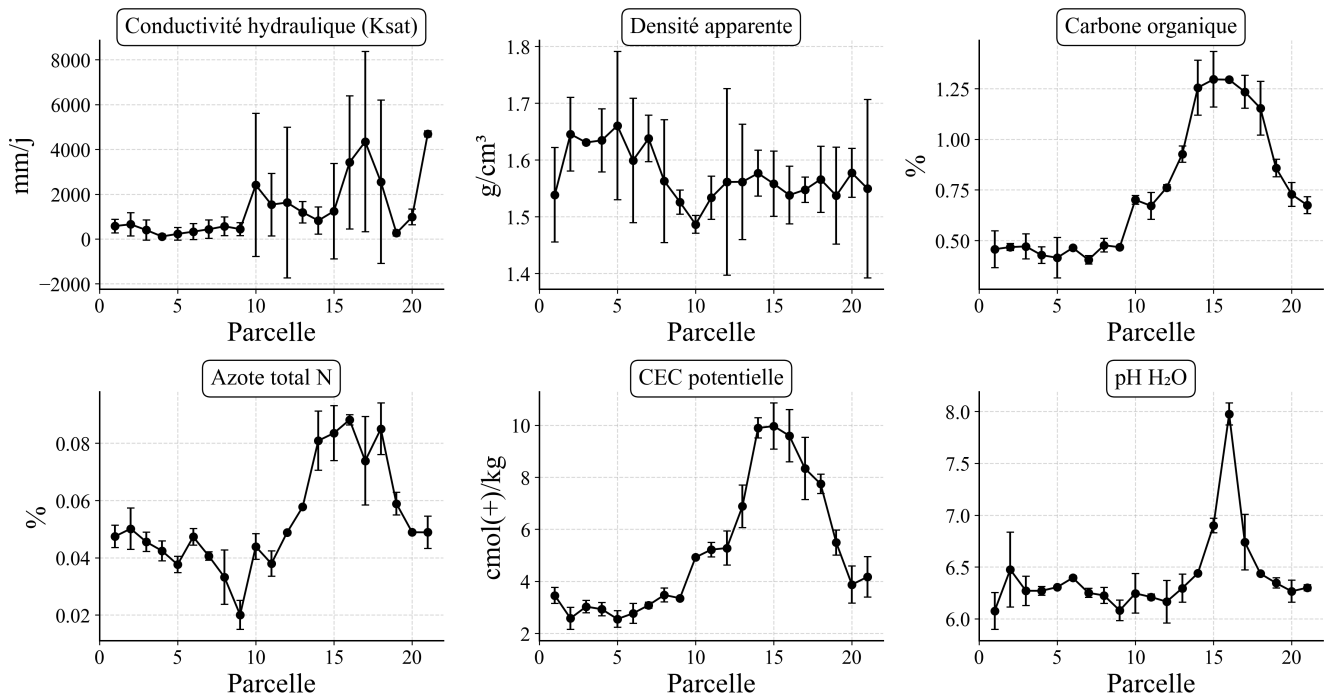


Figure 5.2 – Évolution des propriétés du sol par parcelle. Les points indiquent la moyenne et les barres l'écart-type des mesures. K_{sat} (mm/j) : 4 mesures/parcelle (EL, SL $\times$ 2 répétitions) à 0–5 cm, valeurs aberrantes retirées (méthode IQR, écart interquartile). Densité apparente (g/cm^3) : 3 répétitions à 0–5 cm. Corg, N, CEC et pH_{H2O} : 2 mesures/parcelle (EL + SL) à 0–20 cm.

L'analyse des propriétés physiques, chimiques et hydrodynamiques (Fig. 5.2) met également en évidence des tendances contrastées au sein du parcellaire. Les variables chimiques (pH_{H2O} , azote, CEC et C_{org}) suivent globalement la distribution du carbone total (Fig. 5.1) : leurs valeurs sont plus élevées dans la zone d'accumulation en carbone du sol (parcelles 13 à 19) illustrée à la figure 5.1. Le pH_{H2O} (6,0 à 8,0) correspond à un sol neutre à légèrement acide, voire basique dans la parcelle la plus riche en C_{tot} . La CEC potentielle, relativement faible (2 à 10 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$), est cohérente avec une minéralogie dominée par la kaolinite et un degré d'altération avancé, typique des lixisols.

Contrairement aux propriétés chimiques, les propriétés physiques et hydrodynamiques ne montrent pas de corrélation claire avec le carbone total et présentent une variabilité intraparcillaire élevée (écarts-types importants). La densité apparente est comprise entre 1,50 et 1,65 g/cm^3 , ce qui témoigne d'un léger tassement du sol. Enfin, la conductivité hydraulique saturée (K_{sat}) est très variable (médiane sur l'ensemble du site : 492 mm/j) ; sa moyenne, tout comme la variabilité, augmente nettement à partir de la parcelle n° 10. Cette hétérogénéité pourrait être liée au caractère très local de la mesure, probablement influencée localement par la présence de galeries de vers de terre, favorisant des écoulements préférentiels de l'eau dans le sol.

5.2 Corrélation entre les variables chimiques, physiques et hydrodynamiques et la teneur en C_{tot}

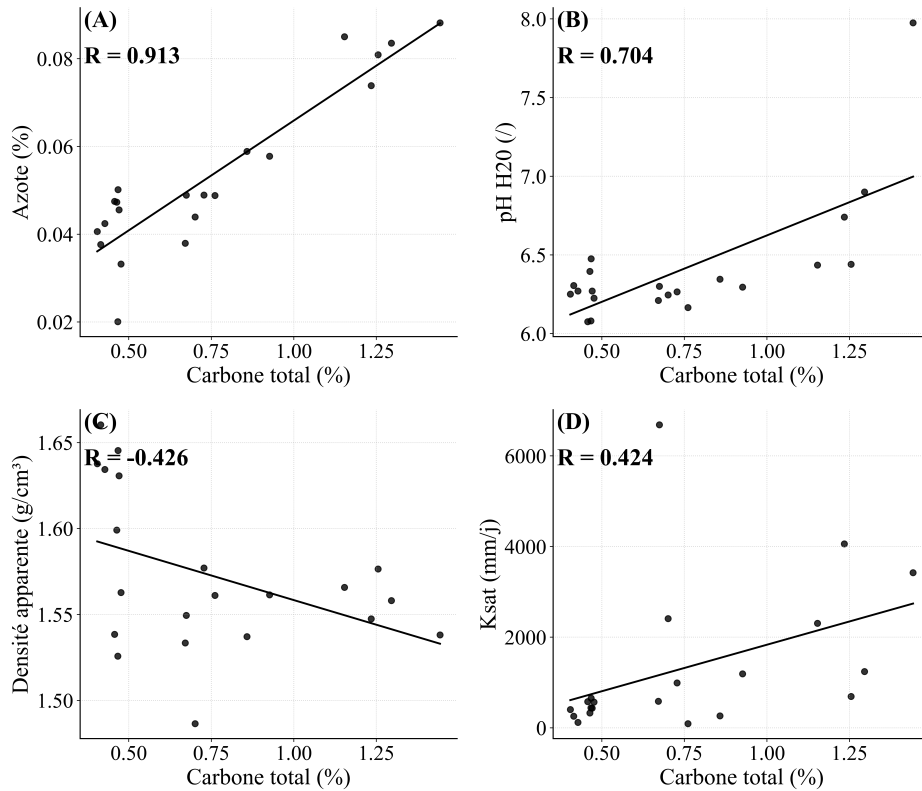


Figure 5.3 – Graphes de corrélation de Pearson (r) entre la teneur en C_{tot} (%) (moyenne SL et EL) et (A) la teneur en azote, (B) le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, (C) la densité apparente et (D) la K_{sat} pour la couche superficielle 0-20 cm. Les données sont issues de 21 parcelles (moyenne de la mesure SL et EL).

Les analyses de corrélation confirment les tendances décrites dans la section précédente. L'azote total est fortement corrélé au C_{tot} ($r = 0,91$) (Fig. 5.3A). Le $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ présente également une corrélation positive ($r = 0,70$), probablement liée à la présence de carbonates issus d'anciens chaulages (avant mise en place de l'essai en 2017). Cette influence est particulièrement marquée autour de la parcelle 16 (Fig. 5.2), où un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} > 8$ a été mesuré (Fig. 5.3 (B)). Un test d'effervescence y a confirmé la présence de calcaire actif, contribuant à la fraction inorganique du carbone et à l'élévation du $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (Y. LI et al., 2019). Toutefois, l'effet du chaulage s'atténue généralement après 3 à 6 ans (Y. LI et al., 2019), ce qui suggère que ce facteur, bien que plausible, n'explique pas entièrement l'élévation du $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ observée dans les zones les plus riches en C_{tot} (Fig. A.21).

Les propriétés physiques et hydrodynamiques confirment l'absence de lien fort avec le C_{tot} observé précédemment (Fig. 5.3 (C) et (D)). La densité apparente diminue légèrement avec l'augmentation du C_{tot} ($r = -0,43$), tandis que le K_{sat} , très variable, ne montre qu'une faible corrélation positive ($r = 0,42$).

L'ensemble des corrélations entre variables physico-chimiques est présenté en Annexe Q. En résumé, le gradient de C_{tot} contrôle en partie la distribution des variables chimiques, mais son influence sur les propriétés physiques et hydrodynamiques reste limitée.

5.3 Effets des systèmes de culture et de la fertilisation microdose sur le sol et la culture

5.3.1 Paramètres chimiques

Pour l'ensemble des propriétés physico-chimiques, la taille et la structure des échantillons analysés se trouvent en Annexe R. Les modèles d'analyse statistique sont repris en Annexe H.

Table 5.1 – Résultats (p-valeur) de l'ANOVA à trois facteurs (Système, Profondeur, Position au sein des parcelles) sur les paramètres chimiques, avec la teneur en carbone du sol des allées ($C_{allée}$) utilisée comme covariable. Les effets significatifs ($p < 0,05$) sont repris en gras.

Variable	Système	Profondeur	Position	$C_{allée}$
C tot (%)	0,40	2,50e-04***	0,22	–
N tot (%)	0,68	1,02e-03**	0,32	9,09e-11***
C/N	0,78	0,03*	0,39	0,47
pH _{H₂O}	0,50	0,06	0,23	0,03*
CEC (cmol(+)/kg)	0,50	–	0,61	0,04*

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

L'analyse de la variance montre que sur l'ensemble de la durée de l'essai (7 ans), aucune des propriétés chimiques analysées (C_{tot} , N_{tot} , pH_{H₂O}, rapport C/N et la CEC) n'a été significativement affectée par le système de culture ($p > 0,05$) (tableau 5.1). Les distributions de ces variables sont illustrées en Annexe V.

La profondeur reste le principal facteur de variation ($p < 0,001$) de ces propriétés chimiques. Par ailleurs, introduite comme covariable, la $C_{allée}$ explique de façon significative la variabilité de l'ensemble de ces propriétés, sauf le ratio, C/N, ce qui met en évidence son influence sur la chimie du sol à moyen terme.

5.3.2 Paramètres physiques et hydrodynamiques

Table 5.2 – Résultats (p-valeur) de l'ANOVA à trois facteurs (Système, Profondeur, Position au sein des parcelles) sur les paramètres physiques et hydrodynamiques avec la teneur en carbone du sol des allées ($C_{allée}$) utilisée comme covariable. Les effets significatifs ($p < 0,05$) sont repris en gras.

Variable	Système	Position	$C_{allée}$
ρ (g/cm ³)	0,77	0,56	0,24
K_{sat} (mm/h)	0,51	0,13	0,55
REU (% vol.)	0,53	0,26	0,04*

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

La densité apparente, la K_{sat} et la réserve en eau utile (REU) ne varient ni avec le *Système* ni avec la *Position* de la mesure (tableau 5.2). Les courbes de rétention en eau ne diffèrent que faiblement entre les trois systèmes (Fig. 5.4). Au-delà de la teneur en eau à la capacité au champ ($pF = 2,5$), le S3 retient en moyenne 1–2% d'eau de plus que S2, tandis que S1 présente une valeur intermédiaire

(Fig. 5.4). Toutefois, les intervalles de confiance (± 1 écart-type, zones ombrées) se chevauchent, rendant toute différence entre les systèmes incertaine. En revanche, le gradient en C_{tot} explique la REU (θ_v entre pF 2,5 et pF 4,2) de façon significative ($p = 0,042$).

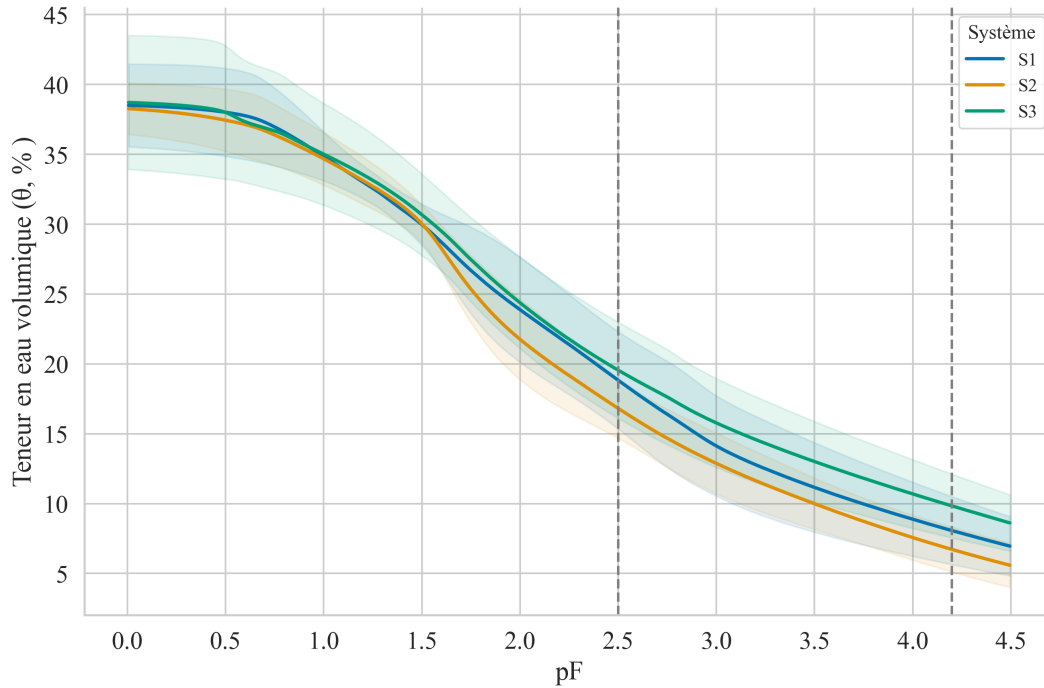


Figure 5.4 – Courbes de rétention du sol pour les trois systèmes de culture (S1, S2 et S3). La teneur en eau volumique moyenne (θ_v , % vol) résulte du regroupement des mesures effectuées *sur* et *entre* les lignes de semis. Les courbes correspondent à l'ajustement du modèle bimodal van Genuchten–PDI. Les lignes verticales en pointillés délimitent la REU. La zone ombrée correspond à l'écart-type de la valeur mesurée en chaque point.

En somme, les propriétés physiques et hydrodynamiques du sol restent statistiquement inchangées d'un système de culture à l'autre, seul le C_{tot} confère un léger avantage sur la REU sans modifier la densité apparente (ρ_b), ni la K_{sat} .

5.3.3 Croissance de la culture

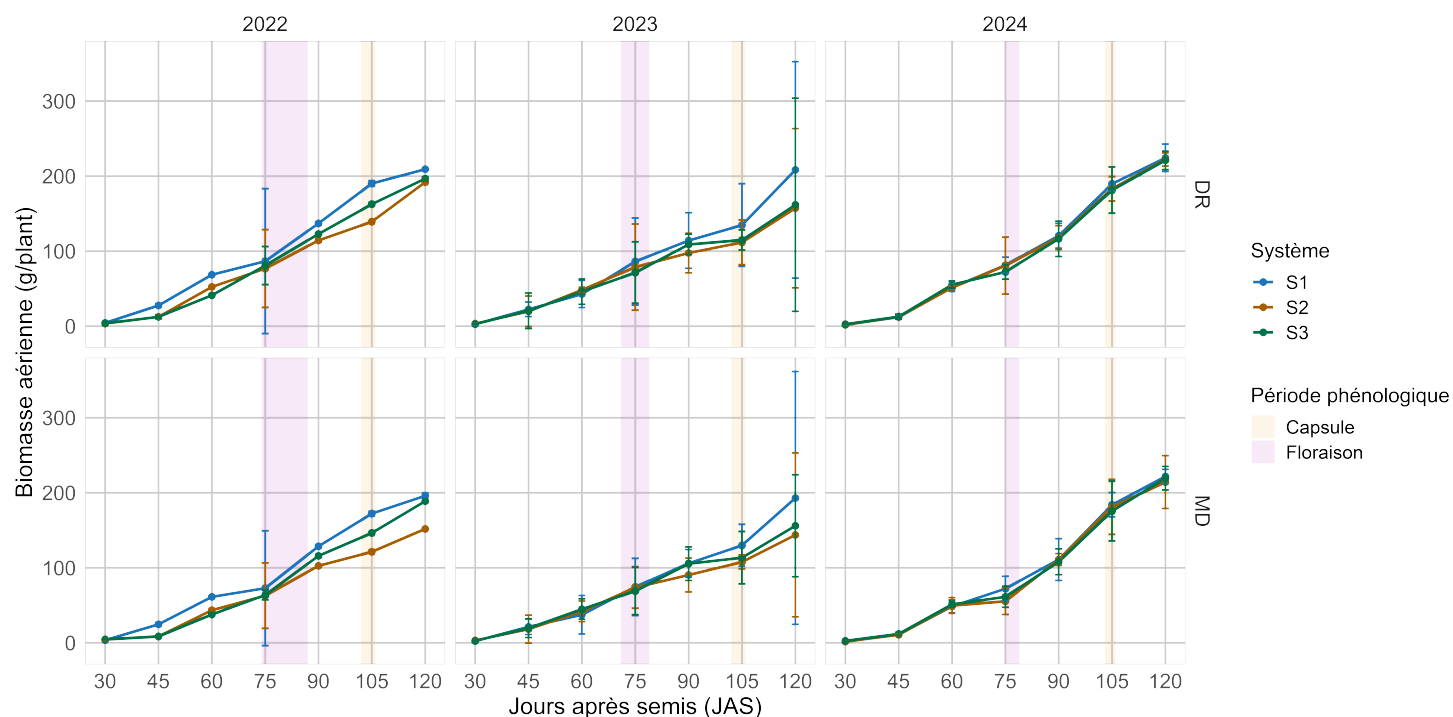


Figure 5.5 – Évolution de la biomasse aérienne du coton (g/plant) mesurée à sept dates en 2022, 2023 et 2024. Ligne continue : moyenne par système de culture (S1 —, S2 —, S3 —). Barres verticales : intervalle de confiance à 95% (les intervalles sont parfois trop petits pour être visibles). Rangée supérieure : dose d’engrais recommandée (DR); rangée inférieure : microdose d’engrais (MD). Les bandes colorées indiquent les fenêtres phénologiques communes à l’ensemble des traitements : floraison (violet) et apparition des capsules (beige).

La figure 5.5 montre une biomasse constamment légèrement supérieure dans le S1 par rapport aux systèmes 2 et 3 en 2022 et 2023. Cela se remarque surtout en fin de cycle, indépendamment de la dose de fertilisant appliquée. La distinction des profils de croissance entre les trois systèmes (S1, S2, S3) est particulièrement marquée en 2022 et tend à fortement diminuer en 2023 et 2024.

La variabilité intra-système, représentée par les barres verticales, reste faible jusqu’au début de la floraison, à partir de laquelle elle s’accroît, surtout en 2023 et 2024. On observe cependant une exception en 2022, avec une très faible variabilité intra-système (uniquement marquée au début de la floraison (75 JAS)).

Les fenêtres phénologiques indiquent un léger décalage de la période de floraison selon les années : plus étendue en 2022, sa durée diminue progressivement jusqu’en 2024 et est la plus précoce en 2023. En revanche, la phase de développement des capsules apparaît relativement stable d’une année à l’autre.

Table 5.3 – Résultats (p-valeur) de l’ANOVA à trois facteurs (Système, Dose d’engrais, Année) et l’interaction *Système × Dose* sur l’évolution de la biomasse aérienne (ensemble du cycle de croissance). La teneur en carbone du sol des allées ($C_{allée}$) est utilisée comme covariable. Les effets significatifs ($p < 0,05$) sont repris en gras.

Variable	Système	Dose	Syst. × Dose	Année	$C_{allée}$
Biomasse (g/plante)	3,48e-07***	9,15e-05***	0,67	5,77e-14***	0,05*

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

L'analyse de la variance met en évidence un effet très significatif de l'année ($p = 5,77 \times 10^{-14}$) et du système ($p = 3,48 \times 10^{-7}$), ainsi qu'un effet marqué de la dose d'engrais ($p = 9,15 \times 10^{-5}$) sur la biomasse aérienne. Dans les systèmes S1 et S2, la biomasse en DR est significativement supérieure à celle en MD ($p = 0,023$ et $p = 0,004$), avec des différences moyennes sur l'ensemble du cycle de 6,7 et 8,5 g/plante, respectivement. L'effet de la MD apparaît moins marqué en S3; toutefois, l'interaction *Système* $\times$ *Dose* étant non significative, cette tendance ne peut être confirmée. L'ANOVA détecte également un léger effet significatif du $C_{allée}$, inclus comme covariable ($p = 0,05$) (tableau 5.3).

Le test de comparaison multiple de Tukey confirme que la biomasse aérienne du S1 est constamment supérieure à celle des autres systèmes, indépendamment de la dose d'engrais. En moyenne, le S1 dépasse S2 et S3 de 10–12 g/plante sur la totalité du cycle ($p \leq 0,002$), tandis que S2 et S3 ne diffèrent pas statistiquement l'un de l'autre.

5.3.4 rendement (grain + fibre)

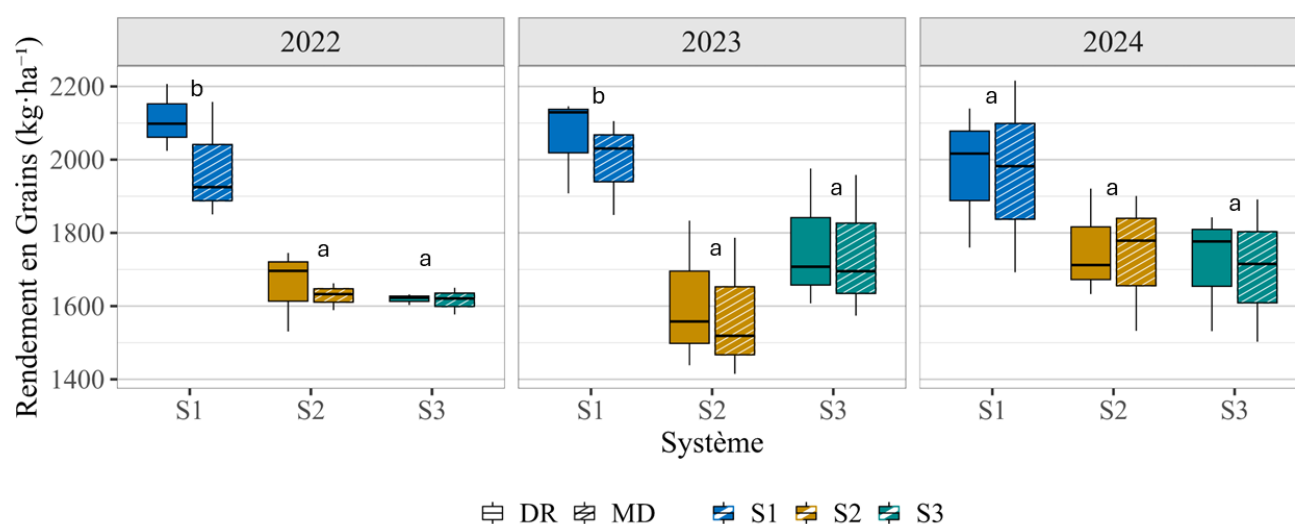


Figure 5.6 – Boxplot des rendements (grain + fibre)(kg/ha) en fonction du système de culture (S1, S2, S3) et de la dose de fertilisants (DR et MD) pour 2022, 2023 et 2024. Les systèmes marqués par une même lettre ne sont pas statistiquement différents entre eux ($\alpha = 0,05$).

La distribution des rendements (Fig. 5.6) reproduit, pour 2022 et 2023, la hiérarchie déjà observée sur la biomasse (Fig. 5.5) : quelles que soient les doses d'engrais, S1 dépasse nettement S2 et S3. Aucun effet net de la dose d'engrais n'est observé.

Table 5.4 – Résultats (p-valeur) de l'ANOVA à trois facteurs (Système, Dose d'engrais, Année) et l'interaction *Système* $\times$ *Dose* sur le rendement (grain et fibre) (kg/ha). La teneur en carbone du sol des allées ($C_{allée}$) est utilisée comme covariable. Les effets significatifs ($p < 0,05$) sont repris en gras.

Variable	Système	Dose	Syst. $\times$ Dose	Année	$C_{allée}$
Levée (%)	0,15	0,68	0,80	5,60e-07***	0,02*
Rendement (kg/ha)	1,41e-12***	0,18	0,67	0,99	2,03e-09***

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

L'ANOVA confirme ces observations (tableau 5.4). Le facteur *Système* est hautement significatif

pour le rendement ($p = 1,41 \times 10^{-12}$), tandis que l'interaction *Syst. $\times$ Dose* et l'effet direct de la dose d'engrais sont non significatifs. De manière analogue à la biomasse, le carbone du sol ($C_{allée}$) intervient comme covariable déterminante pour le rendement ($p = 2,03 \times 10^{-9}$) (tableau 5.4) ainsi que pour le pourcentage de levée ($p = 0,02$). Enfin, la variabilité interannuelle affecte la levée ($p = 5,60 \times 10^{-7}$) mais pas le rendement. En moyenne, le S1 procure un avantage d'environ 350 (kg/ha) par rapport aux deux autres systèmes, soit trois à quatre fois le gain apporté par la dose azotée supplémentaire en DR.

5.3.5 Phénologie

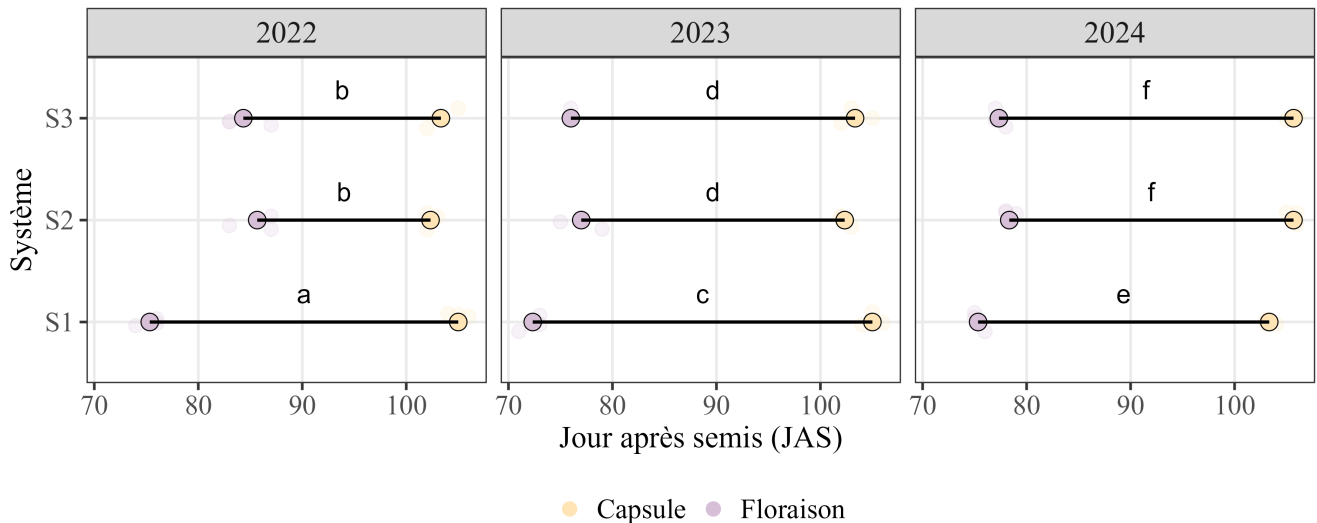


Figure 5.7 – Dates de floraison (pastilles violettes) et de formation des capsules (pastilles jaunes) pour chaque système de culture (S1, S2, S3) au cours des campagnes 2022–2024. Les points pâles correspondent aux observations individuelles, les points opaques indiquent la moyenne par système. Le trait représente la durée moyenne anthèse–capsule. Les lettres (a–f) signalent les groupes homogènes issus d’un test de Tukey ($\alpha = 0,05$) (comparaisons valables entre système et entre années).

Table 5.5 – Résultats (p-valeur) de l’ANOVA à deux facteurs (Système, Année) et l’interaction *Système $\times$ Année* sur les paramètres phénologiques (anthèse et apparition des capsules). La teneur en carbone du sol des allées ($C_{allée}$) est utilisée comme covariable. Les effets significatifs ($p < 0,05$) sont repris en gras

Variable	Système	Syst. $\times$ Année	Année	$C_{allée}$
Floraison (JAS)	4.34 e-08***	1.35e-05***	1.36 e-11***	0,52
Capsule (JAS)	0,02*	1,52e-07***	1,78e-04***	2,31e-04***
Durée anthèse–capsule (JAS)	8,29e-13***	4.59e-09***	6.56 e-13***	0,14

*** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

La figure 5.7, appuyée par le tableau 5.5, met en évidence une floraison significativement plus précoce en S1 : entre 2022 et 2024, la floraison intervient en moyenne six jours avant S2 et près de cinq jours avant S3. Ainsi, l’intervalle *anthèse–capsule* est significativement allongé pour le S1 en 2022. Le S1 combine donc floraison précoce et phase *anthèse–capsule* prolongée, deux traits susceptibles de favoriser la croissance et le rendement.

Au-delà des effets significatifs propres au système ($p < 0,001$), la variabilité interannuelle influence aussi significativement la phénologie ($p < 0,001$). De fait, les dates de floraison, de mise en capsule et la durée *anthèse–capsule* varient également de façon significative d’une année à l’autre (tableau 5.5). L’interaction *Système $\times$ Année* est également significative pour chacun de ces paramètres.

Cela indique, par exemple, que l’effet du système sur la précocité de la floraison est modulé par les conditions annuelles.

Finalement, le $C_{allée}$ n’affecte pas la date de floraison ($p = 0,52$) mais influence l’apparition des capsules ($p = 2,31 \times 10^{-4}$). Son effet sur la durée *anthèse-capsule* reste non significatif ($p = 0,14$).

5.4 Paramétrage du modèle DSSAT et analyse de sensibilité

5.4.1 Optimisation des coefficients génétiques

Table 5.6 – Valeurs observées, simulées et pourcentages de variation (PV %, calculés via l’équation 4.10.) pour les trois méthodes de calibration génétique appliquées au S1 en dose recommandée sur l’ensemble de calibration (2022 et 2023).

Année	Variable	Observation	Valeurs simulées			PV(%)		
			GLUE	GENCALC	Croissance	GLUE	GENCALC	Croissance
2022	Date d’anthèse (JAS)	58	59	58	54	1.7	0.0	−7.4
	Apparition des capsules (JAS)	75	74	69	64	−1.3	−8.7	−17.2
	Maturité physiologique (JAS)	156	152	151	126	−2.6	−3.3	−23.8
	Rendement (kg ha^{-1})	2109	2159	2239	1057	2.3	5.8	−99.5
	Biomasse finale (kg ha^{-1})	5678	5219	4921	3735	−8.8	−15.4	−52.0
2023	Date d’anthèse (JAS)	56	57	56	52	1.7	0.0	−7.7
	Apparition des capsules (JAS)	75	71	66	61	−5.6	−13.6	−22.9
	Maturité physiologique (JAS)	156	142	141	120	−9.9	−10.6	−30.0
	Rendement (kg ha^{-1})	2061	2088	2127	995	1.3	3.1	−107.1
	Biomasse finale (kg ha^{-1})	5034	4872	4536	3539	−3.3	−11.0	−42.2

Globalement, la méthode GLUE reproduit le mieux les observations, avec des écarts compris entre $-9,86\%$ et $+1,75\%$ pour l’ensemble des variables considérées (tableau 5.6). Elle est suivie par GENCALC, dont les pourcentages de variation (PV) se situent entre $-15,38\%$ et $3,10\%$. Contrairement aux deux méthodes incluses dans DSSAT, l’optimisation basée sur les courbes de croissance présente les écarts les plus importants et tend à sous-estimer systématiquement les observations ($\text{PV} \in [-107,14; -7,41]\%$).

Bien que la méthode GLUE soit la plus performante, certains biais persistent. Elle tend notamment à avancer légèrement l’apparition des capsules ainsi que la maturité physiologique. De plus, elle sous-estime la biomasse finale, surestime légèrement le rendement (grain + fibre) et retarde modérément l’anthèse.

5.4.2 Analyse de sensibilité des paramètres d'entrée relatifs à la gestion des résidus

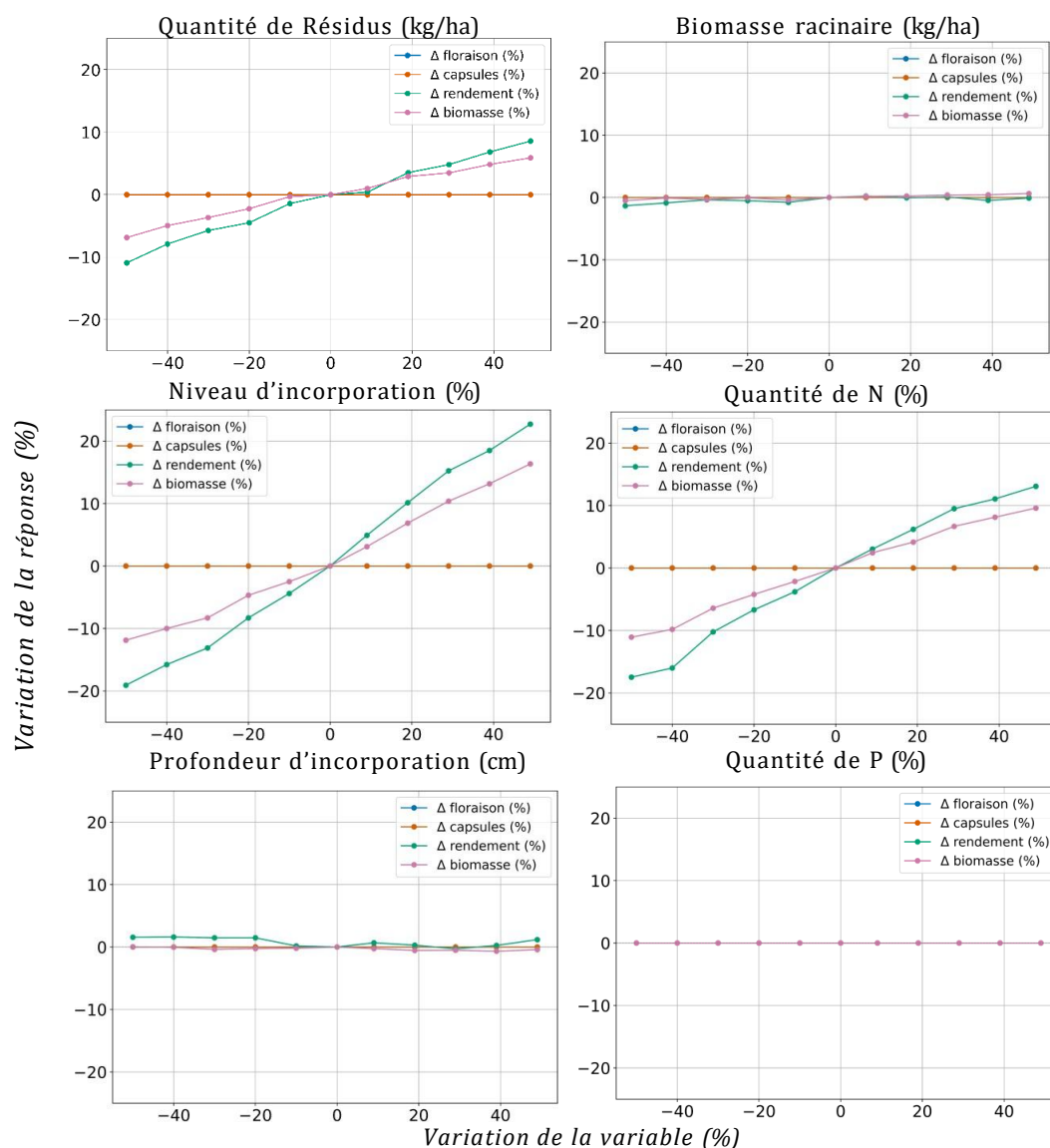


Figure 5.8 – Analyse de sensibilité des réponses du modèle (dates d’anthèse et d’apparition des capsules, rendement (grain + fibre), biomasse aérienne finale) aux variations des paramètres liés aux modalités de gestion des résidus (masse restituée, niveau et profondeur d’incorporation, biomasse racinaire, teneurs en N et P dans les résidus). Les valeurs de référence prises par chaque variable sont reprises en Annexe P et correspondent à celles du S1 en 2022.

L’analyse de sensibilité (Fig. 5.8) révèle que seules les variables de production (rendement (grain + fibre) et biomasse aérienne) réagissent aux variations des paramètres étudiés (entre -50 et 50 %), tandis que les stades phénologiques (floraison et capsules) restent inchangés. Parmi les facteurs testés, la quantité de résidus, leur niveau d’incorporation et leur teneur en azote (N) induisent une réponse linéaire des variables de production.

Parallèlement, la biomasse racinaire initiale génère des variations minimales, inférieures à 2 %, la rendant peu sensible dans la plage étudiée. De même, la teneur en phosphore (P) des résidus ne

montre aucun effet mesurable sur les sorties du modèle.

Enfin, la profondeur d'incorporation des résidus n'affecte pas les sorties du modèle (Fig. 5.8).

5.4.3 Analyse de sensibilité des paramètres d'entrée relatifs à la fertilisation et au travail du sol

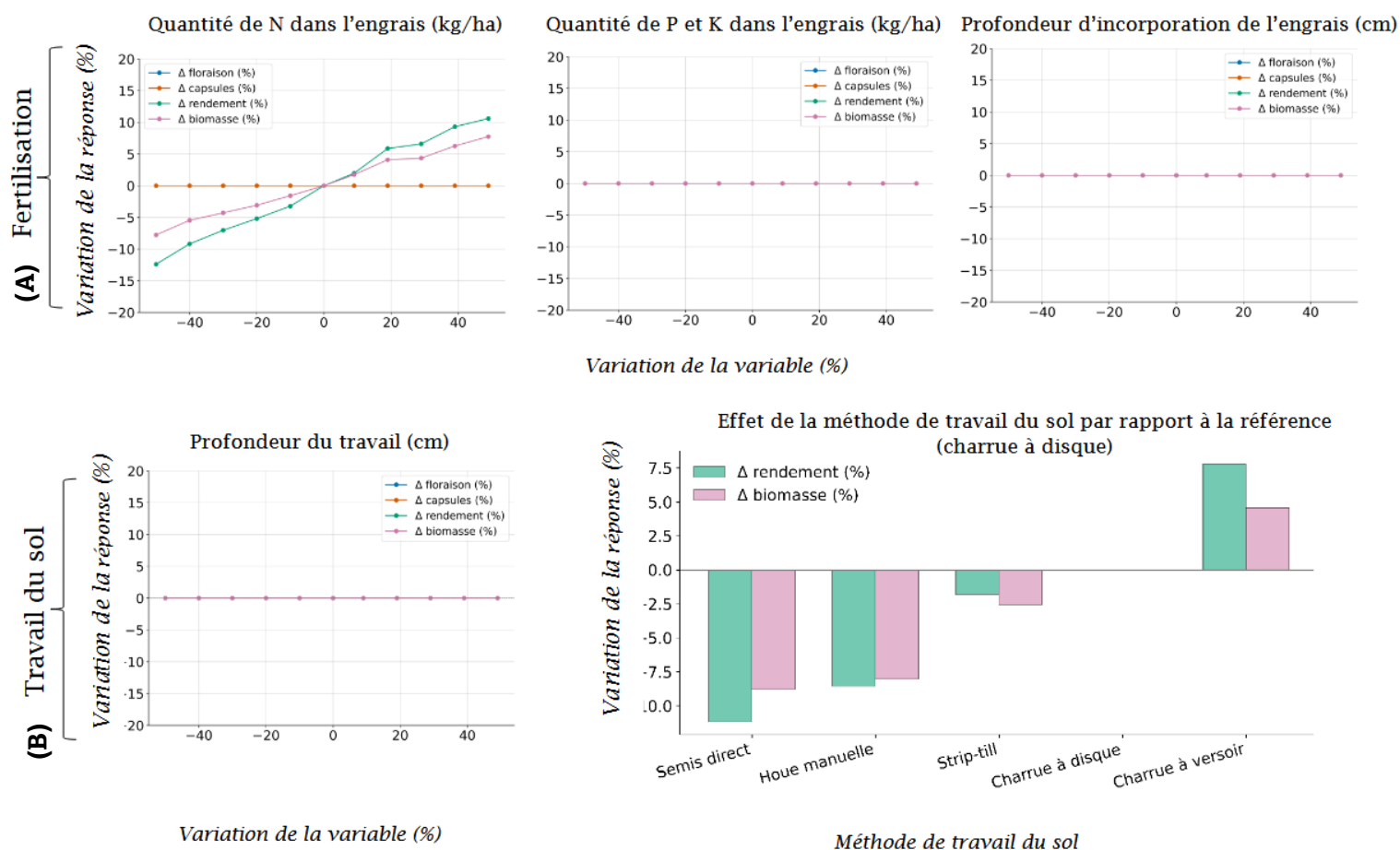


Figure 5.9 – Analyse de sensibilité montrant les variations relatives des variables de production (dates d'anthèse, apparition des capsules, rendement (grain + fibre), biomasse aérienne finale) en fonction de : **(A)** trois facteurs de fertilisation (quantité de N-P-K dans l'engrais, profondeur d'incorporation de l'engrais) et **(B)** le mode de travail du sol (méthode et profondeur).

Pour les paramètres d'entrée liés à la fertilisation, le modèle est uniquement sensible à la quantité d'azote (N) contenue dans l'engrais et y répond linéairement (Fig. 5.9 (A)). Tout comme pour la profondeur d'incorporation des résidus (Fig. 5.8) et du travail du sol (Fig. 5.9 (B)), la profondeur d'incorporation de l'engrais n'a pas d'impact sur les réponses du modèle. Cependant, le modèle reproduit de façon logique l'intensité des perturbations des modes de travail du sol, avec une diminution du rendement allant de 10 % pour la méthode dite la plus conservatrice (semis direct) jusqu'à une augmentation de 8 % pour la méthode conventionnelle intensive (charrue à versoir) (Fig. 5.9 (B)).

5.4.4 Effet de l'hétérogénéité en carbone du site sur les sorties du modèle

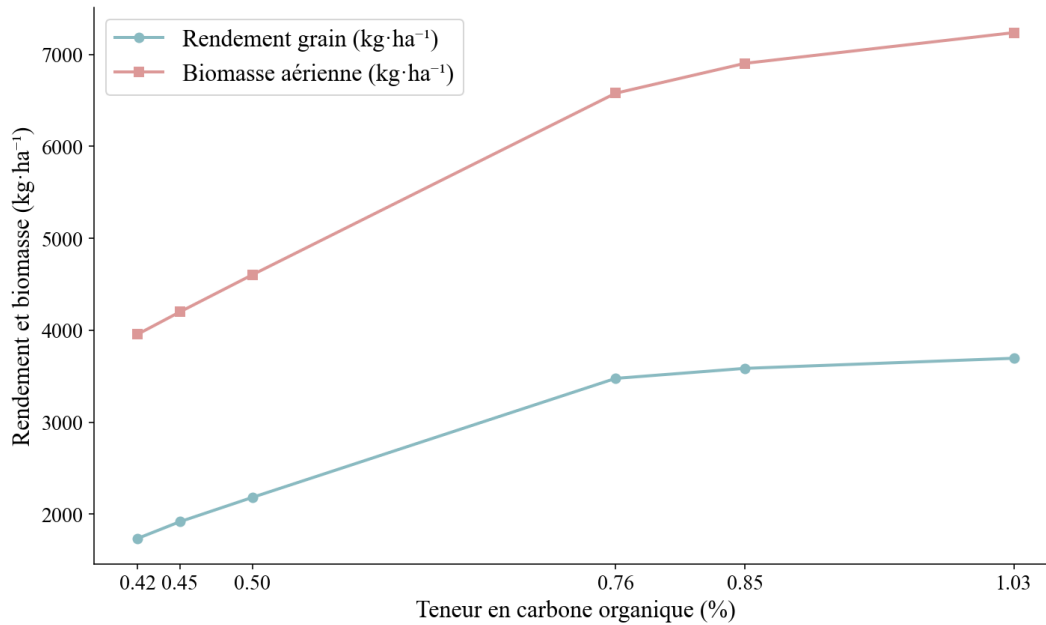


Figure 5.10 – Biomasse aérienne (kg/ha) et rendement (grain + fibre) (kg/ha) en fonction de la teneur en carbone organique SLOC (%) dans le profil de sol reproduit dans DSSAT. Les variations de la SLOC ont été effectuées entre 0-25 cm de profondeur.

La teneur en C_{org} dans le profil de sol a une grande influence sur les sorties du modèle liées à la production (Fig. 5.10). Ainsi, une multiplication par plus de deux du C_{org} initial (SLOC = 0,45% → 1,03%) entraîne une augmentation d'environ 70% de la biomasse finale et de près de 90% du rendement (grain + fibre). La figure 5.10 révèle cependant un effet de plafonnement : après une augmentation rapide, la biomasse aérienne et le rendement (grain + fibre) montrent une réponse plus faible aux teneurs en C_{org} supérieures à 0,76%. Ces résultats (Fig. 5.10) mettent en évidence l'impact significatif de l'hétérogénéité spatiale du carbone du sol (Fig. 5.1), qui n'est pas pleinement prise en compte lorsque le modèle utilise les données d'un seul profil de sol (tableau 4.4).

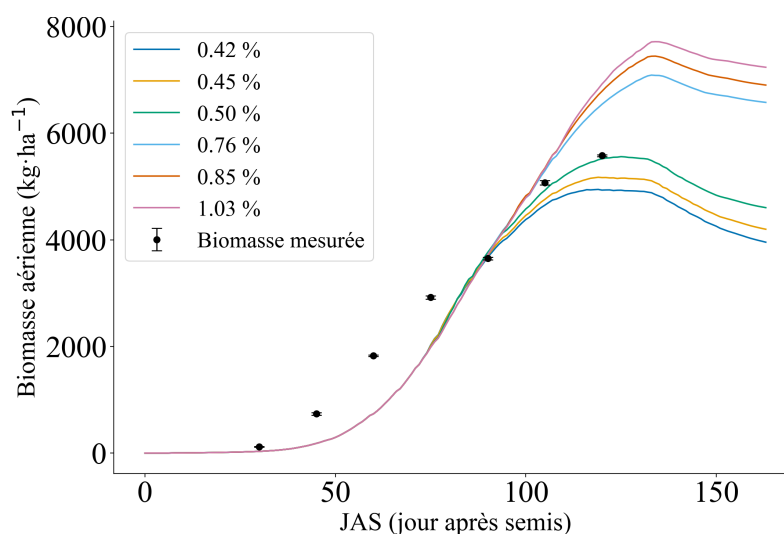


Figure 5.11 – Effet du C_{org} (SLOC) dans le profil de sol reproduit dans DSSAT sur l'évolution de la biomasse aérienne (kg/ha) pour le traitement du S1-DR en 2022. Les • $\pm$ écart-type (n=3, par date) correspondent aux mesures (S1-DR en 2022).

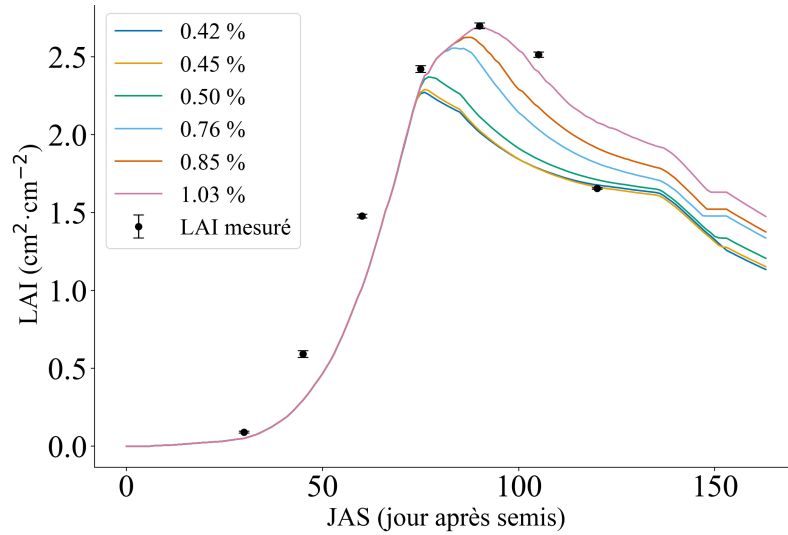


Figure 5.12 – Effet du C_{org} (SLOC) dans le profil de sol reproduit dans DSSAT sur l'évolution du rendement (grain + fibre) (kg/ha) pour le traitement du S1-DR en 2022. Les $\bullet \pm$ écart-type ($n=3$, par date) correspondent aux mesures (S1-DR en 2022).

Au-delà de l'impact sur les performances agronomiques (Fig. 5.10), la teneur en C_{org} influence la croissance du coton, comme représenté sur les graphes d'évolution de la biomasse aérienne et de l'indice de surface foliaire (LAI) (Fig. 5.11 et 5.12). La valeur de SLOC de 0,5% reproduit le mieux l'évolution mesurée de la biomasse aérienne (Fig. 5.11). Parallèlement, une SLOC de 1,03% tend à reproduire plus fidèlement l'évolution du LAI au cours de la saison, bien qu'une légère surestimation soit observée en fin de cycle (Fig. 5.12). Au vu de ces résultats, la teneur de C_{org} de 0,45%², inférieure à la moyenne parcellaire (Fig. 5.2), sous-estime la croissance observée.

En outre, les analyses révèlent une absence d'influence du C_{org} sur les paramètres hydriques modélisés par DSSAT. Ni le ruissellement cumulé (Fig. A.18) ni la teneur en eau volumique en surface (Fig. A.19) ne sont affectés par les variations du paramètre SLOC, ce qui pourrait indiquer un "découplage" entre les modules "Carbone" et "Eau du sol" au sein du modèle.

2. utilisée dans l'ensemble des simulations DSSAT de ce travail.

5.5 Calibration du modèle (2022 et 2023)

Le modèle, paramétré avec les coefficients GLUE (Annexe N), a été calibré sur l'ensemble des données de 2022 et 2023.

5.5.1 Performances agronomiques

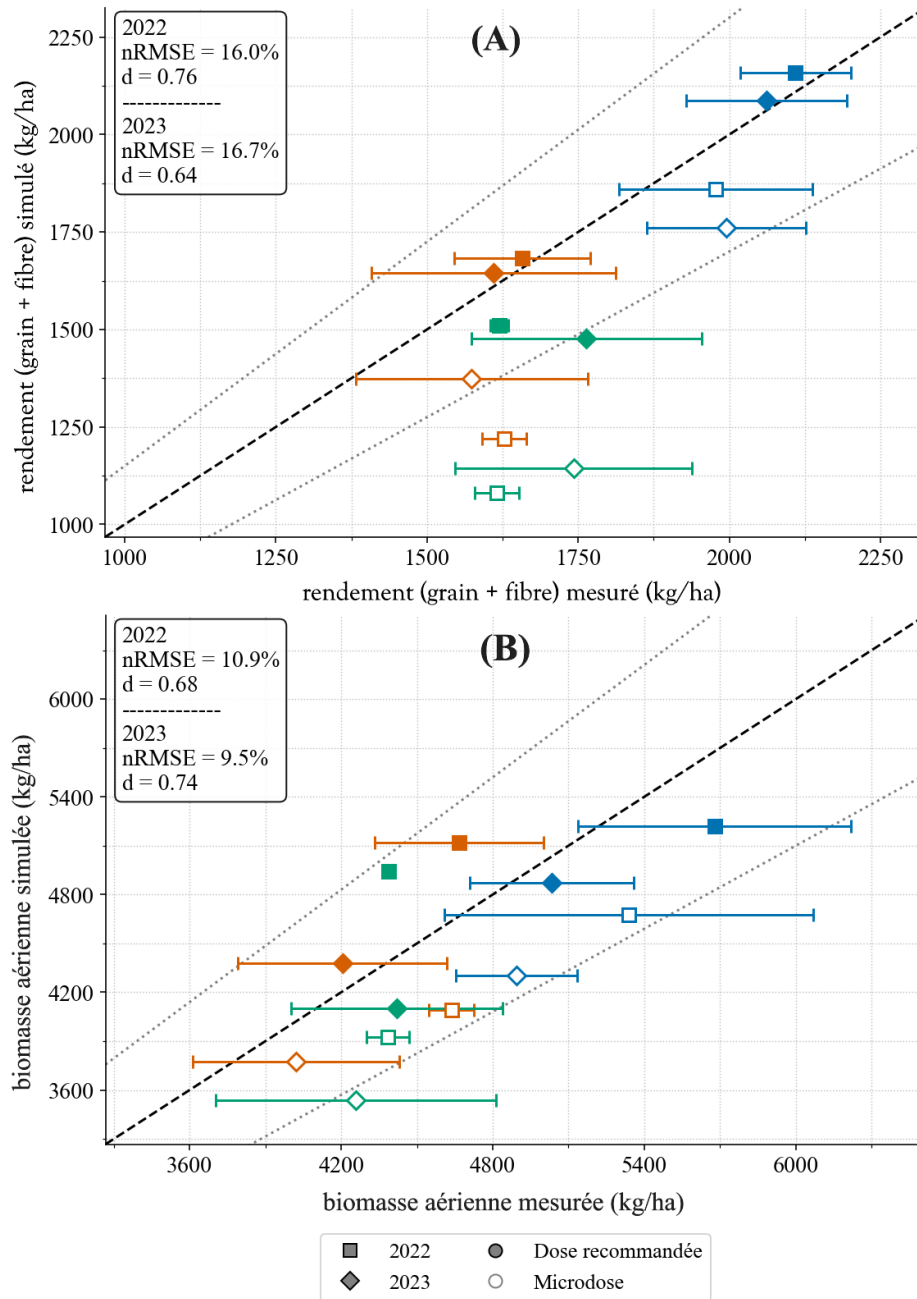


Figure 5.13 – Biplots (simulé vs mesuré) du rendement (grain + fibre) (A) et de la biomasse aérienne (B) pour l'ensemble de calibration (2022 et 2023) : barres = $\bar{x} \pm \sigma$, droite pleine = concordance parfaite, pointillés = $\pm 10\%$. Les encadrés indiquent le nRMSE (équation 4.6) et l'indice d'accord d (équation 4.7). Les systèmes de culture correspondent aux couleurs suivantes : S1 ■, S2 ■, S3 ■.

La figure 5.13 présente la qualité de la calibration du modèle DSSAT en comparant les rendements (A) et la biomasse aérienne finale (B) simulés et mesurés. Concernant le rendement (grain + fibre), la performance du modèle est considérée comme bonne (voir critères RAVELOJAONA et al. (2023)).

Les indicateurs statistiques montrent une meilleure adéquation avec les mesures en 2022 ($d=0,76$ et $nRMSE=16,0\%$) qu'en 2023 ($d=0,64$ et $nRMSE=16,7\%$).

L'analyse graphique montre une bonne simulation des traitements sous dose recommandée (DR - points pleins), dont les valeurs se situent majoritairement dans un intervalle de $\pm 10\%$ par rapport aux mesures (incluses entre les deux lignes pointillées). En revanche, le modèle sous-estime systématiquement les rendements sous MD, un biais marqué pour le S3.

La simulation de la biomasse aérienne finale est globalement plus précise que celle du rendement. Les erreurs relatives sont plus faibles, avec un $nRMSE$ de 10,9% en 2022 et de 9,5% en 2023. Pour la biomasse, la majorité des points, tous traitements confondus, se trouve à proximité de la ligne de concordance parfaite (1 :1). Cependant, la tendance à la sous-estimation des traitements en fertilisation MD persiste pour tous les systèmes.

5.5.2 Phénologie

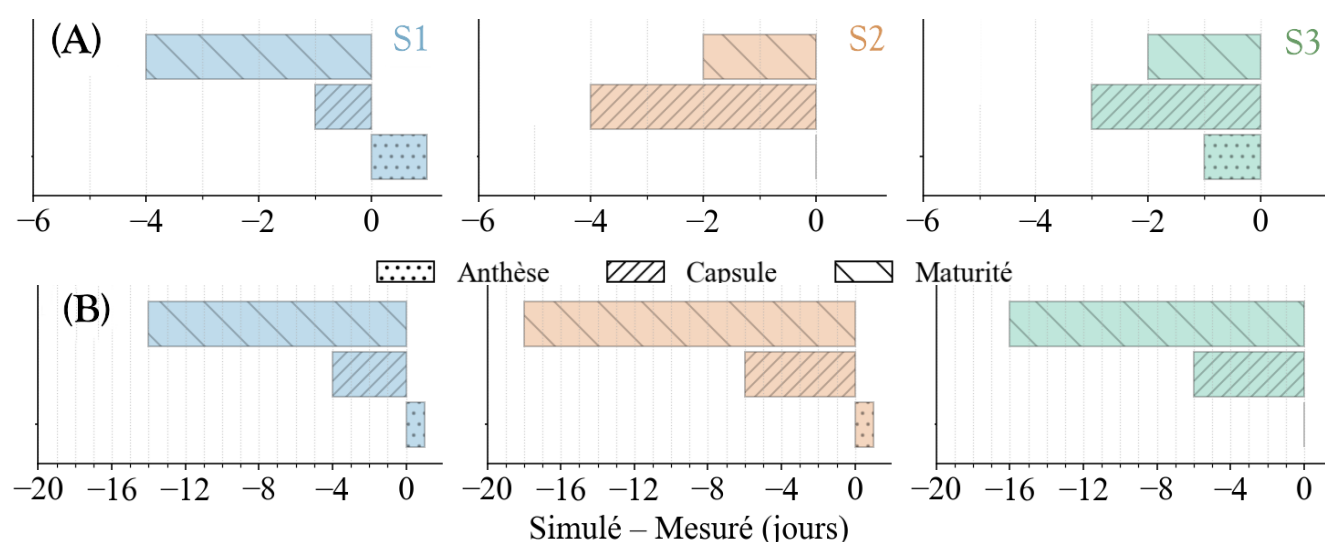


Figure 5.14 – Écarts simulés et mesurés (nombre de jours) pour les stades phénologiques (anthèse, première capsule et maturité physiologique) selon le système (S1-S3) et le mode de fertilisation (DR, MD) en (A) 2022 et (B) 2023.

En accord avec les données de terrain, aucune différence n'est observée entre les traitements MD et DR pour la phénologie (voir fenêtres phénologiques à la figure 5.5). En 2022, tous stades confondus, l'écart maximal entre simulation et observation ne dépasse pas quatre jours. L'apparition des capsules et la maturité physiologique sont les stades les moins bien reproduits, systématiquement simulés trop précocement, tandis que l'anthèse est presque parfaitement reproduite (écart d'un jour seulement pour le S1).

En 2023, les prédictions phénologiques sont nettement moins précises, en particulier pour le S2 : la maturité est simulée avec une avance pouvant atteindre 18 jours et l'apparition des capsules avec 4 à 6 jours d'avance. L'anthèse reste toutefois correctement représentée, avec un retard maximal d'un jour, comme en 2022.

En résumé, le modèle restitue bien l'anthèse mais tend à anticiper systématiquement la mise en capsule et la maturité, avec une erreur plus marquée en 2023 qu'en 2022.

5.5.3 Dynamique de croissance (LAI et biomasse aérienne)

Au-delà des performances agronomiques, le modèle a aussi été évalué sur sa capacité à reproduire la dynamique de croissance de la culture au cours du cycle, notamment l'évolution de l'indice de surface foliaire (LAI) et l'accumulation de la biomasse aérienne.

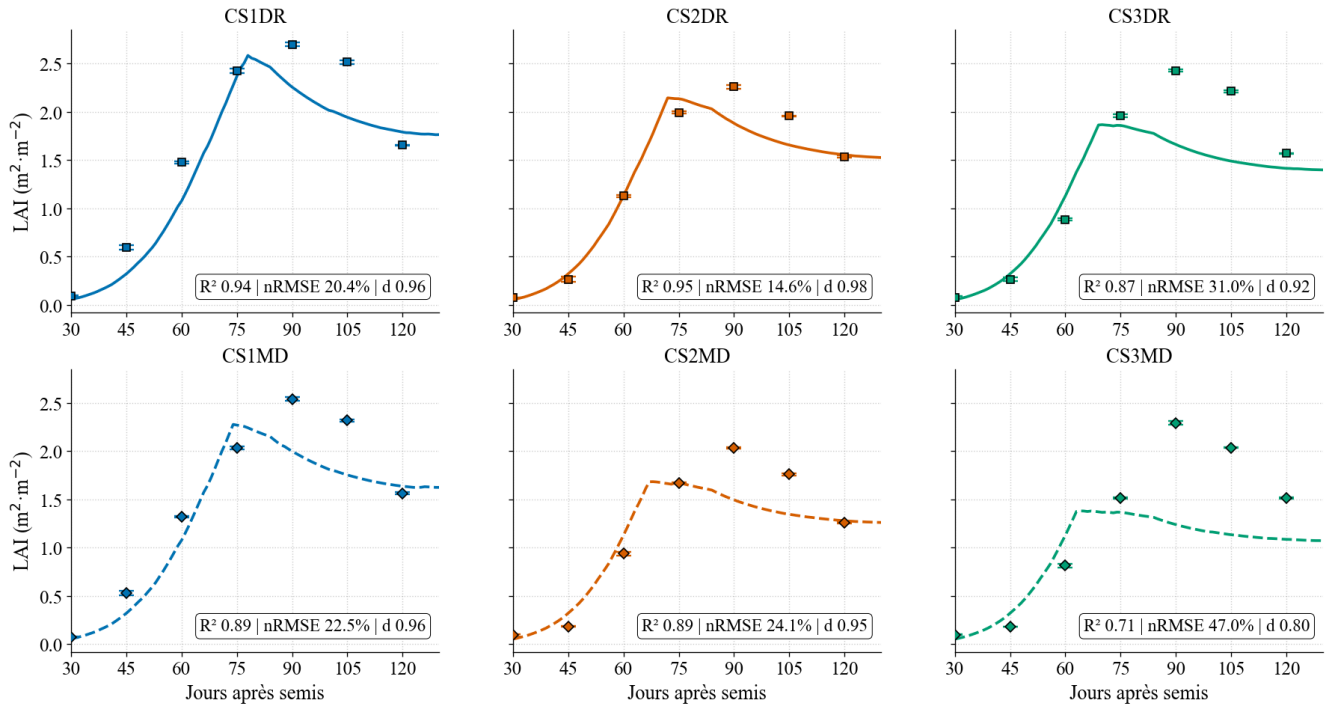


Figure 5.15 – Évolution du LAI (cm^2/cm^2) par traitement (2022) et indices statistiques nRMSE, R^2 et d. Traits pleins = valeurs simulées en DR et traits pointillés = valeurs simulées en MD. Les mesures sont représentées avec leur déviation standard (σ) (barres verticales)

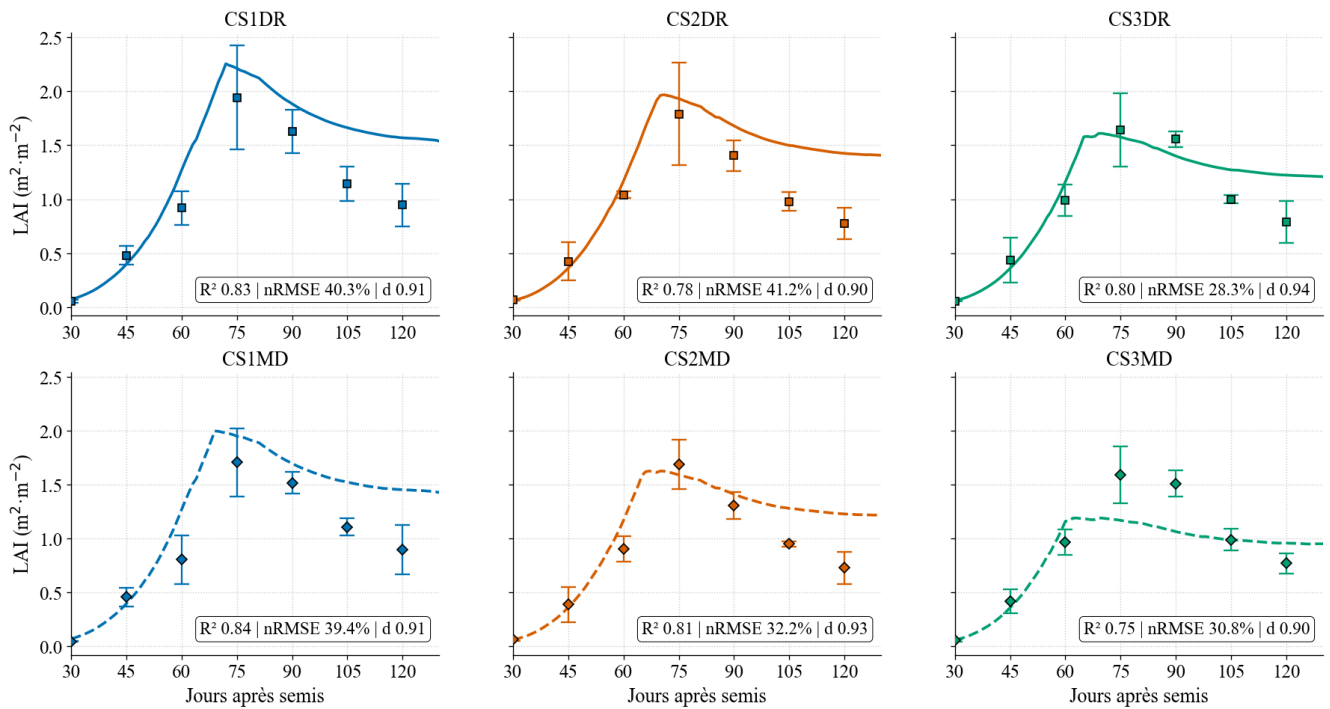


Figure 5.16 – Évolution du LAI (cm^2/cm^2) par traitement (2023) et indices statistiques nRMSE, R^2 et d. Traits pleins = valeurs simulées en DR et traits pointillés = valeurs simulées en MD. Les mesures sont représentées avec leur déviation standard (σ) (barres verticales).

Globalement, le modèle montre une capacité satisfaisante à simuler l'évolution du LAI, comme l'attestent les coefficients de détermination (R^2) élevés et des indices d'accord (d) supérieurs à 0,90 pour la quasi-totalité des traitements sur les deux années (Fig. 5.15 et 5.16).

Cependant, malgré cette tendance générale satisfaisante, certaines limites apparaissent, notamment dans la seconde moitié du cycle de culture. La phase de croissance végétative initiale, jusqu'à environ 75 JAS est correctement simulée pour les deux années. Au-delà de ce stade, des biais apparaissent et varient selon l'année :

- En 2022, le modèle a tendance à sous-estimer la surface foliaire en fin de cycle. La simulation est plus précise pour les traitements en dose recommandée (DR), le traitement S2-DR présentant l'erreur la plus faible (nRMSE de 14,6%).
- En 2023, la tendance s'inverse pour certains systèmes, avec une surestimation du LAI après 90 JAS pour S1 et S2. Bien que les R^2 soient légèrement inférieurs à 2022 (entre 0,75 et 0,84) et les nRMSE plus élevés (30 à 40%), le modèle parvient tout de même à mieux capturer le moment du pic de LAI qu'en 2022. Il est également à noter qu'en 2023, contrairement à 2022, la précision du modèle pour le LAI semble augmenter avec le caractère conservatif (S1 $\Rightarrow$ S3) et ce quel que soit le régime de fertilisation (MD ou DR).

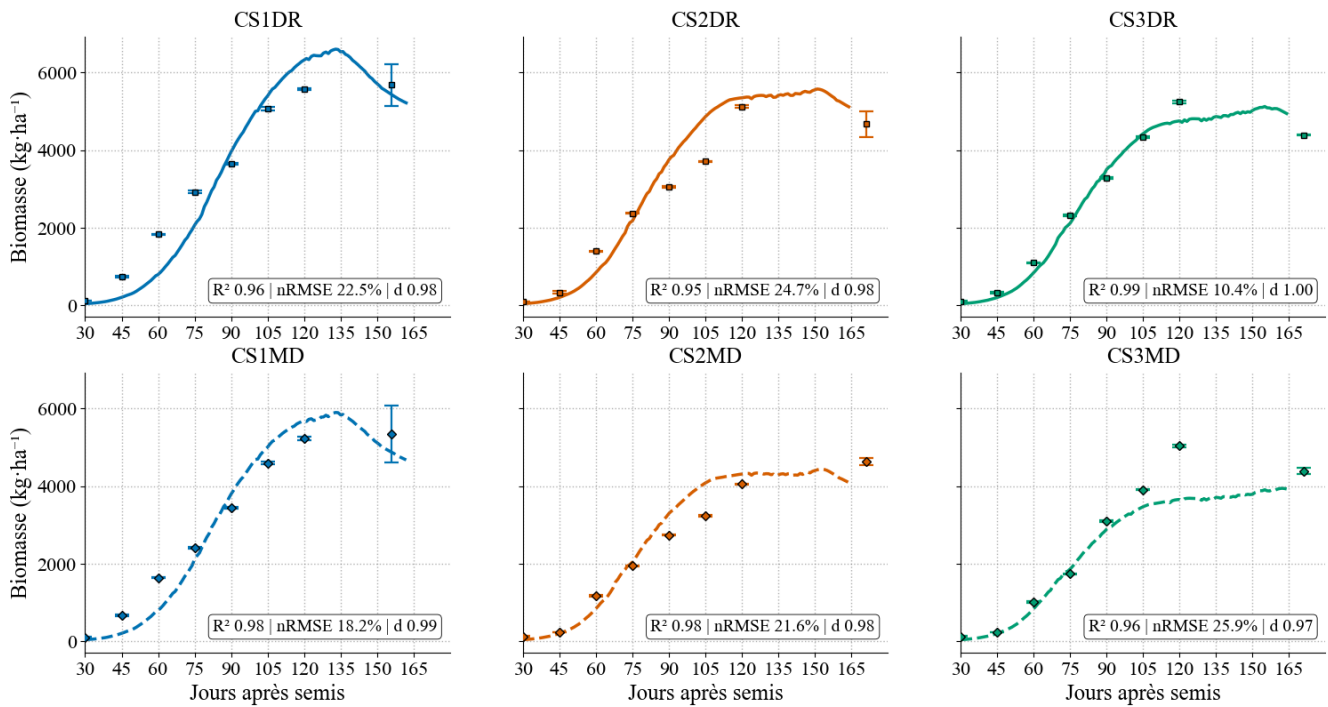


Figure 5.17 – Évolution de la biomasse aérienne(kg/ha) par traitement (**2022**) et indices statistiques nRMSE, R^2 et d. Traits pleins = valeurs simulées en DR et traits pointillés = valeurs simulées en MD. Les mesures sont représentées avec leur déviation standard (σ) (barres verticales).

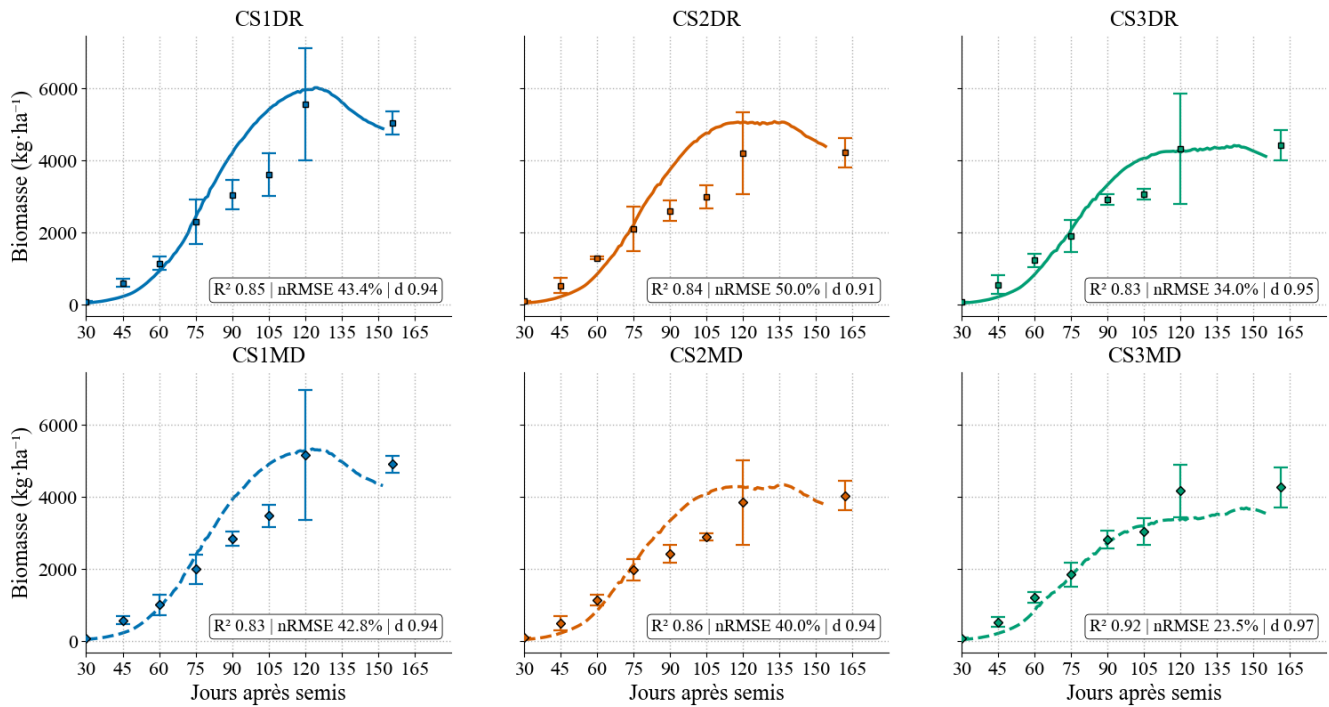


Figure 5.18 – Évolution de la biomasse aérienne (kg/ha) par traitement (**2023**) et indices statistiques nRMSE, R^2 et d. Traits pleins = valeurs simulées en DR et traits pointillés = valeurs simulées en MD. Les mesures sont représentées avec leur déviation standard (σ) (barres verticales).

L'évolution de la biomasse est, quant à elle, correctement simulée par le modèle, avec des coefficients de détermination élevés ($R^2 \geq 0,95$ en 2022 et $R^2 \geq 0,83$ en 2023) (Fig. 5.17 et 5.18). De façon similaire au LAI, la phase de croissance initiale (jusqu'à 75 JAS) est bien simulée, mais une tendance à la surestimation apparaît ensuite pour les deux années.

En 2022, le modèle reproduit correctement la phase de plateau de fin de cycle pour la plupart des traitements, à l'exception du S3 en fertilisation microdose (MD), où la croissance s'arrête trop tôt. La concordance entre la simulation finale et la mesure à la récolte (dernier point sur le graphe) est parfaite pour le système S1.

En 2023, les écarts de performance entre systèmes ne suivent pas la même hiérarchie que pour le LAI, le système S3 étant le mieux représenté, suivi de S1 et S2. De manière intéressante, l'erreur de prédiction cette année-là est plus faible pour les traitements en fertilisation MD que pour ceux en DR.

En résumé, le modèle simule correctement la dynamique globale de croissance mais il montre des difficultés à capturer précisément les processus de fin de cycle (après 75 JAS), avec des biais (sous-estimation ou surestimation) qui dépendent des conditions spécifiques de chaque année.

5.5.4 Modélisation du bilan hydrique net (2022)

Les figures 5.19 à 5.21 présentent une synthèse des flux d'eau simulés et du stock en eau (mesuré et simulé) par intervalles de 15 jours. Ces graphiques permettent d'évaluer de façon synthétique la cohérence entre l'évolution du stock en eau (simulé et mesuré) et le bilan hydrique net simulé par traitement. Les valeurs numériques du bilan hydrique net sont indiquées en vert (excédent) ou en rouge (déficit) au-dessus des barres. L'idée est de voir si le stock d'eau évolue de manière logique par rapport au bilan hydrique net : un bilan positif devrait faire augmenter le stock, et inversement.

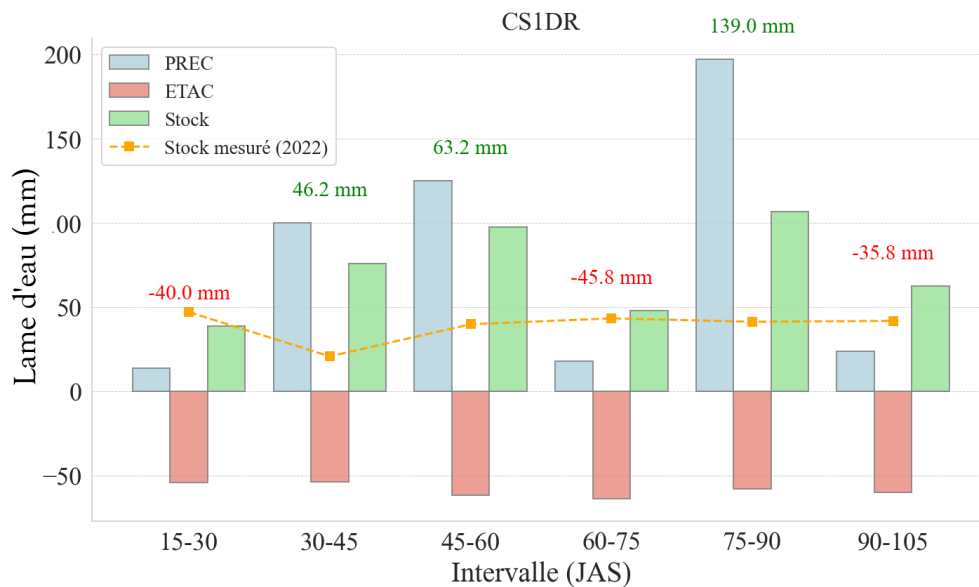


Figure 5.19 – Stock en eau (0-30 cm) simulé et mesuré par intervalles de 15 jours (JAS) pour le **S1 en DR** en 2022. Les barres représentent les cumuls de précipitations (PREC - bleu) et d'évapotranspiration (ETAC - rouge), ainsi que le stock d'eau simulé (vert). Le stock d'eau mesuré au dernier jour de l'intervalle est indiqué par une ligne orange. Le bilan hydrique net PREC-ETAC est affiché en mm au-dessus des barres.

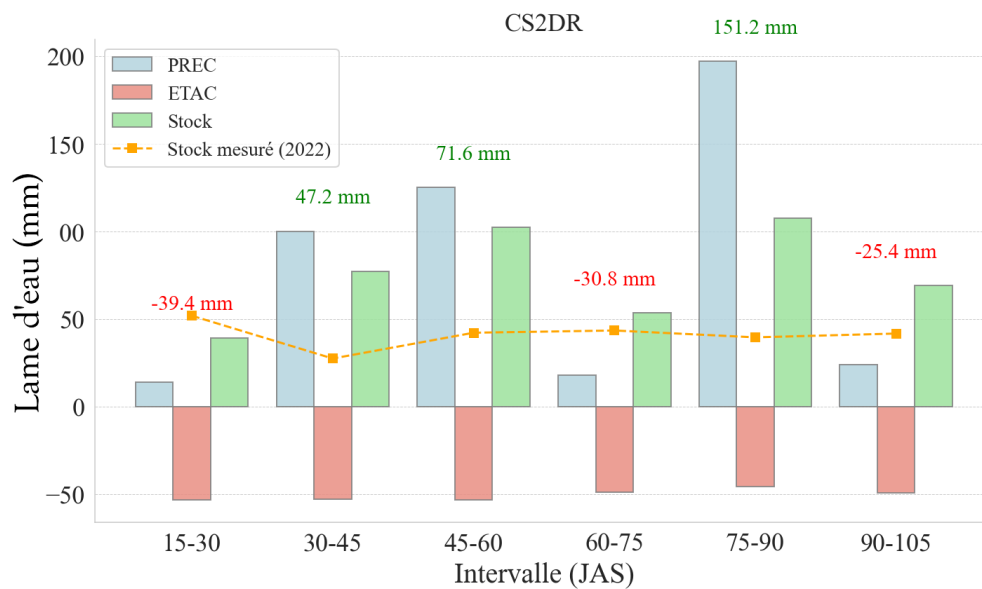


Figure 5.20 – Stock en eau simulé et mesuré par intervalles de 15 jours (JAS) pour le **S2 en DR**.

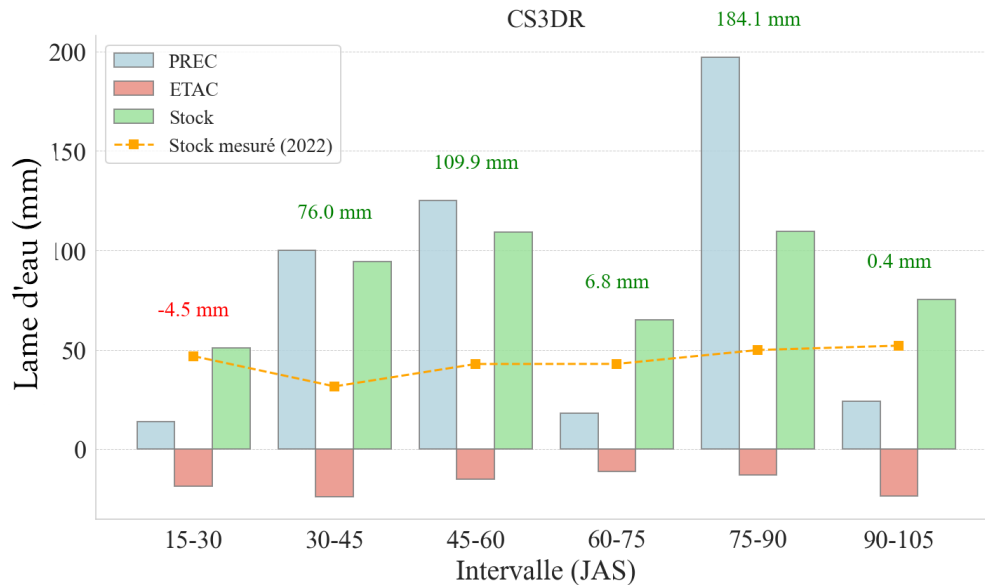


Figure 5.21 – Stock en eau simulé et mesuré par intervalles de 15 jours (JAS) pour le S3 en DR.

Tout comme pour la phénologie (Fig. 5.14), aucune différence n'est remarquée entre les traitements en MD et DR. En effet, l'évolution de l'évapotranspiration cumulée (ETAC) ne varie que très peu en fonction de la dose d'engrais. Cette différence n'apparaît qu'en fin de cycle (JAS $\approx$ 110 JAS) pour le S3 (Annexe T).

Dans l'ensemble, les stocks mesurés sont mal reproduits par le modèle sauf pour les intervalles 15-30 JAS et 60-75 JAS (Fig. 5.19 à 5.21). Dans les autres cas, les stocks mesurés sont toujours plus faibles que les simulations.

Plus le système est conservatif ($S1 \Rightarrow S3$), plus le nombre de bilans nets négatifs (écrits en rouge sur la figure 5.21) sur l'ensemble du cycle diminue. Ainsi, pour le S1 et S2 (Fig. 5.19 et 5.20) trois quinzaines sur les six représentées présentent un bilan hydrique net négatif. Cette proportion chute à une sur six pour le S3 (Fig. 5.21), ce qui suggère que le stress hydrique simulé est moins marqué pour le système le plus conservatif (S3)³.

3. NB : un bilan hydrique net négatif n'implique pas automatiquement un stress hydrique, il faut comparer le stock d'eau effectif avec le stock à la capacité au champ et au point de flétrissement pour apprécier l'occurrence d'un stress hydrique.

5.6 Validation du modèle (2024)

En employant les coefficients génétiques et les valeurs des paramètres .SPE calibrés à partir des données de 2022 et 2023, le modèle a été testé sur les données indépendantes de 2024. Cette étape permet d'évaluer la capacité de généralisation du modèle calibré.

5.6.1 Performances agronomiques

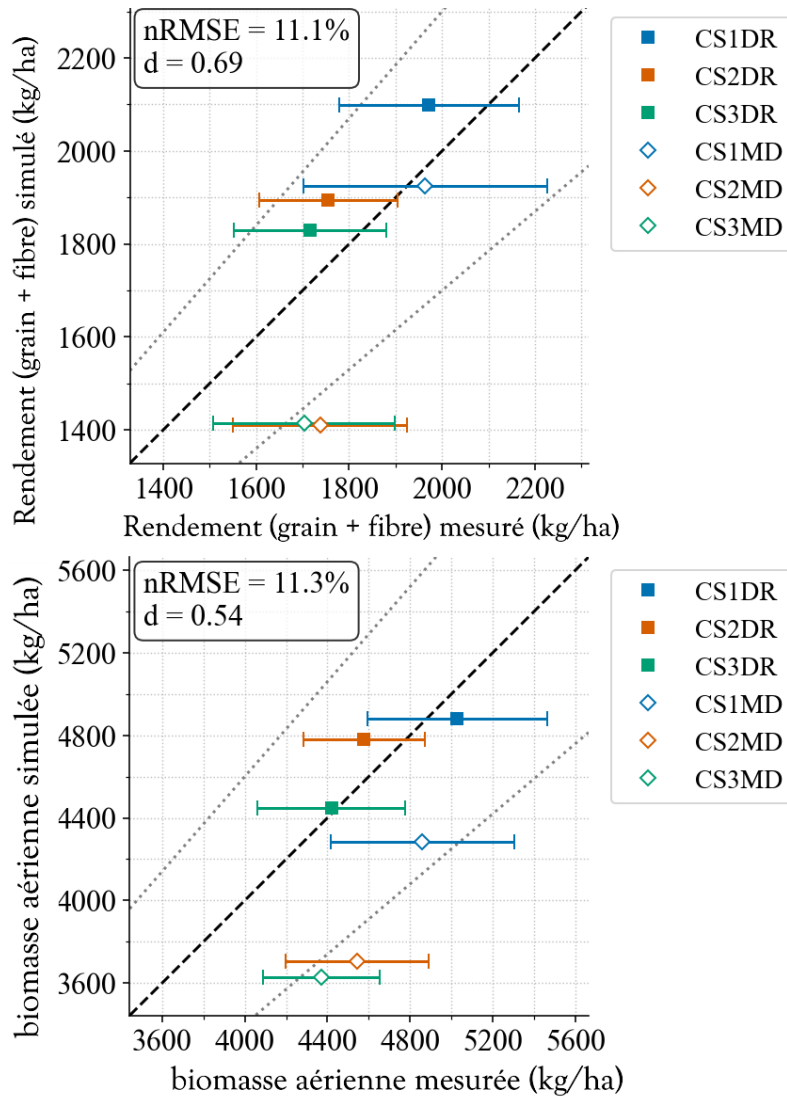


Figure 5.22 – Biplots (simulé vs mesuré) du rendement (grain + fibre) et de la biomasse aérienne finale : barres = $\bar{x} \pm \sigma$, ligne pleine = concordance parfaite, pointillés = $\pm 10\%$. Les encarts indiquent le nRMSE (équation 4.6) et l'indice d'accord d (équation 4.7).

Au premier abord, la performance du modèle pour la simulation du rendement et de la biomasse en 2024 (Fig. 5.22) semble meilleure que lors de la calibration (Fig. 5.13). En effet, les erreurs relatives (nRMSE) sont plus faibles, autour de 11 % pour les deux variables, et un plus grand nombre de points se situe dans la bande de tolérance de $\pm 10\%$.

Cette amélioration doit toutefois être nuancée : les indices d'accord de Willmott (d) sont inférieurs à ceux obtenus en calibration (0,69 pour le rendement, 0,54 pour la biomasse). Cela signifie que, si le modèle estime des valeurs moyennes plus proches des observations, il décrit moins bien les

différences relatives entre traitements.

Par ailleurs, la validation confirme les biais systématiques déjà mis en évidence lors de la calibration. Pour le rendement comme pour la biomasse, le modèle continue de sous-estimer la performance des traitements en fertilisation MD. Ce biais persiste, les écarts simulés entre DR et MD demeurant particulièrement prononcés pour les systèmes S2 et S3.

5.6.2 Phénologie

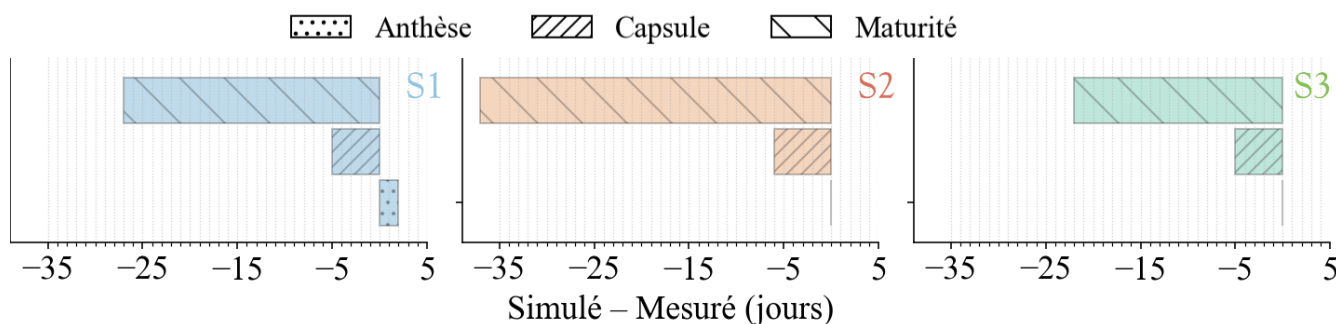


Figure 5.23 – Écarts simulés et mesurés (nombre de jours) pour l’anthèse, la première capsule et la maturité selon le système (CS1–CS3) en **2024**.

La simulation des stades phénologiques en 2024 (Fig. 5.23) confirme et accentue les tendances observées lors de la calibration (Fig. 5.14).

D’une part, tout comme en 2022 et 2023, l’anthèse est prédite avec précision, l’écart maximal n’excédant pas deux jours (pour le S1).

D’autre part, la principale faiblesse du modèle s’accroît : la prédiction de la maturité physiologique est encore plus imprécise qu’en 2023 (Fig. 5.14), avec une anticipation pouvant atteindre plus d’un mois pour le S2. L’apparition des capsules est également simulée de façon précoce, avec 5 à 6 jours d’avance. La validation met donc en évidence la difficulté du modèle à reproduire correctement la durée de la phase reproductive.

5.6.3 Dynamique de croissance (LAI et biomasse aérienne)

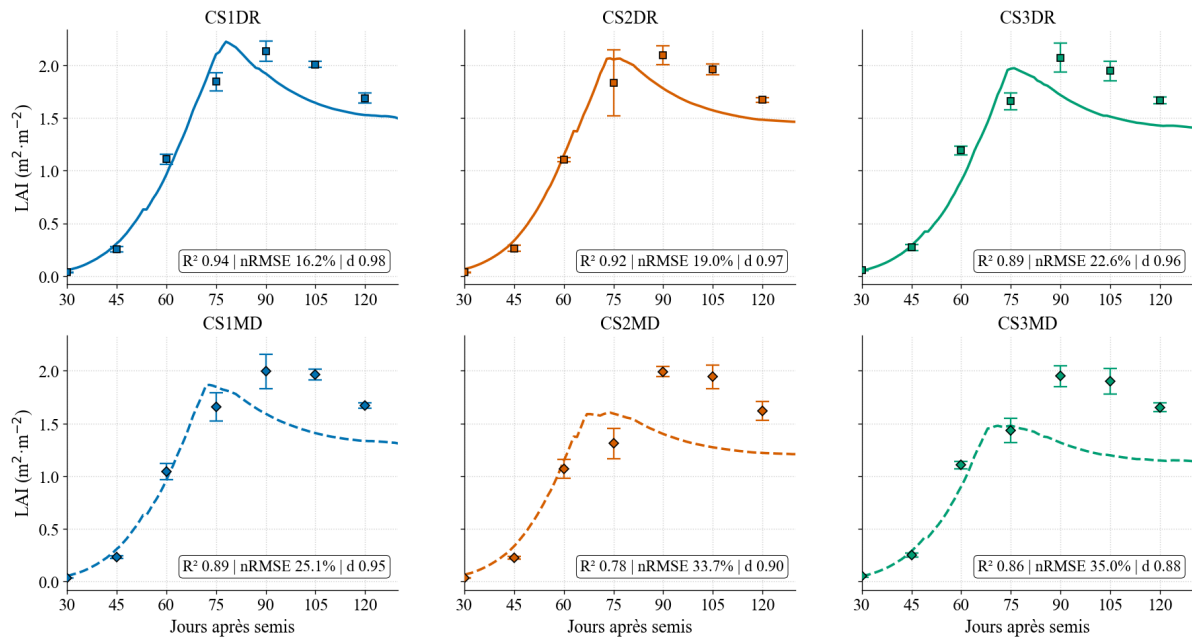


Figure 5.24 – Évolution du LAI (cm^2/cm^2) par traitement (2024) et indices statistiques nRMSE, R^2 et d. Traits pleins = valeurs simulées en DR et traits pointillés = valeurs simulées en MD. Les mesures sont représentées avec leur écart-type (σ).

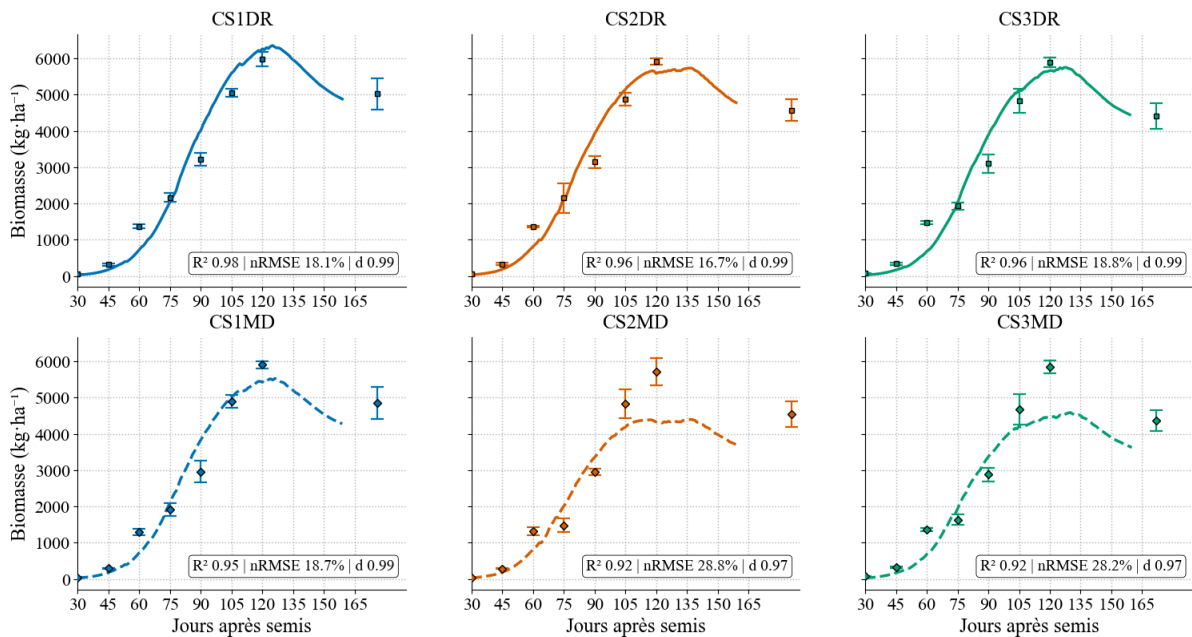


Figure 5.25 – Évolution de la biomasse aérienne (kg/ha) par traitement (2024) et indices statistiques nRMSE, R^2 et d. Traits pleins = valeurs simulées en DR et traits pointillés = valeurs simulées en MD. Les mesures sont représentées avec leur écart-type (σ).

L'analyse de l'évolution du LAI et de la biomasse en 2024 met en évidence des tendances similaires à celles observées lors de la calibration. Pour le LAI (Fig. 5.24), le modèle reproduit fidèlement la phase de croissance initiale jusqu'à 75 JAS. Cependant, la tendance à la sous-estimation en fin de cycle, déjà observée en 2022, se confirme et s'intensifie, particulièrement pour les traitements en MD. De plus, la validation révèle une nouvelle tendance non identifiée lors de la calibration : la qualité de la prédiction diminue non seulement avec la réduction de la dose d'engrais (de DR à MD, comme déjà observé en 2022 – Fig. 5.15), mais aussi avec le caractère conservatif du système

de culture (contrairement aux observations de 2023 – Fig. 5.16).

Concernant la biomasse (Fig. 5.25), la concordance globale reste très bonne ($R^2 \geq 0,92$; $d \geq 0,97$). Néanmoins, le modèle éprouve des difficultés à représenter certaines phases du cycle. Une sous-estimation systématique apparaît autour de 60 JAS, et la sous-estimation en fin de cycle, surtout pour les systèmes S2 et S3 en MD, est bien plus marquée qu’en calibration. Ce constat est cohérent avec des nRMSE élevés (jusqu’à ≈ 30 % pour S3-MD) et confirme que le modèle peine à reproduire les interactions entre pratiques conservatrices et fertilisation microdose. Enfin, les dates de récolte étant trop tardives, l’écart final entre mesures (dernier point) et simulations demeure difficile à interpréter.

Chapitre 6

Discussion et perspectives

Le premier objectif de cette étude était de répondre à la question suivante : « *Quels sont les effets d'une transition vers des pratiques culturales de conservation sur la qualité du sol et les rendements cotonniers au Bénin ?* ».

Pour ce faire, trois systèmes de culture, du plus conservatif au moins conservatif (S3, S2, S1 ; voir tableau 4.2), ont été comparés quant à leurs effets sur les propriétés chimiques, physiques et hydrodynamiques du sol, ainsi que sur la croissance et les performances agronomiques du coton (rendement (grain + fibre), biomasse aérienne finale). Parallèlement, l'effet de la fertilisation microdose a spécifiquement été étudié sur les performances agronomiques de la culture.

6.1 Contraste entre la réponse du sol et celle de la culture

Les résultats montrent un contraste entre la réponse du sol et celle de la culture aux systèmes étudiés. Alors que les performances agronomiques du coton ont été significativement affectées par les traitements, aucune variation significative des propriétés physiques et chimiques du sol (carbone total, azote total, le pH_{H20} , la densité apparente ou la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat})) n'a été détectée au terme des sept années de l'essai.

6.1.1 Inertie des propriétés du sol

L'absence de résultats contraste avec les effets rapportés dans la littérature de l'adoption de pratiques de conservation (tableau 2.1), tels qu'une augmentation de l'humidité du sol en surface (HANDISO et al., 2023 ; KARLEN et al., 1994) lors de l'application du semis direct, de la conductivité hydraulique (JABRO et al., 2009 ; LAWAL & LAWAL, 2017) ou du carbone organique en surface (ASSEFA et al., 2020 ; ZIBILSKA et al., 2002).

De plus, aucune différence significative sur les propriétés du sol n'a été relevée entre les lignes de semis (SL) et les interlignes (EL). Or, après sept années de pratiques de conservation, des différences auraient pu s'observer, comme une densité apparente et une humidité du sol plus élevées dans les interlignes non travaillés, tel que démontré par JASKULSKA et al. (2020) après huit ans d'adoption du strip-till.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette inertie de la réponse des paramètres étudiés :

Durée de transition de pratique insuffisante. Les bénéfices de l'agriculture de conservation sur les propriétés du sol se manifestent généralement à long terme. Par exemple, NAAB et al. (2017) n'a pas observé de différence de teneur en carbone organique ou azote total après quatre ans entre le semis direct et labour conventionnel. D'autres études signalent qu'il faut parfois dix ans (CHIKOWO, 2011), voire plus de 15 ans (COOPER et al., 2021) pour voir des améliorations notables lors de la réduction du labour par rapport au système conventionnel. Les sept années de l'essai semblent donc insuffisantes pour que les effets des traitements se manifestent.

Profondeur de l'échantillonnage. Les échantillons chimiques, prélevés à 0-20 cm de profondeur, intègrent une couche de sol trop épaisse pour saisir les changements de teneur en C_{org} , qui se produisent principalement dans les premiers centimètres du sol (0-5 ou 0-10 cm) (OLSON & AL-KAISI, 2015). Il est donc logique que l'échantillonnage à 0-20 cm n'ait pas mis en évidence de différences significatives. En revanche, la conductivité hydraulique à saturation et la densité apparente ont été mesurées à 0-5 cm, ce qui aurait pu fournir un aperçu plus précis des effets des pratiques dans la couche superficielle du sol, cependant aucune différence significative n'a été observée.

Conditions locales. Le gradient de carbone au sein de l'essai (Fig. 5.1) apparaît comme le principal facteur expliquant la variabilité des propriétés du sol, au point de « masquer » les effets spécifiques des systèmes de culture. Dans le système le plus conservatif (S3), les médianes des teneurs de carbone et azote total sont plus élevées que dans les deux autres systèmes (S1 et S2), sans différence statistiquement significative (Annexe V). Cette tendance pourrait refléter un effet réel du système, mais elle s'explique probablement aussi par la distribution des parcelles : deux tiers de celles du S3 se situent dans des zones naturellement riches en carbone (parcelles 14, 15 et 18 - Fig. 5.1). Il reste donc difficile de distinguer par exemple la part d'augmentation du C_{tot} et du N_{tot} imputable au système de culture lui-même de celle due à la teneur naturellement élevée en carbone des parcelles du S3, fortement corrélée à ces deux propriétés (Annexe Q).

Cette difficulté d'isoler l'effet du traitement est renforcée par les conditions pédoclimatiques locales, peu favorables à la stabilisation du carbone organique. De fait, le climat tropical humide de la zone d'étude stimule l'activité microbienne et accélère la minéralisation des résidus (REICHENBACH et al., 2021). Dans ces conditions, le temps de résidence réduit de la matière organique fraîche limite sa transformation en carbone stable (VAN KEULEN, 2001). Les lxisols altérés, pauvres en argiles 2 :1 (WEST & DUMBLETON, 1970), offrent en outre peu de surfaces d'adsorption, ce qui réduit la protection chimique du carbone (REICHENBACH et al., 2021 ; WATTEL- KOEKKOEK et al., 2003).

Ainsi, seule une faible part des résidus s'intègre au stock de carbone stable, la majorité alimentant le carbone labile, à renouvellement rapide au détriment du pool de carbone récalcitrant (CASTRO et al., 2015). La fraction récalcitrante, plus stable et persistante, contribue à améliorer durablement les propriétés physiques du sol (SANCHEZ, 2019). Les conditions pédoclimatiques limitent donc la stabilisation du carbone, ce qui pourrait expliquer que, malgré des apports élevés en résidus dans les systèmes S2 et S3 (via les associations culturales), aucune amélioration nette des propriétés du sol ne soit observée dans ces systèmes.

À ces contraintes s'ajoutent des facteurs biologiques, comme la présence de termites. Celles-ci dégradent activement les résidus de culture en saison sèche (NAAB et al., 2017), réduisant la biomasse disponible pour enrichir le sol et limitant ainsi les effets bénéfiques attendus des associations culturales en S2 et S3 (tableau 2.1).

6.1.2 Effets immédiats des traitements sur les performances agronomiques

À l'inverse du sol, la culture a réagi de manière significative au système. Le système conventionnel (S1) a systématiquement produit des rendements (grain + fibre) et une biomasse aérienne supérieurs aux systèmes de conservation (S2 et S3), qui n'ont pas montré de différence entre eux. Cette pénalité

de rendement pendant la période de transition vers des pratiques de conservation est largement documentée dans la littérature (NYAGUMBO et al., 2017; TERAVEST et al., 2015; YEMADJE et al., 2022). Une méta-analyse de PITTELKOW et al. (2015) sur plus de 600 études confirme cette tendance globale à la réduction des rendements en phase de transition vers des pratiques plus conservatives. Trois hypothèses peuvent expliquer ces observations :

1. **Bénéfices immédiats du labour** : le labour conventionnel du S1, bien que potentiellement dégradant à long terme (AL-KAISI & KWAW-MENSAH, 2020; DEJONG, 2018; WEIDHUNER et al., 2020), offre des avantages immédiats : en favorisant des conditions oxydatives il accélère la libération des nutriments et leur assimilation par le coton (YEMADJE et al., 2022). Il permet aussi d'aérer le sol (YEMADJE et al., 2022), ce qui est d'autant plus important pour favoriser la pénétration du système racinaire pivotant du coton qui requiert un sol meuble (NILES, 1958).
2. **Effets des résidus (S2 et S3)** : l'apport de résidus de culture dans les systèmes de conservation (S2 et S3), bien que potentiellement bénéfique à long terme, a pu contribuer à la baisse de rendement observée en phase de transition. Premièrement, la quantité importante de résidus dans ces systèmes peut avoir induit une « faim d'azote ». En 2022, la litière du système S3 présentait un rapport C :N estimé de 21. Un tel rapport (>20), combiné à un volume élevé de résidus dans les systèmes S2 et S3, favorise l'immobilisation temporaire de l'azote minéral par les micro-organismes chargés de décomposer cette grande quantité de matière organique riche en carbone (GENTILE et al., 2011). Cette compétition microbienne réduit la disponibilité immédiate de l'azote pour le coton planté après une culture générant beaucoup de résidus, ce qui peut pénaliser la productivité en S2 et S3 par rapport au S1 qui est caractérisé par une quantité de résidus moindre. Deuxièmement, la biomasse apportée semble insuffisante pour améliorer notablement les propriétés du sol à court terme. La quantité de carbone présente dans les résidus restitués au sol ne représentait que 3,6%¹ du stock initial de carbone organique du sol (0-25 cm), un ratio a priori trop faible pour induire un effet mesurable sur la teneur en C_{org} du sol, et a fortiori sur la productivité de la culture. Les S2 et S3 auraient ainsi cumulé les inconvénients d'un apport de résidus (immobilisation d'azote) avec une quantité a priori trop faible pour générer un effet positif sur la productivité, combinée à une vitesse de décomposition élevée (voir supra), limitant les effets bénéfiques attendus des associations. Ces effets incluent une amélioration de la structure du sol (OGUNWOLE et al., 2010), enrichissement en carbone et en azote (ANTOINE et al., 2019; KIMOU et al., 2023) ou encore meilleure rétention en eau dont la culture de coton aurait pu bénéficier (COULIBALY et al., 2024).
3. **Une phénologie plus favorable** : le S1 a montré une floraison significativement plus précoce et une durée anthèse-capsule significativement plus longue (Fig. 5.7). Cette période de développement prolongée pour les organes reproducteurs est favorable pour le rendement

1. En 2022, la litière totale du S3 a été estimée à 7500 kg/ha. Cette litière comprend 6000 kg/ha (valeur estimée cohérente tableau A7 de SWANEPOEL et al. (2018)) de résidus en surface (2 400 kg C/ha) et 1500 kg/ha de biomasse racinaire (600 kg C/ha). La litière totale (racines + résidus de surface) = 3 000 kg C/ha en considérant une teneur moyenne en carbone de 40% (valeur utilisée dans DSSAT) Le stock de carbone organique dans la couche 0–25 cm a été calculé selon : $\text{Stock C (kg/ha)} = C_{org} \times 10\,000 \times \text{épaisseur (m)} \times \text{DA (kg/m}^3\text{)}$, où C_{org} est exprimé en kg C/kg sol. En considérant $C_{org} = 0,0045$, $\text{DA} = 1\,490 \text{ kg/m}^3$ et $\text{épaisseur} = 0,25 \text{ m}$, le stock est estimé à $\sim 16\,800 \text{ kg C/ha}$. L'apport de C stabilisé issu de la litière totale (coefficient d'humification de 20%) représente ainsi environ 600 kg C/ha, soit 3,6% du stock de la couche 0–25 cm.

en grain et fibre car c'est durant cette fenêtre phénologique que s'intensifie l'allocation des assimilats des tissus végétatifs vers les organes reproducteurs (PETTIGREW & GERIK, 2007).

6.2 Fertilisation microdose : une croissance ralentie sans pénaliser les rendements

Un résultat important de cette étude est que la fertilisation microdose, bien qu'ayant induit une croissance plus lente de la biomasse aérienne par rapport à la dose recommandée, n'a entraîné aucune réduction significative des rendements (grain + fibre). Ce constat rejoint plusieurs travaux qui rapportent des rendements équivalents entre MD et dose complète, que ce soit sur le sorgho (OUEDRAOGO et al., 2022) ou le maïs (TOVIHOUDJI, AKPONIKPÈ et al., 2019).

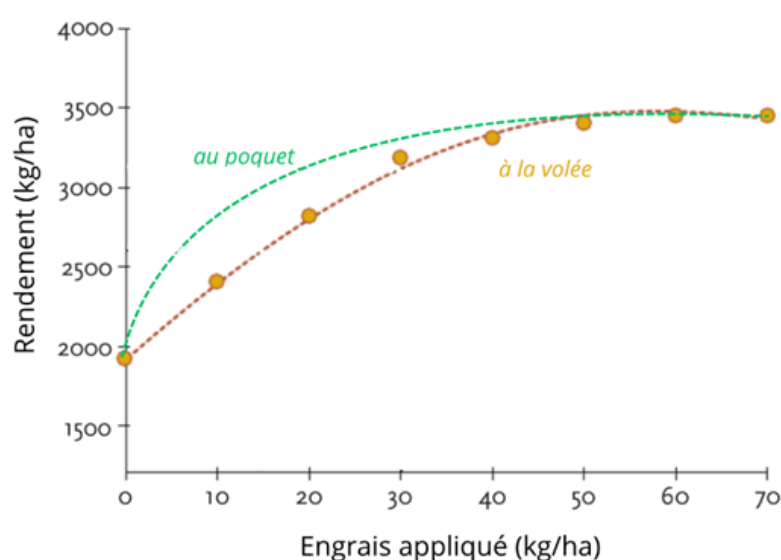


Figure 6.1 – Réponse typique du rendement à la quantité d'engrais appliquée (à la volée vs au poquet). Modifié d'après ALLEY et VANLAUWE (2009).

Cette absence de pénalité de rendement peut s'expliquer par l'allure logarithmique de la courbe de réponse des cultures aux engrais (Fig. 6.1) et l'efficacité plus importante de l'engrais lors de l'application localisée (OKEBALAMA et al., 2016; TOVIHOUDJI et al., 2017). Ainsi, en plaçant l'engrais au poquet, la fertilisation microdose permet d'atteindre le plateau de rendement avec une dose réduite.

Ce gain d'efficacité en MD s'explique principalement par un développement racinaire optimisé : la concentration locale de nutriments stimule une croissance en profondeur, améliorant l'absorption de l'eau et des nutriments tout en limitant les pertes par lessivage (MUEHLIG-VERSEN et al., 2003; TABO et al., 2011). Ce système racinaire plus robuste confère par conséquent une résilience accrue aux stress, notamment hydriques. (IBRAHIM et al., 2015; OUEDRAOGO et al., 2022), facteur critique durant le remplissage des grains du coton (KO et al., 2009).

Les implications de ce résultat sont particulièrement encourageantes pour les producteurs de coton. Il suggère qu'une réduction de 50% des intrants azotés est envisageable sans pénaliser le rendement mais requiert tout de même plus de main-d'œuvre. La fertilisation microdose constitue donc une perspective intéressante dans un contexte de forte dépendance à des intrants coûteux au Bénin

(ALIDOU & NIEHOF, 2020). De plus, une fertilisation réduite contribue à limiter les risques sanitaires et environnementaux liés à la fertilisation (AIHOUNTON, EDJA & YABI, 2022 ; WESTERBERG et al., 2017).

6.3 Performance du modèle DSSAT : forces et limites

Le deuxième objectif de ce mémoire visait à déterminer si le modèle DSSAT pouvait simuler fidèlement la croissance et les performances agronomiques du cotonnier selon les trois systèmes étudiés et la fertilisation MD.

6.3.1 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité a confirmé que DSSAT réagit de façon cohérente à la majorité des leviers qui différencient les systèmes testés : la biomasse aérienne et le rendement (grain + fibre) augmentent de manière quasi linéaire avec la quantité, la teneur en azote des résidus et leur niveau d'incorporation.

En revanche, plusieurs limites ressortent de ces analyses :

- **Profondeur** : le modèle ne réagit pas à la profondeur, que ce soit pour l'application de l'engrais, le travail du sol ou l'incorporation des résidus de culture. Cela empêche de simuler les bénéfices liés à l'application en profondeur de l'engrais (voir section 6.2) ou de différencier l'impact de la profondeur du travail du sol entre traitements (entre S1 et S2, S3).
- **Cas du Phosphore** : les variables liées au phosphore n'ont généré aucune réponse du modèle, en négligeant le phosphore (P), le modèle pourrait sous-estimer les bénéfices du P contenu dans les résidus pour la productivité des cultures dans les S2 et S3.
- **Gestion du gradient en carbone** : l'analyse des résultats a montré que le modèle est particulièrement sensible à la teneur en carbone organique du profil de sol (SLOC). L'utilisation d'un seul profil de sol "moyen" apparaît donc simpliste dans ce contexte, vu le fort gradient de teneur en carbone du sol sur le site expérimental. Une alternative plus fidèle au site d'étude aurait été de construire plusieurs profils DSSAT correspondant à différentes classes de teneurs en carbone organique du sol (par exemple : 0,4% ; 0,4–0,7% ; 0,7–1,2% ; > 1,2%) et de réaliser les simulations séparément pour chaque groupe homogène de parcelles, avant de regrouper les résultats par traitement.

6.3.2 Calibration et validation du modèle : des performances globalement satisfaisantes

La calibration (2022-2023) du modèle a montré que le modèle pouvait simuler la dynamique de croissance avec une bonne précision, surtout en phase végétative (jusqu'à 75 JAS). La performance globale pour la prédiction du rendement (grain + fibre) et de la biomasse aérienne finale a été jugée bonne, avec des nRMSE inférieurs à 20% . Ces valeurs sont meilleures que celles obtenues à l'issue des diverses études employant le modèle Cotton-CROPGRO en Afrique subsaharienne (performances rapportées à le tableau 2.3). Malgré ces bonnes performances globales, la modélisation du LAI montre une chute de qualité après 75 JAS. Deux hypothèses peuvent expliquer ce phénomène :

1. **Hétérogénéité et Échantillonnage** : autour de la floraison (75 JAS), la compétition

devient plus importante pour l'eau (GIBB et al., 2012 ; KO et al., 2009) et les nutriments (MULLINS & BURMESTER, 2010). Ce phénomène peut augmenter la variabilité de la biomasse entre les plants. L'échantillonnage restreint (voir section 4.3.1), passé cette date, devient alors moins représentatif. De fait, une plus grande variabilité intra-parcelle nécessite un échantillon plus large pour être correctement capturée (LÚCIO et al., 2012).

2. **Biais de Mesure du LAI** : la courbure des feuilles matures a provoqué une sous-estimation systématique de la surface foliaire par l'analyse d'images (Annexe F), un phénomène également rapporté dans la littérature (FANG et al., 2014). Ce biais a directement affecté la qualité des régressions *surface foliaire – biomasse aérienne* utilisées par le modèle qui chute après 75 JAS (toutes années confondues) (Annexe G).

Face à ces limites, deux améliorations méthodologiques peuvent être envisagées. D'une part, élargir la taille de l'échantillonnage pour les mesures de biomasse aérienne après 75 JAS, afin de mieux capturer la variabilité accrue entre plants. D'autre part, corriger le biais lié à la courbure des feuilles matures (Annexe F), par exemple en aplatissant les feuilles lors de l'analyse d'images, afin de limiter l'effet de la sénescence sur l'estimation de la surface foliaire.

Enfin, il faut noter que la régression utilisée par le modèle, reliant biomasse aérienne totale et surface foliaire, perd en précision au cours du cycle : à mesure que les capsules et les parties ligneuses représentent une part croissante de la biomasse, la corrélation avec la surface foliaire se dégrade. Une mesure directe de la biomasse foliaire seule aurait permis d'obtenir une relation plus robuste, bien que plus fastidieuse.

Concernant la phénologie, la date d'anthèse a été prédite avec une grande précision (écart de 1 à 2 jours, toutes années et systèmes confondus), contrastant avec les prédictions moins fiables pour la maturité physiologique. Cet écart peut être attribué à la nature de l'observation (l'anthèse est un événement discret et visible, tandis que la maturité est un processus plus graduel et donc difficile à dater précisément (HUTMACHER et al., 2003 ; OOSTERHUIS & COTHEREN, 2012), ou à des défauts de calibration des coefficients génétiques.

Pour la calibration génétique, la méthode GLUE s'est avérée la plus performante. La supériorité de cette méthode de calibration génétique est probablement due à sa capacité à explorer un large espace de paramètres génétique ce qui lui permet d'éviter les optima locaux, contrairement aux algorithmes plus simples comme GENCALC (BERTON FERREIRA et al., 2024b), bien que cela demande un temps de calcul plus long.

La phase de validation (2024) a montré un résultat paradoxal : le nRMSE s'est amélioré par rapport à la calibration (11 %), mais l'indice d'accord de Willmott (d) a diminué. Cela peut indiquer que si le modèle est devenu plus précis pour prédire la moyenne des rendements, il a perdu en capacité à discriminer les différences relatives entre les traitements. Conformément à la littérature, le nRMSE mesure l'erreur moyenne, tandis que l'indice d évalue la capacité du modèle à reproduire la variabilité et les motifs observés (LEGATES & MCCABE, 1999).

6.3.3 Faiblesses et biais systématiques du modèle

- **Sous-estimation des bénéfices de la fertilisation microdose** : le modèle DSSAT a systématiquement sous-estimé les rendements et la biomasse en MD. Cette limite est liée à la

structure du modèle qui applique les nutriments de façon homogène dans une couche de sol (JONES et al., 2003), ce qui empêche de reproduire l'effet localisé de la fertilisation microdose, où la forte concentration d'engrais à proximité des racines maximise l'efficacité d'absorption, surtout en début de cycle (voir section 6.2). Le modèle sous-estime ainsi l'avantage de la fertilisation microdose comme déjà observé par TOVIHOUDJI, AKPONIKPÈ et al. (2019).

- **Modélisation du bilan hydrique** : les stocks d'eau simulés étaient globalement décorrélés des mesures terrain. Cela peut s'expliquer à la fois par les limites de l'instrumentation et par les approximations du modèle. Le capteur résistif utilisé est sensible aux conditions de terrain (salinité, température > 23 °C, corrosion), ce qui peut altérer sa précision (TEIXEIRA & CORREIA DOS SANTOS, 2021). De plus, la méthode des trapèzes employée pour estimer les stocks accroît l'incertitude sur les données. Côté simulation, le module de bilan hydrique de DSSAT, basé sur la "*bucket method*" (Fig. 2.11), donne de bons résultats lorsque les paramètres de rétention (DUL, LL) et la distribution racinaire sont correctement renseignés (BOOTE et al., 2015), or dans ce cas, ces paramètres critiques ont été estimés via le modèle (Annexe J). L'approche de DSSAT pour le bilan hydrique reste moins précise que celle de modèles comme HYDRUS-1D, qui représentent l'écoulement capillaire bidirectionnel et l'humidité du profil avec plus de finesse (SCANLON et al., 2002; SHELIA et al., 2018). Dès lors, un couplage DSSAT–HYDRUS-1D permettrait d'intégrer des flux d'eau simulés plus réalistes mais au détriment d'un temps de calcul beaucoup plus long.

6.4 Perspectives

Sur le terrain

Au-delà des paramètres chimiques, physiques et hydrodynamiques analysés dans ce travail, il serait pertinent d'intégrer des indicateurs potentiellement plus réactifs dès les 1 à 3 premières années des essais. Par exemple, intégrer à l'étude le *QuantSlakeTest* qui mesure la stabilité structurale du sol par pesée d'échantillons non perturbés immergés dans l'eau (VANWINDEKENS & HARDY, 2023). Cette méthode permettrait de détecter plus tôt une amélioration de la structure (0–10 cm) d'un système conservatif par rapport à un système conventionnel. En complément, la dynamique de décomposition des résidus pourrait être évaluée par la méthode du *LitterBag* (WIDER & LANG, 1982), qui suit la perte de masse de résidus placés dans un sac en filet métallique et laissés sur le champ (CORNWELL & WEEDON, 2014). L'association de ces deux mesures fournirait à la fois une évaluation de l'amélioration physique du sol et un suivi des processus biologiques susceptibles de l'influencer et permettraient ainsi d'apprécier plus rapidement les effets des traitements.

Pour la modélisation

Une fois le modèle calibré pour mieux représenter la fertilisation microdose et intégrer l'hétérogénéité spatiale du carbone du sol, il pourrait servir d'outil d'aide à la décision pour évaluer différents scénarios.

Il serait par exemple pertinent de tester différentes trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre (RCP) et d'y intégrer des événements climatiques critiques (sécheresses de 10 à 20 jours à la floraison,

vagues de chaleur, faux départ des pluies) afin d'évaluer la réponse des traitements conservatifs et en fertilisation microdose au changement climatique.

Des travaux antérieurs sur le coton ont d'ailleurs utilisés cette approche : AHMAD et al. (2023) ont intégré des scénarios RCP dans DSSAT et montré qu'en RCP 8.5, le rendement du coton pourrait chuter de 39,2% d'ici le milieu du siècle. De même, POUREBRAHIMI FOUMANI et al. (2025) ont simulé, sur 2025-2057 et avec plusieurs modèles climatiques, l'effet combiné de deux systèmes de travail du sol et de différentes doses d'azote. Le non-labour surpassait systématiquement le labour, surtout en RCP 8.5, soulignant son intérêt face au changement climatique. Ces projections pourraient être réalisées à partir des données CMIP5 (LOPEZ, 2016), converties pour DSSAT via MarkSim® GCM. Les sorties visées incluraient des indicateurs intéressants pour les producteurs (par exemple, la probabilité que le rendement passe sous un seuil critique ou quantité de résidus nécessaire pour réduire le risque de perte à l'horizon 2100 selon un scénario donné).

Chapitre 7

Conclusion

L'agriculture en Afrique de l'Ouest, pilier socio-économique essentiel, doit faire face à de nombreux défis : dégradation continue des terres, forte dépendance aux intrants et vulnérabilité croissante aux aléas climatiques. Dans ce contexte, l'agriculture de conservation (AC) apparaît comme une voie intéressante vers une intensification plus durable. Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective en analysant la mise en place de pratiques de conservation au sein de la filière cotonnière béninoise, à travers une double approche expérimentale et de modélisation de la culture avec le logiciel DSSAT.

Un dispositif expérimental de longue durée (sept ans) a permis de comparer trois systèmes de culture illustrant différents niveaux d'intensité de conservation : un système témoin en labour conventionnel et rotation biennale (coton/maïs) (S1), un système intermédiaire en strip-till avec cultures associées, également en rotation biennale (coton/maïs+niébé) (S2), et un système en semis direct intégrant davantage d'associations et en rotation triennale (coton/maïs+*stylosanthes*+*crotalaria*/sorgho) (S3). Dans chacun de ces systèmes, l'effet de la fertilisation localisée au poquet — en microdose (MD) et en dose recommandée (DR) — a été testée. Cette pratique, souvent considérée comme un quatrième principe implicite de l'AC, vise à améliorer l'efficacité d'utilisation des nutriments en limitant les pertes et en ciblant directement le système racinaire.

Les résultats révèlent une inertie marquée des propriétés physiques, chimiques et hydrodynamiques du sol, traduisant un horizon temporel encore trop court pour remarquer des améliorations significatives de la qualité du sol. Cette stabilité s'explique également par l'hétérogénéité initiale du carbone organique sur le site d'étude, masquant les effets propres aux traitements et par des conditions pédoclimatiques favorisant la minéralisation rapide de la matière organique apportée dans le S2 et le S3 par des volumes importants de résidus de culture. À l'échelle de la culture, les contrastes sont plus immédiats : le système conventionnel (S1) a procuré les rendements les plus élevés, reflet des avantages initiaux du travail du sol en labour conventionnel, tandis que les systèmes conservatifs (S2 et S3) semblent pénalisés à court terme, possiblement en raison d'une immobilisation transitoire de l'azote liée à l'apport important de résidus. Toutefois, l'efficacité de la fertilisation microdose — qui a permis de maintenir des rendements équivalents à la dose recommandée tout en réduisant de moitié les apports — souligne le potentiel de la fertilisation localisée, malgré la charge de travail supplémentaire qu'elle implique.

La modélisation conduite avec le modèle DSSAT/CROPGRO-Cotton complète le volet expérimental de cette étude en offrant une capacité satisfaisante à reproduire les trajectoires de croissance, les rendements et la biomasse aérienne finale du cotonnier. Elle met néanmoins en évidence certaines limites structurelles, en particulier l'incapacité actuelle du modèle à représenter les effets localisés de la fertilisation microdose ou à simuler correctement la dynamique de croissance après la phase végétative (au-delà de 75 jours après semis).

En définitive, ce travail illustre le compromis temporel inhérent à la transition vers l'agriculture de conservation : une baisse de rendement à court terme contrebalancée par des bénéfices attendus pour la santé des sols et la résilience à plus long terme. La fertilisation localisée en microdose, bien qu'exigeante en main-d'œuvre, se positionne comme une innovation intéressante pour une

gestion raisonnée des intrants. L'une des grandes perspectives à l'issue de ce travail est d'améliorer le modèle DSSAT, afin d'y intégrer plus finement la fertilisation en microdose ainsi que le gradient de carbone organique propre au site d'étude. À terme, un tel modèle adapté pourrait être mobilisé pour élaborer des scénarios de production agricole et de gestion des systèmes cultureux face aux incertitudes climatiques dans un contexte ouest-africain.

Chapitre 8

Annexes

Annexe A Profils pédologiques

Table A.1 – Données morpho-physico-chimiques des horizons des profils pris au niveau des parcelles P6, P16 et P21

Parcelle	Profondeur (cm)	Ntot (%)	Corg (%)	C/N	pH H ₂ O	pH KCl	MO (%)
16	0–12	0.067	0.84	12.02	6.00	5.75	1.35
16	12–22	0.047	0.56	11.96	6.19	5.73	1.00
16	22–46	0.03	0.30	9.46	6.17	5.82	0.56
16	46–100	0.03	0.25	7.89	6.15	5.85	0.49
21	0–17	0.07	0.87	12.87	6.41	5.56	1.56
21	17–27	0.06	0.90	14.65	6.42	5.35	1.6
21	27–50	0.04	0.47	11.85	6.12	5.35	0.850
21	50–100	0.03	0.30	8.70	6.23	5.56	0.71

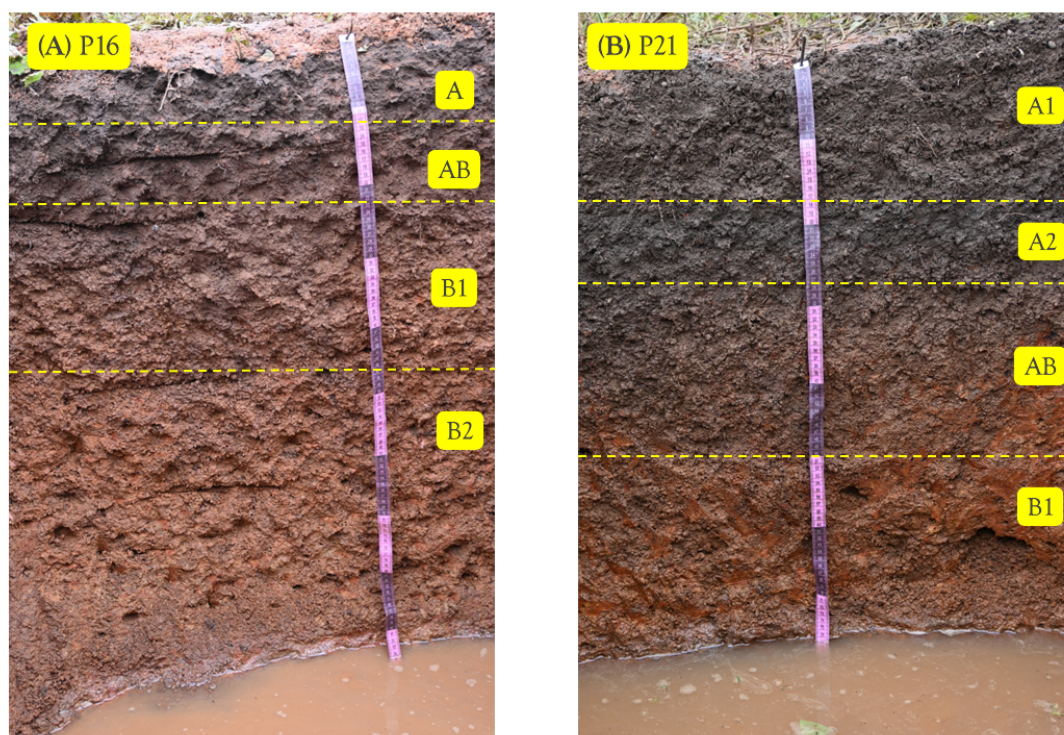


Figure A.1 – Photos des profils pris au niveau de la parcelle 16 (A) et 21 (B) avec la délimitation des différents horizons. L'eau visible à partir de 95 cm de profondeur environ, correspond à la remontée de la nappe phréatique en saison des pluies.

Annexe B Successions culturales (2017-2024)

Table A.2 – Historique des successions culturales (2017–2024) par parcelle.

Parcelle	Système	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1	2	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct
2	1	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct
3	3	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj
4	3	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct
5	2	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp
6	1	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma
7	3	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r
8	2	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp
9	3	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj
10	1	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma
11	2	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct
12	3	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj
13	1	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct
14	3	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct
15	3	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct
16	1	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma
17	2	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma + Cp	Ct	Ma + Cp
18	3	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj
19	1	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct
20	2	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct
21	3	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Cr _r	Sg+Soy+Cj

Abréviations : Ct = Coton, Ma = Maïs, Cp = Niébé, Sg = Sorgho, St = Stylosanthes, Soy = Soja, Cr_r = *Crotalaria retusa*, Cj = *Crotalaria juncea*.

Annexe C Photos illustrant les trois systèmes



Figure A.2 – Photo du S1 (coton) au niveau de la parcelle 2 (octobre 2024).



Figure A.3 – Photo du S2 (maïs + *niébé*) au niveau de la parcelle 8 (octobre 2024)



Figure A.4 – Photo du S3 (sorgho + *soja*) au niveau de la parcelle 12 (octobre 2024)

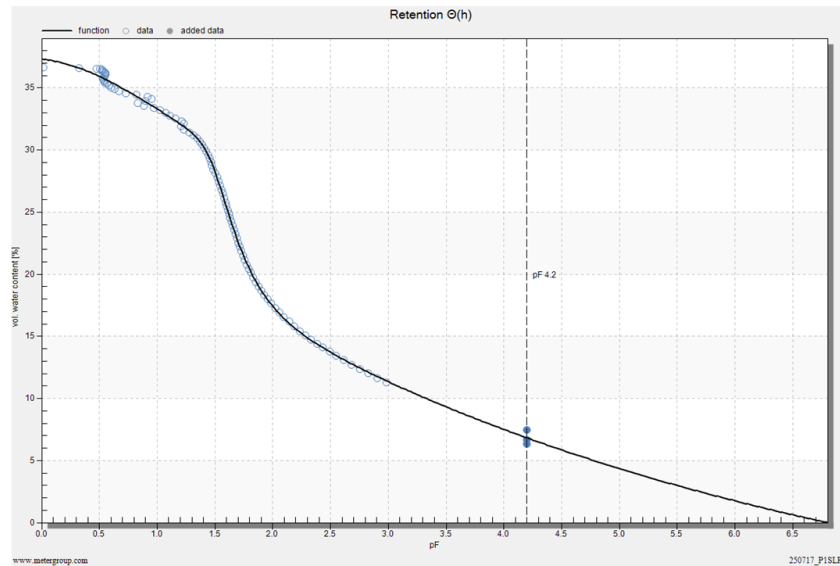


Figure A.6 – Graphe de l'interface du logiciel *LABROS Soil View Analysis (2025)* représentant la courbe de rétention ajustée pour un échantillon de la parcelle n°1 pris SL. La mesure à $pF = 4,2$ (/) est ajoutée et mesurée par les casseroles à haute pression.

Annexe D Hyprop

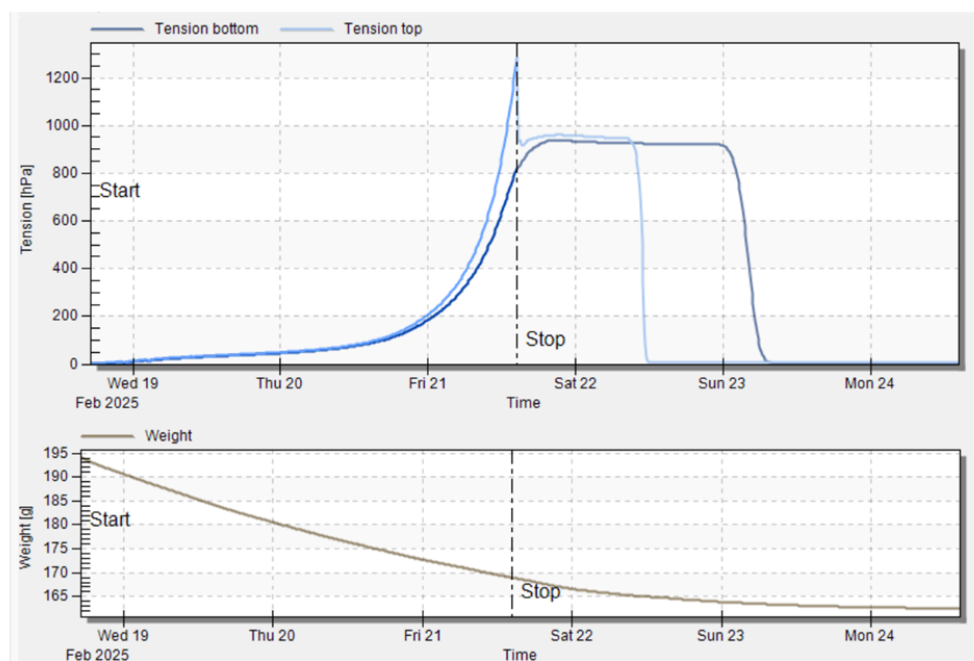


Figure A.5 – En haut : Graphe de l'interface du logiciel *LABROS Soil View Analysis (2025)* de la tension (hPa) mesurées au court du temps (18 -23 février 2025) pour le tensiomètre du haut et du bas. En bas : graphe de l'évolution de la masse de l'échantillon. Les deux graphes sont effectués à partir des mesures d'un échantillon pris sur les lignes de semis de la parcelle n°1.

Annexe E Construction de la courbe de rétention via Hyprop

Sur base de la figure A.7, on dispose des paramètres suivants :

HYPROP					Retention function parameters				
Soil hydraulic model selection					Parameter	Value	2.5%	97.5%	Unit
	original	PDI	bimodal	bimodal PDI	☒ alpha1	0.4551	0.2211	0.9365	1/cm
Brooks-Corey	☐				☒ n1	1.753	0.421	7.298	-
Fredlund-Xing	☐	☐		☐	☒ th_r	0.000*	0*	0.526	cm ³ /cm ³
Kosugi	☐	☐	☐	☐	☒ th_s	0.377	0.368	0.387	cm ³ /cm ³
van Genuchten m=1-1/n	☐	☐	☐	☐	☐ pF_dry	6.80			-
van Genuchten mnvar	☐	☐	☐	☒	☒ alpha2	0.0315	0.0297	0.0334	1/cm
Model: VGmnbi-PDI Model Code: 3211					☒ n2	6.068	4.854	7.585	-
Source: Iden and Dumer (2014), Peters (2014)					☒ w2	0.245	-0.333	0.824	-
Description: PDI-variant of the bimodal unconstrained van					☒ m1	0.048	-0.137	0.232	-
					☒ m2	0.300	0.209	0.390	-

Figure A.7 – Paramètres de la courbe bimodale PDI tels qu’affichés dans le logiciel *Labros SoilView-Analysis*, pour la P1, donnée SL

$$\begin{aligned}
 \theta_s &= 0.377 & (\text{cm}^3/\text{cm}^3) \\
 \theta_r &= 0 & (\text{cm}^3/\text{cm}^3) \\
 pF_{\text{dry}} &= 6.80 & (-) \\
 \alpha_1 &= 0.4551 & (\text{cm}^{-1}) \\
 \alpha_2 &= 0.0315 & (\text{cm}^{-1}) \\
 n_1 &= 1.753 & (-) \\
 n_2 &= 6.068 & (-) \\
 m_1 &= 0.048 & (-) \\
 m_2 &= 0.300 & (-) \\
 w_2 &= 0.245 & (-) \Rightarrow w_1 = 1 - w_2 = 0.755
 \end{aligned}$$

Les cinq étapes suivantes constituent une synthèse de la construction de la courbe de rétention dans le logiciel LABROS SoilView -Analysis. Les numéros des équations correspondent à ceux du manuel du logiciel ((METER GROUP, INC., 2022b), pages 62-66).

0.5.1 Étape 1 — Modèle PDI global

La PDI somme rétention capillaire et adsorptive

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) S^{\text{cap}} + \theta_r S^{\text{ad}} \quad (11)$$

- S^{cap} : saturation de la phase liquide dans les capillaires.
- S^{ad} : saturation de l’eau adsorbée (films – coin des pores).

0.5.2 Étape 2 — Mise à l’échelle PDI de la saturation capillaire

Pour imposer $\theta = 0$ à la « sécheresse four » (pF_{dry}), la saturation est normalisée

$$S^{\text{cap}}(h) = \frac{\Gamma(h) - \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}, \quad \Gamma_0 = \Gamma(h_0), \quad h_0 = 10^{pF_{\text{dry}}} \text{ cm} \quad (13)$$

0.5.3 Étape 3 — Fonction de base $\Gamma(h)$: van Genuchten non contraint

$$\Gamma_{\text{vGm}}(h) = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (16)$$

Les paires (α_i, n_i, m_i) décrivent chaque mode poral.

0.5.4 Étape 4 — Combinaison bimodale

$$\Gamma_{\text{bi}}(h) = \sum_{i=1}^2 w_i \Gamma_i(h), \quad w_1 + w_2 = 1 \quad (19)$$

Ici : $w_1 = 0.755$ et $w_2 = 0.245$. Chaque Γ_i est donné par (16) avec son propre α_i, n_i, m_i .

0.5.5 Étape 5 — Expression finale de $\theta(h)$

$$\theta(h) = \theta_s S^{\text{cap}}(h) = \theta_s \frac{\Gamma_{\text{bi}}(h) - \Gamma_0}{1 - \Gamma_0} \quad (\text{avec } \theta_s = 0.377)$$

En omettant Γ_0 (valeur $\ll 1$) et en injectant les paramètres numériques (Fig. A.7) :

$$\theta(h) = 0.377 \left[0.755 (1 + 0.4551 h)^{-1.753 m_1} + 0.245 (1 + 0.0315 h)^{-6.068 m_2} \right]$$

où $m_1 = 0.048$ et $m_2 = 0.300$.

Annexe F ImageJ



Figure A.8 — Illustration de la méthode de *ImageJ* pour établir la régression surface foliaire (cm^2/plant) - biomasse aérienne sèche (g/plant). Le cercle plein en haut à droite correspond à la pièce de monnaie de référence.



Figure A.9 – Illustration du problème de détermination de la surface foliaire via *ImageJ* à des stades phénologiques avancés à cause de l’arcure naturelle des feuilles sénescentes.

Annexe G Régression linéaire LAI -Biomasse

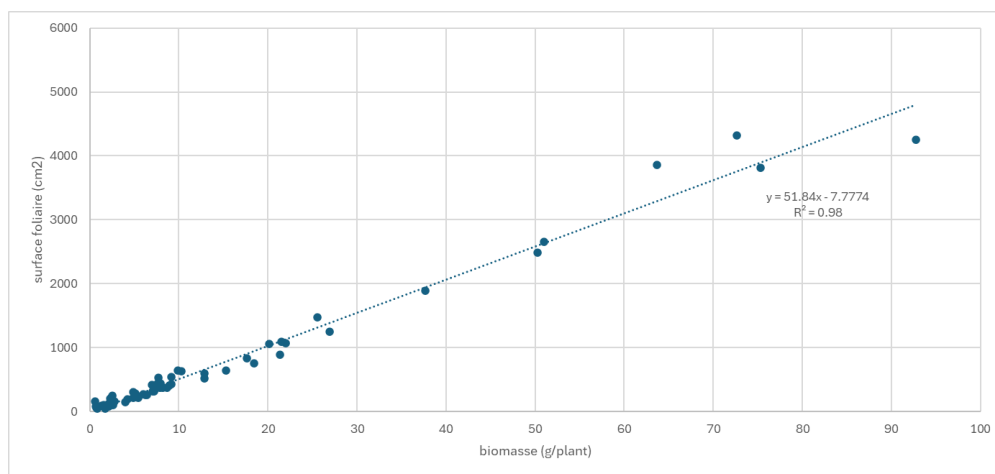


Figure A.10 – Régression (2022, 2023, 2024) biomasse aérienne sèche (g/plant) - surface foliaire (cm²/plant) : **30** -60 JAS. (20 points par année : MD et DR confondues)

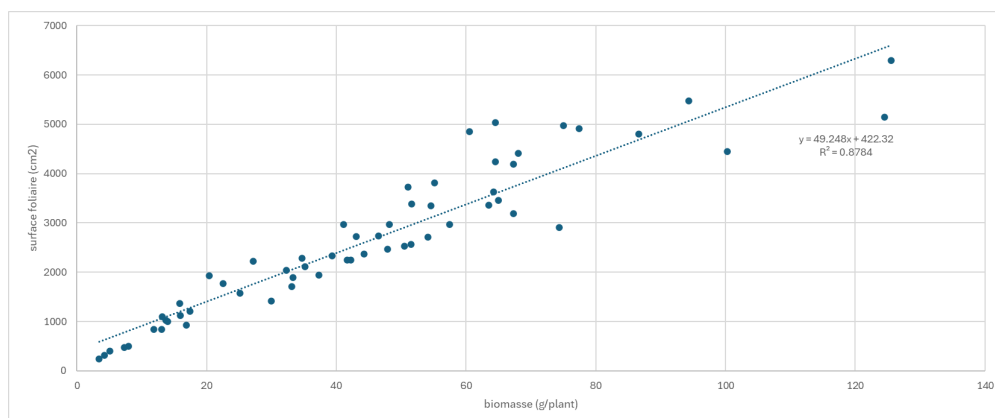


Figure A.11 – Régression (2022, 2023, 2024) biomasse aérienne sèche (g/plant) - surface foliaire (cm²/plant) : **75** JAS (20 points par année : MD et DR confondues)



Figure A.13 – Régressions séparées par année pour déterminer la surface foliaire (cm² /plant) à 105 JAS à partir de la biomasse aérienne sèche (g/plant) (20 points par année : MD et DR confondues). Axe Y = surface foliaire (cm²/plant)

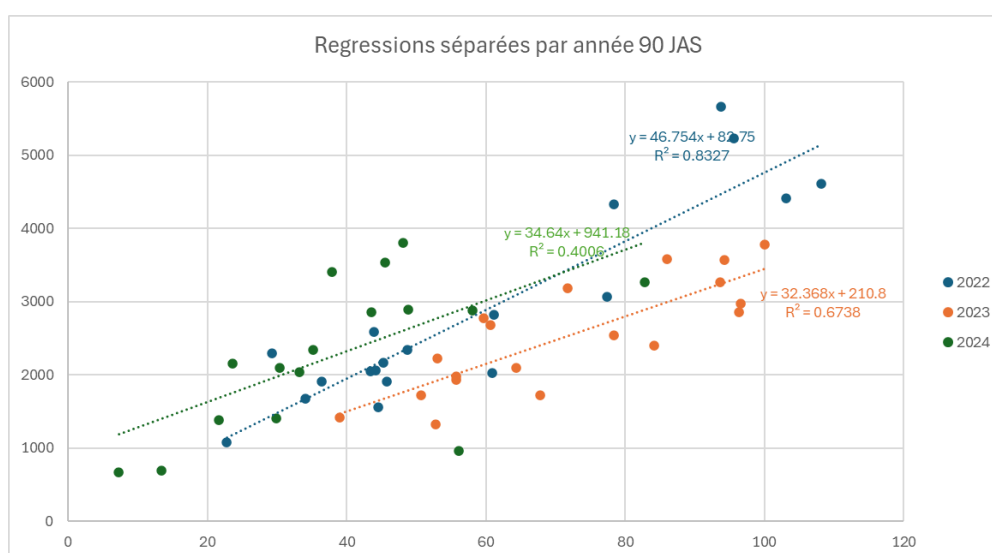


Figure A.12 – Régressions séparées par année pour déterminer la surface foliaire (cm² /plant) à 90 JAS à partir de la biomasse aérienne sèche (g/plant) (20 points par année : MD et DR confondues). Axe Y = surface foliaire (cm²/plant)



Figure A.14 – Régressions séparées par année pour déterminer la surface foliaire (cm² /plant) à 120 JAS à partir de la biomasse aérienne sèche (g/plant). Axe Y = surface foliaire (cm²/plant)

30-60 JAS $\Rightarrow$ modèles communs (2022–2024) (Figures A.10 et A.11) Le $\mathbf{x}$ = biomasse aérienne sèche du plant mesuré entre 30 et 105 JAS (g/plant) et $\mathbf{y}$ = surface foliaire (cm^2/plant).

$$y = 51.84x - 7.78 \quad (R^2 = 0,98) \quad (30\text{--}60 \text{ JAS}) \quad (1a)$$

$$y = 49.248x + 422.32 \quad (R^2 = 0,88) \quad (75 \text{ JAS}) \quad (1b)$$

2022

$$y = 46.754x + 82.750 \quad (R^2 = 0,83) \quad (90 \text{ JAS } 2022) \quad (1c)$$

$$y = 26.337x + 1029.100 \quad (R^2 = 0,59) \quad (105 \text{ JAS } 2022) \quad (1d)$$

$$y = 16.842x + 476.330 \quad (R^2 = 0,73) \quad (120 \text{ JAS } 2022) \quad (1e)$$

2023

$$y = 32.368x + 210.800 \quad (R^2 = 0,67) \quad (90 \text{ JAS } 2023) \quad (1f)$$

$$y = 17.207x + 423.980 \quad (R^2 = 0,46) \quad (105 \text{ JAS } 2023) \quad (1g)$$

$$y = 8.1379x + 578.360 \quad (R^2 = 0,32) \quad (120 \text{ JAS } 2023) \quad (1h)$$

2024

$$y = 34.640x + 941.180 \quad (R^2 = 0,40) \quad (90 \text{ JAS } 2024) \quad (1i)$$

$$y = 18.323x + 1345.500 \quad (R^2 = 0,72) \quad (105 \text{ JAS } 2024) \quad (1j)$$

$$y = 15.528x + 562.150 \quad (R^2 = 0,58) \quad (120 \text{ JAS } 2024) \quad (1k)$$

Annexe H Modèles statistiques

Table A.3 – Paramètres mesurés, structure des données et code R associé

Variables (Y)	Structure des données	Code R
(2) Chimie		
C _{org} (%), N (%), C/N (-), pH (-), CEC (cmol(+)/kg)	3 traitements (S1–S3); 3 parcelles/trt; 5 mesures composites/parcelle; SL/EL; 0–20 cm et 0–40 cm (! CEC que entre 0–20 cm !)	<code>lmer(Y ~ system + depth + position + c_{allée} + (1 plot))</code>
(3) Physique		
Ksat (mm/h), REU (cm ³ /cm ³), densité apparente (g/cm ³)	3 traitements; 3 parcelles/trt; SL/EL (S2–S3), SL (S1); 2 répét.;	<code>lmer(Y ~ system + c_{allée} + position + (1 plot))</code>
(4) Croissance		
Biomasse aérienne sèche (g/plant)	3 systèmes×2 doses; 3 années (2022–24), 7 dates; 3 rép./trt;	<code>lmer(Y ~ system*dose + year + date + c_{allée} + (1 rep) + (1 rep : date), REML = FALSE)</code>
(5) Phénologie		
Date JAS	3 systèmes×3 années; 3 rép./système	<code>lmer(Y ~ system*year + c_{allée} + (1 rep))</code>
(6) Rendement		
Rendement (grain + fibre) en kg/ha	3 systèmes ×2 doses×3 années; 3 rép./année	<code>lmer(Y ~ system*dose + year + c_{allée} + (1 rep))</code>
(7) Levée		
% émergence	3 années×2 doses×3 systèmes; 3 rép.; 4 lignes/rép.	<code>lmer(Y ~ system*dose + year + (1 plot) + c_{allée})</code>

Annexe I Biais des données météorologiques estimées

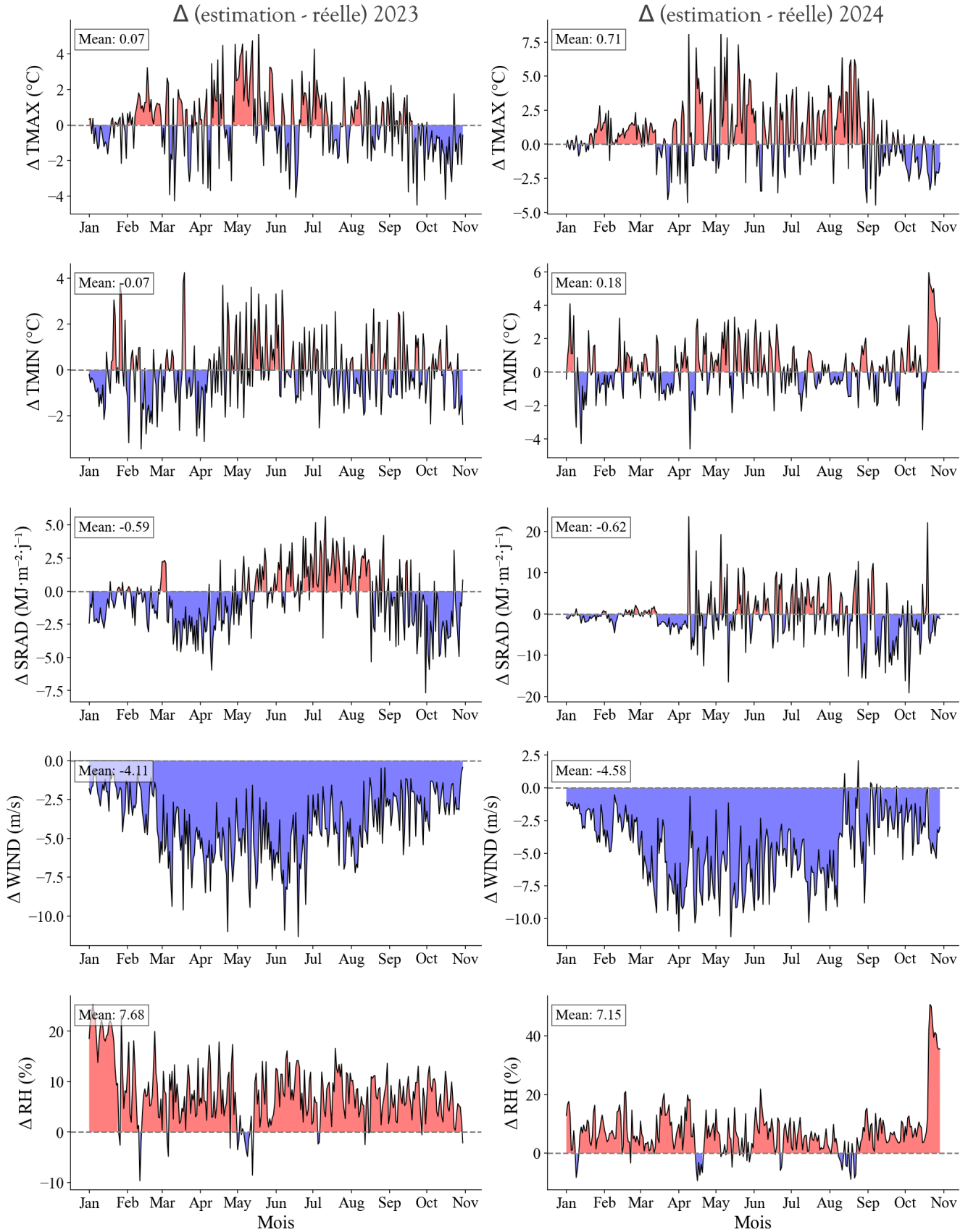


Figure A.15 — Biais journalier entre les mesures de la station d'Okpara (réelle) (Fig. 4.1) et les données météorologiques estimées par le modèle de réanalyse (MERRA 2 de la NASA) (POWER, 2024) (entre janvier et octobre inclus) pour 2023 et 2024. En rouge = surestimation du modèle et bleu = sous-estimation du modèle. *SRAD* correspond à la radiation solaire, *WIND* à la vitesse du vent et *RH* à l'humidité relative.

Annexe J Construction du profil pédologique DSSAT

Paramètres à inclure dans le profil de sol DSSAT

Table A.4 – Variables de sol à inclure dans le modèle (+ leur codes DSSAT en quatre lettres). Les cases blanches correspondent aux données collectées directement sur le terrain (tableau 4.1) ; les cases grisées correspondent aux paramètres inférés par le logiciel DSSAT via les fonctions de pédotransfert

Code DSSAT	Variable (unités)
SLB	profondeur de la couche (cm)
SLLL	teneur en eau à la limite inférieure drainée (%)
SDUL	teneur en eau à la limite supérieure drainée (%)
SSAT	teneur en eau à saturation (%)
SRGF	facteur de croissance racinaire (–)
SSKS	conductivité hydraulique saturée (cm · h ^{–1})
SLOC	teneur en carbone organique (%)
SLCL	pourcentage d’argile (%)
SLSI	pourcentage de limon (%)
SLCF	pourcentage de fragments grossiers (%)
SLNI	teneur totale en azote (%)
SLHW	pH (eau) (–)
SCEC	capacité d’échange cationique (cmol+ · kg ^{–1} de sol)
SBDM	densité apparente (g · cm ^{–3})

Estimation de l’évolution de la teneur en argile avec la profondeur

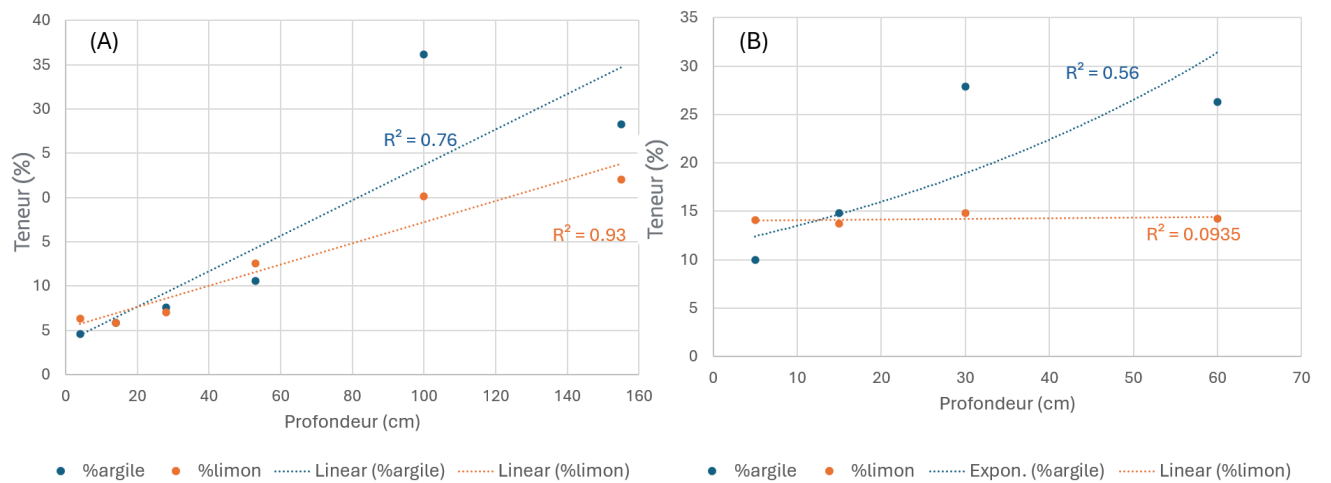


Figure A.16 – Régressions ajustées décrivant l’évolution des teneurs en argile (0–2µm) et en limon (2– 20µm) en fonction de la profondeur dans deux profils de sol.(A) Profil de Covè (département du Zou) (FOOD & of the UNITED NATIONS, 2005) ; (B) Profil de Soadou (département de l’Atacora) (ABOUA et al., 2024). Les modèles de régression sélectionnés (linéaire, polynomial ou exponentiel) servent à représenter au mieux les variations observées selon la profondeur. Le coefficient de détermination (R^2) indique la qualité de l’ajustement.

En raison de la meilleure qualité de l’ajustement, seules les équations du profil A ont été employées :

$$Argile(\%) = 0.1998z + 3.7075$$

(2)

$$Limon(\%) = 0.1199z + 5.2491$$

(3)

Fonctions de pédotransfert

Les données grisées dans le tableau A.4 sont estimées directement par le logiciel DSSAT de la façon suivante :

$$BD = \frac{100}{\frac{SOM(\%)}{0.224} + \frac{100 - SOM(\%)}{\rho_{\text{minéral}}}} \quad (4)$$

$$POR = 1 - \frac{BD}{APD} \quad (5)$$

$$\theta_{\text{SAT}} = f_{\text{class}} \times POR \quad (6)$$

$$f_{\text{class}} = \begin{cases} 0.93 & \text{pour S, SL, LS} \\ 0.95 & \text{pour L, SIL, SI, SCL, SC} \\ 0.97 & \text{pour C, CL, SIC, SICL} \end{cases} \quad (7)$$

$$\theta_{1500} = -0.024 S + 0.487 C + 0.006 OM + 0.005 S OM - 0.013 C OM + 0.068 S C + 0.031 \quad (8)$$

$$\theta_{33} = -0.251 S + 0.195 C + 0.011 OM + 0.006 S OM - 0.027 C OM + 0.452 S C + 0.299 \quad (9)$$

$$SRGF(z) = \begin{cases} 1 & \text{si } z_{\text{bottom}} \leq 15 \text{ cm} \\ \exp(-0.02 z_{\text{centre}}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (10)$$

L'ensemble des paramètres employés dans les fonctions de pédotransfert du logiciel sont les suivants :

Symbole	Signification	Unités
BD	Densité apparente du sol	g cm^{-3}
SOM(%)	Matière organique du sol	% (masse)
$\rho_{\text{minéral}}$	Densité des particules minérales (valeur de référence)	g cm^{-3} (2.65)
APD	Densité des particules ajustée (BAUMER & RICE, 1988)	g cm^{-3}
POR	Porosité totale décimale	–
θ_{SAT}	Teneur en eau à saturation (SSAT)	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
f_{class}	Coefficient dépendant de la classe texturale	–
S	Fraction (ou %) de <i>sable</i>	– ou %
C	Fraction (ou %) d' <i>argile</i>	– ou %
OM	Fraction (ou %) de matière organique	– ou %
θ_{1500}	Teneur en eau au point de flétrissement (1500 kPa)	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
θ_{33}	Teneur en eau à la capacité au champ (33 kPa)	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
$SRGF(z)$	Facteur de croissance racinaire à la profondeur z	–
z_{bottom}	Profondeur de la base de l'horizon	cm
z_{centre}	Profondeur du centre de l'horizon	cm

L'équation 4 représente la relation empirique d'Adams (ADAMS, 1973) qui permet d'estimer la

densité apparente (BD) d'un sol en fonction de la proportion de son volume occupé par la matière organique (SOM) et la fraction minérale. La densité apparente de la matière organique est donnée par $\rho_{SOM} = 0,224 \text{ g/cm}^3$, tandis que la fraction minérale est considérée comme ayant la densité apparente du quartz, soit $2,65 \text{ g/cm}^3$.

Après avoir estimé la porosité (éq. 5) selon (BAUMER & RICE, 1988), la teneur en eau volumique à saturation correspond à celle-ci que l'on module par un coefficient (0,93-0,97) (DALGLIESH & FOALE, 1998) qui est fonction de la classe du sol (MCH, 2017). Ce mécanisme permet de prendre en compte l'air piégé (limite le remplissage complet de la porosité par de l'eau).

Des fonctions de pédotransfert (SAXTON & RAWLS, 2006) permettent d'estimer la limite inférieure drainée (LL, $pK_a = -1500$) et la capacité au champ (DUL - $pK_a = -33$) d'un sol à partir de sa texture et de sa teneur en matière organique (OM) et

Finalement, le facteur de croissance racinaire (SRGF) est donné par l'équation 10 où le SRGF est égal à 1 pour toute couche dont la limite inférieure est inférieure ou égale à 15 cm. Cette équation représente donc une diminution exponentielle de croissance racinaire en fonction de la profondeur du centre de la couche (z en cm).

Annexe K Données entrée du logiciel

0.11.1 Données entrées : gestion des cultures

Table A.5 – Informations sur les semis par traitement et par année.

ID	Traitement	Dose	Système	Analyse Sol	Date de Semis	Prof. Semis (cm)	Écartement (cm)	Population (plantes/m ²) ¹
1	CS1_DR_22	DR	CS1	1	28/06/2022	3	80	3.36
2	CS1_MD_22	MD	CS1	1	28/06/2022	3	80	3.36
3	CS2_DR_22	DR	CS2	2	13/06/2022	3	80	3.23
4	CS2_MD_22	MD	CS2	2	13/06/2022	3	80	3.23
5	CS3_DR_22	DR	CS3	3	13/06/2022	3	80	3.16
6	CS3_MD_22	MD	CS3	3	13/06/2022	3	80	3.16
1	CS1_DR_23	DR	CS1	1	27/06/2023	3	80	3.36
2	CS1_MD_23	MD	CS1	1	27/06/2023	3	80	3.36
3	CS2_DR_23	DR	CS2	2	21/06/2023	3	80	3.23
4	CS2_MD_23	MD	CS2	2	21/06/2023	3	80	3.23
5	CS3_DR_23	DR	CS3	3	22/06/2023	3	80	3.16
6	CS3_MD_23	MD	CS3	3	22/06/2023	3	80	3.16
1	CS1_DR_24	DR	CS1	1	01/07/2024	3	80	3.36
2	CS1_MD_24	MD	CS1	1	01/07/2024	3	80	3.36
3	CS2_DR_24	DR	CS2	2	21/06/2024	3	80	3.23
4	CS2_MD_24	MD	CS2	2	21/06/2024	3	80	3.23
5	CS3_DR_24	DR	CS3	3	07/05/2024	3	80	3.16
6	CS3_MD_24	MD	CS3	3	07/05/2024	3	80	3.16

Table A.6 – Gestion des résidus de culture pour les trois années (voir aussi tableau A.11).

ID Traitement	Culture Précédente	Biomasse Racinaire (kg/ha)	Qté Résidus (kg/ha)	%N Résidus	Prof. Incorp. (cm)
Année 2022					
1_CS1_DR_22	Maïs	499.60	3460.00	1.69	25
2_CS1_MD_22	Maïs	499.60	3460.00	1.69	25
3_CS2_DR_22	Maïs + Niébé	681.00	4600.00	1.93	15
4_CS2_MD_22	Maïs + Niébé	681.00	4600.00	1.93	15
5_CS3_DR_22	Cult princ (Sorgho/Maïs) + asso	923.00	6000.00	1.93	15
6_CS3_MD_22	Cult princ (Sorgho/Maïs) + asso	923.00	6000.00	1.93	15
Année 2023					
1_CS1_DR_23	Maïs	473.60	3569.00	1.69	25
2_CS1_MD_23	Maïs	473.60	3569.00	1.69	25
3_CS2_DR_23	Maïs + Niébé	630.00	5740.00	1.93	15
4_CS2_MD_23	Maïs + Niébé	630.00	5740.00	1.93	15
5_CS3_DR_23	Cult princ (Sorgho/Maïs) + asso	845.00	6200.00	1.93	15
6_CS3_MD_23	Cult princ (Sorgho/Maïs) + asso	845.00	6200.00	1.93	15
Année 2024					
1_CS1_DR_24	Maïs	392.40	3924.00	0.89	25
2_CS1_MD_24	Maïs	392.40	3924.00	0.89	25
3_CS2_DR_24	Maïs + Niébé	475.40	4500.00	1.37	15
4_CS2_MD_24	Maïs + Niébé	475.40	4500.00	1.37	15
5_CS3_DR_24	Cult princ (Sorgho/Maïs/...)	1499.00	5998.00	1.71	15
6_CS3_MD_24	Cult princ (Sorgho/Maïs/...)	1499.00	5998.00	1.71	15

Table A.7 – Calendrier de fertilisation NPK et Urée pour chaque traitement

ID Traitement	Engrais	Date	Dose (kg/ha)	Mode d'application
Année 2022				
1_CS1_DR_22	NPK 14-18-18	18/07/2022	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	12/08/2022	50	Bottom of hole, deep placement
2_CS1_MD_22	NPK 7-9-9	18/07/2022	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	12/08/2022	50	Bottom of hole, deep placement
3_CS2_DR_22	NPK 14-18-18	29/06/2022	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	23/07/2022	50	Bottom of hole, deep placement
4_CS2_MD_22	NPK 7-9-9	29/06/2022	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	23/07/2022	50	Bottom of hole, deep placement
5_CS3_DR_22	NPK 14-18-18	29/06/2022	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	23/07/2022	50	Bottom of hole, deep placement
6_CS3_MD_22	NPK 7-9-9	29/06/2022	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	23/07/2022	50	Bottom of hole, deep placement
Année 2023				
1_CS1_DR_23	NPK 14-18-18	12/07/2023	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	11/08/2023	50	Bottom of hole, deep placement
2_CS1_MD_23	NPK 7-9-9	12/07/2023	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	11/08/2023	50	Bottom of hole, deep placement
3_CS2_DR_23	NPK 14-18-18	05/07/2023	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	04/08/2023	50	Bottom of hole, deep placement
4_CS2_MD_23	NPK 7-9-9	05/07/2023	200	Bottom of hole, deep placement

table A.8 (suite)

ID Traitement	Engrais	Date	Dose (kg/ha)	Mode d'application
5_CS3_DR_23	Urée 46% N	04/08/2023	50	Bottom of hole, deep placement
	NPK 14-18-18	07/07/2023	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	06/08/2023	50	Bottom of hole, deep placement
6_CS3_MD_23	NPK 7-9-9	07/07/2023	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	06/08/2023	50	Bottom of hole, deep placement
Année 2024				
1_CS1_DR_24	NPK 14-18-18	16/07/2024	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	15/08/2024	50	Bottom of hole, deep placement
2_CS1_MD_24	NPK 7-9-9	16/07/2024	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	15/08/2024	50	Bottom of hole, deep placement
3_CS2_DR_24	NPK 14-18-18	06/07/2024	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	05/08/2024	50	Bottom of hole, deep placement
4_CS2_MD_24	NPK 7-9-9	06/07/2024	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	05/08/2024	50	Bottom of hole, deep placement
5_CS3_DR_24	NPK 14-18-18	20/07/2024	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	19/08/2024	50	Bottom of hole, deep placement
6_CS3_MD_24	NPK 7-9-9	20/07/2024	200	Bottom of hole, deep placement
	Urée 46% N	19/08/2024	50	Bottom of hole, deep placement

Table A.9 – Opérations de travail du sol par traitement pour les trois années.

ID Traitement	Date	Opération	Profondeur (cm)
Année 2022			
1_CS1_DR_22	23/06/2022	Labour, Disc Plow	25
2_CS1_MD_22	23/06/2022	Labour, Disc Plow	25
3_CS2_DR_22	30/05/2022	ST, Cultivator, row	15
4_CS2_MD_22	30/05/2022	ST, Cultivator, row	15
5_CS3_DR_22	30/05/2022	ST, Cultivator, row	15
6_CS3_MD_22	30/05/2022	ST, Cultivator, row	15
Année 2023			
1_CS1_DR_23	26/06/2023	Labour, Disc Plow	25
2_CS1_MD_23	26/06/2023	Labour, Disc Plow	25
3_CS2_DR_23	17/05/2023	ST, Cultivator, row	15
4_CS2_MD_23	17/05/2023	ST, Cultivator, row	15
5_CS3_DR_23	17/05/2023	ST, Cultivator, row	15
6_CS3_MD_23	17/05/2023	ST, Cultivator, row	15
Année 2024			
1_CS1_DR_24	21/06/2024	Labour, Disc Plow	25
2_CS1_MD_24	22/06/2024	Labour, Disc Plow	25
3_CS2_DR_24	14/06/2024	ST, Cultivator, row	15
4_CS2_MD_24	15/06/2024	ST, Cultivator, row	15
5_CS3_DR_24	14/06/2024	ST, Cultivator, row	15
6_CS3_MD_24	15/06/2024	ST, Cultivator, row	15

Table A.10 – Informations sur la récolte pour les trois années.

ID Traitement	Jours Après Semis (JAS)	% Récolte Grain	Stade
Année 2022			
1_CS1_DR_22	156	100	GS016
2_CS1_MD_22	156	100	GS016
3_CS2_DR_22	171	100	GS016
4_CS2_MD_22	171	100	GS016
5_CS3_DR_22	171	100	GS016
6_CS3_MD_22	171	100	GS016
Année 2023			
1_CS1_DR_23	156	100	GS016
2_CS1_MD_23	156	100	GS016
3_CS2_DR_23	162	100	GS016
4_CS2_MD_23	162	100	GS016
5_CS3_DR_23	161	100	GS016
6_CS3_MD_23	161	100	GS016
Année 2024			
1_CS1_DR_24	176	100	GS016
2_CS1_MD_24	176	100	GS016
3_CS2_DR_24	186	100	GS016
4_CS2_MD_24	186	100	GS016
5_CS3_DR_24	172	100	GS016
6_CS3_MD_24	172	100	GS016

Teneurs en C et N des résidus

Table A.11 – Teneur moyenne en azote (N) et phosphore (P) dans les résidus (Maïs, Sorgho, Soja, Crotalaria, Coton, Niébé et Stylosanthes) issues de la littérature

Plante	Article / Source	N (%)	P (%)	Localisation
Maïs	(MUPANGWA et al., 2020) ^c	1.03	0.42	Afrique australe
	(MANLAY et al., 2007) ^d	1.20	0.30	Sénégal
	(MYAKA et al., 2006)	0.45	0.09	Tanzanie & Malawi
	(SAWYER & BARKER, 2023)	0.60	0.07	Amérique du Nord
	(KUSHWAH et al., 2014)	1.12	0.23	Inde
	(J. NAAB et al., 2015)	0.94	0.26	Ghana
	Moyenne	0.89	0.23	–
Sorgho	(LIBRARY, 2020)e	1.05	–	–
	(PALÉ et al., 2021)	1.60	0.23	Burkina-Faso
	(KUSHWAH et al., 2014)	0.78	0.13	Inde
	Moyenne	1.14	0.18	–
Soja	(DIELS et al., 2003) ^a	2.50	0.30	Savane ouest-africaine
	(LÖWIK, 2023)	1.10	–	Moyenne mondiale
	(KUSHWAH et al., 2014)	1.73	0.16	Inde
	Moyenne	1.78	0.23	–
Crotalaria	(LELEI, 2011)	3.40	0.24	Kenya
	(KHAEMBA, 2011)	4.30	–	Kenya
	(NRCS, 2003)	2.00	–	–
	(WALELA, 2011)	2.60	0.20	Kenya
	Moyenne	3.08	0.22	–
Coton	(MA et al., 2021)	1.69	0.43	Chine
-				
Niébé	(CREAMER & BALDWIN, 1999)	2.13	–	Caroline du Nord (USA)
	(FEEDIPEDIA, s. d.)	–	0.39	–
	Moyenne	2.13	0.39	–
Stylosanthes	(AKPENSUEN et al., 2019) ^b	2.60	0.31	Nigéria

Notes : ^a Moyenne de l'intervalle 1.8–3.2 % N et 0.20–0.40 % P. ^b Moyenne de l'intervalle 0.275–0.351 % P. ^c Moyenne de l'intervalle 0.96–1.10 % N et 0.22–0.61 % P. ^d Moyenne de l'intervalle 0.80–1.60 % N et 0.20–0.40 % P.

Exemple d'application de la méthode d'estimation de la quantité d'azote restitués par les résidus de culture

— Résidus de Sorgho (Sg) :

- Biomasse épandue ($Biomasse_{Sg}$) = 200 kg/ha
- Teneur en azote = 1,4%

— Résidus de Soja (Soy) :

- Biomasse épandue ($Biomasse_{Soy}$) = 150 kg/ha
- Teneur en azote ($\%N_{Soy}$) = 1.78%

— Résidus de Crotalaria Juncea (Cj) :

- Biomasse épandue ($Biomasse_{Cj}$) = 300 kg/ha
- Teneur en azote ($\%N_{Cj}$) = 3.08%

Dans cet exemple, la quantité totale d'azote restituée au sol serait :

$$\%N_{\text{restitué}} = \frac{200 \text{ kg ha}^{-1} \times 0.014 + 150 \text{ kg ha}^{-1} \times 0.0178 + 300 \text{ kg ha}^{-1} \times 0.0308}{650} \quad (11)$$

$$= \frac{2.80 + 2.67 + 9.24}{650} \quad (12)$$

$$= \frac{14.71}{650} \quad (13)$$

$$\approx 0.0226 \quad (14)$$

$$= 2.26 \% \quad (15)$$

R :S ratio

Table A.12 – Synthèse bibliographique des rapports racine/parties aériennes (R :S) mesurés à maturité pour les cultures de l’essai.

Référence	Culture	R :S (maturité)	Lieu
(ORDÓÑEZ et al., 2020) ; (AMOS & WALTERS, 2006)	Maïs	0.04–0.16 ($\mu = 0.10$)	Iowa, USA ; N/A
(MYERS, 1980) ; (THAPA et al., 2017)	Sorgho	0.10–0.24 ($\mu = 0.17$)	Northern Australia ; Texas, USA
(McMICHAEL, 1986)	Coton	0.10–0.18 ($\mu = 0.14$)	Texas, USA
(DATE & RATCLIFF, 1989)	Stylosanthes	0.30	Australia
(ORDÓÑEZ et al., 2020)	Soja	0.09–0.26 ($\mu = 0.17$)	Iowa, USA
(EL NADI et al., 1969)	Crotalaria	0.20*	N/A
(EL NADI et al., 1969)	Niébé	0.20*	N/A

* Légumineuse analogue = *Vicia faba*

Annexe L GLUE

$$L(\omega_i | O) = \prod_{j=1}^M \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} \exp \left[-\frac{(O_j - P_j(\omega_i))^2}{2\sigma_0^2} \right] \quad (16)$$

Cette valeur de vraisemblance est ensuite convertie en probabilité selon l’équation 17 :

$$p(\omega_i) = \frac{L(\omega_i | O)}{\sum_{i=1}^N L(\omega_i | O)} \quad (17)$$

Où :

$L(\omega_i | O)$ valeur de vraisemblance pour l’ensemble de paramètres ω_i ,

$p(\omega_i)$ probabilité associée à l’ensemble de paramètres ω_i ,

ω_i $i^{\text{ème}}$ ensemble de paramètres dans $\{\omega_1, \dots, \omega_N\}$,

O vecteur des observations,

O_j $j^{\text{ème}}$ observation dans O ,

$P_j(\omega_i)$ sortie simulée du modèle pour l'observation j avec les paramètres ω_i ,

M nombre total d'observations,

N nombre total d'ensembles de paramètres testés,

σ_0^2 variance (supposée constante) de l'erreur du modèle.

Annexe M GENCALC

Le processus de calcul dans GENCALC débute par la sélection des expériences, des traitements et des valeurs initiales pour les coefficients génétiques. GENCALC génère ensuite trois fichiers :

- **GCOEFF.CTR** : contient les expériences et traitements sélectionnés.
- **GCINIT.CTR** : contient les valeurs initiales des coefficients génétiques pour chaque combinaison expérience/traitement.
- **GCRULES.CTR** : contient les informations cruciales, telles que les limites d'erreur (ERRMX), les valeurs maximales (MXCEF) et minimales (MNCEF) que les coefficients peuvent prendre, ainsi que l'ordre dans lequel les coefficients génétiques sont ajustés.

Pour chaque itération, le programme **GCCALC** met à jour le coefficient génétique en cours d'ajustement et exécute le modèle de culture. Les valeurs simulées et mesurées, stockées dans le fichier **OVERVIEW.OUT**, sont comparées, et le coefficient génétique est modifié pour rapprocher la valeur simulée de la valeur mesurée. Les changements de valeurs de coefficients sont limités à un maximum de 20% pour éviter les dépassements si la réponse n'est pas linéaire (HUNT et al., 1993). Enfin, les coefficients qui ont donné les meilleurs résultats individuellement sont assemblés pour constituer un ensemble de coefficients plus représentatifs de l'expérience (HUNT et al., 1993).

Annexe N Valeurs des coefficients génétiques

Table A.13 – Valeurs des coefficients de culture pour la calibration génétique automatisée (*GLUE* et *GENCALC*) et sur base des données de croissance (LAI et biomasse aérienne). Les lettres **P** et **C** indiquent respectivement les variables liées à la phénologie et à la croissance.

Abréviation	Définition	Unités	Type	GLUE	GENCALC	Croissance
EM–FL	Délai entre l'émergence et l'apparition des fleurs (R1)	Jours photothermiques	P	40.06	38.99	36.00
SD–PM	Délai entre la première graine (R5) et la maturité physiologique (R7)	Jours photothermiques	P	48.88	48.76	30.00
FL–SH	Délai entre la première fleur et la première gousse (R3)	Jours photothermiques	P	10.20	8.00	7.00
FL–SD	Délai entre la première fleur et la première graine (R5)	Jours photothermiques	P	17.88	18.00	21.00
FL–LF	Temps entre la première fleur (R1) et la fin de l'expansion foliaire	Jours photothermiques	P	73.27	75.00	50.00
SLAVR	Surface foliaire spécifique en conditions standard	cm ² /g	C	173.30	175.00	169.00
SIZLF	Taille maximale d'une feuille entière (trois folioles)	cm ²	C	299.20	280.00	280.00
SFDUR	Durée de remplissage des graines (conditions standard)	Jours photothermiques	C	24.10	24.00	40.00
SDPDV	Nombre moyen de graines par gousse (conditions standard)	graines/gousse	C	21.52	27.00	21.43
PODUR	Temps pour atteindre la charge finale de gousses	Jours photothermiques	C	10.25	11.61	5.00

Annexe O Optimisation génétique sur base de la croissance

$$\text{RMSE}(c) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i(c) - x_i)^2}, \quad (18)$$

$$c_O^* = \arg \min \text{RMSE}_O(c), \quad O \in \{\text{LAI}, \text{BIOM}\}, \quad (19)$$

$$S(c) = \sqrt{n\text{RMSE}_{\text{LAI}}(c)^2 + n\text{RMSE}_{\text{BIOM}}(c)^2}, \quad (20)$$

$$I = [c_{\text{LAI}}^*, c_{\text{BIOM}}^*] \quad (21)$$

$$c_{\text{comp}} = \arg \min_{c \in I} S(c), \quad (22)$$

Annexe P Paramètres d'entrées analyse de sensibilité (gestion de la culture)

Table A.14 – Paramètres agronomiques et leurs valeurs initiales utilisées pour l'analyse de sensibilité.

Code	Paramètre	Valeur initiale
ICRT	Biomasse racinaire (kg/ha)	499.6
ICRES	Résidus (kg/ha)	3569
ICREN	Quantité de N dans résidus (%)	1.69
ICREP	Quantité de P dans résidus (%)	0.43
ICRIP	% d'incorporation	80
ICRID	Profondeur d'incorporation (cm)	20
SADM	Densité apparente (g/cm ³)	1.6
SAOC	Carbone organique (%)	0.75
SANI	Azote (%)	0.06
SAPHW	pH H2O	6.4
TDEP	Profondeur du labour (cm)	25
FEDP	Profondeur placement engrais (cm)	5
FAMN	Azote engrais (kg/ha)	28
FAMP	Phosphore engrais (kg/ha)	16
FAMK	Potassium engrais (kg/ha)	30

Annexe Q Matrice de corrélations des variables physico-chimiques

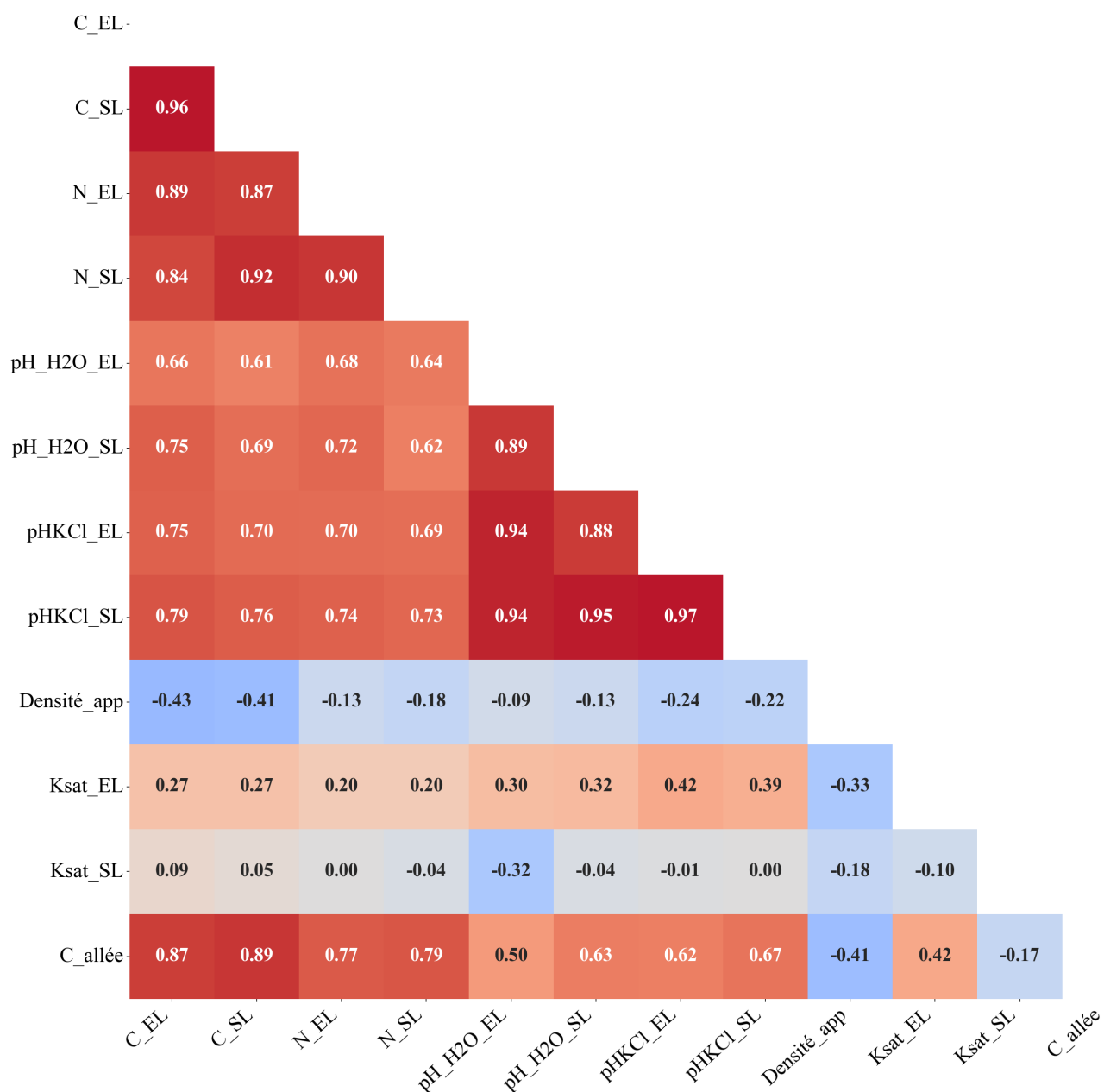


Figure A.17 – Matrice de corrélations de Pearson entre les variables physico-chimiques sur les lignes de semis (SL) et dans l'interligne (EL). L'intensité de la couleur varie de -1 (bleu) à +1 (rouge).

Annexe R Taille des échantillons pour l'analyse des variables physico-chimiques du sol

Table A.15 – Taille de l'échantillon (n/système) pour chaque variable

Variable	n/système
Paramètres chimiques	
C tot (%)	12
N tot (%)	12
C/N	12
pH _{H₂O}	12
CEC (cmol(+)/kg)	12
Paramètres physiques et hydrodynamiques	
ρ (g/cm ³)	12 (S2; S3) / 6 (S1)
K _{sat} (mm/h)	17 (S2; S3) / 5 (S1)
REU (%)	10 (S2; S3) / 5 (S1)
Croissance	
Biomasse (g/plante)	3 / (année; date; dose)
Performances agronomiques	
Rendement (kg/ha)	3 / (année; dose)
Levée (%)	12 / (année; dose)
Phénologie	
Floraison (JAS)	3 /an
Capsule (JAS)	3 /an
Durée anthèse–capsule (JAS)	3 /an

Annexe S Effet de SL0C sur les propriétés hydrodynamiques du sol

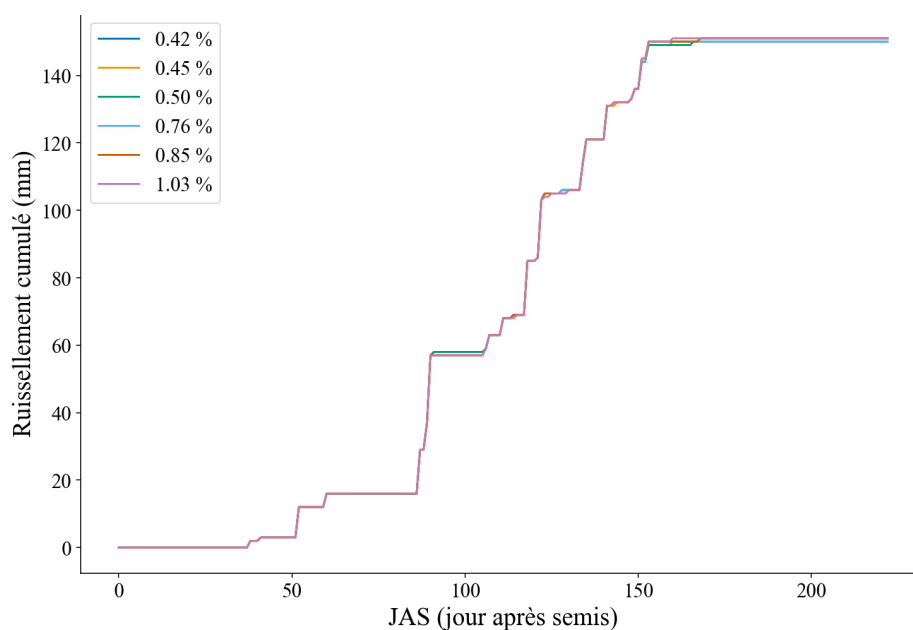


Figure A.18 – Effet de la valeur prise par la variable SL0C sur le ruissellement de surface (mm)

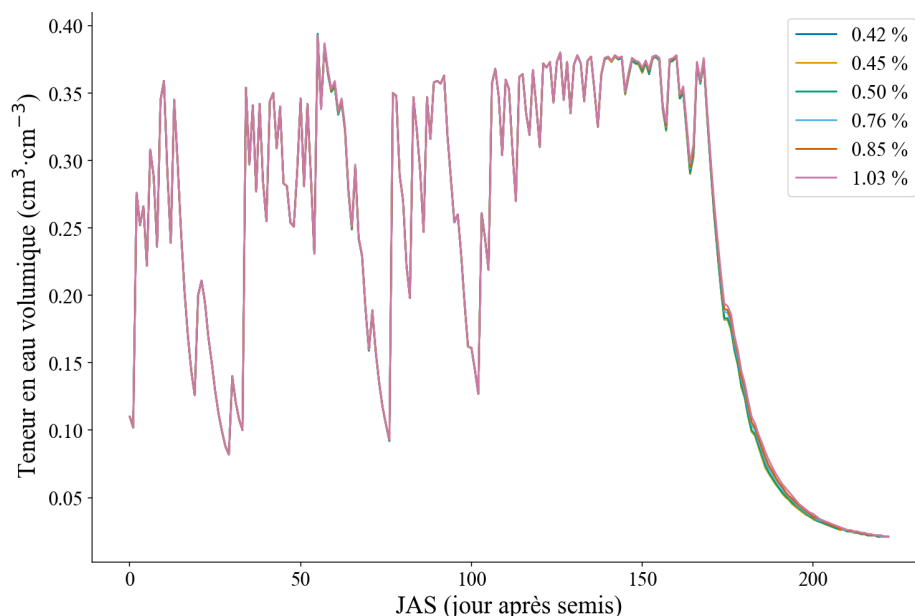


Figure A.19 – Effet de la valeur prise par la variable SLOC sur la teneur en eau (cm^3/cm^3) à la surface

Annexe T Évolution de l'évapotranspiration (ETAC) cumulée (mm) par traitement (2022)

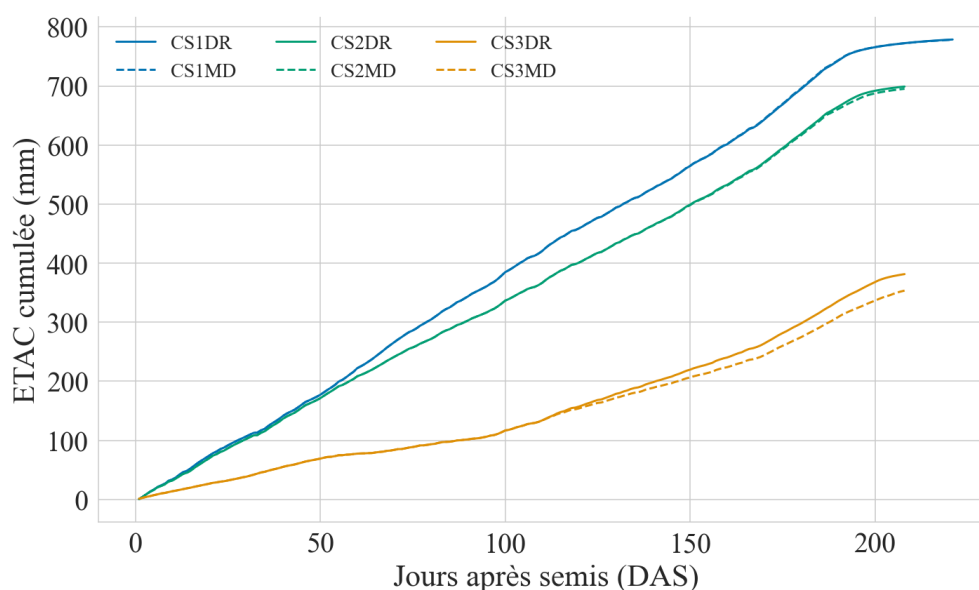


Figure A.20 – Evolution de l'évapotranspiration (ETAC) cumulée (mm) par traitement au cours de la saison de culture (2022). Les lignes pointillées représentent les traitements en MD et les lignes continues en DR.

Annexe U Moyennes ($\pm$ ES) des variables mesurées

Table A.16 – Moyenne $\pm$ erreur standard (ES) de l'ensemble des variables mesurées sous dose recommandée (DR)

Variable	S1	S2	S3
(1) Paramètres chimiques			
C _{tot} (%)	0.68 $\pm$ 0.22	0.56 $\pm$ 0.14	0.91 $\pm$ 0.40
N _{tot} (%)	0.047 $\pm$ 0.017	0.039 $\pm$ 0.011	0.058 $\pm$ 0.02
pH _{H₂O}	6.38 $\pm$ 0.25	6.23 $\pm$ 0.19	6.59 $\pm$ 0.35
CEC (cmol(+) kg ⁻¹)	4.98 $\pm$ 20.37	4.18 $\pm$ 4.06	7.06 $\pm$ 66.35
Δ pH _{KCl-H₂O}	-0.83 $\pm$ 0.3	-0.844 $\pm$ 0.36	-0.676 $\pm$ 0.33
(2) Physiques et hydrodynamiques			
Densité apparente ρ (g cm ⁻³)	1.62 $\pm$ 0.05	1.58 $\pm$ 0.08	1.59 $\pm$ 0.10
K _{sat} (mm h ⁻¹)	32.2 $\pm$ 23.1	51.5 $\pm$ 44.3	13.5 $\pm$ 14.6
REU (% vol)	10.8 $\pm$ 2.0	9.7 $\pm$ 2.0	9.7 $\pm$ 1.7
(3) Performances agronomiques			
Rendement (kg ha ⁻¹)	2048 $\pm$ 140	1674 $\pm$ 152	1700 $\pm$ 141
Levée (%)	80.9 $\pm$ 8.4	77.3 $\pm$ 8.9	76.9 $\pm$ 8
(5) Phénologie			
Date floraison (JAS)	75.1 $\pm$ 1.6	83.9 $\pm$ 5.7	82.3 $\pm$ 2.16
Date capsule (JAS)	104.4 $\pm$ 1.1	103.4 $\pm$ 1.7	104.1 $\pm$ 1.6
Durée anthèse-capsule (JAS)	29.6 $\pm$ 1.8	23.1 $\pm$ 5.2	24.9 $\pm$ 4.5

Table A.17 – Moyenne $\pm$ erreur standard (ES) de l'ensemble des variables mesurées sous fertilisation microdose (MD)

Variable	S1	S2	S3
Rendement (kg ha⁻¹)	1979 $\pm$ 168	1646 $\pm$ 154	1687 $\pm$ 150
Levée (%)	80.6 $\pm$ 8.2	77.6 $\pm$ 9.9	75.9 $\pm$ 7.8

Annexe V Boxplots des paramètres chimiques du sol en fonction du système et de la profondeur.

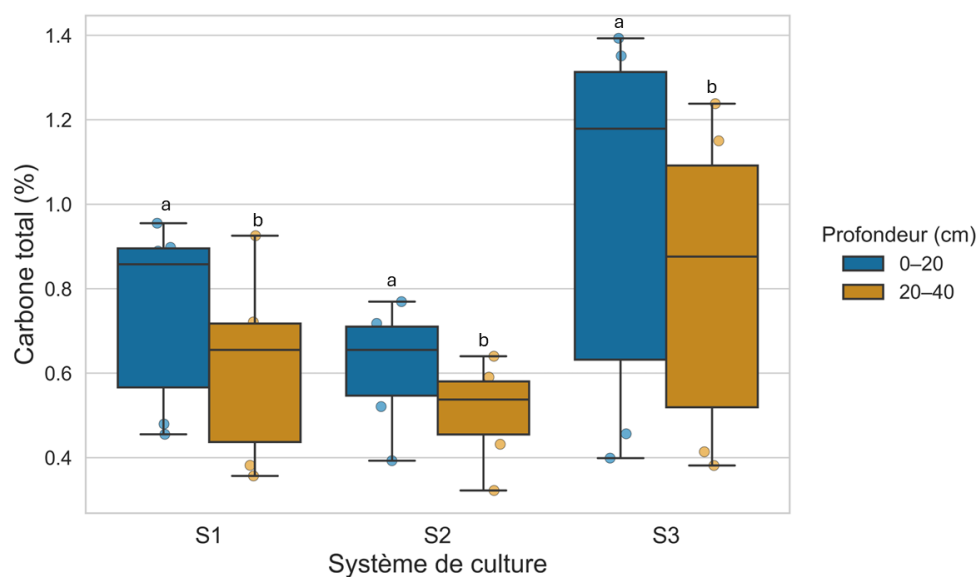


Figure A.21 – Carbone total (%). Aucune différence significative entre systèmes ($p > 0,05$).

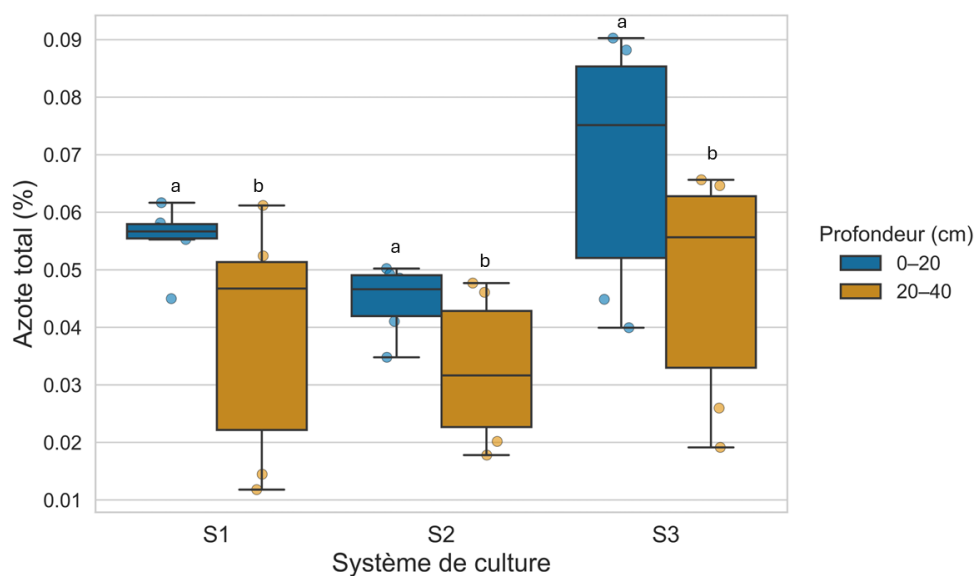


Figure A.22 – Azote total (%). Aucune différence significative entre systèmes ($p > 0,05$).

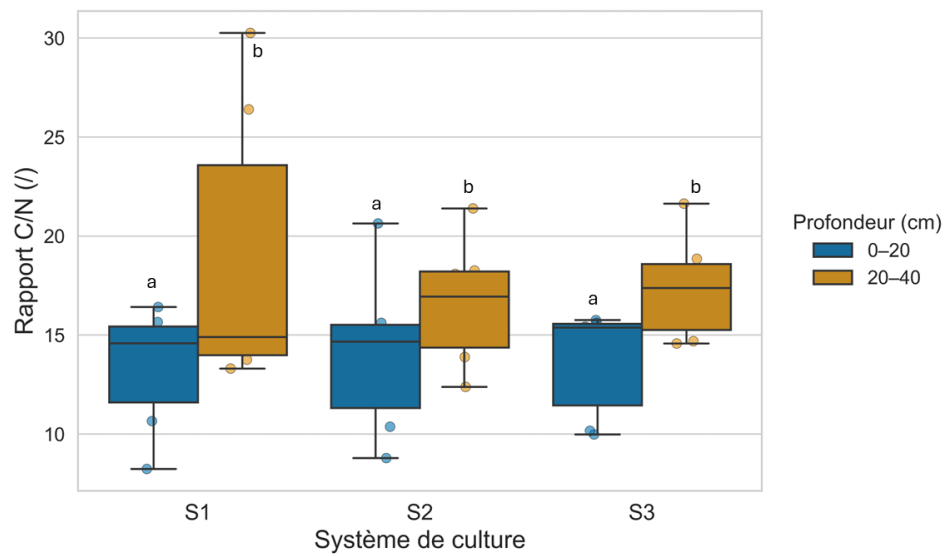


Figure A.23 – Rapport C/N. Aucune différence significative entre systèmes ($p > 0,05$).

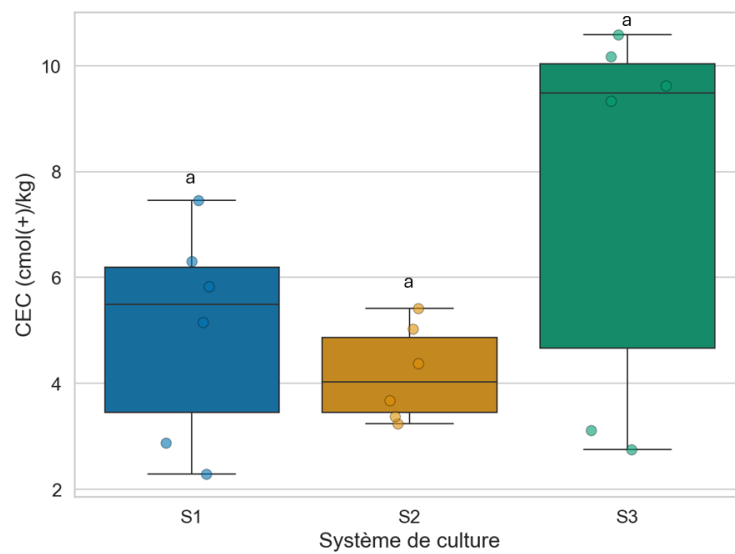


Figure A.24 – Capacité d'échange cationique (CEC). Aucune différence significative entre systèmes ($p > 0,05$).

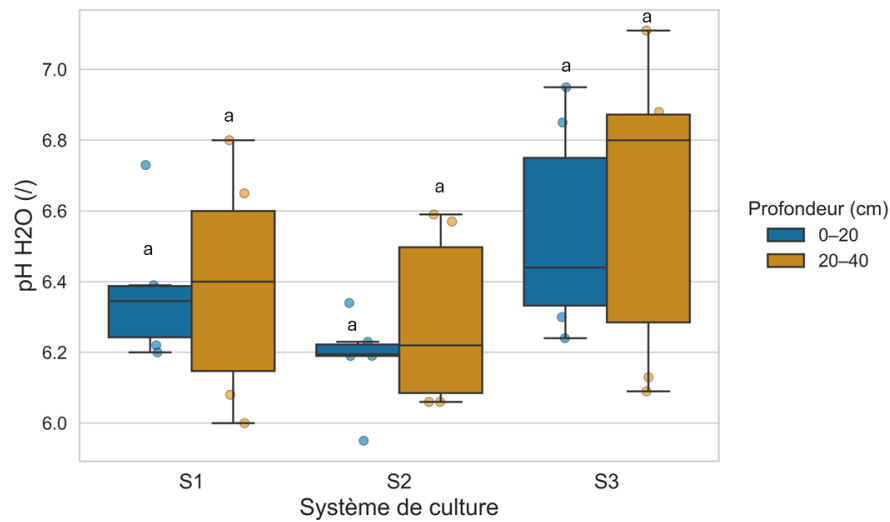


Figure A.25 – pH_{H₂O}. Aucune différence significative entre systèmes ($p > 0,05$).

Annexe W Boxplots des paramètres physiques et hydrodynamiques du sol en fonction du système et de la profondeur.

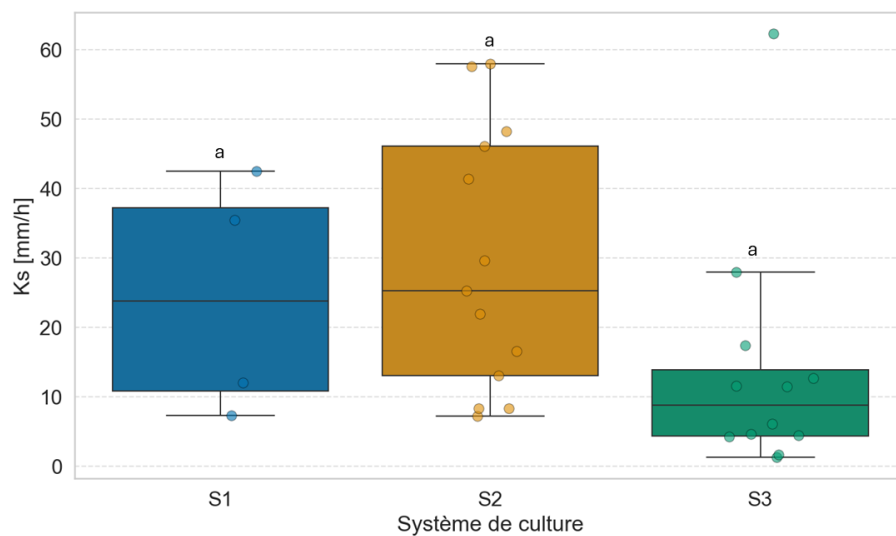
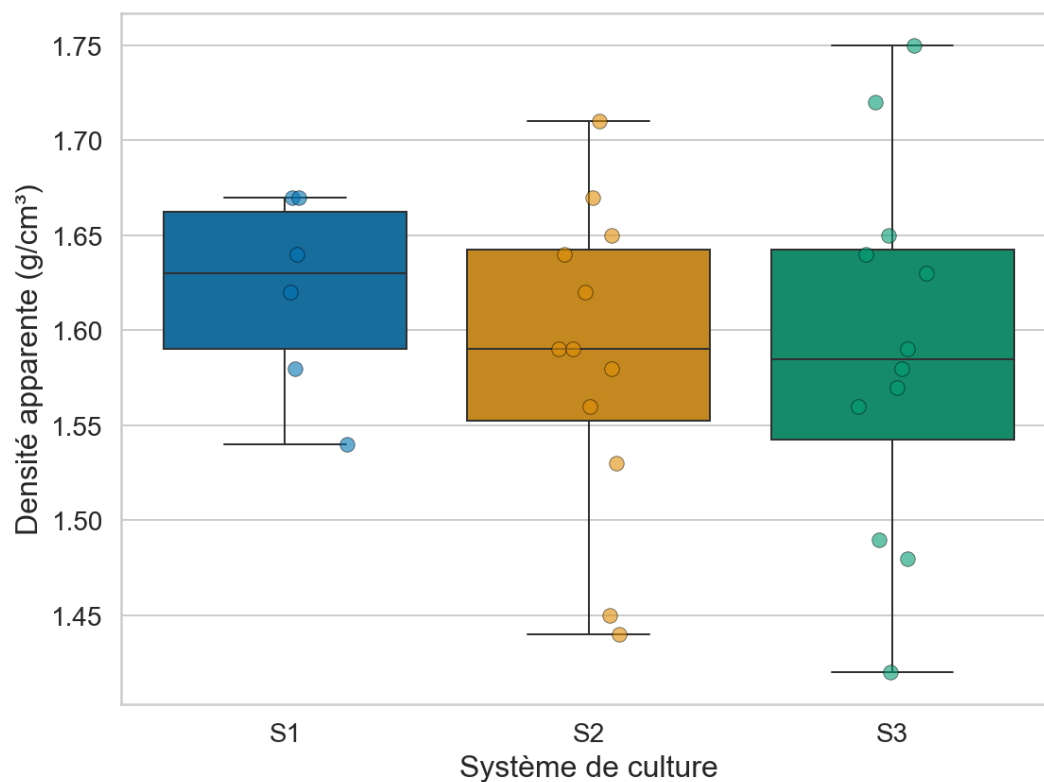
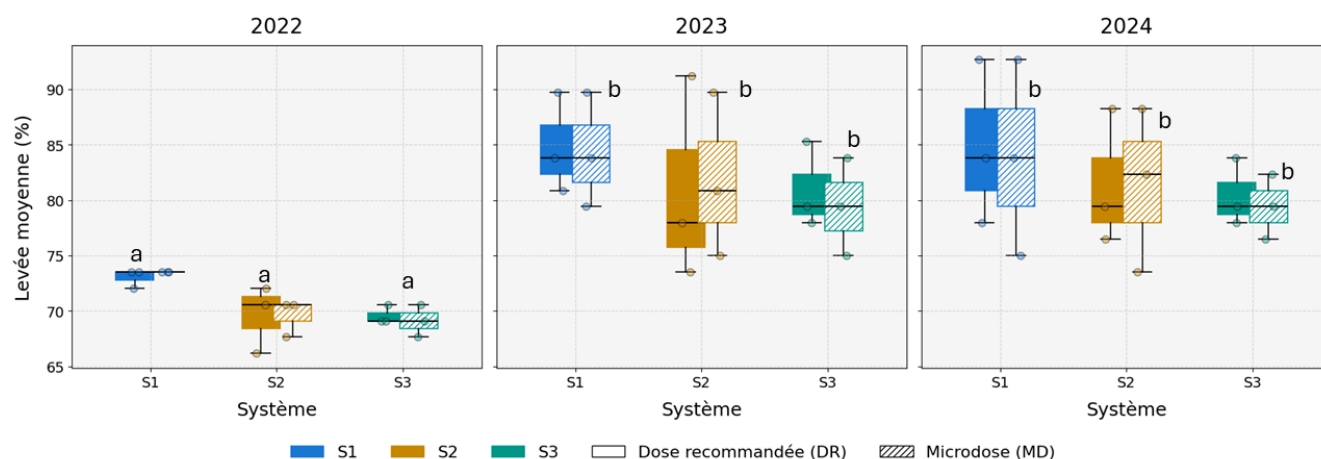


Figure A.26 – Conductivité hydraulique à saturation (K_{sat} , mm h⁻¹). Aucun effet significatif du système de culture ($p > 0,05$).

Figure A.28 – Réserve utile en eau (REU, % vol). Aucun effet significatif du système de culture ($p > 0,05$).**Figure A.27** – Densité apparente (g/cm³). Aucune effet significatif du système de culture ($p > 0,05$).

Annexe X Taux de levée du coton (%) en fonction du système de culture

**Figure A.29** – Taux moyen de levée (%). Ni le système ni la dose d'azote n'affectent significativement la levée ($p > 0,05$).

Annexe Y Test d'effervescence pour détecter la présence de carbonates.

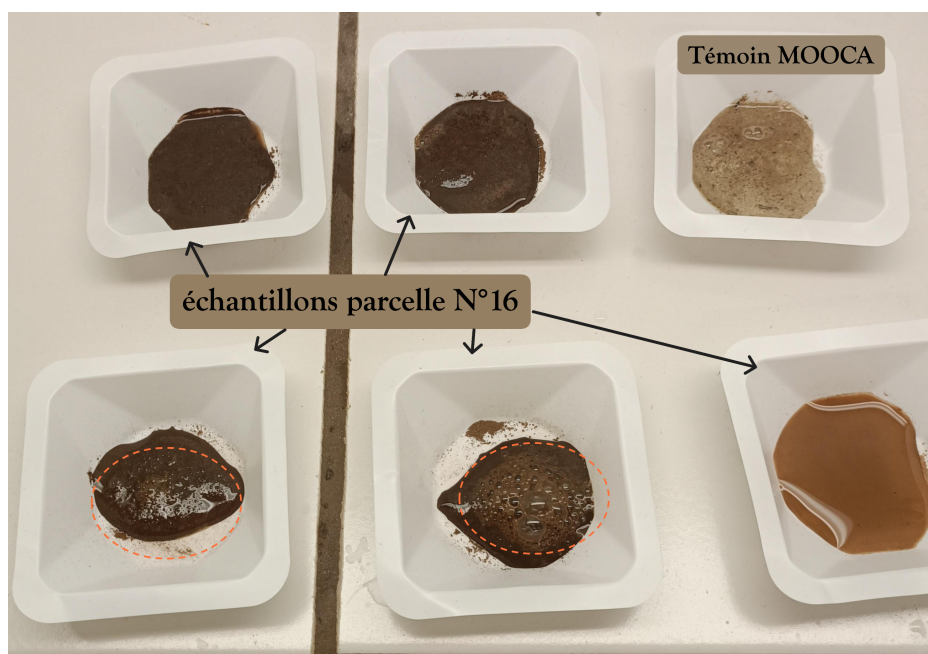


Figure A.30 – Photo du test d'effervescence qui a démontré la présence de calcaire actif (zone en rouge) au niveau de la parcelle la plus riche en C_{tot} (parcelle n°16)

Bibliographie

- ABOE, M. (2012). *Etude de la variabilité intra-balle des caractéristiques technologiques des fibres de coton produites en Afrique de l'Ouest et du Centre* [thèse de doct.]. <http://www.theses.fr/2012MULH4771/document>
- ABOUA, C., EDWARD, G., PHILIPPE, D., STÉPHANE, B., & EMMANUEL, S. (2024). What kind of cotton ideotype is adapted to agroecological cropping systems and climate change in Benin. *CIRAD*.
- ABOUA, C. D., HOUGNI, A., HOUGNI, D.-G. J. M., SINHA, M. G., & YAVOEDJI, G. (2021). Evaluation du rendement en coton-graine de nouveaux génotypes de cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) sélectionnés au Bénin : Evaluation du rendement de nouveaux génotypes de coton. *Tropicultura*, (1). <https://doi.org/10.25518/2295-8010.1725>
- ADAMS, W. A. (1973). THE EFFECT OF ORGANIC MATTER ON THE BULK AND TRUE DENSITIES OF SOME UNCULTIVATED PODZOLIC SOILS. *European Journal of Soil Science*, 24(3), 69-88. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1973.tb00737.x>
- ADJOGBOTO, A., LIKPÈTÈ, D. D., SOSSA-VIHOTGBÉ, C. N. A., AKPONIKPÈ, P. B. I., DJÈNONTIN, A. J., BACO, M. N., DIOGO, R. V. C., & AGBOSSOU, K. E. (2023). Yield response of African leafy vegetables to combined manure and urea microdosing in West Africa. *BASE*, 74-86. <https://doi.org/10.25518/1780-4507.20248>
- AGALATI, B., BOUKARI, K., AYEDEGUE, O. I., & DEGLA, P. (2022). Effets des rotations culturales sur la performance économique des exploitations cotonnières au Centre et Nord du Bénin.
- AGBOGIDI, O. M., & EGHO, E. (2012). Evaluation of eight varieties of cowpea (*vigna unguiculata* (L.) walp) in asaba agro-ecological environment, delta state, nigeria. *European Journal of Sustainable Development*, 1(2), 303. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2012.v1n2p303>
- AHMAD, S., AHMAD, I., AHMAD, B., AHMAD, A., WAJID, A., KHALIQ, T., ABBAS, G., WILKERSON, C., & HOOGENBOOM, G. (2023). Regional integrated assessment of climate change impact on cotton production in a semi-arid environment. *Climate Research*, 89, 113-132. <https://doi.org/10.3354/cr01710>
- AIHOUNTON, G. B. D., ANGE, H. E., & JACOB, A. Y. (2022). Caractérisation et perspectives de durabilité des systèmes de production de coton conventionnel et biologique au Bénin. *Revue Africaine d'Environnement et d'Agricultur*. <https://hal.science/hal-03753922>
- AIHOUNTON, G. B. D., EDJA, A. H., & YABI, J. A. (2022). Caractérisation et perspectives de durabilité des systèmes de production de coton conventionnel et biologique au Bénin. *organic cotton*.
- AKPENSUEN, T., NAMO, O., & AMODU, J. (2019). Effects of Stages of Growth on Dry Matter Yield and Nutrient Composition of Stylosanthes in the Year of Establishment in Vom, Nigeria. *Proceedings of the 44th Annual Conference of the Nigerian Society for Animal Production - ABUJA 2019*.
- ALIDOU, G., & NIEHOF, A. (2020). Responses of rural households to the cotton crisis in Benin. *Sustainability (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/su12104207>
- AL-KAISI, M. M., & KWAW-MENSAH, D. (2020). Quantifying soil carbon change in a long-term tillage and crop rotation study across iowa landscapes. *Soil Science Society of America Journal*, 84(1), 182-202. <https://doi.org/10.1002/saj2.20003>
- ALLEN, T. (2017). The Cost of High Food Prices in West Africa. <https://doi.org/10.1787/C2DB143F-EN>

- ALLEY, M., & VANLAUWE, B. (2009). The Role of Fertilizers in Integrated Plant Nutrient Management.
- ALVEY, S., YANG, C.-H., BUERKERT, A., & CROWLEY, D. E. (2003). Cereal/legume rotation effects on rhizosphere bacterial community structure in west african soils. *Biology and Fertility of Soils*, 37(2), 73-82. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0573-2>
- AMADJI, G., & AHOLOUKPÈ, H. (2008). Impact du niébé (*Vigna unguiculata*) et de la fumure minérale sur les propriétés chimiques de la terre de barre du Bénin. *Etude et Gestion des Sols*, 15, 147-160.
- AMONMIDE, I., DAGBENONBAKIN, G., AGBANGBA, C., & AKPONIKPE, P. (2019). Contribution à l'évaluation du niveau de fertilité des sols dans les systèmes de culture à base du coton au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 13(3), 1846. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v13i3.52>
- AMOS, B., & WALTERS, D. T. (2006). ok. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1489-1503. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0216>
- AMOUZOU, K., NAAB, J., LAMERS, J., BORGEMEISTER, C., BECKER, M., & VLEK, P. (2018). CROPGRO-Cotton model for determining climate change impacts on yield, water- and N-use efficiencies of cotton in the Dry Savanna of West Africa. *Agricultural Systems*, 165, 85-96. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.06.005>
- ANTOINE, N. K., NAFAN, D., N'KLO, O., & PÉLAGIE, K. N. (2019). Effect of the corn-cowpea association on the organic carbon dynamics of the soils of two plots in real culture in northern côte d'ivoire. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 4(6), 1923-1932. <https://doi.org/10.22161/ijeab.46.43>
- AquaCrop / Food and Agriculture Organization of the United Nations*. (s. d.). Récupérée février 17, 2025, à partir de <https://www.fao.org/aquacrop>
- ASSEFA, T., JHA, M., REYES, M., WORQLUL, A., DORO, L., & TILAHUN, S. (2020). Conservation agriculture with drip irrigation : effects on soil quality and crop yield in sub-saharan africa. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 209-217. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.209>
- AZOR, R., DEO, R., BIRBILIS, N., & KODIKARA, J. (2019). On the optimum soil moisture for underground corrosion in different soil types. *Corrosion Science*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108116>
- BAGAYOKO, M., BUERKERT, A., LUNG, G., BATIONO, A., & RÖMHELD, V. (2000). Cereal/legume rotation effects on cereal growth in Sudano-Sahelian West Africa : soil mineral nitrogen, mycorrhizae and nematodes. *Plant and Soil*, 218(1), 103-116. <https://doi.org/10.1023/A:1014957605852>
- BAI, F., & SCHEFFLER, J. (2024). Genetic and molecular regulation of cotton fiber initiation and elongation. *Agronomy*, 14(6), 1208. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061208>
- BASSETT, T. J. (2002). *Le coton des paysans : Une révolution agricole (Côte-d'Ivoire 1880-1999)*. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.10192>
- BATES, D., MÄCHLER, M., BOLKER, B., & WALKER, S. (2023). *lme4 : Linear Mixed-Effects Models using 'Eigen' and S4* [R package version 1.1-35]. <https://cran.r-project.org/web/packages/lme4/lme4.pdf>
- BATIONO, A., KIHARA, J., VANLAUWE, B., WASWA, B., & KIMETU, J. (2007). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, 94(1), 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.08.011>

- BAUDRON, F., TITTONELL, P., CORBEELS, M., LETOURMY, P., & GILLER, K. E. (2012). Comparative performance of conservation agriculture and current smallholder farming practices in semi-arid Zimbabwe. *Field Crops Research*, 132, 117-128. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.008>
- BAUMER, O., & RICE, J. (1988). Methods to predict soil input data for DRAINMOD. *Pacers, American Society of Agricultural Engineers (ASAE Pacers)*, 16P.
- BAYALA, J., SILESHI, G., COE, R., KALINGANIRE, A., TCHOUDJEU, Z., SINCLAIR, F., & GARRITY, D. (2012). Cereal yield response to conservation agriculture practices in drylands of west africa : a quantitative synthesis. *Journal of Arid Environments*, 78, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.10.011>
- BERTON FERREIRA, T., SHELIA, V., PORTER, C., MORENO CADENA, P., SALMERON CORTASA, M., SOHAIL KHAN, M., PAVAN, W., & HOOGENBOOM, G. (2024a). Enhancing crop model parameter estimation across computing environments : Utilizing the GLUE method and parallel computing for determining genetic coefficients. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, 109513. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109513>
- BERTON FERREIRA, T., SHELIA, V., PORTER, C., MORENO CADENA, P., SALMERON CORTASA, M., SOHAIL KHAN, M., PAVAN, W., & HOOGENBOOM, G. (2024b). Enhancing crop model parameter estimation across computing environments : utilizing the GLUE method and parallel computing for determining genetic coefficients. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227, 109513. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109513>
- BLESSING, O. C., IBRAHIM, A., SAFO, E. Y., YEBOAH, E., LOGAH, V., & MONICA, U. I. (2017). Fertilizer micro-dosing in west african low-input cereals cropping : benefits, challenges and improvement strategies.
- BOOTE, K. J., SAU, F., HOOGENBOOM, G., & JONES, J. W. (2015, octobre 26). Experience with Water Balance, Evapotranspiration, and Predictions of Water Stress Effects in the CROPGRO Model. In L. AHUJA, V. REDDY, S. SASEENDRAN & Q. YU (Éd.), *Advances in Agricultural Systems Modeling* (p. 59-103). American Society of Agronomy ; Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/advagricsystmodel1.c3>
- BRADOW, J. M., & BAUER, P. J. (2010). Germination and seedling development. In J. M. STEWART, D. M. OOSTERHUIS, J. J. HEITHOLT & J. R. MAUNEY (Éd.), *Physiology of cotton* (p. 48-56). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3195-2_5
- BUDDHABOON, C., JINTRAWET, A., & HOOGENBOOM, G. (2018). Methodology to estimate rice genetic coefficients for the CSM-CERES-Rice model using GENCALC and GLUE genetic coefficient estimators. *The Journal of Agricultural Science*, 156(4), 482-492. <https://doi.org/10.1017/S0021859618000527>
- CARSKY, R. J., SANGINGA, N., SCHULZ, S., & VANLAUWE, B. (2002). Promising practices for sustainable intensified systems in the savannah zone of west africa.
- CASTRO, G. S., CRUSCIOL, C. A., CALONEGO, J. C., & ROSOLEM, C. A. (2015). Management impacts on soil organic matter of tropical soils. *Vadose Zone Journal*, 14(1), vzj2014.07.0093. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.07.0093>
- CHARLEMAGNE, A. D., EDWARD, G., PHILIPPE, D., STÉPHANE, B., & EMMANUEL, S. (2024, décembre 20). What kind of cotton ideotype is adapted to agroecological cropping systems and climate change in Benin ? <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4664351/v1>
- CHIKOWO, R. (2011). Climatic Risk Analysis in Conservation Agriculture in Varied Biophysical and Socio-economic Settings of Southern Africa. <https://www.fao.org/4/i2017e/i2017e00.pdf#>:

- ~:text=This%20network%20paper%20presents%20the%20findings%20of%20a,in%20CA%20under%20varied%20bio-physical%20and%20socio-economic%20conditions.
- CIRAD. (2024, juin 13). *Au Bénin, la transition agroécologique des zones cotonnières prend de l'envergure* [CIRAD]. Récupérée octobre 23, 2024, à partir de <https://www.cirad.fr/les-actualites-du-cirad/actualites/2024/coton-en-agroecologie-au-benin>
- CONSTABLE, G., & BANGE, M. (2015). The yield potential of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) *Field Crops Research*, 182, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.017>
- COOPER, H. V., SJÖGERSTEN, S., LARK, R. M., GIRKIN, N. T., VANE, C. H., CALONEGO, J. C., ROSELEM, C., & MOONEY, S. J. (2021). Long-term zero-tillage enhances the protection of soil carbon in tropical agriculture. *European Journal of Soil Science*, 72(6), 2477-2492. <https://doi.org/10.1111/ejss.13111>
- CORNWELL, W. K., & WEEDON, J. T. (2014). Decomposition trajectories of diverse litter types : a model selection analysis [Publisher : Wiley Online Library]. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(2), 173-182.
- COULIBALY, K., INSTITUT DE L'ENVIRONNEMENT ET DE RECHERCHES AGRICOLES (INERA)/CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE (CNRST), STATION DE FARAKO-BA, 01 BP 910, BOBO DIOULASSO, BURKINA FASO., TRAORE, M., LABORATOIRE DETUDE ET DE RECHERCHE SUR LA FERTILITE DU SOLET LES SYSTEMES DE PRODUCTION (LERF/SP), INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL (IDR), UNIVERSITE NAZI BONI (UNB) BP 1091, BOBO-DIOULASSO, BURKINA FASO., P.K. GOMGNIMBOU, A., INSTITUT DE L'ENVIRONNEMENT ET DE RECHERCHES AGRICOLES (INERA)/CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE (CNRST), STATION DE FARAKO-BA, 01 BP 910, BOBO DIOULASSO, BURKINA FASO., BACYE, B., LABORATOIRE DETUDE ET DE RECHERCHE SUR LA FERTILITE DU SOLET LES SYSTEMES DE PRODUCTION (LERF/SP), INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL (IDR), UNIVERSITE NAZI BONI (UNB) BP 1091, BOBO-DIOULASSO, BURKINA FASO., B. NACRO, H., & LABORATOIRE DETUDE ET DE RECHERCHE SUR LA FERTILITE DU SOLET LES SYSTEMES DE PRODUCTION (LERF/SP), INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL (IDR), UNIVERSITE NAZI BONI (UNB) BP 1091, BOBO-DIOULASSO, BURKINA FASO. (2024). L'association mais-niébé et la restitution organique sont-elles le moteur d'une gestion durable des sols à l'ouest du Burkina Faso? *International Journal of Advanced Research*, 12(9), 1301-1312. <https://doi.org/10.21474/IJAR01/19566>
- CREAMER, N., & BALDWIN, K. (1999). Summer Cover Crops [North Carolina State Extension]. Récupérée mai 19, 2025, à partir de <https://content.ces.ncsu.edu/summer-cover-crops>
- DALGLIESH, N., & FOALE, M. (1998). *Soil Matters : monitoring soil water and nitrogen in dryland farming*. CSIRO, Agricultural Production Systems Research Unit.
- DATA, N. G. E. S. (, & CENTER, I. S. (2024). GPM IMERG Late Precipitation L3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree V07 [Accessed : 2025-05-12]. https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGDF_07/summary
- DATE, R. A., & RATCLIFF, D. (1989). Growth, Nodulation and Nitrogen Fixation in *Stylosanthes* : Effect of Different Root Temperatures at two Shoot Temperatures. *Experimental Agriculture*, 25, 447-460. <https://doi.org/10.1017/s0014479700015088>
- DATTA, A., ULLAH, H., FERDOUS, Z., SANTIAGO-ARENAS, R., & ATTIA, A. (2019, août 13). Water management in cotton. In K. JABRAN & B. S. CHAUHAN (Éd.), *Cotton production* (1^{re} éd., p. 47-59). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119385523.ch3>

- DE CONDAPPA, D., GALLE, S., DEWANDEL, B., & HAVERKAMP, R. (2008). Bimodal zone of the soil textural triangle : common in tropical and subtropical regions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), 33-40. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0343>
- DECKERS, J., OBAME, R. M., & VANCAMPENHOUT, K. (2024). WRB documentation centre FERRALSOLS : lecture notes.
- DEJONG, H. (2018). Soil Compaction.
- DEMBÉLÉ, G., LOISON, R., TRAORÉ, A., DEMBÉLÉ, S. G., & SISSOKO, F. (2024). Optimizing type, date, and dose of compost fertilization of organic cotton under climate change in Mali : A modeling study. *PLOS ONE*, 19(8), e0308736. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0308736>
- DIELS, J., AIHOU, K., IWUAFOR, E., MERCKX, R., VANLAUWE, B., STRUIF BONTKES, T., WOPEREIS, M., for SOIL FERTILITY, I. (C., agricultural DEVELOPMENT), MUSCLE SHOALS, U., centre for AGRICULTURAL, C. (.E. T., & RURAL COOPERATION, N. (2003). Evaluating options for soil organic carbon maintenance under intensive cropping in the West African Savanna using the Rothamsted Carbon (ROTHC) model.
- DUMAS, J. B. A. (1831). Procédes de l'analyse organique. *Annales de Chimie et de Physique*, 47, 198-213.
- DURNER, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*, 30(2), 211-223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/93WR02676>
- DUSSERRE, J. (2001). Incidence d'une réduction de l'éclairement sur les ajustements de puits, la répartition des assimilats carbonés et sur les composantes du rendement et la qualité des fibres de coton à l'échelle de l'organe reproducteur du cotonnier (*Gossypium hirsutum* L.) <https://agritrop.cirad.fr/490837/>
- DUTTA, S. K., NJOROGÉ, S., TANGI, A., MOULAY, H., ZINGORE, S., GHAROUS, M. E., & MAJUMDAR, K. (2020). Nutrient management in conservation agriculture– a special focus on smallholder farmers of south asia and sub-saharan africa. (24).
- EL NADI, A. H., BROUWER, R., & LOCHER, J. T. (1969). Some responses of the root and the shoot of *Vicia faba* plants to water stress. *Neth. J. agric. Sci.*, 17, 133-142.
- ELECTRONIC, L. (2024). *SOIL MOISTURE METER PMS-714* [Fiche technique]. LUTRON ELECTRONIC. Récupérée mai 15, 2024, à partir de <https://www.lutronelectronic.com/database/pdf/PMS-714.pdf>
- ELEMENTAR. (2025). *Organic elemental analyzer vario EL cube - Elementar*. Récupérée août 16, 2025, à partir de <https://www.elementar.com/en/products/organic-elemental-analyzers/vario-el-cube>
- EPIC & APEX models. (s. d.). Récupérée février 17, 2025, à partir de <https://epicapex.tamu.edu/>
- EZANM, a., HALA N'KLO, KESSE FRANÇOIS, KOTOEHOU, KOUADIO NIAMIEN, KOUASSI ALPHONSE, MA RTIN THIBAUD, N'G UESSAN E SSOI, OCHOU G ERMAIN, OURAGA YOUNGO, TOURE YAYA & VIOT CHRISTOPHER. (1998, avril). Culture du coton manuel technique. https://agritrop.cirad.fr/300355/1/ID_300355.pdf
- FANG, H., LI, W., WEI, S., & JIANG, C. (2014). Seasonal variation of leaf area index (LAI) over paddy rice fields in NE china : intercomparison of destructive sampling, LAI-2200, digital hemispherical photography (DHP), and AccuPAR methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198-199, 126-141. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.005>
- FAO. (2025). Récupérée mars 29, 2025, à partir de <https://www.fao.org/conservation-agriculture/en/>

- FEEDIPEDIA. (s. d.). Feedipedia [Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO]. Récupérée mai 19, 2025, à partir de <https://www.feedipedia.org/node/12026>
- FÉLIX, G. F., DIEDHIOU, I., LE GARFF, M., TIMMERMAN, C., CLERMONT-DAUPHIN, C., Cournac, L., GROOT, J. C., & TITTONELL, P. (2018). Use and management of biodiversity by smallholder farmers in semi-arid West Africa. *Global Food Security*, 18, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.08.005>
- FOHRER, N., BERKENHAGEN, J., HECKER, J.-M., & RUDOLPH, A. (1999). Changing soil and surface conditions during rainfall : Single rainstorm/subsequent rainstorms. *CATENA*, 37(3), 355-375. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00026-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00026-0)
- FOOD & OF THE UNITED NATIONS, A. O. (2005). *Rapport sur les ressources en sols du monde - 98* (rapp. tech.) (Consulté le 28 mai 2025). FAO. <https://www.fao.org/4/y3948f/y3948f05.htm>
- FRANCAVIGLIA, R., ALMAGRO, M., & VICENTE-VICENTE, J. (2023). Conservation Agriculture and Soil Organic Carbon : Principles, Processes, Practices and Policy Options. *Soil Systems*. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017>
- GENTILE, R., VANLAUWE, B., CHIVENG, P., & SIX, J. (2011). Trade-offs between the short- and long-term effects of residue quality on soil C and N dynamics. *Plant and Soil*, 338(1), 159-169. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0360-z>
- GIBB, D., NEILSEN, J., & CONSTABLE, G. (2012). 3.1 cotton growth responses to water stress.
- GIJSMAN, A. J., HOOGENBOOM, G., PARTON, W. J., & KERRIDGE, P. C. (2002). Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter–residue module from CENTURY. *Agronomy Journal*, 94(3), 462-474. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.4620>
- GUO, X., ZHANG, Z., SUN, G., XIONG, S., HAN, Y., WANG, G., LI, C., LI, Y., ZHANG, Y., & WANG, Z. (2023). Relay intercropping cover crop combined with reduced nitrogen application improves subsequent cotton agronomic traits while maintaining yield and quality. *Crop Science*, 63(4), 2475-2490. <https://doi.org/10.1002/csc2.20991>
- HAMAL, K., SHARMA, S., KHADKA, N., BANIYA, B., ALI, M., SHRESTHA, M. S., XU, T., SHRESTHA, D., & DAWADI, B. (2020). Evaluation of MERRA-2 Precipitation Products Using Gauge Observation in Nepal. *Hydrology*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/hydrology7030040>
- HANDISO, M. A., HEMACHO, A. H., BONGIDO, B. L., & ANJULO, M. M. (2023). Effect of conservation tillage on soil and water conservation, yield and yield components of maize (zea mays l.) in south ari district, southern ethiopia. *Discover Agriculture*, 1(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s44279-023-00008-9>
- HAUCHART, V. (2005). *Culture du coton et dégradation des sols dans le Mouhoun (Burkina Faso)* [thèse de doct.].
- HAYASHI, K., ABDOULAYE, T., GERARD, B., & BATIONO, A. (2008). Evaluation of application timing in fertilizer micro-dosing technology on millet production in niger, west africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 80(3), 257-265. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9141-3>
- HE, J., PORTER, C., WILKENS, P., & JONES, J. W. (2017). *Glue Users Guide* (Version 4.7) [2025-05-31]. <https://usermanual.wiki/Document/Glue20Users20Guide20Version2047.1359076516.pdf>
- HEISS, N., MEIER, J., GESSNER, U., & KUENZER, C. (2025). A Review : Potential of Earth Observation (EO) for Mapping Small-Scale Agriculture and Cropping Systems in West Africa. *Land*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/land14010171>

- HENDRIKS, C., SHRIVASTAVA, V., SIGURNJAK, I., LESSCHEN, J., MEERS, E., NOORT, R., YANG, Z., & RIETRA, R. (2021). Replacing Mineral Fertilisers for Bio-Based Fertilisers in Potato Growing on Sandy Soil : A Case Study. *Applied Sciences*, 12, 341. <https://doi.org/10.3390/app12010341>
- HULUGALLE, N., & MAURYA, P. (1991). Tillage systems for the west african semi-arid tropics. *Soil and Tillage Research*, 20(2), 187-199. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(91\)90039-Z](https://doi.org/10.1016/0167-1987(91)90039-Z)
- HUNT, L. A., PARARAJASINGHAM, S., JONES, J. W., HOOGENBOOM, G., IMAMURA, D. T., & OGOSHI, R. M. (1993). GENCALC : Software to Facilitate the Use of Crop Models for Analyzing Field Experiments. *Agronomy Journal*, 85(5), 1090-1094.
- HUTMACHER, R. B., VARGAS, R. N., WRIGHT, S. D., & ROBERTS, B. A. (2003). Harvest aid materials and practices for california cotton. *Agriculture and Natural Resources*.
- IBRAHIM, A., ABAIDOO, R. C., FATONDI, D., & OPOKU, A. (2015). Hill placement of manure and fertilizer micro-dosing improves yield and water use efficiency in the sahelian low input millet-based cropping system. *Field Crops Research*, 180, 29-36. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.04.022>
- IGUE, A. M., A. SAIDOU, A. ADJANOHOUN, G. EZUI, P. ATTIOGBE, G. KPAGBIN, GOTOECHAN-HODONOU, S. YOUL, T. PARE, I. BALOGOUN, J. OUEDRAOGO, E. DOSSA & J. M. SOGBEDJI. (2013, janvier). Evaluation de la fertilité des sols au sud et centre du Bénin - Numéro spécial Fertilité du maïs. https://www.slire.net/download/1798/igue_et_al._evaluation_fertilit_.pdf
- ILM. (s. d.). *Modèle STICS - Site web AGROCLIM*. Récupérée février 17, 2025, à partir de <https://agroclim.paca.hub.inrae.fr/services-et-outils/modelisation/modele-stics>
- INTERFACES. (2008). sustainable-landmanagement-africa.net. https://sustainable-landmanagement-africa.net/wp-content/uploads/2024/09/Blog-8_Fertilizer-Microdosing-1.pdf
- JABRO, J., W. B. STEVENS, R. G. EVANS & W. M. IVERSEN. (2009). Tillage effects on physical properties in two soils of the northern great plains. *Applied Engineering in Agriculture*, 25(3), 377-382. <https://doi.org/10.13031/2013.26889>
- JASKULSKA, I., ROMANECKAS, K., JASKULSKI, D., GAŁĘZEWSKI, L., BREZA-BORUTA, B., DĘBSKA, B., & LEMANOWICZ, J. (2020). Soil properties after eight years of the use of strip-till one-pass technology. *Agronomy*, 10(10), 1596. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101596>
- JONES, J., HOOGENBOOM, G., PORTER, C., BOOTE, K., BATCHELOR, W., HUNT, L., WILKENS, P., SINGH, U., GIJSMAN, A., & RITCHIE, J. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
- JORDAN, W. R., & RITCHIE, J. T. (1971). Influence of soil water stress on evaporation, root absorption, and internal water status of cotton. *Plant Physiology*, 48(6), 783-788. <https://doi.org/10.1104/pp.48.6.783>
- JOSIAS SANOU, BABOU ANDRÉ BATIONO, JOSIAS SANOU, J. SANOU, J. SANOU, JOSIAS SANOU, JOSIAS SANOU, SILAMANA BARRY, BABOU ANDRÉ BATIONO, SILAMANA BARRY, LOYEHOUN DOROTHÉE NABIE, LOYEHOUN DOROTHÉE NABIE, JULES BAYALA, JULES BAYALA, ROBERT B. ZOUGMORÉ & ROBERT B. ZOUGMORÉ. (2016). Combining soil fertilization, cropping systems and improved varieties to minimize climate risks on farming productivity in northern region of Burkina Faso. *Agricultural and Food Science*. <https://doi.org/10.1186/s40066-016-0067-3>

- KARIMOU, R. I., ESPÉRANCE NAZAIRE BIAOU, PROF. ISMAIL M. MOUMOUNI & TEATSKE BAKKER. (2024). La tractorisation et ses enjeux en zone cotonnière du nord Bénin. *Sur la piste des transitions agroécologiques. Quels chemins parcourus ?*
- KARLEN, D. L., WOLLENHAUPT, N. C., ERBACH, D. C., BERRY, E. C., SWAN, J. B., EASH, N. S., & JORDAHL, J. L. (1994). Long-term tillage effects on soil quality. *Soil and Tillage Research*, 32(4), 313-327. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)00427-G](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)00427-G)
- KEATING, B., CARBERRY, P., HAMMER, G., PROBERT, M., ROBERTSON, M., HOLZWORTH, D., HUTH, N., HARGREAVES, J., MEINKE, H., HOCHMAN, Z., MCLEAN, G., VERBURG, K., SNOW, V., DIMES, J., SILBURN, M., WANG, E., BROWN, S., BRISTOW, K., ASSENG, S., ... SMITH, C. (2003). An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18(3), 267-288. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)
- KHAEMBA, M. (2011). Innovations as Key to the Green Revolution in Africa. In *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa - Vol. 1 : Exploring the Scientific Facts* (p. 1339). Springer Science+Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_1
- KIMOU, S. H., KONÉ, T., COULIBALY, N. D., & KONÉ, M. (2023). Efficacité de l'association maïs [*Zea mays* (L.) (Poaceae)] et niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp (Fabaceae)] sur la fertilité chimique du sol au Sud de la Côte d'Ivoire. *Journal of Applied Biosciences*, 20286-20294. <https://doi.org/10.35759/JABs.191.9>
- KIRUI, O. (2019). The agricultural mechanization in africa : micro-level analysis of state drivers and effects [Publisher : Elsevier BV]. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3368103>
- KO, J., PICCINNI, G., MAREK, T., & HOWELL, T. (2009). Determination of growth-stage-specific crop coefficients (kc) of cotton and wheat. *Agricultural Water Management*, 96(12), 1691-1697. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.023>
- KUSHWAH, S., DOTANIYA, M., UPADHYAY, A., S, R., COUMAR, V., KUNDU, S., & RAO, A. (2014). Assessing Carbon and Nitrogen Partition in Kharif Crops for Their Carbon Sequestration Potential. *National Academy Science Letters*. <https://doi.org/10.1007/s40009-014-0230-y>
- LAIBI, A. B., GOMINA, M., SORGHO, B., SAGBO, E., BLANCHART, P., BOUTOUIL, M., & SOHOUNHLOULE, D. K. (2017). Caractérisation physico-chimique et géotechnique de deux sites argileux du Bénin en vue de leur valorisation dans l'éco-construction. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(1), 499. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i1.40>
- LAWAL, H. M., & LAWAL, A. (2017). PORE SIZE DISTRIBUTION AND SOIL HYDRO PHYSICAL PROPERTIES UNDER DIFFERENT TILLAGE PRACTICES AND COVER CROPS IN a TYPIC HAPLUSULT IN NORTHERN NIGERIA. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(1). <https://doi.org/10.56369/tsaes.2263>
- LEE, J.-T., LEE, G.-J., RYU, J.-S., HWANG, S.-W., PARK, S. H., ZHANG, Y., & JUNG, Y.-S. (2011). Application of Reduce Tillage with a Strip Tiller and its Effect on Soil Erosion Reduction in Chinese Cabbage Cultivation [Publisher :]. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 44(6), 970-976.
- LEEuw, P. N. d., MOHAMED-SALEEM, M. A., NYAMU, A. M., & INTERNATIONAL LIVESTOCK CENTRE FOR AFRICA (Éd.). (1994). *Stylosanthes as a forage and fallow crop : proceedings of the regional workshop on the use of stylosanthes in west africa, held in kaduna, nigeria, 26-31 october 1992* [Meeting Name : Regional Workshop on the Use of Stylosanthes in West Africa]. International Livestock Centre for Africa.

- LEGATES, D. R., & MCCABE, G. J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233-241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>
- LELEI, J. (2011). Innovations as Key to the Green Revolution in Africa. In *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa - Vol. 1 : Exploring the Scientific Facts* (p. 1339). Springer Science+Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_1
- LI, Y., CUI, S., CHANG, S. X., & ZHANG, Q. (2019). Liming effects on soil pH and crop yield depend on lime material type, application method and rate, and crop species : a global meta-analysis. *Journal of Soils and Sediments*, 19(3), 1393-1406. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2120-2>
- LI, Z., HE, J., XU, X., JIN, X., HUANG, W., CLARK, B., YANG, G., & LI, Z. (2018a). Estimating genetic parameters of DSSAT-CERES model with the GLUE method for winter wheat (*triticum aestivum* l.) production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 213-221. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.009>
- LI, Z., HE, J., XU, X., JIN, X., HUANG, W., CLARK, B., YANG, G., & LI, Z. (2018b). Estimating genetic parameters of DSSAT-CERES model with the GLUE method for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 213-221. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.009>
- LIBRARY, C. D. (2020). CABI Digital Library [Consulté le 19 mai 2025]. <https://doi.org/https://www.cabidigitallibrary.org/doi/epdf/10.5555/202033545198>
- LI-ZHEN, Z., WEI-XING, C., SI-PING, Z., ZHI-GUO, Z., & (1 MOA KEY LABORATORY OF CROP GROWTH REGULATION, NANJING AGRICULTURAL UNIVERSITY, NANJING 210095, CHINA). (2005). CHARACTERIZING ROOT GROWTH AND SPATIAL DISTRIBUTION IN COTTON. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 29(2), 266-273. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2005.0034>
- LOISON, R., AUDEBERT, A., DEBAEKE, P., & GÉRARDEAUX, E. (2016). Design of african rainfed cotton ideotypes using dssat cropgro-cotton.
- LOPEZ, A. (2016). CMIP5 daily data on single levels. <https://doi.org/10.24381/CDS.D3513DBF>
- LÖWIK, E. (2023). *Estimating soybean harvest index and nitrogen concentrations of grain and residue using globally available data* [MSc Thesis]. Wageningen University.
- LÚCIO, A. D., HAESBAERT, F. M., SANTOS, D., SCHWERTNER, D. V., & BRUNES, R. R. (2012). Tamanhos de amostra e de parcela para variáveis de crescimento e produtivas de tomateiro. *Horticultura Brasileira*, 30(4), 660-668. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000400016>
- MA, F., WANG, Y., YAN, P., WEI, F., DUAN, Z., YANG, Z., & LIU, J. (2021). Effect of cotton residues incorporation on soil properties, organic nitrogen fractions, and nitrogen-mineralizing enzyme activity under long-term continuous cotton cropping. *PeerJ*. <https://doi.org/10.7717/peerj.11053>
- MAHDI AL-KAISI. (2004). Frequent tillage and its impact on soil quality [Iowa State University]. *IC-492(13)*, 78-79. Récupérée mars 30, 2025, à partir de <https://crops.extension.iastate.edu/encyclopedia/frequent-tillage-and-its-impact-soil-quality>
- MAJUMDAR, K., SANYAL, S. K., DUTTA, S. K., SATYANARAYANA, T., & SINGH, V. K. (2016). Nutrient Mining : Addressing the Challenges to Soil Resources and Food Security. In U. SINGH, C. S. PRAHARAJ, S. S. SINGH & N. P. SINGH (Éd.), *Biofortification of Food Crops* (p. 177-198). Springer India. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2716-8_14

- MALIK, W., BOOTE, K. J., HOOGENBOOM, G., CAVERO, J., & DECHMI, F. (2018). Adapting the CROPGRO Model to Simulate Alfalfa Growth and Yield. *Agronomy Journal*, 110(5), 1777-1790. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj2017.12.0680>
- MANLAY, R. J., CHOTTE, J.-L., MASSE, D., LAURENT, J.-Y., & FELLER, C. (2007). Carbon, Nitrogen & Phosphorus Allocation in Agro-ecosystems of a West African Savanna - III. The Plant & Soil Components Under Continuous Cultivation. *Submitted to Agriculture Ecosystems & Environment*.
- MBAYE, A. KANE, MBAYE, A. KANE, ABOUBACRY KANE, MOMAR TALLA GUÈYE, MOUSTAPHA GUEYE, MADIOP GUEYE, CÉSAR BASSÈNE, CÉSAR BASSENE, NENAD BAN, C. BASSENE, N BAN, DOUDOU DIOP, DOUDOU DIOP, S.N. SYLLA, D DIOP, SN SYLLA, KANDIOURA NOBA, ... KANDIOURA NOBA. (2014). Date et densité optimales de semis du niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.] en association avec le mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] *Journal of Applied Biosciences*. <https://doi.org/10.4314/jab.v76i1.4>
- MCH, W. (2017). *Data Soil DSSAT* [Accessed online at <https://fr.scribd.com/document/439937170/data-soil-DSSAT?>].
- McMICHAEL, B. (1986). Growth of Roots [Consulté le 20 mai 2025]. In J. MAUNEY & J. M. STEWART (Éd.), *Cotton Physiology* (p. 29-54). The Cotton Foundation. <https://www.cotton.org/foundation/reference-books/cotton-physiology/upload/COTTON-PHYSIOLOGY-Chapter-3.pdf>
- MECHICHE-ALAMI, A., & ABDI, A. (2020). Agricultural productivity in relation to climate and cropland management in West Africa. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59943-y>
- MÉNARD, L. (2018). MISSION D'APPUI EN DIAGNOSTIC ET SANTÉ DES SOLS AUPRÈS DE LA PLATEFORME NATIONALE DES ORGANISATIONS PAYSANNES ET DE PRODUCTEURS AGRICOLES DU BÉNIN DU 28 AVRIL AU 31 MAI 2018.
- METER GROUP, INC. (2022a). *HYPROP User Manual* [Consulté le 8 mai 2025]. METER Group, Inc. Pullman, WA, USA. https://library.metergroup.com/Manuals/18263_HYPROP_Manual_Web.pdf
- METER GROUP, INC. (2022b). *LABROS SoilView Analysis for HYPROP – User Manual* [Consulté le 8 mai 2025]. METER Group, Inc. Pullman, WA, USA. https://publications.metergroup.com/Manuals/20868_LABROS-SoilView-Analysis-for-HYPROP_Manual_Web.pdf
- METER GROUP, INC. (2024). *KSAT – Saturated Hydraulic Conductivity Instrument* [Consulté le 8 mai 2025]. https://metergroup.com/products/ksat/Models_Overview [DSSAT]. (2025). Récupérée février 17, 2025, à partir de <https://dssat.net/models-overview/>
- MORGAN, K. T., JONES, J. W., SCHOLBERG, J. M. S., & BOOTE, K. J. (2003). Paper number 033071 [Presented at the 2003 ASAE Annual Meeting]. *2003 ASAE Annual Meeting*. <https://doi.org/10.13031/2013.15003>
- MOSELEY, W. G., CARNEY, J., & BECKER, L. (2010). Neoliberal policy, rural livelihoods, and urban food security in West Africa : A comparative study of The Gambia, Côte d'Ivoire, and Mali. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(13), 5774-5779. <https://doi.org/10.1073/pnas.0905717107>
- MUEHLIG-VERSEN, B., BUERKERT, A., BATIONO, A., & ROEMHELD, V. (2003). PHOSPHORUS PLACEMENT ON ACID ARENOSOLS OF THE WEST AFRICAN SAHEL. *Experimental Agriculture*, 39(3), 307-325. <https://doi.org/10.1017/S0014479703001261>

- MULLINS, G., & BURMESTER, C. (2010). Relation of Growth and Development to Mineral Nutrition. In J. M. STEWART, D. M. OOSTERHUIS, J. J. HEITHOLT & J. R. MAUNEY (Éd.), *Physiology of Cotton* (p. 97-105). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3195-2_9
- MUPANGWA, W., THIERFELDER, C., CHEESMAN, S., NYAGUMBO, I., MUONI, T., MHLANGA, B., MWILA, M., SIDA, T. S., & NGWIRA, A. (2020). Effects of maize residue and mineral nitrogen applications on maize yield in conservation-agriculture-based cropping systems of Southern Africa. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 35(3), 322-335. <https://doi.org/10.1017/S174217051900005X>
- MYAKA, F., SAKALA, W., ADU-GYAMFI, J., MAFONGOYA, P., & CHIRWA, M., R.M. anduddin. (2006). Yields and accumulations of N and P in farmer-managed intercrops of maize–pigeonpea in semi-arid Africa. *Plant and Soil*, 285, 207-220. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9006-6>
- MYERS, R. (1980). The root system of a grain sorghum crop. *Field Crops Research*, 3, 53-64. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(80\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0378-4290(80)90007-6)
- NAAB, J., MAHAMA, G., KOO, J., ASARE, R., ISSAKA, R., & SINGH, A. (2015). Nitrogen and phosphorus fertilization with crop residue retention enhances crop productivity, soil organic carbon, and total soil nitrogen concentrations in sandy-loam soils in Ghana. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 102(1), 33-43. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9675-8>
- NAAB, MAHAMA, G. Y., YAHAYA, I., & PRASAD, P. V. V. (2017). Conservation agriculture improves soil quality, crop yield, and incomes of smallholder farmers in north western ghana. *Frontiers in Plant Science*, 8, 996. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00996>
- NABI, G., & MULLINS, C. (2008). Soil temperature dependent growth of cotton seedlings before emergence. *Pedosphere*, 18(1), 54-59. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(07\)60102-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60102-7)
- NANA, P., ANDRIEU, N., ZERBO, I., OUÁDRAOGO, Y., & LE GAL, P.-Y. (2015). Conservation agriculture and performance of farms in West Africa [Agriculture de conservation et performances des exploitations agricoles en Afrique de l'Ouest]. *Cahiers Agricultures*, 24(2), 113-122. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0743>
- NATIONAL COTTON COUNCIL AMERICA. (2025). Growth and Development of a Cotton Plant. <https://www.cotton.org/tech/ace/links.cfm>
- NELSON, V., & SMITH, S. (2011). *FAIRTRADE COTTON : ASSESSING IMPACT IN MALI, SENEGAL, CAMEROON AND INDIA*. https://www.fairtrade.org.uk/wp-content/uploads/legacy/Fairtrade_Cotton_Assessing_Impact_in_Mali__Senegal__Cameroon_and_India.pdf
- NEPAD, A. (2023). Addressing Africa's soil health challenges through the ten-year African Fertilizer and Soil Health Action Plan (2024-2034) and the longer-term Soil Initiative for Africa Framework. <https://www.nepad.org/publication/briefing-note-addressing-africas-soil-health-challenges-through-ten-year-african>
- N'GOYE, G. C. B., EGAH, J., & BACO, M. N. (2022). From Structuring Cotton Fields to Restructuring Farming Families : Social and Environmental Transformation in Northern Benin. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*, 340-351. <https://doi.org/10.9734/ajaees/2022/v40i111720>
- NICOU, R., & CHARREAU, C. (1986). Appropriate Technologies for Farmers in Semi-Arid Africa. *Soil tillage and water conservation in semi-arid West Africa*.
- NILES, G. A. (1958). Cotton (3rd edition) : by harry bates brown and jacob osborn ware. McGraw-hill book co., inc., 330 w. 42 st., new york. 1958. 566 p., illus. \$12.00. *Agronomy Journal*, 50(8). <https://doi.org/10.2134/agronj1958.00021962005000080030x>

- NRCS, U. (2003). Sunn hemp : A cover crop for southern and tropical farming systems [Soil Quality – Agronomy Technical Note No. 10. Washington, DC.]. https://plants.usda.gov/DocumentLibrary/plantguide/pdf/pg_crju.pdf
- NYAGUMBO, I., MKUHLANI, S., MUPANGWA, W., & RODRIGUEZ, D. (2017). Planting date and yield benefits from conservation agriculture practices across southern africa. *Agricultural Systems*, 150, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.09.016>
- OGUNWOLE, J. O., IWUAFOR, E. N. O., ECHE, N. M., & DIELS, J. (2010). EFFECT OF ORGANIC AND INORGANIC SOIL AMENDMENTS ON SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES IN a WEST AFRICA SAVANNA AGROECOSYSTEM.
- OKEBALAMA, C. B., SAFO, E. Y., YEBOAH, E., ABAIDOO, R. C., & LOGAH, V. (2016). Fertilizer microdosing in the humid forest zone of ghana : an efficient strategy for increasing maize yield and income in smallholder farming. *Soil Science Society of America Journal*, 80(5), 1254-1261. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.03.0065>
- OLSON, K., & AL-KAISI, M. (2015). The importance of soil sampling depth for accurate account of soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss. *CATENA*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.004>
- ONDURU, D. D., DE JAGER, A., & GACHINI, G. N. (2005). The hidden costs of soil mining to agricultural sustainability in developing countries : a case study of machakos district, eastern kenya [Publisher : Informa UK Limited]. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 3(3), 167-176. <https://doi.org/10.1080/14735903.2005.9684754>
- OOSTERHUIS, D. M., & COTHEREN, J. T. (2012). Flowering and fruiting in cotton.
- ORDÓÑEZ, R. A., ARCHONTOULIS, S. V., MARTINEZ-FERIA, R., HATFIELD, J. L., WRIGHT, E. E., & CASTELLANO, M. J. (2020). Root to shoot and carbon to nitrogen ratios of maize and soybean crops in the US Midwest. *European Journal of Agronomy*, 120, 126130. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126130>
- ORSTOM. (1977). CARTE PEDOLOGIQUE DE RECONNAISSANCE de la République Populaire du Bénin.
- OSUNBITAN, J., OYEDELE, D., & ADEKALU, K. (2005). Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern nigeria. *Soil and Tillage Research*, 82(1), 57-64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.05.007>
- OTT, H.-N. K.
bibinitperiod L. (2023, février 24). *NASA Scientific Visualization Studio / OCO-2 Gridded Global Carbon Dioxide (CO)* [NASA Scientific Visualization Studio]. Récupérée avril 28, 2025, à partir de <https://svs.gsfc.nasa.gov/5022/>
- OUEDRAOGO, Y., TAONDA, J.-B. S., SERMÉ, I., TYCHON, B., & BIELDERS, C. L. (2022). Drivers of sorghum response to fertilizer microdosing on smallholder farms across burkina faso. *Field Crops Research*, 288, 108709. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108709>
- OUÉDRAOGO, E., MANDO, A., & STROOSNIJDER, L. (2006). Effects of tillage, organic resources and nitrogen fertiliser on soil carbon dynamics and crop nitrogen uptake in semi-arid west africa. *Soil and Tillage Research*, 91(1), 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.004>
- OYDE, I. (2023). Etat du climat de l'année 2023 au Bénin.
- PALÉ, S., MASON, S., JEAN-BAPTISTE, S., SERME, I., & ADAMA, S. (2021). SORGHUM GRAIN AND STOVER NUTRIENT CONCENTRATIONS AS INFLUENCED BY TILLAGE, CROPPING SYSTEM AND SOIL AMENDMENT. *International Journal of Agriculture Environment and Biotechnology*, 6, 184-198. <https://doi.org/10.35410/IJAEB.2021.5637>

- PEREIRA. (1998). FAO irrigation and drainage paper.
- PEREIRA, H., MESCHIATTI, M., PIRES, R., & BLAIN, G. (2018). On the performance of three indices of agreement : an easy-to-use r-code for calculating the Willmott indices. *Bragantia*, 77. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017054>
- PETERS, A., TIAN, Z., HEITMAN, J. L., IDEN, S. C., ROLFES, L., GERMER, K., & LORENZ, M. (2025). Modeling compaction effects on soil water retention across the full moisture range : calibration and validation. *Vadose Zone Journal*, 24(1), e70004. <https://doi.org/10.1002/vzj2.70004>
- PETTIGREW, W., & GERIK, T. (2007). Cotton leaf photosynthesis and carbon metabolism. In *Advances in agronomy* (p. 209-236, T. 94). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)94005-X](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)94005-X)
- PITTELKOW, C. M., LIANG, X., LINQUIST, B. A., van GROENIGEN, K. J., LEE, J., LUNDY, M. E., van GESTEL, N., SIX, J., VENTEREA, R. T., & van KESSEL, C. (2015). Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture. *Nature*, 517(7534), 365-368. <https://doi.org/10.1038/nature13809>
- PORTER. (2018, janvier). [Q] Soil layer options. Récupérée mai 31, 2025, à partir de <https://dssat.net/2575/>
- PORTER, JONES, J. W., ADIKU, S., GIJSMAN, A. J., GARGIULO, O., & NAAB, J. B. (2010). Modeling organic carbon and carbon-mediated soil processes in DSSAT v4.5. *Operational Research*, 10(3), 247-278. <https://doi.org/10.1007/s12351-009-0059-1>
- POTOPOVÁ, V., CHAUDHERRY, M. R. A., MUNTEAN, N., HOOGENBOOM, G., BOOTE, K. J., & MUSIOLKOVÁ, M. (2023). *Metodika simulace produkce plodin, hospodaření s vodou a živinami, klimatických rizik a environmentální udržitelnosti v DSSAT*. Česká zemědělská univerzita v Praze.
- POUREBRAHIMI FOUMANI, M., YIN, X., FU, J. S., YANG, C.-E., & ADOTEY, R. (2025). Impact of future climate from different general circulation models on cotton yield predictions in north cotton belt through crop simulation with DSSAT. *Field Crops Research*, 322, 109719. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109719>
- POWER, N. P. O. W. E. R. (2024). NASA POWER Data Access Viewer [Accessed : 2025-05-12]. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/?dataAccessMethod=DAV>
- PRIESTLEY, C. H. B., & TAYLOR, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- RABI, H. M. L., SALIOU NDIAYE, ALIOU GUISSÉ, DIALLO DJIBRIL, ALIOUNE BADARA DIEYE & PAPA SALIOU SARR. (2022). Effect of microdose chemical fertilization method on soil chemical properties and productivity of maize (*Zea mays* L.) in West-Central Senegal. *International Journal of Life Science Research Archive*, 3(2), 176-185. <https://doi.org/10.53771/ijlsra.2022.3.2.0140>
- RASBAND, W. S., & NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. (2012). *ImageJ User Guide* [Consulté le 8 mai 2025]. <https://imagej.net/ij/docs/guide/>
- RAVELOJAONA, N., JÉGO, G., ZIADI, N., MOLLIER, A., LAFOND, J., KARAM, A., & MOREL, C. (2023). STICS soil-crop model performance for predicting biomass and nitrogen status of spring barley cropped for 31 years in a gleysolic soil from northeastern quebec (canada). *Agronomy*, 13(10), 2540. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102540>

- REDDY, K., REDDY, V. R., & HODGES, H. (1992). Temperature effects on early season cotton growth and development. *Agronomy Journal*, 84(2), 229-237. <https://doi.org/10.2134/agronj1992.00021962008400020021x>
- REHMAN, A., & FAROOQ, M. (2019, août 13). Morphology, physiology and ecology of cotton. In K. JABRAN & B. S. CHAUHAN (Éd.), *Cotton production* (1^{re} éd., p. 23-46). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119385523.ch2>
- REICHENBACH, M., FIENER, P., GARLAND, G., GRIEPENTROG, M., SIX, J., & DOETTERL, S. (2021). The role of geochemistry in organic carbon stabilization against microbial decomposition in tropical rainforest soils. *SOIL*, 7(2), 453-475. <https://doi.org/10.5194/soil-7-453-2021>
- RITCHIE, J. T. (1972). Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8(5), 1204-1213. <https://doi.org/10.1029/WR008i005p01204>
- ROMÁN-VÁZQUEZ, J., CARBONELL-BOJOLLO, R. M., VEROZ-GONZÁLEZ, Ó., MARASCHI DA SILVA PILETTI, L. M., MÁRQUEZ-GARCÍA, F., CABEZA-RAMÍREZ, L. J., & GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, E. J. (2025). Global trends in conservation agriculture and climate change research : a bibliometric analysis. *Agronomy*, 15(1), 249. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010249>
- SALIOU, I., ZANNOU, A., AOUDJI, A., & HONLONKOU, A. (2020). Drivers of mechanization in cotton production in Benin, West Africa. *Agriculture (Switzerland)*, 10(11), 1-13. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110549>
- SANCHEZ, P. A. (2019, janvier 10). *Properties and Management of Soils in the Tropics* (2^e éd.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316809785>
- SANCHEZ, P. A., SHEPHERD, K. D., SOULE, M. J., PLACE, F. M., BURESH, R. J., IZAC, A.-M. N., UZO MOKWUNYE, A., KWESIGA, F. R., NDIRITU, C. G., & WOOMER, P. L. (2015, octobre 26). Soil Fertility Replenishment in Africa : An Investment in Natural Resource Capital [ISSN : 2165-9826]. In *SSSA Special Publications* (p. 1-46). Soil Science Society of America American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub51.c1>
- SARR, P. S., M. DIOUF, MARIAMA DALANDA DIALLO, MACOUMBA DIOUF, SALIOU NDIAYE, MARIAMA DALANDA DIALLO, SALIOU NDIAYE, ROUGUIYATOU DIA, ALIOU GUISSÉ, ROUGUIYATOU DIA, ALIOU GUISSÉ, TAKEO YAMAKAWA, ALIOU GUISSÉ, ALIOU GUISSÉ, TAKEO YAMAKAWA &. (2013). Effects of Different Types of Litters and Fertilizer Application on Growth and Productivity of Maize (*Zea mays* L. var. Across 86 Pool 16) in Senegal. *Journal of The Faculty of Agriculture Kyushu University*.
- SASEENDRAN, S. A., NIELSEN, D. C., MA, L., & AHUJA, L. R. (2010). Adapting CROPGRO for Simulating Spring Canola Growth with Both RZWQM2 and DSSAT 4.0. *Agronomy Journal*, 102(6), 1606-1621. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj2010.0277>
- SAU, F., BOOTE, K. J., MCNAIR BOSTICK, W., JONES, J. W., & INÉS MÍNGUEZ, M. (2004). Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models. *Agronomy Journal*, 96(5), 1243-1257. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1243>
- SAUERBORN, J., SPRICH, H., & MERCER-QUARSHIE, H. (2000). Crop rotation to improve agricultural production in sub-saharan africa. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 184(1), 67-72. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2000.00368.x>
- SAWYER, J. E., & BARKER, B. (2023). Nutrient Removal When Harvesting Corn Stover [Iowa State University Extension and Outreach].
- SAXTON, K. E., & RAWLS, W. J. (2006). Estimating Generalized Soil Water Characteristics from Soil Texture, Climate, and Land Use. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117>

- SCANLON, B. R., CHRISTMAN, M., REEDY, R. C., PORRO, I., SIMUNEK, J., & FLERCHINGER, G. N. (2002). Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions. *Water Resources Research*, 38(12). <https://doi.org/10.1029/2001WR001233>
- SCHINDLER, U. (1980). Ein schnellverfahren zur messung der wasserleitfähigkeit im teilgesättigten boden an stechzylinderproben.
- SHELIA, V., ŠIMŮNEK, J., BOOTE, K., & HOOGENBOOM, G. (2018). Coupling DSSAT and HYDRUS-1d for simulations of soil water dynamics in the soil-plant-atmosphere system. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66(2), 232-245. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0055>
- SOLDEVILLA-MARTINEZ, M., LÓPEZ-URREA, R., MARTÍNEZ-MOLINA, L., QUEMADA, M., & LIZASO, J. (2013). Improving simulation of soil water balance using lysimeter observations in a semiarid climate. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 534-542. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.060>
- STEPHEN MASON, STEPHEN C. MASON, KORODJOUMA OUATTARA, SIBIRI JEAN-BAPTISTE TAONDA, KORODJOUMA OUATTARA, SIBIRI JEAN-BAPTISTE TAONDA, SIÉBOU PALÉ, SOHORO ADAMA, S. PALÉ, DANIEL KABORÉ, ADAMA SOHORO & DANIEL KABORE. (2015). Soil and cropping system research in semi-arid West Africa as related to the potential for conservation agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*. <https://doi.org/10.1080/14735903.2014.945319>
- STORIE, R. E. (1957). Methods of Chemical Analysis for Soil Survey Samples. *Agronomy Journal*, 49(4), NP-NP. <https://doi.org/https://doi.org/10.2134/agronj1957.00021962004900040024x>
- SUBBARAO, G. V., RENARD, C., PAYNE, W. A., & BATIONO, A. (2000). LONG-TERM EFFECTS OF TILLAGE, PHOSPHORUS FERTILIZATION AND CROP ROTATION ON PEARL MILLET–COWPEA PRODUCTIVITY IN THE WEST-AFRICAN SAHEL. *Experimental Agriculture*, 36(2), 243-264. <https://doi.org/10.1017/S0014479700002106>
- SULTAN, B., DEFRANCE, D., & IIZUMI, T. (2019). Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49167-0>
- SULTAN, B., & GAETANI, M. (2016). Agriculture in West Africa in the twenty-first century : Climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01262>
- SWAC [SWAC]. (2024). Récupérée mars 29, 2025, à partir de <https://www.oecd.org/en/about/directorates/sahel-and-west-africa-club.html>
- SWANEPOEL, C., RÖTTER, R., VAN DER LAAN, M., ANNANDALE, J., BEUKES, D., DU PREEZ, C., SWANEPOEL, L., VAN DER MERWE, A., & HOFFMANN, M. (2018). The benefits of conservation agriculture on soil organic carbon and yield in southern africa are site-specific. *Soil and Tillage Research*, 183, 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.016>
- TABO, R., BATIONO, A., AMADOU, B., MARCHAL, D., LOMPO, F., GANDAH, M., HASSANE, O., DIALLO, M., NDJEUNGA, J., FATONDJI, D., GERARD, B., SOGODOGO, D., TAONDA, J.-B., SAKO, K., BOUBACAR, S., ABDOU, A., & KOALA, S. (2011). Fertilizer microdosing and “warrantage” or inventory credit system to improve food security and farmers’ income in west africa. In A. BATIONO, B. WASWA, J. M. OKEYO, F. MAINA & J. M. KIHARA (Éd.), *Innovations as key to the green revolution in africa* (p. 113-121). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_10

- TEAM, R. C. (2019a). `kruskal.test` : Kruskal-Wallis Rank Sum Test [R package version 3.6.2]. Récupérée mai 18, 2025, à partir de <https://www.rdocumentation.org/packages/stats/versions/3.6.2/topics/kruskal.test>
- TEAM, R. C. (2019b). `shapiro.test` : Shapiro-Wilk Normality Test [R package version 3.6.2]. Récupérée mai 18, 2025, à partir de <https://www.rdocumentation.org/packages/stats/versions/3.6.2/topics/shapiro.test>
- TEIXEIRA, J., & CORREIA DOS SANTOS, R. (2021). Exploring the applicability of low-cost capacitive and resistive water content sensors on compacted soils. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(4), 2969-2983. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01672-0>
- TERAVEST, D., CARPENTER-BOGGS, L., THIERFELDER, C., & REGANOLD, J. P. (2015). Crop production and soil water management in conservation agriculture, no-till, and conventional tillage systems in malawi. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 212, 285-296. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.07.011>
- THAPA, S., STEWART, B. A., & XUE, Q. (2017). Grain sorghum transpiration efficiency at different growth stages. *Plant Soil Environ.*, 63(2), 70-75. <https://doi.org/10.17221/796/2016-PSE>
- THIERFELDER, C., CHEESMAN, S., & RUSINAMHODZI, L. (2013). Benefits and challenges of crop rotations in maize-based conservation agriculture (CA) cropping systems of southern Africa. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 11(2), 108-124. <https://doi.org/10.1080/14735903.2012.703894>
- THORP, K., DEJONGE, K., MAREK, G., & EVETT, S. (2020). Comparison of evapotranspiration methods in the DSSAT cropping system model : i. global sensitivity analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, 105658. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105658>
- TOVIHOUDJI, AKPONIKPE, P., AGBOSSOU, E. K., & BIELDERS, C. (2019). Using the DSSAT Model to Support Decision Making Regarding Fertilizer Microdosing for Maize Production in the Sub-humid Region of Benin. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00013>
- TOVIHOUDJI, AKPONIKPÈ, P. B. I., AGBOSSOU, E. K., & BIELDERS, C. L. (2019). Using the DSSAT Model to Support Decision Making Regarding Fertilizer Microdosing for Maize Production in the Sub-humid Region of Benin. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00013>
- TOVIHOUDJI, AKPONIKPÈ, P. I., AGBOSSOU, E. K., & BIELDERS, C. L. (2019). Variability in maize yield and profitability following hill-placement of reduced mineral fertilizer and manure rates under smallholder farm conditions in northern benin. *Field Crops Research*, 230, 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.018>
- TOVIHOUDJI, AKPONIKPÈ, P., AGBOSSOU, E., BERTIN, P., & BIELDERS, C. (2017). Fertilizer microdosing enhances maize yields but may exacerbate nutrient mining in maize cropping systems in northern Benin. *Field Crops Research*, 213, 130-142. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.003>
- TRAIL, P., ABAYE, O., THOMASON, W. E., THOMPSON, T. L., GUEYE, F., DIEDHIOU, I., DIATTA, M. B., & FAYE, A. (2016). Evaluating intercropping (living cover) and mulching (desiccated cover) practices for increasing millet yields in senegal [Publisher : Wiley]. *Agronomy Journal*, 108(4), 1742-1752. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0422>
- UNITED STATES. SOIL CONSERVATION SERVICE. (1985). *SCS national engineering handbook*. Washington. Récupérée avril 28, 2025, à partir de <http://archive.org/details/CAT71334647003>

- van GENUCHTEN, M. T. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- VAN KEULEN, H. (2001). (tropical) soil organic matter modelling : problems and prospects. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61(1), 33-39. <https://doi.org/10.1023/A:1013372318868>
- VANLAUWE, B., WENDT, J., GILLER, K., CORBEELS, M., GERARD, B., & NOLTE, C. (2014). A fourth principle is required to define conservation agriculture in sub-saharan africa : the appropriate use of fertilizer to enhance crop productivity. *Field Crops Research*, 155, 10-13. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.10.002>
- VANWINDEKENS, F. M., & HARDY, B. F. (2023). The QuantiSlakeTest, measuring soil structural stability by dynamic weighing of undisturbed samples immersed in water. *SOIL*, 9(2), 573-591. <https://doi.org/10.5194/soil-9-573-2023>
- VERHULST, N., KIENLE, F., SAYRE, K. D., DECKERS, J., RAES, D., LIMON-ORTEGA, A., TIJERINA-CHAVEZ, L., & GOVAERTS, B. (2011). Soil quality as affected by tillage-residue management in a wheat-maize irrigated bed planting system. *Plant and Soil*, 340(1), 453-466. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0618-5>
- VYN, T. J., & RAIMBULT, B. A. (1993). Long-Term Effect of Five Tillage Systems on Corn Response and Soil Structure [Publisher : John Wiley & Sons, Ltd]. *Agronomy Journal*, 85(5), 1074-1079. <https://doi.org/10.2134/agronj1993.00021962008500050022x>
- WALE, A., ABERA, M., ASMELIE, T., & BEZA, G. (2025). Effects of microdose fertilizers and irrigation depth on onion (*Allium cepa* L.) growth under drip irrigation in northern ethiopia. *Air, Soil and Water Research*, 18, 11786221251318021. <https://doi.org/10.1177/11786221251318021>
- WALELA, C. (2011). Innovations as Key to the Green Revolution in Africa. In *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa - Vol. 1 : Exploring the Scientific Facts* (p. 1339). Springer Science+Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2543-2_1
- WATSON, K. W., & LUXMOORE, R. J. (1986). Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 578-582. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030007x>
- WATTEL- KOEKKOEK, E. J. W., BUURMAN, P., VAN DER PLICHT, J., WATTEL, E., & VAN BREEMEN, N. (2003). Mean residence time of soil organic matter associated with kaolinite and smectite. *European Journal of Soil Science*, 54(2), 269-278. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00512.x>
- Weather module [DSSAT.net]. (2025). Récupérée avril 28, 2025, à partir de <https://dssat.net/weather-module/>
- WEIDHUNER, A., hanauer anastacia, a., krausz ronald, r., CRITTENDEN, S., GAGE, K., & SADEGHPOUR, A. (2020). Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years. *Soil and Tillage Research*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104878>
- WEJS, A. (2021, novembre 19). Unprecedented challenge : implications for climate resilient urban planning. In F. J. CARRILLO & C. GARNER (Éd.), *City Preparedness for the Climate Crisis*. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781800883666.00012>
- WEST, G., & DUMBLETON, M. J. (1970). The mineralogy of tropical weathering illustrated by some west malaysian soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 3(1), 25-40. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1970.003.01.02>

- WESTERBERG, V., GOLAY, A., L, C., & V, H. (2017). *Westerberg, V and Golay A, Houndekon V, Costa L. 2017. L'économie de la dégradation de terre, le cas de la commune de Banikoara. Le coton est-il vraiment l'or blanc à Banikoara ?* GIZ, Economics of Land Degradation (ELD). <https://docslib.org/doc/7448689/1%C3%A9conomie-de-la-d%C3%A9gradation-des-terres-au-b%C3%A9nin-cas-de-la-commune-de-banikoara>
- What is APSIM ? [APSIM]. (s. d.). Récupérée février 17, 2025, à partir de <https://www.apsim.info/apsim-model/>
- WIDER, R. K., & LANG, G. E. (1982). A Critique of the Analytical Methods Used in Examining Decomposition Data Obtained From Litter Bags. *Ecology*, 63(6), 1636. <https://doi.org/10.2307/1940104>
- WILLAGRI. (2024, juin 24). *AFRICA MOBILIZES AGAINST SOIL DEGRADATION - willagri - comprendre les enjeux de l'agriculture*. Récupérée mars 29, 2025, à partir de <https://www.willagri.com/2024/06/24/africa-mobilizes-against-soil-degradation/?lang=en,%20https://www.willagri.com/2024/06/24/africa-mobilizes-against-soil-degradation/?lang=en>
- WTW GMBH. (2006). *Manuel d'utilisation du conductimètre inoLab Cond 720* [Consulté le 8 mai 2025]. WTW GmbH. Weilheim, Allemagne. <https://www.manualslib.fr/manual/640923/Wtw-Inolab-Cond-720.html?page=2>
- YEMADJE, P., TAKPA, O., AMONMIDE, I., BALARABE, O., SEKLOKA, E., GUIBERT, H., & TITTONELL, P. (2022). Limited yield penalties in an early transition to conservation agriculture in cotton-based cropping systems of Benin. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1041399>
- YOUSSEF, I., & LAWANI, M. (2000). Les sols béninois : classification dans la Base de référence mondiale. *Rapport de la Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols*, 29-50.
- ZHANG, D., SHEN, S., BAI, Z., HARRISON, M. T., LIU, K., REES, R. M., TOPP, C. F., ZOU, J., YANG, Y., SONG, Z., CHEN, H., & YIN, X. (2025). Optimizing N rate in wheat-maize rotation to match long-term and inter-seasonal N turnover for high yield and sustainability using STICS. *Field Crops Research*, 322, 109718. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109718>
- ZHOU, W. (2016). levene.test : Levene's Test for Homogeneity of Variance [R package lawstat version 3.6]. Récupérée mai 18, 2025, à partir de <https://www.rdocumentation.org/packages/lawstat/versions/3.6/topics/levene.test>
- ZIBILSKE, L., BRADFORD, J., & SMART, J. (2002). Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. *Soil and Tillage Research*, 66(2), 153-163. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00023-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00023-5)
- ZONGO, K. F. (2013). Associations légumineuses-céréales dans les agrosystèmes soudanosahéliennes du Burkina Faso : Perceptions et pratiques paysannes, effets du zaï et des amendements organiques et organominéraux sur les rendements des cultures associées niébé-sorgho. *Science du sol, IDR/UPB*, 55p.
- ZONTA, J. H., BRANDÃO, Z. N., RODRIGUES, J. I. D. S., & SOFIATTI, V. (2017). COTTON RESPONSE TO WATER DEFICITS AT DIFFERENT GROWTH STAGES. *Revista Caatinga*, 30(4), 980-990. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n419rc>

Évaluation des pratiques d'agriculture de conservation sur la culture cotonnière : analyse expérimentale et modélisation avec DSSAT

Étude de cas à Parakou (Bénin)

Ombeline Neujean

Résumé

L'agriculture de conservation (AC) est souvent présentée comme une voie pour favoriser la durabilité des systèmes cotonniers en Afrique de l'Ouest. Cette étude évalue ses effets au Bénin en combinant un dispositif expérimental à long terme et la modélisation avec DSSAT/CROPGRO-Cotton. Depuis 2017, un essai en blocs randomisés compare trois systèmes de culture : **(S1)** labour conventionnel et rotation biennale coton/maïs ; **(S2)** strip-till et rotation coton/maïs+niébé ; **(S3)** semis direct et rotation triennale coton/maïs+*stylosanthes+crotalaria*/sorgho+soja avec associations, chacun testé sous deux régimes de fertilisation localisée (dose recommandée et microdose).

Après sept années, aucune différence significative n'a été détectée entre les trois systèmes pour les propriétés chimiques, physiques et hydrodynamiques du sol, reflétant une forte inertie pédologique et l'influence d'un gradient naturel de carbone organique. Sur le plan agronomique, le système S1 reste le plus performant, confirmant l'avantage immédiat du labour malgré des bénéfices attendus de l'AC à plus long terme. La fertilisation microdose a ralenti la croissance initiale sans réduire significativement les rendements, ce qui souligne son intérêt pour réduire les apports d'engrais.

Le modèle DSSAT, calibré sur 2022–2023 et validé en 2024, a correctement reproduit la phénologie (écart ≤ 2 jours pour l'anthèse), les rendements et la biomasse finale ($nRMSE < 20\%$). Néanmoins, il présente des limites persistantes : difficultés à simuler la croissance au-delà du stade végétatif, anticipation marquée de la maturité physiologique et sous-estimation des performances en fertilisation microdose.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'améliorer la représentation des processus liés à la fertilisation localisée et à la phénologie dans DSSAT/CROPGRO-Cotton, et rappellent l'importance du suivi de long terme pour évaluer si les bénéfices attendus de l'AC sur la fertilité des sols se manifesteront au-delà de l'inertie actuelle.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs

Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/agro