

Faculté des bioingénieurs

Dans quelle mesure le modèle STICS est-il capable de simuler les performances agronomiques de l'association maïs-niébé dans les conditions pédoclimatiques de Parakou (Bénin), et que nous apprend-il sur les mécanismes par lesquels le niébé influence la productivité du système ?

Auteur :	d'Argembeau Bastien
Promoteurs :	Biielders Charles Seydou Kamarou-Dine
Lecteurs :	Lobet Guillaume Tovihoudji Pierre G.
Année Académique :	2025-2026
Bioingénieur :	Sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Je souhaite tout d’abord remercier mon promoteur, Monsieur Biolders, pour son aide, sa disponibilité, ses conseils et ses interrogations qui m’ont permis d’enrichir et d’avancer tout le long de mon travail. Je souhaite également remercier Kamarou-Dine Seydou, qui fut tout aussi présent et précieux dans son aide pour la réalisation de ce travail.

Mes remerciements s’adressent également aux membres de mon jury Monsieur Guillaume Lobet et Monsieur Pierre G. Tovihoudji, pour le temps passé à la lecture de mon travail.

Un immense merci à Audrey Deheinzelin (INRAE) qui m’a permis, avec de nombreux échanges, à comprendre de mieux en mieux le modèle STICS dans sa globalité et en particulier le module d’association. Je souhaite aussi remercier Mathilde De Freitas (CIRAD), pour ces échanges enrichissants qui m’ont permis d’avancer plus efficacement dans ma modélisation.

Un grand merci à mes camarades et amis bioingénieurs pour les précieux moments partagés durant ces années de formation et tout particulièrement durant cette dernière année.

Enfin, merci à ma famille et mes proches pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leurs encouragements constants.

TABLE 1 – Attribution des contributions selon la taxonomie CRediT

Étape CRediT	d'Argembeau Bastien	Autres contributeur·ice	Intelligence artificielle
Conceptualisation	✓	Pr.Bielders Charles	—
Méthodologie	✓	Pr.Bielders Charles	—
Investigation	✓	—	Gemini et Claude (recherche bibliographique)
Analyse formelle	✓	—	Gemini et Claude (aide méthodologique)
Validation	✓	—	—
Rédaction – version originale	✓	—	Gemini et Claude (aide à la rédaction)
Rédaction – révision et édition	✓	—	Gemini et Claude (reformulation et orthographe)
Visualisation	✓	—	—
Supervision	✓	Pr.Bielders Charles et Seydou Kamarou	—

Table des matières

I	Introduction générale	1
II	État de l’art	3
1	Contexte socio-économique et agronomique Béninois	3
1.1	Contraintes liées au développement de la production agricole au Bénin . . .	3
1.1.1	Croissance démographique	3
1.1.2	Pression sur les terres agricoles et les ressources	3
1.1.3	Vulnérabilité Alimentaire et Socio-économique	4
1.2	Importance du maïs dans l’alimentation et l’économie béninoise	4
1.3	La culture de maïs (<i>Zea mays L.</i>)	5
1.3.1	Phénologie	5
1.3.2	Exigences agronomiques	6
1.4	La crise de la productivité des sols béninois	7
1.4.1	Pauvreté intrinsèque et dégradation des sols	7
1.4.2	Facteurs limitants de la croissance du maïs : rôle de l’azote (N) et du phosphore (P)	8
1.4.3	Rendements et dynamique de production	8
1.4.4	Impact du climat et des sécheresses	9
1.4.5	Activités humaines et pratiques non durables	9
1.4.6	Pratiques culturales et gestion du sol au Bénin	9
1.4.7	Utilisation des engrais minéraux	11
1.5	Agriculture de conservation et plantes améliorantes	12
1.5.1	Définition et piliers fondamentaux	12
1.5.2	Les plantes améliorantes : définition et rôles agronomiques	13
1.6	Le niébé comme plante améliorante	15
1.6.1	Origine, importance et distribution	15
1.6.2	Morphologie et phénologie	15
1.6.3	Fixation biologique de l’azote	15
1.6.4	Effets sur la productivité du système maïs-niébé	16
1.6.5	Effets sur les propriétés du sol et la culture suivante	17
1.7	Problématique et question de recherche	17
2	Modélisation de la croissance des cultures et modèle STICS	18
2.1	Principes et objectifs de la modélisation agronomique	18
2.2	Différents modèles	18
2.3	Revue de modélisation dans les contextes tropicaux	19

2.4	Applications au maïs et aux systèmes associés	20
2.5	Limites de la modélisation agronomique	20
III	Matériels et méthodes	22
3	Site expérimental et données	22
3.1	Zone d'étude et caractéristiques agroclimatiques	22
3.1.1	Caractéristiques climatiques	22
3.1.2	Données relatives au sol	23
3.2	Dispositif expérimental et conduites culturales	25
3.2.1	Dispositif expérimental et traitements	25
3.2.2	Gestion agronomique	25
3.2.3	Dispositif d'association maïs-niébé (S2)	26
3.2.4	Données phénologiques	26
3.3	Données collectées et traitements statistiques	27
3.3.1	Paramètres de croissance	27
3.3.2	Rendement et composantes du rendement	28
4	Le modèle STICS	28
4.1	Présentation générale du modèle STICS	28
4.2	Scénarios simulés et configuration	31
4.2.1	Configuration du profil de sol et conditions initiales dans STICS	31
4.2.2	Démarche générale de calibration	32
4.2.3	Maïs en culture conventionnelle (S1)	32
4.2.4	Niébé en culture pure optimisée	33
4.2.5	Système maïs-niébé en association (S2)	33
4.3	Procédure de validation	34
4.4	Indicateurs statistiques d'évaluation du modèle	34
4.4.1	Pourcentage de biais (PV)	34
4.4.2	Erreur quadratique normalisée (nRMSE)	34
4.4.3	Grille d'interprétation	35
IV	Résultats et discussion	35
5	Résultats expérimentaux et de simulation	36
5.1	Synthèse des données expérimentales de référence à Okpara (2022–2024)	36
5.1.1	Performances du maïs en culture pure et sous itinéraire technique (S1 et S2)	36
5.1.2	Performances du niébé en association	36

5.2	Calibration du maïs en culture conventionnelle (S1, 2022)	37
5.3	Validation du modèle en culture conventionnelle	38
5.3.1	Campagne 2023	38
5.3.2	Campagne 2024	40
5.3.3	Dynamique du LAI	40
5.4	Paramétrage du niébé en culture pure	41
5.5	Simulation du système maïs-niébé en association (S2)	42
5.5.1	Performances agronomiques observées	42
5.5.2	Configuration et paramétrage retenu	43
5.5.3	Comparaison modèle/observations	43
6	Discussion et perspectives	45
6.1	Analyse critique des résultats et comparaison avec la littérature	45
6.1.1	Le maïs : des performances conformes aux références tropicales	45
6.1.2	Le niébé en culture pure : dans les fourchettes de référence	45
6.1.3	L'association : une dominance correctement orientée	46
6.2	Performance du modèle STICS et limites	46
6.2.1	Sensibilité aux conditions de nodulation en culture pure	46
6.2.2	Une limite structurelle, pas une erreur de calibration	47
6.2.3	Caractérisation mécaniste : le stress radiatif déclenche le stress azoté	47
6.2.4	Le verrou confirmé par une analyse de sensibilité exhaustive	49
6.2.5	Limites techniques et précautions d'interprétation	51
6.2.6	Implications pour la question de recherche	52
6.2.7	Implications pour la durabilité et la modélisation future	52
7	Conclusion	55
8	Annexes	57
	Références bibliographiques	78

Glossaire des paramètres STICS utilisés dans ce mémoire

Les tableaux suivants définissent les paramètres du modèle STICS (Brisson et al., 2009) mentionnés dans ce mémoire. Les paramètres sont regroupés par module fonctionnel. Le préfixe P_ indique un paramètre du fichier plante (.plt) ; l'absence de préfixe désigne une variable de sortie ou un paramètre de configuration (.tec ou .sol). Les valeurs retenues pour le maïs (cv. S2) et le niébé (cv. 58-74f) sont précisées en Annexe D.

Phénologie et croissance foliaire

TABLE 2 – Paramètres de phénologie et de croissance foliaire (fichier plante .plt).

Paramètre	Unité	Définition
stlevamf	°C·j	Somme de températures levée → feuillaison maximale (stade AMF)
stamflax	°C·j	Somme de températures AMF → LAI maximum (stade LAX)
stlevdrp	°C·j	Somme de températures levée → début remplissage des grains (stade DRP)
stflodrp	°C·j	Somme de températures floraison → stade DRP
stdrpdex	°C·j	Somme de températures DRP → dessiccation (maturité physiologique)
dlaimaxbrut	m ² feuille m ⁻² sol °C·j ⁻¹	Vitesse maximale brute d'augmentation du LAI par degré-jour
durvieF	°C·j	Durée de vie d'une feuille adulte
durviesupmax	—	Durée de vie additionnelle due à un excès de N dans la plante
laicomp	m ² m ⁻²	Seuil de LAI à partir duquel la compétition interplant démarre dans le calcul de croissance foliaire
<i>Variables de sortie associées</i>		
lai(n)	m ² m ⁻²	Indice de surface foliaire (LAI) à la date <i>n</i>
fapar	—	Fraction du rayonnement photosynthétique actif intercepté par le couvert
rsoleil	—	Fraction du rayonnement solaire incident atteignant la culture dominée (intercrop uniquement)
SLA	cm ² g ⁻¹	Surface foliaire spécifique simulée

Bilan carboné et rendement

TABLE 3 – Paramètres du bilan carboné et de l’élaboration du rendement (fichier plante .plt).

Paramètre	Unité	Définition
efcroiveg	g MJ^{-1}	Efficienc e de conversion du rayonnement intercepté en biomasse végétative
efcroirepro	g MJ^{-1}	Efficienc e de conversion pendant la phase reproductive
ktrou	—	Coefficient d’extinction du rayonnement dans le couvert (loi de Beer–Lambert) ; gouverne la fraction de lumière transmise au sol et à la culture associée en intercrop
nbgrmin	grains m^{-2}	Nombre minimal de grains par m^2 imposé comme plancher dans STICS
<i>Variables de sortie associées</i>		
masec(n)	t ha^{-1}	Biomasse aérienne sèche à la date n
mafruit	t ha^{-1}	Biomasse des organes récoltés (grain)
HI	—	Indice de récolte = mafruit / masec

Bilan hydrique et évapotranspiration

TABLE 4 – Paramètres et variables du bilan hydrique.

Paramètre / Variable	Unité	Définition
ETP	mm j^{-1}	Évapotranspiration potentielle ; Calculated Penman (sole crop S1) ou Shuttleworth–Wallace (mode intercrop, obligatoire)
swfac	0–1	Indice de stress hydrique sur la transpiration (1 = aucun stress)
turfac	0–1	Indice de stress hydrique sur la turgescence et la croissance foliaire (1 = aucun stress)
etr	mm j^{-1}	Évapotranspiration réelle simulée
etm	mm j^{-1}	Évapotranspiration maximale (demande climatique)

Nutrition azotée et fixation symbiotique (niébé)

TABLE 5 – Paramètres de la nutrition azotée et de la fixation symbiotique du niébé (fichier plante .plt).

Paramètre	Unité	Définition
fixmax	$\text{kg N ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$	Taux maximal journalier de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique
concNrac0	mg N g^{-1} racine	Seuil de nitrate du sol au-delà duquel la fixation est totalement inhibée, exprimé en $\text{kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ou $\text{kg ha}^{-1} \text{ cm}^{-1}$
stlevdno	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{j}$	Somme de températures levée $\rightarrow$ début de nodulation effective
vitno	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{j}$	Taux d'augmentation du potentiel de fixation biologique après l'apparition du nodule
Vmax1	$\text{micromole cm}^{-1} \text{ h}^{-1}$	Capacité maximale d'absorption active de l'azote minéral par le système à haute affinité (HATS, faibles concentrations)
Vmax2	$\text{micromole cm}^{-1} \text{ h}^{-1}$	Capacité maximale d'absorption active de l'azote minéral par le système à basse affinité (LATS, fortes concentrations)
innsen	—	Indice de nutrition azotée en dessous duquel la sénescence foliaire précoce est déclenchée
<i>Variables de sortie associées</i>		
inns	0–1	Facteur de réduction du taux de croissance de biomasse dû à un stress azoté
QNplante	kg N ha^{-1}	Quantité d'azote totale présent dans la plante

Enracinement

TABLE 6 – Paramètres d'enracinement (fichier plante .plt et fichier sol .sol).

Paramètre	Unité	Définition
stoprac	—	Condition d'arrêt de l'élongation racinaire : lax (arrêt au stade LAI maximum) ou sen (arrêt au début de la sénescence)
croirac	$\text{cm } ^{\circ}\text{C} \cdot \text{j}^{-1}$	Vitesse de progression du front racinaire en profondeur par degré-jour
obstarac	cm	Profondeur maximale d'enracinement
longsperac	$\text{cm} \cdot \text{g}^{-1}$	Longueur spécifique racinaire : longueur de racine produite par unité de masse racinaire
<i>Variables de sortie associées</i>		
zrac	cm	Profondeur atteinte par le front racinaire

Paramètres intercrop et dispositif cultural

TABLE 7 – Paramètres de configuration du système intercrop (fichiers technique `.tec` et fichier plante `.plt`).

Paramètre	Unité	Définition
interrang	m	Espacement entre rangs de semis d'une même culture
densitesem	pl m ⁻²	Densité de semis
hauteur	/ m	Hauteur de la plante
hautmax		Hauteur maximale simulée ; utilisée dans la géométrie du module radiatif intercrop
forme	—	Forme de la section du couvert dans le module radiatif (1 = rectangulaire, 2 = triangulaire)
rapforme	—	Rapport hauteur/largeur du couvert pour la géométrie intercrop
khaut	—	Coefficient d'extinction reliant la hauteur et le LAI
codetransrad	—	Code de mode de transfert radiatif en intercrop (1 = Beer law, 2 = radiative transfer)
<i>Indicateurs de performance</i>		
PV	%	Biais relatif : $(\text{sim} - \bar{\text{obs}}) / \bar{\text{obs}} \times 100$
nRMSE	%	Erreur quadratique normalisée intégrant la variabilité parcellaire :
		$\sqrt{(\text{sim} - \bar{\text{obs}})^2 + \frac{n-1}{n}\sigma^2} / \bar{\text{obs}} \times 100$

Liste des abréviations et acronymes

- AC — Agriculture de Conservation
- APSIM — Agricultural Production Systems sIMulator
- AquaCrop — Modèle de culture orienté eau développé par la FAO
- ABC — L'ABC du maïs, guide technique de référence édité par KWS (connaître la plante et réussir sa conduite)
- BCR — Bloc Complet Randomisé
- BEPP — Bureau d'Évaluation des Politiques Publiques (Bénin)
- CA-1, CA-2 — Conservation Agriculture, niveaux 1 et 2 (systèmes S2 et S3)
- CEC — Capacité d'Échange Cationique
- CGIAR — Consultative Group for International Agricultural Research
- CNRA — Centre National de Recherches Agronomiques (Sénégal)
- CR — Competition Ratio (Willey & Rao, 1980)
- CT — Conventional Tillage (labour conventionnel)
- DR — Dose Recommandée (de fertilisation)
- DSA — Direction de la Statistique Agricole (Bénin)
- DSSAT — Decision Support System for Agrotechnology Transfer
- EPIC — Environmental Policy Integrated Climate model
- ETP — ÉvapoTranspiration Potentielle
- FAO — Food and Agriculture Organization of the United Nations
- HI — Harvest Index (indice de récolte)
- HYPROP — Méthode d'évaporation pour la mesure de la rétention en eau du sol (Schindler et al., 2010)
- IFAD — International Fund for Agricultural Development
- IFDC — International Fertilizer Development Center
- INN — Indice de Nutrition Azotée
- INRAB — Institut National des Recherches Agricoles du Bénin
- INRAE — Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (France)
- ISRA — Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
- JAS — Jours Après Semis
- KWS — Klein Wanzlebener Saatzucht (entreprise allemande de sélection végétale et producteur mondial de semences)
- LAI — Leaf Area Index ("indice de surface foliaire")
- LER — Land Equivalent Ratio ("Ratio de Surface Équivalente (RSE)" Mead & Willey, 1980)
- MAEP — Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche (Bénin)
- NPK — Engrais minéral composé (Azote–Phosphore–Potassium)
- nRMSE — normalized Root Mean Square Error
- PV — Pourcentage de biais (Percent Bias)
- REU — Réserve en Eau Utile
- RUE — Radiation Use Efficiency (efficience de conversion du rayonnement)
- STICS — Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard
- WRB — World Reference Base for Soil Resources (classification internationale des sols, FAO/IUSS)

Première partie

Introduction générale

L’agriculture constitue le principal pilier socio-économique en Afrique de l’Ouest, assurant la subsistance de la majorité de la population. Dans la région soudano-guinéenne du Nord-Bénin, le maïs (*Zea mays* L.) représente la céréale vivrière majeure, essentielle à la fois pour la diète des ménages et pour les revenus ruraux (Tovihoudji et al., 2022). Cependant, les systèmes maïsicoles pluviaux font aujourd’hui face à une instabilité croissante des rendements, entraînée par la dégradation rapide des sols arables et accentuée par la variabilité climatique (Sultan et Gaetani, 2016). Les sols dominants de la région de Parakou, classés comme Lixisols selon le système WRB (Youssouf et Lawani, 2000), présentent des contraintes agronomiques majeures : faible réserve en eau utile, fragilité structurale de surface face à l’érosion hydrique et carences sévères en nutriments minéraux, particulièrement en azote et en phosphore (Bationo et al., 2007). Dans un contexte marqué par le coût élevé des engrais chimiques de synthèse et la baisse de fertilité liée au travail conventionnel du sol, la transition vers des pratiques agricoles durables est devenue une priorité pour garantir la sécurité alimentaire.

Pour surmonter ces contraintes sans dépendre exclusivement d’intrants minéraux inaccessibles aux petits exploitants, l’association de cultures (*intercropping*) combinant une céréale et une légumineuse à grain offre une voie écologique prometteuse. L’introduction du niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) dans les systèmes maïsicoles fournit des services écosystémiques tels que la fixation symbiotique de l’azote atmosphérique (N_2), une meilleure protection du sol contre le ruissellement et du fourrage en saison sèche (Namatshewe et al., 2020 ; Yemadje et al., 2025). Néanmoins, le succès de ces associations sous itinéraire technique réduit (tel que le strip-tillage) repose sur une maîtrise de la compétition interspécifique pour la lumière, l’eau et les nutriments sous la canopée dominée.

Face à la complexité des interactions au champ, la modélisation des cultures constitue un outil indispensable pour caractériser les processus compétitifs, tester la durabilité des itinéraires techniques et analyser le fonctionnement des agrosystèmes (Brisson et al., 2004 ; Falconnier et al., 2020). Le modèle STICS v10.5.0 dispose d’un module d’association natif permettant de gérer le partage des ressources (Beaudoin et al., 2023). Cependant, si STICS est largement documenté en zone tempérée, sa transférabilité sous climat tropical soudanien et sa capacité à simuler la réponse d’un cultivar local de niébé (cv. 58-74f) sous l’ombrage du maïs représentent un verrou scientifique encore peu documenté dans la littérature (De Freitas et al., 2026).

Ce mémoire s’insère dans le cadre de la collaboration scientifique entre l’Université de Parakou et l’Université catholique de Louvain (UCLouvain). Il s’appuie sur le dispositif expérimental pluriannuel initié en 2017 sur le site d’Okpara sous la coordination

de Kamarou-Dine SEYDOU. Alors que de récents travaux de modélisation menés sur ce site se sont concentrés sur la culture cotonnière (Neujean, 2025), cette étude se consacre spécifiquement à la modélisation du système maïs–niébé.

L’objectif principal de ce mémoire est d’évaluer la capacité du modèle STICS v10.5.0 à simuler fidèlement la croissance, la phénologie et les performances agronomiques du maïs en culture pure et en association avec le niébé sur le site d’Okpara (Bénin, campagnes 2022 à 2024), tout en caractérisant les mécanismes écophysiologiques de la compétition et les limites de structure du module d’association.

Pour répondre à cet objectif, la recherche s’articule autour de trois questions centrales :

1. **Q1 (Transférabilité Maïs)** : Dans quelle mesure le paramétrage de STICS calibré sur le maïs en culture pure permet-il de prédire fidèlement la biomasse, le rendement et la dynamique du *LAI* ?
2. **Q2 (Plausibilité Niébé)** : Le jeu de paramètres adapté pour le niébé (cv. 58-74f) restitue-t-il correctement la biomasse en culture pure, et permet-il d’évaluer le comportement de la légumineuse ?
3. **Q3 (Verrous et Mécanismes Intercrop)** : Le module d’association de STICS parvient-il à reproduire la compétition maïs–niébé, et que nous apprend l’analyse du modèle sur la chaîne causale de la domination ainsi que sur ses limites ?

Le document est structuré en six grands chapitres. Le Chapitre 1 dresse une revue de la littérature sur le contexte agroécologique béninois et les associations céréale-légumineuse. Le Chapitre 2 détaille les principes de la modélisation agronomique et le fonctionnement du modèle STICS v10.5.0. Le Chapitre 3 décrit le dispositif expérimental d’Okpara et les jeux de données collectés. Le Chapitre 4 présente la méthodologie de calibration, de validation et les protocoles de simulation. Enfin, les Chapitres 5 et 6 exposent respectivement l’ensemble des résultats empiriques et de simulation, suivis d’une discussion approfondie autour des verrous et des perspectives de recherche.

Deuxième partie

État de l’art

1 Contexte socio-économique et agronomique Béninois

1.1 Contraintes liées au développement de la production agricole au Bénin

1.1.1 Croissance démographique

La population béninoise a connu une croissance très rapide depuis l’indépendance. Estimée à environ 2,27 millions d’habitants en 1960, elle a été multipliée par plus de six pour atteindre près de 15 millions d’habitants en 2025 (BEPP, 2012 ; Worldometer, consulté le 25/11/2025). Le taux d’accroissement démographique, historiquement élevé, a culminé à environ 4,5 % par an en 1994 avant d’amorcer une décroissance progressive pour atteindre environ 2,5 % en 2025.

Même si la croissance ralentit, son rythme demeure soutenu : au taux actuel, la population béninoise devrait dépasser les 16.6 millions d’habitants à l’horizon 2030, ce qui représente un quasi-doublement en une seule génération (8,4 millions en 2005). Cette dynamique démographique constitue un défi majeur pour l’amélioration des conditions de vie, car elle accentue la pression sur les terres agricoles, les infrastructures, les services sociaux et la sécurité alimentaire.

1.1.2 Pression sur les terres agricoles et les ressources

La croissance démographique rapide du Bénin exerce une pression croissante sur les terres agricoles et les ressources naturelles dont dépendent fortement les populations rurales et urbaines. Cette pression se mesure d’abord par la densité de population, qui a doublé entre 2000 et 2025 en passant de 64 à 131 habitants par km² (Worldometer, 2026). La conséquence la plus directe est la diminution des surfaces disponibles par exploitation : la superficie moyenne cultivable est passée de 6,1 ha en 1992 à 4,4 ha en 2010, soit une baisse de près de 28% en moins de deux décennies (BEPP, 2010). Cette raréfaction du foncier pèse d’autant plus lourd que l’agriculture béninoise reste l’activité dominante du pays, employant près de 70 % de la population active selon l’IFAD, et 44 % des Béninois en tirent directement leur revenu, surtout en milieu rural (World Bank, 2023). Elle repose sur des exploitations de petite taille, à organisation familiale et faiblement mécanisées, qui entretiennent une forte dépendance à la main-d’œuvre domestique (Magbondé et al., 2023). Faute de moyens pour intensifier la production, ces systèmes ont longtemps répondu à la demande croissante par l’extension des surfaces cultivées mais cette solution se referme à

mesure que les terres disponibles diminuent, ce qui place le modèle d'exploitation familiale étendue face à ses limites.

1.1.3 Vulnérabilité Alimentaire et Socio-économique

Plusieurs analyses de pauvreté révèlent que la majorité des ménages les plus vulnérables dépendent de l'agriculture : 80 % des ménages pauvres sont actifs dans ce secteur, contre 40 % des ménages non considérés comme pauvres (World Bank, 2023). La pauvreté touche 67 % de la population nationale, avec un taux critique de 79 % en zone rurale.

1.2 Importance du maïs dans l'alimentation et l'économie béninoise

L'agriculture béninoise est marquée par une grande diversité de cultures, incluant les plantes à racines et tubercules, les légumineuses ainsi que le coton, qui demeure la principale culture d'exportation. Au sein des cultures vivrières, les céréales occupent une place de premier plan avec une production totale record de 2,7 millions de tonnes en 2023, en hausse de 19 % par rapport à l'année précédente (DSA/MAEP, 2024). Le maïs s'y impose comme la culture ultra-dominante : avec une production historique de plus de 2 millions de tonnes, il représente à lui seul 74 % de la production céréalière totale du pays (DSA/MAEP, 2024). Cette prédominance, soutenue par une extension des superficies de 11,8 % en une seule campagne, confirme son rôle de pilier central et croissant dans les systèmes d'exploitation et la souveraineté alimentaire du Bénin (DSA/MAEP, 2024).

Sur le plan alimentaire, le maïs est l'un des produits les plus consommés au Bénin. Le pays est le premier consommateur de l'Afrique de l'Ouest, avec une consommation moyenne de plus de 85 kg par habitant et par an, utilisé sous différentes formes (pâte, bouillies, farine torréfiée ou couscous local) (Dossa et al., 2018). Sa place dans la sécurité alimentaire est très importante car il constitue dans de nombreux pays d'Afrique subsaharienne plus de 20% des apports caloriques moyens (Sultan et Gaetani, 2016). Il devient particulièrement crucial dans les régions où les alternatives céréalières sont moins accessibles. Parallèlement à la consommation humaine, le maïs joue un rôle de plus en plus stratégique dans l'alimentation animale. Il représente la principale source d'énergie, souvent à hauteur de 50 à 65 % dans la composition des aliments pour la volaille dans les conditions intensives d'élevage (Guedou et al., 2019). Avec l'essor de la filière avicole nationale, la demande en maïs grain s'est intensifiée, créant une compétition directe entre les besoins humains et animaux (Adjiba et al., 2021). De plus, les résidus (tiges et feuilles) sont systématiquement valorisés pour former du fourrage renforçant l'intégration agriculture-élevage.

Sur le plan économique, la filière maïsicole est dominée par les petits exploitants, qui dépendent fortement de cette culture pour leurs revenus (Amegnaglo, 2018). Près de 80

% des ménages agricoles béninois cultivent ainsi le maïs selon les statistiques officielles de la production agricole nationale (DSA/MAEP, 2024). Ces exploitations familiales se caractérisent par une agriculture essentiellement pluviale sujette à une forte variabilité de rendement, ce qui accentue la vulnérabilité économique des producteurs (Amegnaglo, 2018). Enfin, au-delà de l’autoconsommation, le maïs alimente activement les marchés locaux et urbains et constitue une part majeure des échanges commerciaux intérieurs et régionaux (Yallou et al., 2025).

Ainsi, le maïs occupe une position doublement essentielle : il constitue l’aliment de base d’une grande part de la population et un des leviers économiques majeurs du pays, tout en étant sujet aux fluctuations climatiques, à la disponibilité des intrants et au manque d’accès aux innovations techniques.

1.3 La culture de maïs (*Zea mays L.*)

1.3.1 Phénologie

Le maïs (*Zea mays subsp. mays*) est une plante herbacée tropicale annuelle appartenant à la famille des Poacées (graminées), largement cultivée comme céréale pour ses grains riches en amidon, mais aussi comme plante fourragère (Wikipédia 2026, “Maïs”). Le cycle de développement du maïs s’étend généralement sur 120 à 160 jours, selon le génotype, les conditions climatiques et les pratiques culturales. Les différentes phases de développement sont visibles sur la Figure 1. Le cycle de développement du maïs est divisé en une phase végétative, une phase reproductive et une phase de maturation (Ritchie et al., 1993).

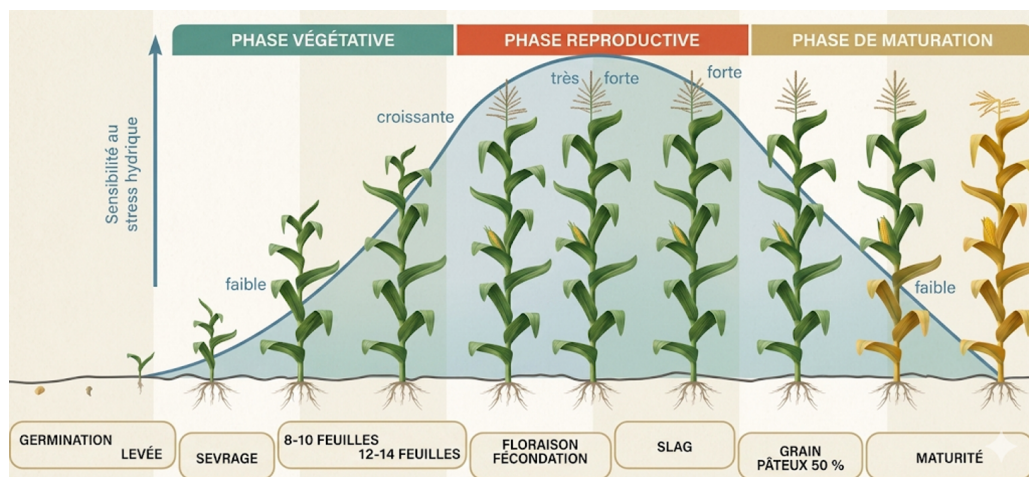


FIGURE 1 – Phases de développement du maïs, illustration modifiée sur base d’une illustration ABC du maïs (guide technique de référence édité) - KWS (entreprise allemande de semences)

Sur le plan physiologique, le maïs est une plante monoïque à photosynthèse de type C4, ce qui lui confère une efficacité élevée dans l’utilisation du rayonnement solaire, du

dioxyde de carbone et de l'eau, notamment sous des conditions de températures élevées et de forte luminosité. Cette caractéristique, partagée avec le sorgho ou la canne à sucre par exemple, peut expliquer la forte utilisation de ces espèces dans l'agriculture moderne.

1.3.2 Exigences agronomiques

La culture du maïs se développe préférentiellement sur des sols profonds et légers (sablonneux à limoneux), permettant un bon développement racinaire et une capacité d'infiltration et de drainage adéquate (Amato et Ritchie, 2002).

Le pH optimal pour la culture du maïs se situe entre 6,0 et 7,5, plage dans laquelle la disponibilité de la plupart des éléments nutritifs essentiels est maximale. En dessous de pH 5,5, trois mécanismes distincts compromettent la nutrition minérale. Premièrement, la disponibilité du phosphore chute fortement : dans de nombreux sols tropicaux à pH acide, les ions phosphate s'adsorbent sur les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, formant des complexes covalents stables qui bloquent le P sous une forme non assimilable par la plante (Kochian et al., 2004). Deuxièmement, les bases échangeables (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) sont progressivement déplacées des sites d'échange de la CEC par les ions H^+ et Al^{3+} , réduisant leur disponibilité pour l'absorption racinaire. Troisièmement, lorsque le pH descend en dessous de 5,0, l'aluminium soluble (Al^{3+}) peut atteindre des concentrations phytotoxiques qui inhibent directement l'élongation racinaire, restreignant l'accès de la plante aux ressources en eau et en nutriments (Kochian et al., 2004).

La germination du maïs se produit généralement 4 à 10 jours après semis, en fonction de la température et de la teneur en eau du sol. Une température du sol minimale de 10 °C est nécessaire pour permettre l'émergence, une température au-dessus de 18 °C accélère la levée, favorise la croissance et la robustesse des plantules (Kwabiah, 2002 ; Gouvernement du Canada 2021).

Le système racinaire du maïs est de type fasciculé : les racines primaires sont rapidement ramifiées par des racines adventives nodales qui assurent la majorité de l'absorption d'eau et de nutriments. La profondeur effective des racines peut atteindre plus d'un mètre, ce qui permet à la plante de puiser dans les réserves hydriques plus profondes en conditions de sécheresse modérée (Amato et Ritchie, 2002).

Le maïs est une culture exigeante en eau, particulièrement pendant la floraison et le remplissage des grains. Si des précipitations de 300 à 400 mm peuvent suffire en climat tempéré (Vâtcă et al., 2021), les besoins sont nettement plus élevés en zone tropicale. En raison d'une forte évapotranspiration, la FAO estime que le maïs nécessite en réalité entre 500 et 800 mm d'eau bien répartis sur l'ensemble de son cycle pour atteindre son potentiel de rendement (FAO, 1986). Sans un apport complémentaire par irrigation ou une bonne gestion de l'eau du sol lors des périodes de sécheresse (en début de cycle ou à la floraison), le stress hydrique réduit fortement la croissance foliaire et la formation des grains, ce qui entraîne de lourdes pertes de rendement.

Enfin, le bon développement du maïs dépend des interactions entre l'eau, l'azote (N), le phosphore (P) et le type de sol. L'azote est le facteur limitant principal pour l'expansion foliaire et la photosynthèse (Dossa et al., 2018), mais son efficacité dépend fortement des propriétés du sol. Dans les sols tropicaux, le risque de perte d'azote par lessivage est particulièrement prononcé pour la forme nitrate (NO_3^-). En raison de sa charge négative, cet anion subit un phénomène d'exclusion anionique face aux surfaces colloïdales de la matière organique et des argiles gonflantes, également chargées négativement. Bien que l'ammonium (NH_4^+) puisse être temporairement adsorbé sur la capacité d'échange cationique (CEC), sa nitrification rapide en NO_3^- par les microorganismes du sol sous climat chaud et humide limite cette forme de rétention à court terme. Pour répondre aux besoins de la culture en agriculture paysanne, les recommandations du MAEP (2022) préconisent une dose totale de 76 kg N/ha sur le cycle, visant un objectif de rendement réaliste de 3,0 à 4,0 t/ha (contre environ 1,2 t/ha sans fertilisation). En pratique, cela repose sur une fertilisation combinée et fractionnée : un premier apport de 30 kg N/ha sous forme de NPK à la levée (sécurisant également les besoins initiaux en phosphore et potassium), puis combiné à un apport de 46 kg N/ha sous forme d'urée en phase de pleine croissance (30-45 jours après semis).

1.4 La crise de la productivité des sols béninois

1.4.1 Pauvreté intrinsèque et dégradation des sols

Les sols d'Afrique de l'Ouest sont intrinsèquement pauvres en éléments nutritifs, très altérés et souvent déjà dégradés (Koh et Haile, 2025). Des décennies d'extraction de nutriments par les cultures, combinées à un réapprovisionnement limité en matières organiques et minérales, ont fortement contribué à leur appauvrissement (IFDC, 2024). Les systèmes de culture, notamment ceux basés sur le maïs en Afrique subsaharienne, sont souvent caractérisés par une agriculture à faibles intrants qui épuise progressivement les nutriments et favorise la dégradation des sols par la perte de matière organique et l'érosion (Tovihoudji et al., 2023).

Cette fragilité résulte des propriétés intrinsèques des sols dominants au Bénin et, plus largement, en Afrique de l'Ouest, où la couverture pédologique est majoritairement représentée par des Lixisols et des Luvisols (Yousouf et Lawani, 2002). Ces sols sont fortement lessivés, souvent appauvris en matière organique et présentent une capacité d'échange cationique faible, en particulier en raison de la prédominance d'argiles kaolinitiques (Igué et al., 2013). Leur aptitude naturelle à retenir l'eau et les nutriments est donc limitée, ce qui réduit fortement leur fertilité et les rend particulièrement sensibles à l'épuisement progressif par les cultures continues et des apports insuffisants en biomasse et en nutriments (Vanlauwe et al., 2006).

Cette dégradation physique et chimique se traduit par un déficit de rendement (yield

gap) considérable. Selon le document : "Production vivrière et industrielle au niveau national" disponible sur le site de la Direction de la Statistique Agricole du Bénin (DSA), le rendement moyen du maïs serait de 1214 kilogrammes par hectare (kg/ha) sur la période entre 2016 et 2024, ce qui est confirmé par le site "Our world in data" qui donne un rendement de 1,3 t/ha. Selon cette même source, qui s'appuie sur la méthodologie de Mueller et al. (2012), le rendement actuel n'est qu'à 30% de son rendement potentiel (2,4 t/ha de déficit). Le déficit n'est pas seulement dû à la génétique des semences, mais principalement à l'incapacité des sols dégradés à répondre aux besoins de la plante. Comme le soulignent Mueller et al. (2012), la gestion des nutriments est le levier principal pour combler ce fossé productif. Sans une compensation minérale et organique suffisante, on parle d'« agriculture minière ». En s'appuyant sur les travaux de Vandermoere et al. (2021), l'agriculture minière peut être définie comme un système de gestion où les apports d'intrants sont maintenus en deçà des exportations par les récoltes, forçant le prélèvement dans les réserves du sol. Cette pratique bloque les producteurs dans un cycle de faibles rendements, où l'écart entre la production réelle et le potentiel continue de se creuser au détriment de la sécurité alimentaire (Affholder et al., 2013).

1.4.2 Facteurs limitants de la croissance du maïs : rôle de l'azote (N) et du phosphore (P)

En Afrique de l'Ouest, l'azote (N) et le phosphore (P) constituent les principaux facteurs limitants de la production végétale. Cependant, leur impact varie fortement selon la géographie : si le manque de phosphore limite surtout les rendements dans le Sahel sableux, c'est l'azote qui constitue le premier verrou en zone soudanienne (Buerkert et al., 2001). Les analyses de Tovihoudji et al. (2022) mettent d'ailleurs en évidence des teneurs très faibles, avec un azote total sous la barre des 750 mg kg⁻¹ et un phosphore assimilable (P-Bray) inférieur à 18 mg kg⁻¹. L'acidité fréquente de ces sols vient encore compliquer la situation en bloquant le phosphore sous des formes insolubles, le rendant inaccessible pour le maïs. Bien que le modèle STICS ne prenne pas en compte le cycle du phosphore dans sa version standard, sa grande précision sur la dynamique de l'eau et de l'azote nous permet de simuler fidèlement le facteur limitant majeur de notre zone d'étude.

1.4.3 Rendements et dynamique de production

L'analyse des statistiques officielles récentes (DSA, 2024) révèle une dynamique pré-occupante pour la culture du maïs au Bénin. Si la production nationale totale a connu une croissance soutenue, passant de 1,37 million de tonnes en 2016 à plus de 2,05 millions de tonnes pour la campagne 2023-2024, cette performance masque une baisse structurelle de la productivité.

En effet, l'augmentation des volumes produits repose quasi-exclusivement sur une stra-

tégie extensive. Les superficies cultivées ont plus que doublé en sept ans, passant de 1 million d’hectares en 2016-2017 à 2 millions d’hectares en 2023-2024. À l’inverse, les rendements moyens à l’hectare suivent une tendance négative marquée. Alors qu’ils s’établissaient autour de 1 350 kg/ha en 2016, ils ont chuté sous la barre symbolique de la tonne, atteignant 990 kg/ha lors de la campagne 2023-2024 (DSA, 2024).

Cette régression des rendements en milieu paysan ne traduit pas un manque de performance intrinsèque des semences, mais illustre plutôt l’incapacité des plantes à exprimer leur potentiel dans le milieu dégradé. Certes, les variétés améliorées diffusées par l’INRAB affichent un potentiel génétique oscillant entre 3 et 5 t/ha en station expérimentale (INRAB, 2019). Cependant, ces rendements optimaux ne sont atteints que sous des conditions de fertilisation et de gestion hydrique optimisées, hors de portée de la majorité des exploitations familiales. En réalité, le gouffre qui sépare les rendements réels de ce potentiel théorique met en lumière l’épuisement critique des sols. Sous l’effet d’une pression foncière accrue et de pratiques culturales peu régénératrices, la dégradation physique et chimique des terres prive les cultures des nutriments essentiels, bloquant leur potentiel génétique (Tovihoudji et al., 2022).

1.4.4 Impact du climat et des sécheresses

L’Afrique de l’Ouest tropicale est considérée comme un point chaud climatique ("climate hotspots"), avec une augmentation attendue des températures et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes dès 2040 (Sultan et Gaetani, 2016). Le changement climatique est l’une des deux principales catégories de processus à l’origine de la dégradation des terres (Boansi et al., 2024). Les sécheresses récurrentes, comme celles observées au Burkina Faso en 1970–1973, 1983–1984, 1991, 1994, 1998 et 2004, ont entraîné une dégradation accrue des terres agricoles (Boansi et al., 2024).

1.4.5 Activités humaines et pratiques non durables

L’autre grande catégorie de processus menant à la dégradation est liée aux activités humaines, notamment le changement d’utilisation des terres (expansion des cultures, intensification de l’agriculture, surpâturage et surexploitation des plantations de bois). Les pratiques agricoles non durables endommagent les terres à un rythme 100 fois plus rapide que le temps nécessaire à leur régénération naturelle (IFDC, 2024). L’agriculture intensive, associée à une gestion inadéquate des terres et à la forte utilisation d’intrants organo-minéraux, épuise les sols, rendant de vastes zones non-productives.

1.4.6 Pratiques culturales et gestion du sol au Bénin

Les pratiques agricoles actuellement dominantes dans les systèmes maïsicoles du Bénin reposent majoritairement sur des techniques traditionnelles, faiblement mécanisées et ca-

ractérisées par une gestion limitée de la fertilité organique. Ces pratiques contribuent à la dégradation progressive des sols et expliquent en partie la baisse des rendements observée dans les exploitations.

Le labour constitue l'opération centrale des systèmes de culture au Bénin. Dans la grande majorité des exploitations, il est réalisé manuellement à l'aide de la houe ou par traction animale, la motorisation restant marginale avec un taux de mécanisation inférieur à 10% (FAO, 2022 ; IFAD, 2021). Ce labour manuel est généralement superficiel, affectant les 10 à 15 premiers centimètres du sol. Ce retournement de la couche arable perturbe la structure physique du sol et accélère la minéralisation de la matière organique. À court terme, ce processus libère rapidement de l'azote minéral sous des formes assimilables par les jeunes plants, offrant un "boost" nutritionnel qui explique pourquoi cette pratique reste privilégiée pour le démarrage de la culture. Néanmoins, ce gain immédiat se fait aux dépens de l'épuisement des stocks de carbone organique, de la dégradation de la cohésion des agrégats et de l'accroissement de la vulnérabilité des terres à l'érosion hydrique et éolienne (Bationo et al., 2007).

La plupart des exploitations familiales exportent une grande partie des résidus après récolte, ce qui crée un déséquilibre entre les apports au sol, pour l'élevage et l'énergie domestique (Valbuena et al., 2012). Le maïs joue ici un rôle central : les tiges et les feuilles servent fréquemment de fourrage pour les ruminants, tandis que les rafles et les tiges sèches sont utilisées comme combustible domestique. Cette exportation systématique limite fortement l'apport de matière organique au sol et empêche le maintien de la structure du sol (Vandermoere et al., 2021). L'exposition directe de la surface du sol à l'énergie cinétique des précipitations favorise alors la dégradation physique par battance, ce qui réduit l'infiltration de l'eau et exacerbe les pertes par érosion (Bationo et al., 2007).

Les rotations pratiquées sont souvent courtes et dominées par des successions coton-maïs ou maïs-maïs, selon les zones (INRAB, 2019). Les légumineuses (niébé, arachide, soja) restent présentes mais sur des surfaces restreintes, malgré leur intérêt agronomique pour la fixation biologique de l'azote. Cette faible diversification accentue l'épuisement des nutriments et limite la résilience du système face aux stress climatiques.

La disponibilité faible en matière organique constitue un autre facteur limitant majeur. Les apports en fumier ou compost sont souvent très faibles, en raison d'un cheptel limité, à cause d'une collecte et d'un stockage inadaptés ou encore dû à la difficulté de transport entre les lieux de productions et d'applications des amendements (FAO, 2022). De nombreuses exploitations ne disposent pas de suffisamment de ressources organiques pour atténuer les pertes de fertilité liées à l'exportation des biomasses et aux processus d'érosion. Cette situation conduit à une diminution progressive du stock de carbone et à un appauvrissement des horizons superficiels.

Le désherbage est principalement assuré manuellement, souvent en deux à trois passages pendant la saison des pluies. L'absence de couverture du sol entre deux cultures

favorise la prolifération des adventices annuelles, nécessitant une forte mobilisation de main-d'œuvre. Dans certains cas, l'utilisation du feu pour nettoyer les parcelles avant la mise en culture est encore pratiquée, malgré ses effets délétères sur la biologie du sol et les risques d'érosion (IFDC, 2024).

Dans l'ensemble, ces pratiques traduisent un système agricole basé sur la mobilisation du travail manuel, des intrants limités et une faible restitution des biomasses au sol. Elles expliquent en grande partie l'épuisement progressif de la matière organique et des nutriments et la vulnérabilité accrue des cultures face aux stress climatiques. Elles constituent ainsi un point d'entrée stratégique pour explorer les alternatives de gestion durable telles que l'agriculture de conservation et l'intégration de plantes améliorantes.

1.4.7 Utilisation des engrais minéraux

L'application d'engrais N et P est indispensable pour compenser cette faible disponibilité naturelle. Les données issues des essais réalisés au nord du Bénin montrent qu'un apport même modeste en engrais entraîne une augmentation significative du rendement en grain par rapport au témoin non fertilisé ($1\,017\text{ kg ha}^{-1}$) (Tovihoudji et al., 2022). Par exemple, des doses réduites (technologie du microdosage) comme N25P4 ou N25P8 permettent déjà d'augmenter la production de 132 % à 173 % par rapport au témoin non fertilisé ($1\,017\text{ kg ha}^{-1}$) tandis que des doses légèrement supérieures (N35P8) entraînent des hausses dépassant 200 % (Tovihoudji et al., 2022).

Ces fortes réponses s'expliquent par une levée immédiate de la déficience azotée et phosphatique. Les gains de rendement en grain atteignent ainsi +200 % sous la dose vulgarisée recommandée et jusqu'à +208 % sous le microdosage N35P8 par rapport au témoin (Tovihoudji et al., 2022).

Malgré cette efficacité agronomique, plusieurs limites entravent l'usage optimal des engrais. La première est économique : le coût élevé des engrais minéraux constitue un frein majeur pour les petits exploitants, incapables d'investir dans les doses recommandées nationalement (N76P13), jugées inaccessibles et risquées (Okebalama et al., 2017; Tovihoudji et al., 2022).

Une seconde limite est environnementale et technique. La variabilité des pluies et la texture sableuse des sols (Lixisols) augmentent les risques de perte d'azote par lessivage, réduisant la rentabilité de l'investissement. À cela s'ajoute le rôle acidifiant des engrais à base d'ammonium (NH_4^+) et d'urée. Sous l'action des microorganismes, la nitrification rapide de l'ammonium en nitrate (NO_3^-) libère des protons (H^+), accélérant l'acidification de ces Lixisols déjà naturellement sensibles en raison de leur faible capacité d'échange cationique et de leur faible pouvoir tampon. Enfin, plusieurs études signalent que la fertilisation minérale exclusive peut mener à des bilans nutritifs partiels négatifs (exportations supérieures aux apports), entraînant une dégradation progressive de la fertilité chimique et biologique du sol à long terme (Tovihoudji et al., 2017). Ce risque d'épuisement souligne

la nécessité impérieuse de coupler la gestion minérale à des apports organiques.

1.5 Agriculture de conservation et plantes améliorantes

1.5.1 Définition et piliers fondamentaux

Selon la FAO (2025), l’agriculture de conservation est un système de production reposant sur trois principes complémentaires destinés à préserver durablement la fertilité des sols : la réduction du travail du sol, la couverture permanente du sol et la diversification des cultures. Leur mise en œuvre combinée vise à prévenir la perte de terres arables et à restaurer les sols dégradés.

1. **Travail minimal du sol** : La réduction du travail du sol regroupe les pratiques visant à limiter la perturbation mécanique du sol par rapport au labour conventionnel. Elle inclut le travail simplifié (reduced tillage), qui consiste en un travail superficiel du sol, et le semis direct (no-tillage), qui est l’absence totale de travail du sol en dehors de la ligne de semis. Ces pratiques sont utilisées dans la logique de préservation de la structure du sol, en évitant la destruction des agrégats, la rupture des macropores et l’exposition de la matière organique.

Sur le plan physique, ces pratiques permettent de diminuer l’érosion hydrique et éolienne, d’améliorer la stabilité structurale et d’augmenter l’infiltration de l’eau (Kassam et al., 2009). Elles favorisent également une meilleure conservation de l’humidité du sol, ce qui peut être déterminant en conditions tropicales soumises à une forte variabilité pluviométrique (Thierfelder et Wall, 2010). La réduction du travail du sol ralentit la minéralisation rapide de la matière organique, ce qui mène à une accumulation de carbone dans le sol. Toutefois, les effets sur les rendements restent dépendants du contexte de la parcelle et de la gestion globale du système : une méta-analyse montre que le semis direct seul peut parfois entraîner une légère baisse de rendement, mais que cette différence tend à disparaître lorsque la pratique est combinée avec les autres piliers de l’agriculture de conservation, notamment la couverture permanente et la diversification des cultures (Pittelkow et al., 2014).

Dans le contexte du Bénin, l’étude récente de Akplo et al. (2025) met en évidence l’intérêt du travail simplifié dans les rotations coton-maïs du nord du pays. Sur un essai split-plot comparant le labour conventionnel à plusieurs modalités de travail réduit (strip-till en un passage, semis direct, strip-till complété par sarclage), les auteurs montrent que les variantes de travail minimal réduisent la variabilité interannuelle des rendements et améliorent la stabilité économique des exploitations. Même lorsque les gains de rendement bruts ne dépassent pas systématiquement le labour, la diminution des coûts d’implantation et la réduction du risque économique se traduisent par une amélioration du revenu net et du ratio coût/bénéfice. Ces résultats sont confortés par les travaux de Yemadje et al. (2025),

qui montrent qu'en combinant no-tillage et association maïs-soja sur le même site, la marge brute peut être augmentée de l'ordre de 580\$ ha⁻¹ par rapport au système conventionnel, et que ce bénéfice se maintient sous des scénarios contrastés de prix des intrants et de rendement. Ces deux études confirment que, dans les conditions pédoclimatiques et socio-économiques du Bénin, la réduction du travail du sol couplée à une diversification par les légumineuses constitue une stratégie pertinente pour renforcer la résilience agronomique et économique des systèmes agricoles.

2. **Couverture permanente du sol :** Assurée par les résidus de culture (paillage) ou par des plantes de couverture vivantes, elle protège le sol contre l'érosion hydrique et éolienne, atténue l'impact des pluies, limite la formation de la croûte de battance et réduit l'évaporation. Elle joue également un rôle essentiel dans la régulation thermique du sol et dans l'apport de matière organique. La culture de couverture apporte des bénéfices supplémentaires grâce aux systèmes racinaires qui stimulent l'activité microbienne, offrent un recyclage des nutriments et une meilleure stabilité structurale du sol. Lorsque ces légumineuses sont cultivées en association avec une céréale, ces complémentarités se traduisent par une hausse moyenne de 42 % de l'efficacité d'utilisation des ressources du milieu (Namatsheve et al., 2020).
3. **Diversification des cultures :** Les rotations et associations culturales consistent à alterner/combiner différentes espèces végétales dans le temps et/ou dans l'espace. Cette pratique permet de rompre les cycles des bioagresseurs, d'optimiser l'utilisation des ressources du sol et les relations plante-microorganismes, ce qui apporte des effets positifs sur la fertilité et la productivité des systèmes agricoles (Beillouin et al., 2021).

1.5.2 Les plantes améliorantes : définition et rôles agronomiques

Les plantes améliorantes sont des espèces végétales cultivées principalement pour leurs effets bénéfiques sur le sol et sur les cultures associées ou suivantes, plutôt que pour leur valeur commerciale directe. Elles renforcent les piliers de l'agriculture de conservation en assurant la couverture permanente du sol et la diversification des rotations ou associations culturales. Leurs fonctions agronomiques sont multiples et complémentaires.

1. **Protection physique du sol :** En couvrant la surface du sol, les plantes améliorantes protègent les agrégats de l'impact des gouttes de pluie, réduisant ainsi la formation de la croûte de battance et les pertes par érosion hydrique. Si leur présence limite l'évaporation directe du sol (E) et maintient l'humidité au sol, ces bénéfices hydriques doivent être nuancés. Lorsqu'elles sont vivantes, les plantes de couverture consomment et transpirent également de l'eau (T). Cette transpiration peut compenser, voire dépasser, l'économie réalisée sur l'évaporation, créant parfois une compétition hydrique avec la culture principale en cas de sécheresse (Unger

et Vigil (1998) cité dans la revue de Kaye et Quemada, 2017). L'effet net sur le maintien de l'humidité du sol résulte donc d'un compromis entre la réduction de l'évaporation et la hausse de la transpiration globale, un équilibre qui souligne l'importance d'un décalage temporel des cycles ou d'une transition rapide vers un mulch mort (Thierfelder et Wall, 2010).

2. **Apport de biomasse et amélioration de la matière organique :** Les plantes de couverture produisent des quantités significatives de biomasse aérienne et racinaire. Lorsqu'elles sont incorporées au sol ou laissées en mulch, elles contribuent à reconstituer les stocks de carbone organique, à stimuler l'activité biologique et à améliorer la structure du sol. Une méta-analyse menée en Afrique subsaharienne montre que l'intégration de légumineuses comme plantes de couverture ou engrais verts peut augmenter de façon spectaculaire les rendements de la culture principale de maïs, pouvant jusqu'à doubler la production par rapport aux pratiques sans amendement organique (Sileshi et al., 2009).
3. **Fixation biologique de l'azote :** Les légumineuses utilisées comme plantes améliorantes présentent la capacité unique de fixer l'azote atmosphérique par voie symbiotique, grâce aux bactéries du genre rhizobiums présentes dans leurs nodosités racinaires. Si ce mécanisme constitue un apport gratuit d'azote pour l'agrosystème, il engendre un coût physiologique majeur pour la plante hôte. La réduction de N_2 en NH_4^+ par le complexe enzymatique de la nitrogénase exige un investissement énergétique considérable, absorbant 10 à 30 % des photosynthétats journaliers de la plante, soit environ 16 à 24 moles d'ATP par mole de N_2 fixé (Kaschuk et al., 2009). Ce coût métabolique élevé rend le processus très dépendant de la nutrition phosphatique et explique pourquoi la plante limite ou inhibe sa nodulation en présence d'azote minéral facilement assimilable dans le sol afin de préserver ses ressources carbonées (Namatsheve et al., 2020).
4. **Suppression des adventices :** La couverture dense du sol par les plantes améliorantes réduit la disponibilité en rayonnement photosynthétiquement actif pour les adventices, limitant leur germination et leur développement (Liebman et Dyck, 1993). Cette fonction d'étouffement est particulièrement précieuse dans les systèmes à faibles intrants d'Afrique de l'Ouest, où le désherbage manuel constitue l'un des principaux goulets d'étranglement en termes de main-d'œuvre (Chikoye et al., 2004).
5. **Recyclage des nutriments :** Le système racinaire profond de certaines plantes améliorantes peut explorer des horizons plus profonds que les céréales, remontant des nutriments lessivés vers la surface et les rendant disponibles après décomposition des résidus. Par ailleurs, certaines espèces améliorent la disponibilité du phosphore via la solubilisation de formes peu accessibles (Li et al., 2016).

1.6 Le niébé comme plante améliorante

1.6.1 Origine, importance et distribution

Le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) est une légumineuse herbacée annuelle appartenant à la famille des Fabacées. Cultivé sur plus de 11,5 millions d’hectares en Afrique, en Asie du Sud-Est et dans certains pays des Amériques, le niébé représente la troisième légumineuse la plus importante au monde. Le Nigéria et le Niger concentrent à eux seuls environ 66 % de la production mondiale (Wikipedia, 2026). En Afrique de l’Ouest, le niébé est étroitement intégré aux systèmes vivriers. Il est cultivé en culture pure ou, le plus souvent, en association avec des céréales telles que le maïs, le sorgho ou le mil.

1.6.2 Morphologie et phénologie

Le niébé est une légumineuse herbacée annuelle qui, en raison de sa tolérance pour les sols sableux et les faibles précipitations, constitue une culture importante dans les régions semi-arides d’Afrique et d’Asie. Les feuilles sont trifoliées, les fleurs de couleur blanche à violacée, et les gousses, pendantes, contiennent de 6 à 13 graines de couleurs très variées. Le cycle de développement du niébé est court : leur cycle se complète en 60 à 90 jours pour la plupart des variétés (Sarr et al., 2022). Cette précocité est un atout considérable dans les systèmes d’association, car elle permet au niébé de compléter son cycle avant que l’ombrage induit par le maïs ne devienne trop pénalisant pour sa productivité. Le niébé est thermophile et relativement résistant à la sécheresse comparativement aux autres légumineuses cultivées en Afrique tropicale (Timko et Singh, 2008). Sur le plan racinaire, le niébé développe un pivot principal pouvant s’enfoncer profondément dans le profil, accompagné de nombreuses racines latérales portant les nodosités symbiotiques avec *Bradyrhizobium spp.*

1.6.3 Fixation biologique de l’azote

La capacité de fixation symbiotique de l’azote atmosphérique est la propriété centrale qui fait du niébé une plante améliorante dans les systèmes céréaliers ouest-africains. Grâce aux nodosités racinaires, le niébé peut couvrir une part importante de ses besoins par fixation symbiotique, ce qui en fait une culture précieuse pour les agriculteurs disposant de peu d’intrants et bien adaptée aux systèmes d’association. La fixation est proportionnelle à la croissance de la plante hôte qui alimente les nodules en photosynthétats (Brisson et al., 2009). Les quantités fixées varient donc avec la disponibilité du substrat et la production de biomasse : en association avec une céréale, les valeurs sont plus faibles en raison de la compétition pour la lumière qui réduit alors la biomasse produite du niébé, avec une fixation moyenne de 57 kg N ha⁻¹ en monoculture contre 36 kg N ha⁻¹ en association céréale-niébé (Namatsheve et al., 2020). La fertilisation minérale azotée

peut par ailleurs inhiber partiellement la nodulation et réduire l’efficacité de la fixation symbiotique (Namatsheve et al., 2020).

Le bénéfice azoté du niébé pour le maïs associé doit néanmoins être nuancé. En cours de saison, les transferts directs par décomposition des nodosités et rhizodépôts racinaires restent modestes en conditions de terrain, de l’ordre de 2 kg N ha⁻¹ (Laberge et al., 2011). L’essentiel du bénéfice s’exprime en théorie après décomposition des résidus, au profit de la culture suivante mais ce bénéfice dépend de la gestion des fanes (feuilles et tiges). Les fanes sont fréquemment récoltées comme fourrage pour la saison sèche et constituent un potentiel commercial (Samireddypalle et al., 2017). Lorsque les fanes sont ainsi exportées, la restitution au sol se limite aux racines, dont la biomasse ne représente qu’environ 6 à 8 % de la matière sèche totale de la plante (Binacchi et al., 2022). Le bilan d’azote du système peut alors devenir faiblement positif, nul, voire négatif, ce qui relativise la qualification de « plante améliorante » (Franke et al., 2018).

1.6.4 Effets sur la productivité du système maïs-niébé

L’évaluation de la productivité d’un système d’association s’effectue généralement par le Land Equivalent Ratio (LER), utilisé par Mead et Willey en 1980 pour quantifier l’avantage biologique d’une association culturale. Il représente la superficie de monocultures nécessaire pour obtenir les mêmes rendements que l’association sur une même surface. Un LER supérieur à 1 indique un avantage d’utilisation des ressources en faveur de l’association. Voici l’équation qui la caractérise :

$$LER = LER_A + LER_B = \frac{Y_{A,assoc}}{Y_{A,pur}} + \frac{Y_{B,assoc}}{Y_{B,pur}} \quad (1)$$

Où :

Y_{assoc} est le rendement de la culture en association (par unité de surface totale).

Y_{pur} est le rendement de la culture en monoculture (témoin) dans les mêmes conditions de sol et de climat.

Dans une méta-analyse couvrant 60 publications en Afrique subsaharienne, le LER moyen du système maïs-niébé est de $1,42 \pm 0,47$ (Namatsheve et al., 2020), signifiant que l’association est en moyenne 42% plus productive à l’échelle de la parcelle qu’un système de monocultures équivalent. L’écart-type élevé (0,47) traduit cependant une forte variabilité contextuelle : selon les conditions pédoclimatiques, les variétés utilisées et les densités de semis, le LER peut descendre sous 1, auquel cas l’association n’offre plus d’avantage productif. Cette complémentarité s’explique par une utilisation plus complète du rayonnement solaire intercepté, une bonne répartition temporelle dans l’absorption des ressources (notamment azotée) entre la céréale et la légumineuse.

Néanmoins, le maïs exerce une dominance compétitive marquée sur le niébé en raison

de sa plus grande hauteur : le ratio¹ est de 1,96 pour le maïs et de 0,58 pour le niébé (Dimande et al., 2024), traduisant un avantage compétitif net de la céréale, ce qui se traduit par une réduction du rendement en grains du niébé en association par rapport à sa culture pure.

1.6.5 Effets sur les propriétés du sol et la culture suivante

Les effets du niébé sur les propriétés physico-chimiques du sol à court terme demeurent généralement limités et peu significatifs sur le plan statistique, les modifications structurales du pool organique nécessitant plusieurs cycles culturaux pour être quantifiables (Kussie et al., 2024). Ce constat est cohérent avec les résultats obtenus sur le site d’Okpara après sept années d’essai, où aucune différence significative de carbone total, d’azote total ou de pH n’a été détectée entre les systèmes de culture (NeuJean, 2025). Des études menées en Côte d’Ivoire indiquent néanmoins qu’après deux cycles culturaux successifs, l’association maïs-niébé génère des teneurs en carbone et en azote du sol statistiquement supérieures à celles du sol sans culture associée (Antoine et al., 2019). Les effets positifs peuvent donc émerger à moyen terme dans des contextes pédologiques favorables. En revanche, l’influence du niébé est plus immédiate sur la dynamique de l’azote, via la minéralisation rapide de ses résidus à faible rapport C/N. La fixation apparente d’azote peut atteindre 102,5 kg ha⁻¹ en association maïs-niébé, une performance qui inclut la contribution synergique des diazotrophes endophytes associés au maïs (Dimande et al., 2024). La culture suivante bénéficie ainsi d’un azote résiduel substantiel mais aussi d’une meilleure absorption du phosphore. La quantification précise de ces effets sur la dynamique de l’azote et la productivité du système constitue précisément l’un des enjeux de la modélisation agronomique développée dans ce travail, qui vise à évaluer dans quelle mesure le modèle STICS est capable de reproduire ces interactions.

1.7 Problématique et question de recherche

La complexité des interactions au sein des agrosystèmes rend l’expérimentation in situ à la fois coûteuse, chronophage et limitée dans son pouvoir d’extrapolation. Dans ce contexte, la modélisation agronomique constitue un outil indispensable pour valoriser les données de terrain, tester des hypothèses et mieux comprendre les processus sous-jacents aux effets observés. Le modèle STICS présente plusieurs atouts pour répondre aux objectifs de cette étude : il simule explicitement la dynamique de l’azote, le bilan hydrique, la croissance des cultures et la fixation symbiotique des légumineuses, tout en disposant d’un module d’association bispécifique permettant de représenter les interactions entre

1. ratio de compétition (CR) d’une espèce, défini par Willey et Rao (1979), s’écrit $CR_i = \frac{LER_i}{LER_j} \times \frac{z_j}{z_i}$, où LER_i et LER_j sont les LER partiels des deux espèces et z_i , z_j leurs proportions semées dans le mélange. Une valeur supérieure à 1 traduit une compétitivité supérieure à celle de l’espèce associée, à proportions semées corrigées.

deux espèces en association. Cependant, son application aux conditions pédoclimatiques tropicales d’Afrique de l’Ouest reste peu documentée pour le système maïs-niébé, et sa capacité à reproduire fidèlement les effets de l’association culturale dans ce contexte demeure à démontrer. La question centrale de ce mémoire est donc la suivante :

Dans quelle mesure le modèle STICS est-il capable de simuler fidèlement la croissance, la phénologie et les performances agronomiques du maïs (Zea mays L.) en culture pure et en association avec le niébé (Vigna unguiculata (L.) Walp.) dans les conditions pédoclimatiques de Parakou (Bénin), et que nous apprend-il sur les mécanismes par lesquels le niébé influence la productivité du système ?

Cette question se décline en trois étapes :

1. Calibrer et valider le modèle STICS pour le maïs en culture conventionnelle (S1) à partir de données expérimentales collectées à Okpara.
2. Paramétrer le modèle pour le niébé en conditions optimisées et évaluer sa capacité à simuler la croissance et la fixation d’azote de cette légumineuse.
3. Simuler le système d’association maïs-niébé (S2) et évaluer dans quelle mesure STICS reproduit les effets observés sur les performances agronomiques des cultures.

2 Modélisation de la croissance des cultures et modèle STICS

2.1 Principes et objectifs de la modélisation agronomique

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité, utilisé pour faciliter la compréhension, l’analyse ou la prédiction des comportements de ce système sous différentes conditions. Le modèle inclut les composants du système et les interactions qui se produisent à l’intérieur de ce système. Dans le cas des modèles agronomiques, ils sont centrés sur l’agroécosystème qui comporte les interactions atmosphère, sol, plante, notamment les échanges d’énergie, d’eau et de nutriments. Ils constituent des outils d’aide à la décision pour l’optimisation de l’irrigation ou de la fertilisation, ainsi que pour la prévision des rendements agricoles. Au-delà de la gestion saisonnière, la modélisation permet également d’évaluer la vulnérabilité des systèmes de culture face aux aléas et aux changements climatiques à plus long terme.

2.2 Différents modèles

Depuis les années 1980, plusieurs modèles ont été développés pour simuler le fonctionnement des systèmes de culture. Ces modèles permettent d’estimer différents paramètres

agronomiques, physiologiques et environnementaux à l’échelle de la parcelle pour une résolution journalière. Les variables d’entrée sont le climat, les propriétés du sol et les différents paramètres des pratiques culturales. Les modèles les plus couramment utilisés sont APSIM, AQUACROP, EPIC, DSSAT et STICS.

TABLE 8 – Comparaison des principaux modèles de simulation de culture selon leurs fonctionnalités.

Fonctionnalité	AQUACROP	DSSAT	APSIM	EPIC	STICS
Biomasse et rendement	✓	✓	✓	✓	✓
Cycle de l’azote	✓*	✓	✓	✓	✓
Gestion de l’eau	✓	✓	✓	✓	✓
Rotations culturales	✗	✓	✓	✓	✓
Associations culturales	✗	✗**	✓***	✗	✓
Simulation long terme	✓	✓	✓	✓	✗****
Agriculture de conservation	✗	✓	✓	✓	✓

* AQUACROP représente la fertilité azotée de manière très simplifiée (Raes et al., 2009)
 ** DSSAT dispose d’un module limité pour certaines associations (maïs–haricot) mais sans gestion dynamique du partage des ressources.
 *** APSIM simule les associations mais sans module dédié au transfert d’azote légumineuse–céréale aussi explicite que STICS.
 **** STICS gère les successions pluriannuelles par enchaînement des cultures, mais l’incertitude croît sur le long terme (Brisson et al., 2009, §14).

Afin de choisir le modèle adapté aux objectifs de ce mémoire, les critères prioritaires sont la simulation des associations culturales et la modélisation explicite de la fixation symbiotique de l’azote et de son transfert vers la céréale associée mais aussi vers la culture suivante. La table 8 synthétise les principales fonctionnalités des modèles les plus couramment utilisés. Parmi eux, STICS se distingue par son module d’intercropping natif permettant une gestion dynamique du partage du rayonnement, de l’eau et de l’azote entre deux espèces (Brisson et al., 2004), ainsi que par sa simulation explicite de la fixation symbiotique de l’azote atmosphérique par les légumineuses (Traoré et al., 2022). Ces capacités en font l’outil le plus adapté pour répondre à la question de recherche posée dans ce mémoire.

2.3 Revues de modélisation dans les contextes tropicaux

En contexte tropical, la variabilité climatique, l’hétérogénéité des différentes caractéristiques de sols, la diversité des systèmes de culture et pratiques culturales rendent indispensable une calibration locale des modèles agronomiques. Sans ajustement aux paramètres techniques, pédologiques et climatiques locaux, les performances prédictives peuvent être fortement dégradées.

Une revue publiée en 2024 dans Heliyon synthétise l’ensemble des travaux scientifiques menés en Éthiopie avec le modèle APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator).

Cette revue constitue un exemple pertinent pour l’analyse des pratiques de calibration et de validation en environnement tropical africain (Mihret et al., 2024).

Les cultures ayant le plus grand nombre de simulations sont : maïs, blé, sorgho, légumineuses (haricot, pois chiche) et les systèmes en rotation. Les variables les plus fréquemment évaluées lors des phases de calibration et validation sont : rendement en grain, biomasse aérienne, dates phénologiques (floraison, maturité), indice de surface foliaire (LAI), humidité du sol, dynamique de l’azote.

Dans cette même étude une méthodologie récurrente fut observée :

1. Paramétrisation variétale (durées des phases phénologiques, efficacité de conversion du rayonnement)
2. Paramétrisation pédologique (capacité au champ, point de flétrissement, conductivité hydraulique)
3. Ajustement des paramètres liées au cycle de l’azote
4. Utilisation des données expérimentales pour la validation

Bien qu’APSIM diffère de STICS, ils fonctionnent tous deux selon un système atmosphère-sol-plante. De plus, les études réalisées se sont déroulées dans un contexte climatique tropical. Cette approche servira donc de base méthodologique pour la mise en œuvre du modèle STICS dans le cadre de cette étude sur le maïs au Bénin.

2.4 Applications au maïs et aux systèmes associés

Dans les systèmes associés incluant une céréale (maïs ou sorgho) et une légumineuse, STICS-intercrop se distingue par une gestion dynamique de l’association de culture :

1. **Rayonnement solaire** : Le modèle utilise un transfert radiatif qui estime la lumière interceptée par l’espèce dominante et celle transmise à l’espèce de strate inférieure. L’ombrage induit par la céréale est un facteur déterminant de la réduction de biomasse de la légumineuse associée.
2. **Dynamique azotée et fixation N_2** : STICS simule la compétition pour l’azote minéral du sol tout en intégrant la fixation symbiotique des légumineuses. L’étude de Traoré et al. (2022) souligne que le modèle reproduit l’effet inhibiteur de la fertilisation minérale sur la fixation du N_2 atmosphérique.
3. **Bilan hydrique** : Les besoins en eau sont calculés via un schéma résistif permettant de prendre en compte les microclimats spécifiques à l’association (ex : transfert de chaleur sous la plante dominante).

2.5 Limites de la modélisation agronomique

1. **Disponibilité et qualité des données (Data Gap)** : La fiabilité des simulations est souvent compromise par l’absence de données météorologiques précises

et de caractérisations des sols. L'utilisation de valeurs par défaut pour la capacité de rétention en eau ou la profondeur d'enracinement introduit des biais majeurs (Grassini et al., 2015).

2. **Exclusion des stress biotiques** : Les modèles physiologiques simulent un rendement limité par le climat et les nutriments, mais ignorent les pertes dues aux ravageurs (insectes, rongeurs), aux maladies, etc. Les résultats reflètent donc un potentiel de production et non le rendement réel.
3. **Hétérogénéité spatiale** : Les modèles considèrent la parcelle comme une unité uniforme. Ils ne capturent pas la variabilité intra-parcellaire (zones de fertilité, ombrage d'arbres).

Troisième partie

Matériels et méthodes

3 Site expérimental et données

3.1 Zone d'étude et caractéristiques agroclimatiques

Le site d'étude est situé à la station de recherche d'Okpara ($9^{\circ}21'14.42''$ N, $2^{\circ}41'3.21''$ E), dans le village de Kokoma, à environ 10 km du centre-ville de Parakou, au centre-nord du Bénin. Le terrain présente une altitude moyenne de 327 m avec une pente faible de 1,3 %.

Site expérimental en périphérie de Parakou, Bénin

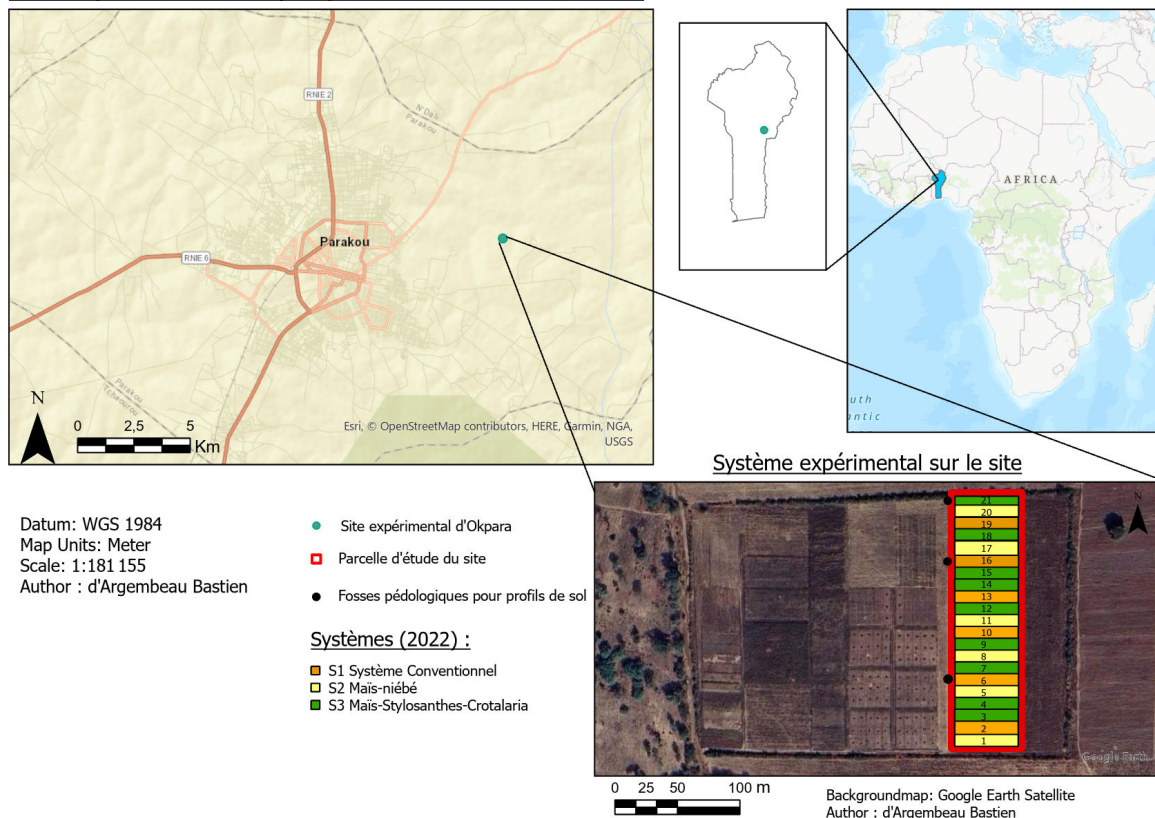


FIGURE 2 – Localisation du site expérimental d'Okpara au centre-nord du Bénin

3.1.1 Caractéristiques climatiques

Le climat de la région est de type tropical humide (soudanien), caractérisé par une saison des pluies unique de mai à octobre. Les séries historiques (1994–2024) extraites de la base satellitaire NASA POWER pour le site d'Okpara ($9^{\circ}21'14,42''$ N, $2^{\circ}41'3,21''$ E) indiquent une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 1150 mm, une température moyenne de 27°C et un rayonnement solaire quotidien moyen de $20\text{ MJ m}^{-2}\text{ j}^{-1}$. La station météorologique

téorologique d’Okpara n’étant devenue opérationnelle qu’en novembre 2022, la campagne de calibration 2022 s’appuie sur la série satellitaire NASA POWER. La fiabilité de ces données estimées a été validée par Neujean(2025), qui confirme leur très bonne concordance avec les mesures locales pour les températures et le rayonnement solaire, malgré des biais de réanalyse sur l’humidité et le vent. Pour les campagnes de validation 2023 et 2024, les simulations utilisent directement les mesures *in situ* (données transmises par Seydou Kamarou). Enfin, par souci de continuité visuelle, l’ensemble des climatogrammes du mémoire (Figures 3 et 9 à 11) provient de la série temporelle NASA POWER.

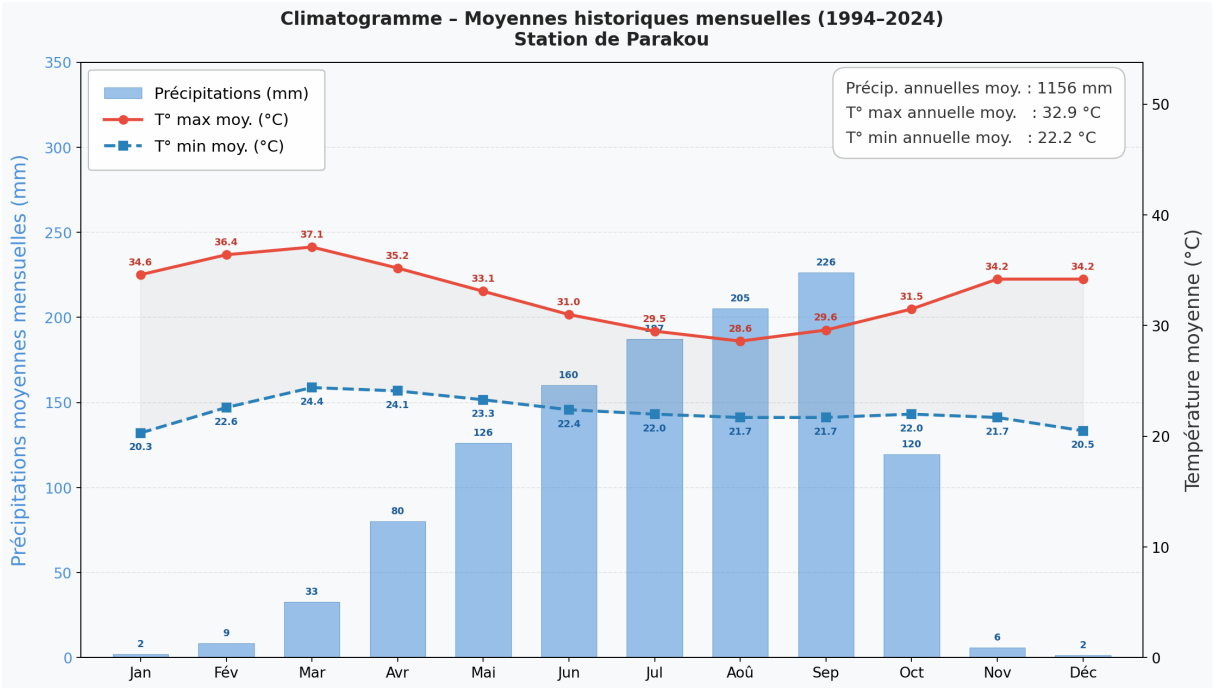


FIGURE 3 – Climatogramme de la station de Parakou (1994-2024) (NASA POWER | Data Access Viewer (DAV), 2026)

3.1.2 Données relatives au sol

Les sols du site d’Okpara sont de type ferrugineux tropical (Youssof et Lawani, 2000), correspondant aux Lixisols dans la classification internationale WRB (Mantel et al., 2023). Ces sols sont caractérisés par un bon drainage et une texture sablo-limoneuse en surface (Laibi et al., 2017). Ils présentent plusieurs contraintes agronomiques notables : sensibilité à l’érosion hydrique, pH faiblement acide (entre 5,5 et 6,5 selon les horizons), faible réserve en eau utile (REU), faible capacité d’échange cationique (CEC) et déficiences en azote, phosphore et potassium (Ménard, 2018).

Trois fosses pédologiques d’un mètre de profondeur ont été creusées sur le site afin de caractériser la morphologie et les propriétés physico-chimiques du profil. Le tableau 9 présente les propriétés chimiques par horizon du profil représentatif situé à coté (à l’ouest) des parcelles expérimentales.

TABLE 9 – Propriétés physico-chimiques, granulométrie et classes texturales par horizon du profil pédologique du site d’Okpara (parcelle n°6, adaptées de Neujean, 2025).

Horizon	Prof. (cm)	Texture*	C _{org} (%)	N _{tot} (%)	C/N	pH H ₂ O
A	0–25	Sableuse	0,43	0,040	10,7	6,1
AB	25–45	Sablo-limoneuse	0,27	0,031	8,5	5,5
B1	45–75	Sablo-limoneuse	0,18	0,020	8,0	5,8
B2	75–100	Sablo-argilo-limoneuse	0,14	0,028	5,0	5,9

*Classes texturales déterminées selon le triangle USDA à partir de la granulométrie moyenne par horizon mesurée et estimée sur la parcelle n°6 du site d’Okpara (Neujean, 2025).

Les propriétés hydrodynamiques du sol ont été déterminées sur des échantillons non remaniés à partir des trois fosses pédologiques. La courbe de rétention en eau a été obtenue par la méthode d’évaporation HYPROP (Schindler et al., 2010), complétée par la méthode des plaques de pression (Richards, 1948) pour estimer le point de flétrissement permanent sur la base d’échantillons des 5 premiers centimètres du sol au sein des parcelles. Les couples teneur en eau–potentiel matriciel ont ensuite été ajustés selon le modèle de van Genuchten. La masse volumique apparente de l’horizon de surface a été mesurée par prélèvement à 0–5 cm à l’aide de cylindres de Kopecky et est comprise entre 1,50 et 1,65 g cm⁻³.

Le profil a été décrit jusqu’à 100 cm de profondeur ; il présente une stratification morphologique nette en quatre horizons (A, AB, B1, B2 ; tableau 9), avec une diminution régulière de la teneur en carbone organique et de l’azote total avec la profondeur. Une hétérogénéité notable de la teneur en carbone organique a été documentée sur l’ensemble du dispositif, avec des teneurs variant de 0,2 à plus de 1,2 % selon les parcelles (pour l’horizon A). Dans le modèle STICS, cette variable est renseignée par la taille du pool d’azote organique actif (Norg) et par le rapport C/N du sol (cnsol). Afin de représenter au mieux le comportement global du dispositif d’Okpara, un profil de sol moyen représentatif a été retenu pour les simulations. La capacité d’infiltration du sol (*INFIL*) a été paramétrée en s’appuyant sur les données de granulométrie mesurées sur le site d’étude. Selon la classification texturale de l’USDA, le profil évolue d’une texture sableuse en surface à sablo-argilo-limoneuse en profondeur.

L’application des fonctions de pédotransfert universelles établies par Saxton et Rawls (2006) indique des conductivités hydrauliques à saturation (K_{sat}) théoriques comprises entre 297 mm h⁻¹ dans les 15 premiers centimètres et 13 mm h⁻¹ en profondeur (312 mm j⁻¹). Il convient toutefois de souligner une distinction conceptuelle majeure entre la conductivité instantanée K_{sat} et le paramètre *INFIL* du modèle STICS. Conformément au formalisme hydrodynamique à réservoirs de STICS (Brisson et al., 2009) , *INFIL* ne représente pas la conductivité à saturation, mais la quantité maximale d’eau stockée dans la macroporosité qui s’infiltré d’une couche vers la suivante d’un jour à l’autre (mm j⁻¹). Ce paramètre dépend donc de l’épaisseur de la couche modélisée et des tables de pédotransfert internes

de STICS (Wösten et al., 1999, Ritchie 1985 cités dans Beaudoin et al., 2023), qui préconisent des capacités de transfert journalier nettement inférieures aux K_{sat} brut afin d’éviter une vidange instantanée irréaliste des réservoirs discrétisés. Ainsi, la valeur retenue de $INFIL = 360 \text{ mm j}^{-1}$ (15 mm h^{-1}) pour l’horizon de surface (0–25 cm) assure un drainage fluide et réaliste sans engorgement artificiel.

3.2 Dispositif expérimental et conduites culturales

3.2.1 Dispositif expérimental et traitements

Le dispositif expérimental d’Okpara, initié en 2017 et suivi de manière continue jusqu’en 2024, est un bloc complet randomisé (BCR) comportant 21 parcelles réparties en trois blocs. Chaque parcelle élémentaire mesure $50 \text{ m} \times 8 \text{ m}$. Cette continuité sur huit campagnes culturales permet d’étudier des systèmes ayant un historique de pratiques bien établi. Les traitements principaux comparent trois systèmes de gestion des sols et des cultures :

- **S1 (Système Conventionnel, SC)** : Caractérisé par un labour à la charrue à une profondeur de 20 cm. La parcelle est en rotation de coton (année 1) et maïs (année 2).
- **S2 (Agriculture de Conservation, AC-1)** : Utilisation du *strip-tillage* (travail du sol uniquement sur la ligne de semis), réalisé environ un mois avant le semis pour 2022 et 2023 (7 jours seulement pour 2024), et association du maïs avec le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.).
- **S3 (AC complet, AC-2)** : *Strip-tillage* localisé avec une association complexe incluant des plantes de couverture telles que *Stylosanthes guianensis* et *Crotalaria retusa* pour favoriser l’apport de biomasse et la fixation d’azote.

Seuls les systèmes *S1* et *S2* sont évalués dans ce travail. Le système *S3*, qui intègre une association incluant *Stylosanthes guianensis* et *Crotalaria retusa*, n’a pas été simulé en raison de l’absence de paramètres de calibration validés pour ces espèces dans STICS v10.5.0. De plus, le module d’association de STICS est bispécifique, ne permettant pas de simuler simultanément plus de deux espèces en compétition (Beaudoin et al., 2023).

3.2.2 Gestion agronomique

La culture principale étudiée pour l’entièreté des systèmes est le maïs (*Zea mays* L.), variété EVDT 97 STR W. Le semis est effectué avec un écartement de 80 cm entre les lignes et 40 cm sur la ligne. Avec 2 plants par poquets la densité est donc de $6,25 \text{ plants/m}^2$ (soit 62 500 plants/ha). La fertilisation minérale standard (Dose Recommandée, DR) par bande consiste en l’apport de :

- 200 kg/ha de NPK (13-17-17) appliqué vers 15 jours après semis (JAS).
- 50 kg/ha d’urée (46 % N) appliqué vers 45 JAS.

Le modèle ne prend pas en compte le mode d'épandage de l'engrais (localisé ou généralisé). Il permet uniquement de spécifier si la fertilisation est appliquée en surface ou incorporée sous la surface du sol.

3.2.3 Dispositif d'association maïs-niébé (S2)

Dans le système S2, le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp., variété 58-74f) est semé 18 jours après le maïs en 2022 (20 jours en 2023 et 25 jours en 2024). Ce décalage limite la compétition précoce pour la lumière et calque le cycle court de la légumineuse (60–75 jours) sur la fenêtre de ressources disponibles sous le couvert de maïs. Le niébé est implanté en double ligne dans chaque interligne du maïs, à 0,2 m de la rangée de maïs adjacente, ce qui porte l'espacement entre les deux rangs de niébé à 0,4 m. Semé avec 2 plants par poquet, la densité de semis est de 12,5 plants/m². Ce dispositif est illustré à la Figure 4.

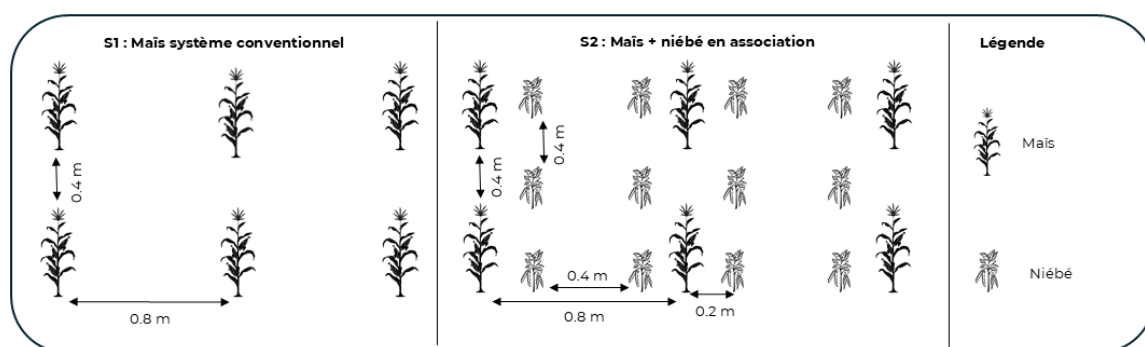


FIGURE 4 – Illustration dispositif des cultures seules et cultures associées adapté de Seydou Kamarou (communication personnelle)

3.2.4 Données phénologiques

Le suivi phénologique du maïs a été réalisé sur l'ensemble des plants des quatre lignes centrales de chaque parcelle, soit entre 114 et 187 plants selon les années et les parcelles (moyenne : ≈ 170 plants). Les stades suivants ont été enregistrés en nombre de jours après semis (JAS) : apparition de la première fleur, 50 % de floraison (50 % des plants en fleurs), 50 % d'anthèse, 50 % de floraison femelle, 50 % d'épiaison et maturité physiologique. Les données moyennes par traitement et par année sont présentées dans la table 10.

TABLE 10 – Dates des stades phénologiques du maïs (JAS) par système de culture et par campagne, site d’Okpara (3 parcelles par traitement). Les données détaillées par parcelle sont présentées en Annexe C.1

Campagne	Système	1ère fleur	50 % de floraison	50 % d’épiaison	Maturité physiologique
2022	S1	47	59	77	90
	S2	47	60	78	90
2023	S1	44	54	75	91
	S2	48	55	77	90
2024	S1	46	55	76	89
	S2	47	55	77	90

3.3 Données collectées et traitements statistiques

3.3.1 Paramètres de croissance

Au cours des campagnes 2022 à 2024 (pour 2017 à 2021, seul le rendement final à la récolte a été mesuré), la biomasse aérienne sèche a été mesurée par méthode destructive toutes les deux semaines, de 30 à 90 JAS pour le maïs et le niébé. À chaque date de collecte, les plants de deux poquets consécutifs sur la ligne de biomasse (ligne adjacente à la bordure) sont coupés au ras du sol par parcelle. La biomasse totale aérienne est considérée sans séparation par organe. Un échantillon composite est prélevé, pesé à l’état frais, puis séché à l’étuve à 70°C jusqu’à masse constante pour la détermination de la teneur en matière sèche. La biomasse sèche par hectare est calculée à partir de la densité de plants à la récolte mesurée sur la surface utile de chaque parcelle.

La surface foliaire (LA) de chaque plant de maïs échantillonné est estimée à partir de la longueur et de la largeur maximale de chacune de ses feuilles (également uniquement pour 2022-2024) :

$$LA = L \times l_{\max} \times k \quad (2)$$

où L est la longueur de la feuille (cm), $l_{\max}$ sa largeur maximale (cm) et $k = 0,75$ un facteur de forme (Abbasi et al., 2013 cité dans Tovihoudji et al., 2022).

L’indice de surface foliaire est ensuite obtenu en rapportant la surface foliaire d’un plant à la surface de sol qui lui est allouée :

$$LAI = \frac{LA}{D} \quad (3)$$

où D est la surface de sol disponible par plant. À la densité de semis de 6,25 plants/m² (62 500 plants/ha), cette surface vaut $D = 10\,000/6,25 = 1600$ cm² par plant. Comme pour la biomasse, ces mesures de LAI au champ ont été effectuées toutes les deux semaines de 30 à 90 JAS sur la période 2022–2024.

3.3.2 Rendement et composantes du rendement

À la récolte, le rendement en grain (kg/ha) et le rendement en paille (kg/ha) sont déterminés sur les quatre lignes centrales de chaque parcelle, soit une surface utile de 13,44 m² pour le maïs et de 8 m² pour le niébé. Le maïs et le niébé sont récoltés à pleine maturité. Les grains sont pesés après égrenage des épis et des gousses à l'aide d'une balance électronique. Le rendement grain est exprimé en kg/ha à 0 % d'humidité, séché également dans l'étuve à 70°C. L'indice de récolte (HI) est calculé comme le quotient du rendement grain sur la biomasse aérienne totale. Le poids de 1000 grains est également déterminé.

4 Le modèle STICS

4.1 Présentation générale du modèle STICS

Le modèle STICS (*Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard*) est un modèle de culture déterministe et mécaniste développé par l'INRAE (France) depuis 1996 (Brisson et al., 1998). Il simule à un pas de temps journalier les interactions sol-plante-atmosphère à l'échelle de la parcelle agricole, depuis le semis jusqu'à la récolte. La version utilisée lors de ce travail est la v10.5.0. Son architecture repose sur une association entre quatre grands modules fonctionnels (Figure 5) :

1. **Phénologie** : le développement de la plante est piloté par le temps thermique, c'est-à-dire des sommes de températures efficaces (en degrés-jours) accumulées jusqu'à des seuils phénologiques, propres à chaque espèce. Le passage d'un stade au suivant est déclenché lorsque cette somme atteint un seuil paramétré. Les principaux stades simulés sont présentés dans le Tableau 2.
2. **Croissance et production de biomasse** : l'accumulation de biomasse aérienne repose sur le concept d'efficacité de conversion du rayonnement (RUE, *Radiation Use Efficiency*). Le rayonnement photosynthétiquement actif intercepté est calculé à partir de la loi de Beer-Lambert appliquée au LAI (*Leaf Area Index*), modulée par des indices de stress hydrique et azoté (Brisson et al., 2003).
3. **Bilan hydrique** : STICS simule l'infiltration, le drainage, le ruissellement, l'évaporation du sol et la transpiration de la culture. L'évapotranspiration potentielle est calculée selon la méthode de calculated Penman ou de Shuttleworth-Wallace. Cette dernière est obligatoire en mode intercrop car elle permet de distribuer l'énergie disponible entre les deux cultures selon leurs LAI respectifs (Brisson et al., 2004 ; Beaudoin et al. 2023).
4. **Cycle de l'azote** : le modèle simule la minéralisation de la matière organique du sol, l'absorption d'azote minéral et la fixation symbiotique de l'azote atmosphé-

rique (N_2) des légumineuses. La compétition entre absorption minérale et fixation est explicitement représentée : une disponibilité élevée en azote minéral inhibe partiellement la nodulation, ce qui est particulièrement pertinent pour le système maïs–niébé fertilisé étudié dans le cadre de ce travail (Traoré et al., 2022).

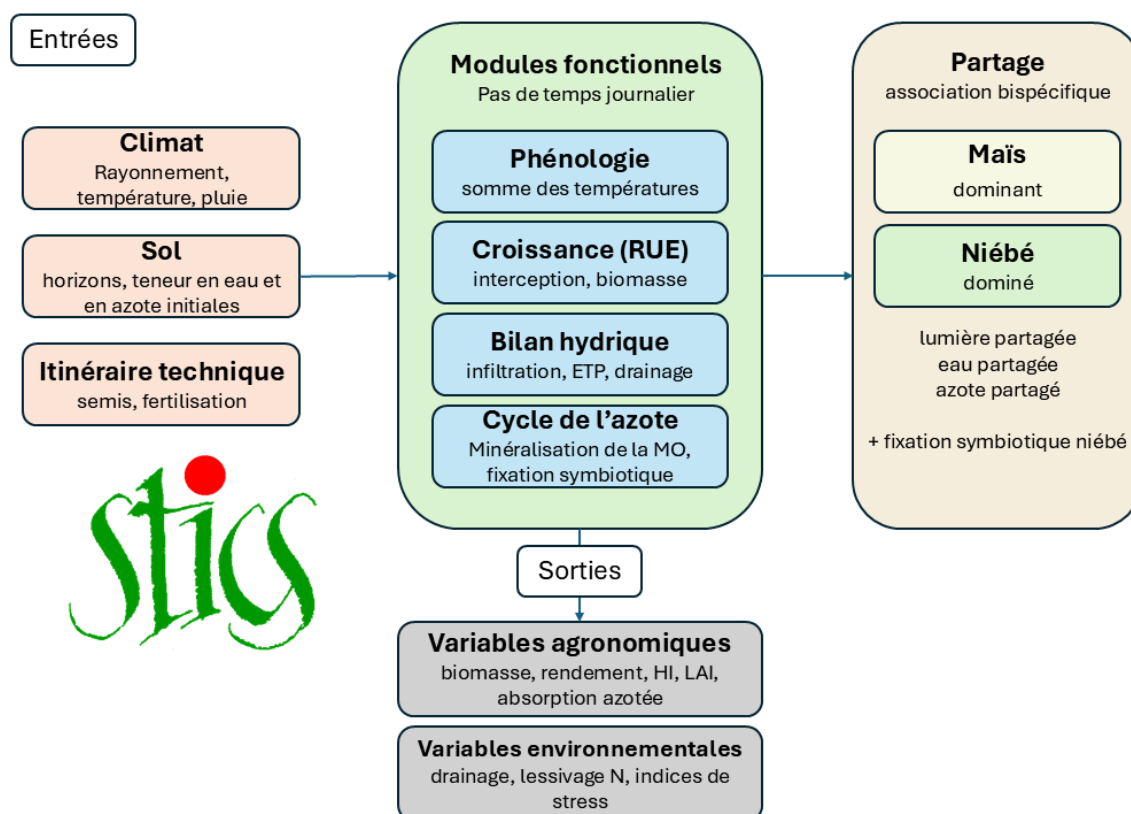


FIGURE 5 – Schéma d’illustration générale du modèle STICS (réalisation personnelle sur base de Brisson et al., 2003)

D’un point de vue pratique, l’utilisation de STICS s’organise autour d’une *unité de simulation* (USM, *Unit of Simulation*), qui est illustré à la figure 6. L’usm rassemble l’ensemble des fichiers d’entrée décrivant une parcelle et sa conduite sur un cycle : un fichier climatique (station et séries journalières de température, rayonnement et pluie), un fichier sol (.sol : horizons, propriétés hydriques et azotées), un fichier plante par espèce (.plt) et un fichier technique par espèce (.tec : itinéraire cultural, semis, fertilisation, travail du sol). À ces fichiers propres à chaque simulation s’ajoutent les paramètres généraux, constants et définis par l’équipe STICS, qui ne furent pas modifiés (Beaudoin et al. 2023).

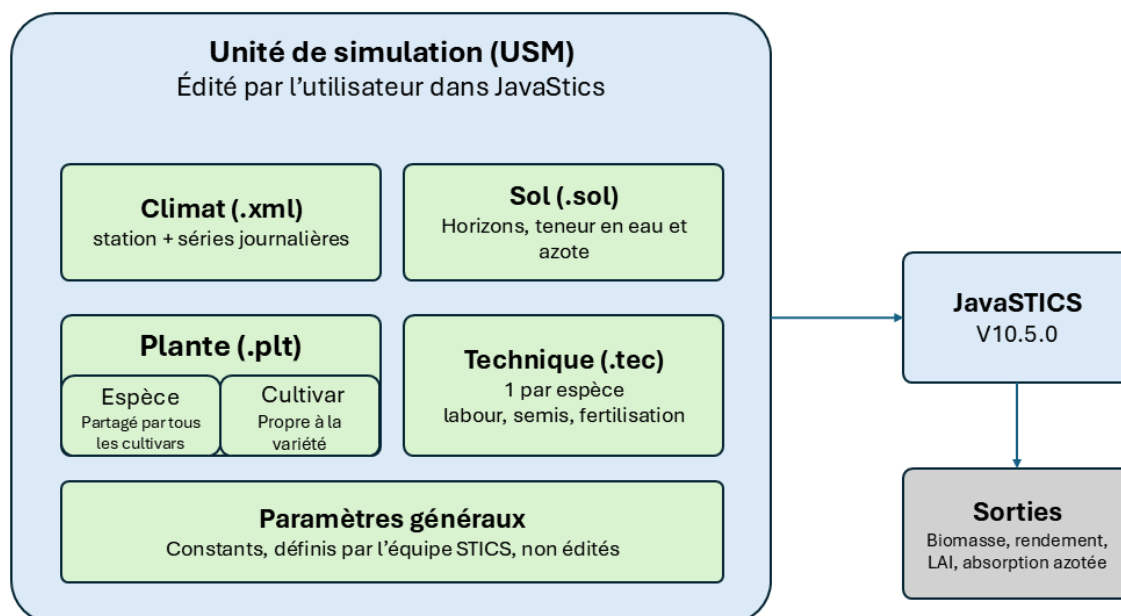


FIGURE 6 – Structure d’une unité de simulation (USM) et fichiers d’entrée édités dans JavaSTICS (réalisation personnelle sur base du logiciel)

Le fichier plante distingue lui-même les paramètres d’espèce (partagés par tous les cultivars) et les paramètres de cultivar (propres à la variété simulée), tandis que les paramètres de gestion sont regroupés dans le fichier technique. Cette architecture permet à STICS de simuler une large gamme d’espèces et de systèmes de culture avec un formalisme commun (Coucheney et al., 2015). L’ensemble des simulations de ce travail a été préparé et lancé via l’interface JavaSTICS (version 10.5.0), qui permet de créer et d’éditer les USM, de gérer les données d’entrée, de lancer les simulations et de visualiser les sorties journalières (Beaudoin et al., 2023).

Chaque campagne culturale est simulée du 1^{er} janvier au 31 décembre de l’année considérée. L’initialisation des simulations au 1^{er} janvier, soit environ cinq à six mois avant la date de semis du maïs (mai/juin). Les résidus de culture y sont également apportés dès ce premier jour de simulation. Ce délai de « préchauffage » permet au module de sol de STICS d’équilibrer le profil hydrique et de simuler la dynamique naturelle de décomposition des résidus, de réhumectation et de minéralisation de l’humus sous les conditions climatiques réelles de début d’année. Ainsi, les reliquats d’azote minéral et la teneur en eau du sol au moment du semis découlent de la dynamique biophysique simulée en amont par le modèle.

4.2 Scénarios simulés et configuration

4.2.1 Configuration du profil de sol et conditions initiales dans STICS

La caractérisation du sol dans STICS repose sur la définition d'un profil pédologique structuré en horizons fonctionnels (fichier `.sol`) et sur l'attribution de conditions initiales au premier jour de la simulation (fichier `.ini`). Le Lixisol de la station d'Okpara a été découpé en 5 horizons jusqu'à 125 cm de profondeur (0–25 cm, 25–45 cm, 45–75 cm, 75–100 cm et 100–125 cm ; Table 9). Les paramètres hydrodynamiques (capacité au champ θ_{cc} et point de flétrissement θ_{pf}) ainsi que la densité apparente (ρ_b) ont été renseignés pour chaque horizon à partir des mesures physiques de terrain (Tableau 11). Les valeurs de capacité au champ (θ_{cc}) et de point de flétrissement permanent (θ_{pf}) traduisent la faible capacité de rétention en eau du Lixisol sablo-limoneux d'Okpara. Cette faible rétention s'explique par la dominance de la fraction sableuse ($> 75\%$) et par la baisse progressive de la teneur en matière organique le long du profil (Saxton et Rawls, 2006). Le paramétrage de ces constantes hydrodynamiques repose sur les courbes de rétention d'eau pF déterminées sur le site par Allakonon (2024) et confirmées par Neujean (2025). La résolution numérique des bilans d'eau, de carbone et d'azote est réalisée par le modèle au pas de temps quotidien par tranches élémentaires de 1 cm.

La teneur en eau initiale (θ_{init}) a été calée à la capacité au champ sur l'ensemble du profil afin de simuler la réhumectation du sol lors des premières pluies de début d'année. Les stocks initiaux d'azote minéral ont été repris des caractérisations de terrain d'Allakonon (2024). Ils s'élèvent à un cumul de 36 kg N ha^{-1} sous forme de nitrates (NO_3^-), répartis sur les trois premiers horizons (Tableau 11), les teneurs en ammonium (NH_4^+) étant négligeables sous ce climat bien aéré. Enfin, le compartiment organique initial a été paramétré sur la base des analyses chimiques de surface (0–25 cm), avec une teneur en carbone organique $C_{org} = 0,45\%$, un azote organique $N_{org} = 0,05\%$, un ratio $C/N = 10,5$ et un $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} = 6,12$.

TABLE 11 – Discrétisation du profil de sol, propriétés physiques et hydrodynamiques (fichier `.sol`) et conditions initiales d'azote minéral (fichier `.ini`) pour le site d'Okpara dans STICS (adaptées d'Allakonon, 2024). Les teneurs en eau HCCF (θ_{cc}) et HMINF (θ_{pf}) saisies dans STICS sont gravimétriques (% masse de sol sec). Elles ont été calculées à partir des teneurs en eau volumétriques ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) issues des fonctions de pédotransfert pour sols tropicaux de Hodnett et Tomasella (2002), selon la relation $\theta_{\text{grav}} = \theta_{\text{vol}}/\rho_b$

Horizon (cm)	ρ_b (g cm^{-3})	$\theta_{cc \text{ grav}}$ (g g^{-1})	$\theta_{pf \text{ grav}}$ (g g^{-1})	$\theta_{cc \text{ vol}}$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	$\theta_{pf \text{ vol}}$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	$\text{NO}_3^- \text{ init}$ (kg N ha^{-1})	$\text{NH}_4^+ \text{ init}$ (kg N ha^{-1})
0 – 25	1,65	0,13	0,05	0,215	0,083	15,0	0,0
25 – 45	1,60	0,11	0,04	0,176	0,064	13,0	0,0
45 – 75	1,50	0,08	0,04	0,120	0,060	8,0	0,0
75 – 100	1,50	0,07	0,03	0,105	0,045	0,0	0,0
100 – 125	1,50	0,07	0,03	0,105	0,045	0,0	0,0

4.2.2 Démarche générale de calibration

La calibration des paramètres des cultures a été réalisée selon une approche manuelle itérative (par essais-erreurs guidés), en respectant une hiérarchie biophysique stricte afin d’éviter le sur-ajustement :

- Phénologie : Calage prioritaire des dates d’apparition des stades clés (ilev, iamf, iflo, idrp) sur base des sommes de températures ou du forçage phénologique.
- Dynamique du *LAI* (Surface foliaire) : Ajustement des paramètres de croissance et de sénescence foliaire (dlaimax, laimax, vlaimax) en confrontant les mesures du *LAI* en cours de saison.
- Rendement et composantes du grain : Calage final de l’indice de récolte et du remplissage des grains (hauteur, poidsgrainmax) pour faire coïncider le rendement grain final simulé avec les données à la récolte.

4.2.3 Maïs en culture conventionnelle (S1)

La calibration du maïs en culture conventionnelle (système *S1*) a été réalisée à partir des données de la campagne 2022 sur le site d’Okpara. Pour ce faire, nous avons activé l’option de forçage phénologique du modèle STICS. Les dates réelles des stades observés sur le terrain ont été introduites dans le fichier technique (.tec) pour contraindre le calendrier de la plante : levée (ilev), fin de phase juvénile (iamf), floraison (iflo) et début de remplissage des grains (idrp). En verrouillant ainsi le calendrier sur les observations réelles, cette approche élimine d’emblée les biais de simulation liés au cumul thermique des degrés-jours. Les paramètres ajustés concernent principalement la dynamique foliaire et la durée de vie des feuilles (dlaimaxbrut : vitesse d’augmentation maximale de *LAI* par degré-jour = $0,0033 \text{ m}^2 \cdot \text{plant}^{-1} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{j}^{-1}$; durvieF : durée de vie en degré-jours d’une feuille adulte = $195 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{j}$). Un glossaire est disponible en début de ce travail pour les paramètres spécifiques à STICS). Les efficacités de conversion du rayonnement en biomasse (efcroiveg = efcroirepro = $2,52 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$; efcroijuv = $1,90 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$) et les paramètres de formation du rendement (nbgrmax = 900, nbgrmin = 0, pgrainmaxi = $0,318 \text{ g}$). Les paramètres hydriques et les températures cardinales ont été maintenus aux valeurs par défaut STICS pour le maïs (Beaudoin et al., 2023). L’ensemble des paramètres calibrés est détaillé en Table 31. La méthode d’évapotranspiration de calculated Penman a été utilisée pour la calibration en culture pure *S1*. En mode association, STICS impose le passage à la méthode de Shuttleworth-Wallace (Brisson et al., 2004). Afin d’isoler le rôle propre de l’association de cultures de tout biais méthodologique, un test comparatif entre les méthodes d’évapotranspiration de calculated Penman et de Shuttleworth-Wallace a été effectué en culture pure. Il n’a révélé aucun écart significatif sur la simulation du maïs en système *S1* (voir détails Table 34 en Annexe E). La méthode de Shuttleworth-Wallace a donc été généralisée à l’ensemble du travail.

4.2.4 Niébé en culture pure optimisée

En l'absence de données expérimentales de culture pure de niébé sur le site d'Okpara, le paramétrage a suivi une approche bibliographique en deux étapes. Les paramètres phénologiques et de croissance ont été initialisés à partir des travaux de calibration de STICS pour le niébé en zone soudanienne ouest-africaine (Traoré et al., 2022 ; De Freitas et al., 2025). Les sorties du modèle en conditions de culture pure simulée ont ensuite été confrontées aux valeurs observées dans la littérature pour des conditions pédoclimatiques comparables, ciblant un rendement grain de 0,8 à 1,3 t ha⁻¹ (Bado et al., 2018 ; Ishikawa et al., 2022) et une biomasse aérienne de 4,5 à 6,0 t ha⁻¹ pour une densité de 125 000 plants/ha en zone soudanienne (Namatsheve et al., 2020).

La variété utilisée (58-74f, ISRA/CNRA Bambey, Sénégal) est insensible à la photopériode, ce qui simplifie le paramétrage en désactivant le module photopériodisme. Le cycle de développement (environ 60 jours) a été reproduit par ajustement des sommes thermiques inter-stades. Le niébé en culture pure est simulé dans les conditions pédologiques et de fertilisation du système S2 (densité 12,5 plants/m², résidus de coton restitués, 49 kg N/ha comme l'itinéraire maïs), et non dans des conditions de niébé pur optimisé. Ce choix garantit que le paramétrage de référence et l'évaluation en association partagent le même environnement sol-azote, isolant ainsi l'effet propre de la compétition.

4.2.5 Système maïs-niébé en association (S2)

La simulation de l'association mobilise le module intercrop de STICS décrit en §4.1. Le maïs et le niébé conservent l'intégralité des paramètres variétaux et de gestion calibrés en culture seule ; seule la configuration propre à l'association est décrite ici.

Le maïs est semé le 23 juin 2022 et le niébé (variété 58-74f) le 11 juillet 2022, soit 18 jours plus tard, à une densité de 12,5 plants/m² et un inter-rang de 0,40 m, conformément au dispositif expérimental (§3.2.3). Les deux cultures partagent le même profil de sol, ce qui impose une règle de configuration spécifique : pour éviter tout double comptage sur cette ressource partagée, la fertilisation minérale (200 kg/ha de NPK à 15 JAS et 50 kg/ha d'urée à 45 JAS) et les opérations sol ne sont déclarées que dans le fichier technique (.tec) du maïs, dont elles bénéficient aux deux cultures via leurs prélèvements racinaires respectifs. Les résidus organiques de la culture précédente (paille de coton, campagne 2021) sont initialisés au jour 1 de simulation à partir des biomasses mesurées sur le site, afin de reproduire l'état organique du sol au démarrage de la campagne, cohérent avec la rotation coton-maïs du système S2.

La compétition pour l'azote minéral entre les deux cultures est simulée explicitement, le niébé ayant recours à la fixation symbiotique lorsque la disponibilité en azote minéral devient insuffisante ; l'effet inhibiteur de la fertilisation azotée sur la nodulation est reproduit conformément au formalisme de STICS (Traoré et al., 2022).

4.3 Procédure de validation

La validation du modèle a été conduite sur les campagnes 2023 et 2024 en appliquant les paramètres d'espèce et de cultivar issus de la calibration 2022 sans aucun réajustement. Les données climatiques, les caractéristiques des résidus, les dates de semis et la fertilisation ont été attribuées à leurs années respectives. Cette approche permet d'évaluer la transférabilité des paramètres d'espèce et de cultivar à des conditions agro-climatiques différentes de celles ayant servi à la calibration. Comme pour la calibration, les stades phénologiques observés (levée, AMF, floraison, DRP) ont été ancrés dans le fichier technique (.tec) pour chacune des deux campagnes, à l'exception de la maturité physiologique qui reste calculée par le modèle à partir de la somme thermique stdrpmat. La validation porte ainsi exclusivement sur les sorties agronomiques : biomasse aérienne totale, rendement grain, indice de récolte (HI), LAI et durée de cycle. La comparaison s'appuie sur les mesures de récolte effectuées sur les trois parcelles de répétition du traitement S1-DR pour chaque campagne (parcelles 2, 13 et 19 en 2023 ; parcelles 6, 10 et 16 en 2024), conformément au dispositif expérimental décrit en §3.2.1. Les performances sont quantifiées via les indicateurs statistiques présentés en §4.4.

4.4 Indicateurs statistiques d'évaluation du modèle

L'évaluation des sorties simulées par rapport aux observations repose sur deux indicateurs complémentaires : un indicateur de biais (le pourcentage de biais, PV) et un indicateur d'erreur quadratique normalisée (nRMSE). Ces deux indicateurs suffisent au vu des données disponibles : des variables agronomiques de fin de cycle (biomasse aérienne, rendement grain, indice de récolte) mesurées sur trois parcelles par traitement. Le LAI est évalué graphiquement par la suite (§5.3.3).

4.4.1 Pourcentage de biais (PV)

Le pourcentage de biais quantifie l'écart moyen relatif entre la valeur simulée et la moyenne observée :

$$PV = \frac{\text{sim} - \bar{\text{obs}}}{\bar{\text{obs}}} \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

où sim est la valeur simulée par STICS et $\bar{\text{obs}}$ la moyenne des observations sur les trois parcelles de répétition. Un PV positif traduit une surestimation par le modèle, un PV négatif une sous-estimation. Il est associé à un indicateur de dispersion car avoir un PV nul peut être constitué de grands écarts individuels mais de signes opposés.

4.4.2 Erreur quadratique normalisée (nRMSE)

Le dispositif expérimental fournit trois parcelles de répétition par traitement, tandis que la simulation STICS repose sur un profil pédologique unique et produit donc une

seule valeur par traitement. La variabilité inter-parcelles ne peut donc pas être restituée par le modèle. Pour intégrer cette variance incompressible dans l'indicateur d'erreur, un nRMSE modifié est défini :

$$\text{nRMSE} = \frac{\sqrt{(\text{sim} - \bar{\text{obs}})^2 + \frac{n-1}{n}\sigma^2}}{\bar{\text{obs}}} \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

où σ est l'écart-type inter-parcelles (formule de Bessel, $n = 3$). Cette formulation reprend la décomposition classique de la MSE en un terme de biais et un terme de variance résiduelle (Kobayashi et Salam, 2000). Elle donne une limite définie par la seule dispersion parcellaire : même une simulation parfaite ($\text{sim} = \bar{\text{obs}}$) produit un nRMSE égal à $\sigma\sqrt{(n-1)/n}/\bar{\text{obs}} \times 100$, ce qui matérialise la limite de précision atteignable par une simulation à profil de sol unique et évite d'attribuer une performance meilleure que ce que le dispositif permet de vérifier.

4.4.3 Grille d'interprétation

Les valeurs obtenues sont interprétées à l'aide de la grille de Jamieson et al., (1991), largement utilisée en modélisation agronomique, qui distingue quatre classes de performance pour le nRMSE (Tableau 12). Le PV, indicateur de biais, est interprété qualitativement par son signe (surestimation si positif, sous-estimation si négatif) et son amplitude : dans le prolongement des grilles proposées par Moriasi et al. (2015) pour l'évaluation des modèles agroenvironnementaux, un PV inférieur à 10 % est généralement considéré comme un biais faible, sans qu'une grille chiffrée strictement adaptée aux rendements en grain ne fasse consensus (Bellocchi et al., 2010).

TABLE 12 – Grille d'interprétation du nRMSE (Jamieson et al. (1991)).

Classe	Seuil
Excellent	< 10 %
Bon	10–20 %
Acceptable	20–30 %
Médiocre	> 30 %

L'indice de récolte (HI), rapport de deux variables simulées, est évalué par son écart absolu plutôt que par un nRMSE normalisé, la faible variabilité de ce ratio (0,2–0,4) rendant la normalisation peu informative.

Quatrième partie

Résultats et discussion

5 Résultats expérimentaux et de simulation

5.1 Synthèse des données expérimentales de référence à Okpara (2022–2024)

Avant d'évaluer la capacité de calibration et de prédiction du modèle STICS, cette section présente les performances agronomiques réellement observées sur le site d'Okpara au cours des trois campagnes d'étude (2022, 2023 et 2024). Ces observations constituent la référence que les simulations du modèle doivent restituer. Les différentes caractéristiques climatiques des 3 campagnes sont présentées en Annexe A (Table 22; Figure 9, 10 et 11)

5.1.1 Performances du maïs en culture pure et sous itinéraire technique (S1 et S2)

La Table 13 rassemble les composantes du rendement et de la surface foliaire du maïs mesurées au champ pour les régimes conventionnel (S1) et en association (S2).

TABLE 13 – Performances agronomiques observées pour le maïs sur le site d'Okpara (campagnes 2022 à 2024) en culture pure (S1) et en association avec le iébé (S2). Les valeurs représentent les moyennes ($\bar{x}$) et écarts-types (σ) des parcelles de répétition.

Campagne	Rdt Grain [t MS/ha]	Biomasse Totale [t MS/ha]	Biomasse Paille [t MS/ha]	HI [-]	LAI _{max} [m ² /m ²]
Campagne 2022					
Maïs S1	2,23 ± 0,19	6,29 ± 0,46	4,06 ± 0,27	0,35 ± 0,01	2,65 ± 0,21
Maïs S2	2,02 ± 0,02	5,41 ± 0,07	3,39 ± 0,05	0,37 ± 0,00	2,17 ± 0,32
Campagne 2023					
Maïs S1	2,43 ± 0,25	6,36 ± 0,68	3,92 ± 0,42	0,38 ± 0,00	3,25 ± 0,54
Maïs S2	2,16 ± 0,21	5,72 ± 0,59	3,56 ± 0,38	0,38 ± 0,00	3,42 ± 1,03
Campagne 2024					
Maïs S1	2,49 ± 0,33	6,06 ± 0,57	3,57 ± 0,26	0,41 ± 0,02	4,22 ± 0,38
Maïs S2	2,24 ± 0,30	5,64 ± 0,58	3,40 ± 0,29	0,40 ± 0,01	3,49 ± 0,38

LAI_{max} mesuré à environ 60 JAS (jours après semis); HI = Indice de récolte = rendement en grain / biomasse totale

5.1.2 Performances du niébé en association

La Table 14 présente les caractéristiques mesurées pour le niébé en association sur le site d'Okpara.

TABLE 14 – Performances agronomiques observées pour le niébé en association (S2 intercrop) sur le site d’Okpara (campagnes 2022 à 2024).

Campagne	Rdt Grain [t MS/ha]	Biomasse Totale [t MS/ha]	Biomasse Paille [t MS/ha]	HI [–]
Campagne 2022				
Niébé S2	$0,88 \pm 0,02$	$4,16 \pm 0,13$	$3,29 \pm 0,12$	$0,21 \pm 0,01$
Campagne 2023				
Niébé S2	$0,80 \pm 0,02$	$3,80 \pm 0,48$	$3,00 \pm 0,46$	$0,21 \pm 0,02$
Campagne 2024				
Niébé S2	$0,83 \pm 0,05$	$4,01 \pm 0,54$	$3,19 \pm 0,49$	$0,21 \pm 0,02$

5.2 Calibration du maïs en culture conventionnelle (S1, 2022)

La calibration du maïs en système conventionnel (S1) aboutit à une reproduction fidèle des observations de la campagne 2022. La biomasse aérienne simulée (6,31 t/ha) et le rendement grain simulé (2,24 t/ha) sont quasi identiques aux valeurs observées, l’indice de récolte ($HI = 0,35$) et la durée du cycle (104 jours) sont reproduits à l’identique. Pour ce qui concerne le LAI, les valeurs maximales sont très proches et la dynamique diffère peu (voir 5.3.3).

Le maïs simulé en culture pure sous la configuration S2 (strip-tillage et méthode d’évapotranspiration de Shuttleworth-Wallace) présente des sorties agronomiques très proches du scénario S1 calibré (labour à 30 cm et méthode de calculated Penman), avec une biomasse aérienne de 6,41 t/ha (contre 6,31 t/ha en S1) et un rendement grain de 2,33 t/ha (contre 2,24 t/ha en S1). Afin de vérifier si cet écart réduit ne masquait pas des effets compensatoires opposés entre les deux facteurs, des simulations orthogonales modifiant un seul paramètre à la fois ont été réalisées :

- **Effet du travail du sol seul** : Le passage au strip-tillage (avec la date de semis associée au 23 juin) entraîne à lui seul la totalité de la hausse observée sur la biomasse (+0,11 t/ha) et le rendement (+0,10 t/ha).
- **Effet de la méthode d’évapotranspiration seule** : La méthode de Shuttleworth-Wallace n’exerce aucun impact significatif sur la biomasse (-0,01 t/ha) ni sur le rendement (-0,01 t/ha), l’indice de stress hydrique restant nul ($swfac = 1,00$) dans les deux configurations.

L’analyse des simulations confirme ainsi l’absence de biais par compensation d’effets opposés. Ce résultat garantit que lors de l’association, une divergence de comportement du maïs ou du niébé ne peut pas être attribuée à ces choix de configuration technique (travail du sol ou méthode d’ET), mais bien au fonctionnement propre du module. La méthode Shuttleworth-Wallace sera donc utilisée pour le reste du travail.

TABLE 15 – Comparaison des sorties simulées et des valeurs observées pour le maïs en culture conventionnelle (S1), campagne 2022, site d’Okpara (Bénin). Les stades phénologiques ont été imposés (ancrage sur observations terrain).

Variable	Unité	Observé ($\bar{x} \pm \sigma$)	Simulé	Écart (%)	nRMSE (%)
<i>Performances agronomiques</i>					
Biomasse aérienne	t/ha	$6,29 \pm 0,46$	6,31	+0,3	6,0
Rendement grain	t/ha	$2,23 \pm 0,19$	2,24	+0,4	7,0
Indice de récolte (HI)	–	$0,35 \pm 0,01$	0,35	0,0	–
N absorbé total	kg N/ha	–	130	–	–

nRMSE = Root Mean Square Error normalisé ; Valeurs simulées issues de STICS v10.5.0 (calculated Penman).

5.3 Validation du modèle en culture conventionnelle

5.3.1 Campagne 2023

Les paramètres calibrés sur la campagne 2022 ont été appliqués sans réajustement aux conditions de la campagne 2023 (traitement S1), avec ancrage des stades phénologiques observés. Le semis a été réalisé le 27 juin 2023 et la récolte le 5 octobre 2023, soit une durée de cycle de 100 jours. La pluviométrie cumulée sur le cycle (663 mm) n’a produit aucun stress hydrique ni de stress azoté significatif sur les phases végétative et reproductive (*swfac*, *turfac*, *inns* = 1,00).

La Table 16 synthétise la comparaison entre observations (moyenne $\pm$ écart-type sur les trois parcelles de répétition) et simulation STICS pour la campagne 2023. Le rendement grain est reproduit de manière quasi-exacte (2,40 vs 2,43 t/ha, PV = $-1,2\%$), la biomasse aérienne totale avec un écart de $-0,8\%$ (6,31 vs 6,36 t/ha), et l’indice de récolte est restitué à l’identique (HI = 0,38).

TABLE 16 – Validation STICS pour le maïs en culture conventionnelle (S1-DR), campagnes 2023 et 2024, site d’Okpara. Les observations représentent les moyennes ($\bar{x}$) et écarts-types (σ) des trois parcelles de répétition (2023 : P2, P13, P19 ; 2024 : P6, P10, P16).

Variable	Observé ($\bar{x} \pm \sigma$)	Simulé	PV (%)	nRMSE (%)
Campagne 2023 (<i>cycle de 100 jours</i>)				
Biomasse aérienne totale [t/ha]	6,36 $\pm$ 0,68	6,31	−0,8	8,8
Rendement grain [t/ha]	2,43 $\pm$ 0,25	2,40	−1,2	8,8
Biomasse paille [t/ha]	3,92 $\pm$ 0,42	3,91	−0,3	8,8
Indice de récolte (HI) [−]	0,38	0,38	0,0	—
Campagne 2024 (<i>cycle de 103 jours</i>)				
Biomasse aérienne totale [t/ha]	6,06 $\pm$ 0,57	6,35	+4,8	9,0
Rendement grain [t/ha]	2,49 $\pm$ 0,33	2,53	+1,6	10,9
Biomasse paille [t/ha]	3,57 $\pm$ 0,26	3,82	+7,0	9,2
Indice de récolte (HI) [−]	0,41 $\pm$ 0,02	0,40	−2,4	—

PV = Pourcentage de Biais ; nRMSE = Root Mean Square Error normalisé. Valeurs simulées issues de STICS v10.5.0.

Les nRMSE obtenus (8,8 % pour le rendement grain et la biomasse totale) placent la performance dans la catégorie « *excellente* » selon les critères de Jamieson et al. (1991), ce qui valide la transférabilité des paramètres calibrés en 2022 aux conditions de 2023. Ces résultats sont d’autant plus satisfaisants que la simulation utilise un profil de sol unique pour les trois parcelles de répétition, qui n’ont fait l’objet d’aucun ajustement.

L’ancrage des stades observés dans le fichier technique impose un calage parfait sur la levée, l’AMF, la floraison et le début de remplissage des grains. La maturité physiologique, calculée par le modèle à partir de la somme thermique **stdrpmat** (500 °C.j), est prédite au 5 octobre 2023, en concordance exacte avec la date de récolte observée (100 JAS). Cette précision sur la maturité confirme la pertinence du calibrage thermique effectué en 2022.

Le modèle présente un biais quasi-nul sur les variables agronomiques moyennes, ce qui constitue bonne restitution. Néanmoins, la dispersion observée entre parcelles ($\sigma = 0,25$ t/ha pour le rendement grain, soit un coefficient de variation de 11 %) reflète l’hétérogénéité intra-traitement que la simulation ne peut pas reproduire. Cette différence inter-parcellaire explique l’essentiel du nRMSE (≈ 10 %) : sur la moyenne des trois parcelles, le modèle est très robuste, mais la variabilité parcelle à parcelle reste hors de portée d’une simulation à profil pédologique unique. La parcelle P2, qui présente le rendement le plus faible (2,14 t/ha), est ainsi la plus écartée de la simulation (−12 %), tandis que P13 et P19 sont reproduites à 3 % près maximum sur le rendement en grain. Ces performances valident donc la paramétrisation établie en calibration.

5.3.2 Campagne 2024

La validation a été reconduite sur la campagne 2024 (S1-DR), en appliquant les mêmes paramètres que pour la calibration 2022 et la validation 2023, sans aucun réajustement. Le semis a été réalisé le 1er juillet 2024 et la récolte le 12 octobre 2024 (durée de cycle : 103 jours). La pluviométrie cumulée sur le cycle est plus élevée qu'en 2023, mais reste sans impact sur la simulation qui n'enregistre aucun stress hydrique ni azoté (*swfac*, *turfac*, *inns* = 1,00 sur les phases végétative et reproductive).

Comme illustré dans la Table 16, le rendement grain de la campagne 2024 est également reproduit avec une bonne précision (+1,6 %, soit 2,53 vs 2,49 t/ha), la biomasse aérienne totale avec un écart de +4,8 % (6,35 vs 6,06 t/ha), et l'indice de récolte avec un écart de -2,4 % (0,40 simulé vs 0,41 observé). Les nRMSE restent contenus autour de 9–10 %. Ces performances confirment la robustesse du calage obtenu en 2023 et démontrent la transférabilité interannuelle des paramètres calibrés sur 2022.

5.3.3 Dynamique du LAI

La validation du modèle sur les variables de production de fin de cycle (biomasse aérienne, rendement grain, indice de récolte) s'avère très satisfaisante sur l'ensemble des trois campagnes, avec un nRMSE inférieur à 11 % et un biais faible ($PV_{max} \approx 7\%$). La dynamique du LAI révèle en revanche des écarts entre les valeurs simulées et observées, illustrés à la Figure 7.

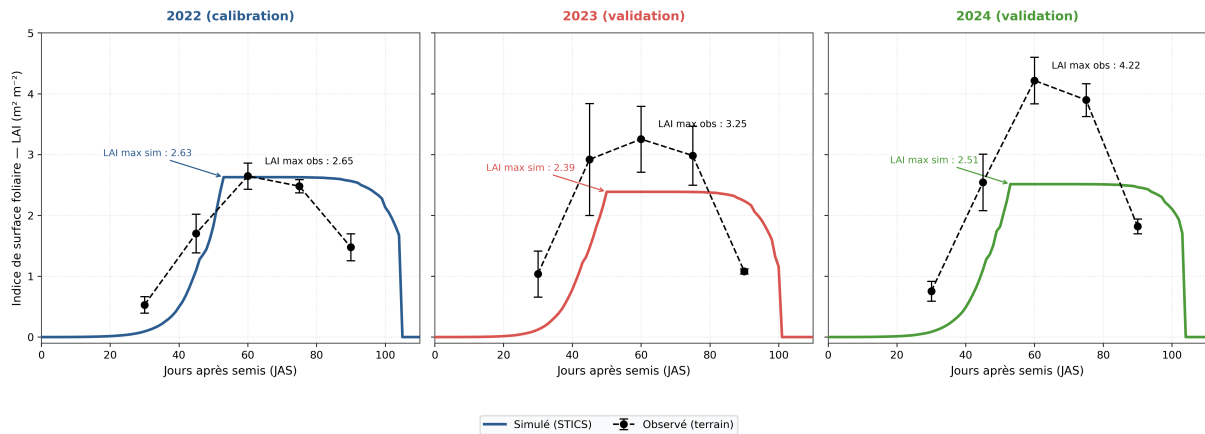


FIGURE 7 – Comparaison de la dynamique du LAI simulé (STICS v10.5.0) et observé pour le maïs en culture pure (traitement S1) avec les écarts-types pour les valeurs observées, site d'Okpara, Bénin, 2022-2024.

En phase végétative précoce (JAS 30 à 45), STICS sous-estime la vitesse d'établissement foliaire observée sur les trois campagnes, un décalage classique déjà documenté pour le maïs en milieu tropical (Falconnier et al., 2017). En phase de plateau, le LAI maximum simulé par STICS reste très stable d'une année à l'autre (2,63 en 2022 ; 2,40 en 2023 ; 2,53 en 2024). Le modèle restitue fidèlement le plateau observé en 2022 (2,63 simulé contre

$2,65 \pm 0,21$ observé), mais sous-estime les maxima mesurés en 2023 ($3,25 \pm 0,54$) et en 2024 ($4,22 \pm 0,38$), avec des écarts respectifs de 27 % et 40 %. L’analyse des valeurs de LAI en association (observés vs simulés) révèle des dynamiques similaires (présenté en Annexe C.5).

Ces écarts de *LAI* doivent être interprétés en accord avec la dynamique globale d’accumulation de la biomasse au champ (Annexe C.3). En culture pure ainsi qu’en association, la biomasse aérienne maximale à 90 JAS plafonne à des valeurs très proches entre les trois campagnes. Deux hypothèses permettent d’expliquer l’absence de surplus net de biomasse en 2023 et 2024 malgré un *LAI* mesuré plus élevé : D’une part, ce résultat peut traduire la saturation de l’interception lumineuse selon la loi de Beer-Lambert ($e_i = 1 - e^{-k \cdot LAI}$). Au-delà d’un *LAI* critique ($\approx 3,5$), l’accroissement de la surface foliaire n’apporte qu’un gain marginal d’assimilation carbonée, lequel est compensé négativement par le coût respiratoire d’entretien des feuilles basales ombragées (Maddonni et Otegui, 1996). D’autre part, une incertitude liée à un biais d’échantillonnage ou d’estimation des dimensions foliaires lors des mesures de terrain peut être également une cause.

Par ailleurs, les valeurs de LAI maximum simulées par STICS (2,40 à 2,63) ainsi que les mesures de la campagne 2022 ($2,65 \pm 0,21$) s’inscrivent parfaitement dans les plages de référence documentées en Afrique de l’Ouest pour des maïs tropicaux sous fertilisation modérée (2,00 à 3,20 ; Tovihoudji et al., 2022 ; Falconnier et al., 2020).

5.4 Paramétrage du niébé en culture pure

Le paramétrage du cultivar 58-74f repose sur un jeu de valeurs majoritairement issu de la littérature spécialisée plutôt qu’ajusté empiriquement. Le paramètre de protection de la sénescence au stress azoté ($innsen = -1,80$) et la capacité maximale de fixation symbiotique ($fixmax = 4,2$) proviennent de la calibration publiée par De Freitas et al. (2025). Les paramètres racinaires calibrés traduisent le système pivotant profond du niébé (§4.2.4). L’efficacité de conversion du rayonnement ($efcroiveg = efcroirepro = 1.8 \text{ g MJ}^{-1}$) et la somme thermique de début de remplissage ($stlevdrp = 950 \text{ °C d}$) ont été calées sur l’indice de récolte observé en l’absence de données phénologiques mesurées sur le terrain.

Les sorties du modèle pour le niébé en culture pure ont été évaluées par confrontation aux plages de référence issues de la littérature pour des conditions pédoclimatiques comparables (Table 17). Pour la campagne de référence 2022, l’ensemble des variables de développement et de rendement s’inscrit pleinement dans les fourchettes attendues : biomasse aérienne ($4,51 \text{ t ha}^{-1}$), rendement grain ($1,22 \text{ t ha}^{-1}$), indice de récolte (0,28), floraison (55 JAS) et maturité physiologique (87 JAS). Seule la fixation symbiotique simulée (81 kg N ha^{-1} en 2022 se situe assez fortement au-dessus des fourchettes usuelles ($38\text{--}57 \text{ kg N ha}^{-1}$), un écart agronomiquement cohérent qui s’explique par la forte densité de semis appliquée ($12,5 \text{ pl m}^{-2}$, calée sur le dispositif en association S2).

L'évaluation pluriannuelle confirme la transférabilité de ce paramétrage sur la campagne 2023, qui restitue une biomasse de 4,01 t ha⁻¹ et un rendement grain de 0,75 t ha⁻¹. En revanche, la campagne 2024 présente une sous-estimation marquée de la biomasse (1,79 t ha⁻¹) et du rendement (0,67 t ha⁻¹). Le modèle ne simulant aucun stress d'anoxie (*exofac* = 0,00), cette baisse s'explique par un verrouillage du module de fixation symbiotique de l'azote (17 kg N ha⁻¹ contre 81 kg N ha⁻¹ en 2022), qui induit un stress azoté continu (*INNS* = 0,80) et une sénescence foliaire précoce (§6.2.1).

TABLE 17 – Évaluation de plausibilité et comparaison pluriannuelle (2022–2024) des sorties STICS pour le niébé en culture pure (cv. 58-74f, site d'Okpara) par rapport aux plages de référence de la littérature

Variable		Simulé STICS			Plage litté- ra- ture	Verdict	Source
		2022	2023	2024			
Rendement	grain	1,22	0,75	0,67	0,8–1,3	✓ / ~✓ / ×	(Ishikawa et al., 2022)
Biomasse	aérienne	4,51	4,01	1,79	4,0–6,0	✓ / ✓ / ×	(Traoré et al., 2022)
Indice de récolte (HI)		0,27	0,19	0,38	0,25–0,38	✓ / ~✓ / ✓	(Ishikawa et al., 2022)
Floraison (JAS)		55	44	46	50–62	✓ / ~✓ / ~✓	(Traoré et al., 2022)
Fixation symbiotique N		81	54	17	38–57 [†]	× / ✓ / ×	(Namatsheve et al., 2020)
Maturité	physiologique	87	76	78	70–90	✓ / ✓ / ✓	(Ishikawa et al., 2022)

JAS = jours après semis. ✓ : conforme à la plage de référence; ~✓ : légèrement hors plage,
[†] La fixation simulée élevée en 2022 s'explique par la densité de semis forte (12,5 pl m⁻², correspondant aux conditions S2 et non à un essai purement optimisé).

5.5 Simulation du système maïs-niébé en association (S2)

5.5.1 Performances agronomiques observées

Le maïs associé atteint une biomasse aérienne de 5.41 t ha⁻¹ et un rendement grain de 2.02 t ha⁻¹, soit une réduction modérée de 14 et 10 % par rapport à la culture pure (S1). Son indice de récolte reste par ailleurs stable (0.37), ce qui indique que la compétition exercée par le niébé pour la lumière et l'azote pèse sur la production totale de biomasse sans pour autant déformer la partition vers les grains. Le niébé associé, plante dominée, produit quant à lui 4.16 t ha⁻¹ de biomasse aérienne et 0.88 t ha⁻¹ de grain, avec un indice de récolte bien plus faible (0.21) qui traduit une difficulté de croissance reproductive sous l'ombrage du maïs.

5.5.2 Configuration et paramétrage retenu

Conformément à la logique d’un fichier plante unique par cultivar (§4.2), le niébé est simulé en association avec *exactement* le même fichier plante que celui paramétré en culture pure (§5.4) : seul la gestion de la culture (absence d’ajouts de résidus et de fertilisation pour éviter de doubler les quantités déjà inscrites dans le fichier du maïs) et la méthode d’évapotranspiration potentielle diffèrent. Le maïs conserve les paramètres calibrés en S1.

5.5.3 Comparaison modèle/observations

Les Tableaux 18 et 19 comparent les sorties du modèle aux observations du dispositif S2 pour les trois campagnes d’étude (site d’Okpara, 2022–2024) pour chacune des deux espèces.

STICS reproduit de manière satisfaisante la composante céréalière du système associé (Tableau 18) : les sous-estimations de la biomasse aérienne (-5.9% à -15.1%) et du rendement grain (-4.6% à -7.1%) restent contenues sur les trois campagnes, tandis que l’indice de récolte est restitué quasi exactement. Le modèle capture donc correctement la réduction de productivité du maïs due à la compétition interspécifique exercée au sein du mélange.

TABLE 18 – Comparaison des sorties simulées et des valeurs observées pour le maïs en association maïs–niébé (S2), site d’Okpara (campagnes 2022 à 2024).

Campagne	Variable	Simulé	Observé	Écart (%)
2022	Biomasse aérienne (t ha^{-1})	5,09	$5,41 \pm 0,07$	$-5,9$
	Rendement grain (t ha^{-1})	1,91	$2,02 \pm 0,02$	$-5,4$
	Indice de récolte (HI)	0,38	$0,37 \pm 0,00$	$+2,7$
2023	Biomasse aérienne (t ha^{-1})	5,12	$5,72 \pm 0,59$	$-10,5$
	Rendement grain (t ha^{-1})	2,06	$2,16 \pm 0,21$	$-4,6$
	Indice de récolte (HI)	0,40	$0,38 \pm 0,00$	$+5,3$
2024	Biomasse aérienne (t ha^{-1})	4,79	$5,64 \pm 0,58$	$-15,1$
	Rendement grain (t ha^{-1})	2,08	$2,24 \pm 0,30$	$-7,1$
	Indice de récolte (HI)	0,43	$0,40 \pm 0,01$	$+7,5$

L’analyse détaillée des variables journalières du maïs sur l’ensemble des trois campagnes (2022–2024) confirme que la céréale dominante ne subit aucun stress écophysiologique supplémentaire en association. Les indices de stress hydrique (*sufac* et *turfac*) restent égaux à 1 en continu sur les trois années, indiquant une couverture intégrale des besoins transpiratoires. L’indice de nutrition azotée (*inns*) demeure également optimal (1 en 2022 et 2024, avec une baisse très marginale à 0,89 en toute fin de cycle 2023).

La baisse de biomasse aérienne maximale observée chez le maïs en association (4.79 t ha^{-1} à 5.12 t ha^{-1} , contre 6.31 t ha^{-1} à 6.35 t ha^{-1} en culture pure) provient notamment de la

géométrie d’occupation spatiale du module d’association, où la fraction de rayonnement interceptée par la bande de maïs ($f_{apar} = 0,57\text{--}0,59$) est réduite par rapport au semis plein champ ($f_{apar} = 0,72\text{--}0,76$).

Le contraste avec le niébé est particulièrement marqué (Tableau 19). La biomasse aérienne et le rendement grain sont très fortement sous-estimés sur l’ensemble de la période (écarts compris entre -37% à -60% pour la biomasse et entre -20% à -40% pour le grain). De même, la fixation symbiotique simulée (4 kg ha^{-1} à 17 kg ha^{-1} selon les années) reste nettement inférieure à la référence de la littérature pour ce type d’association ($\sim 36\text{ kg ha}^{-1}$; Namatsheve et al., 2020).

TABLE 19 – Comparaison des sorties simulées et des valeurs observées pour le niébé en association maïs–niébé (S2), site d’Okpara (campagnes 2022 à 2024).

Campagne	Variable	Simulé	Observé	Écart (%)
2022	Biomasse aérienne (t ha^{-1})	1,69	$4,16 \pm 0,13$	$-59,4$
	Rendement grain (t ha^{-1})	0,52	$0,88 \pm 0,02$	$-40,9$
	Indice de récolte (HI)	0,31	$0,21 \pm 0,01$	$+47,6$
	Fixation symbiotique N (kg ha^{-1})	17	$\sim 36^a$	—
2023	Biomasse aérienne (t ha^{-1})	2,39	$3,80 \pm 0,48$	$-37,1$
	Rendement grain (t ha^{-1})	0,64	$0,80 \pm 0,02$	$-20,0$
	Indice de récolte (HI)	0,27	$0,21 \pm 0,02$	$+28,6$
	Fixation symbiotique N (kg ha^{-1})	10	$\sim 36^a$	—
2024	Biomasse aérienne (t ha^{-1})	2,49	$4,01 \pm 0,54$	$-37,9$
	Rendement grain (t ha^{-1})	0,65	$0,83 \pm 0,05$	$-21,7$
	Indice de récolte (HI)	0,21	$0,21 \pm 0,02$	$0,0$
	Fixation symbiotique N (kg ha^{-1})	4	$\sim 36^a$	—

^a Valeur moyenne rapportée en association céréale–niébé par Namatsheve et al. (2020); non mesurée in situ sur le site d’Okpara.

L’analyse des indices de stress éclaire ce mécanisme. En phase reproductive, le niébé associé subit un fort déficit azoté (indice de nutrition azotée $inns = 0,59$) tandis que le maïs ne connaît aucun stress ($inns = 1$). Le bilan azoté du sol partagé montre que l’azote minéral disponible est en grande partie prélevée par le maïs. Avec le reste d’azote minéral et la fixation symbiotique (celle-ci reste limitée à 4 kg ha^{-1} à 17 kg ha^{-1} ; les quantités cumulées d’azote minéral absorbé + fixation restent stables entre les campagnes : $35\text{--}40\text{ kg ha}^{-1}$) : la plante, trop peu développée sous l’ombrage du maïs, n’atteint pas une biomasse nodulaire suffisante pour fixer davantage. Ce verrou est auto-entretenu : un déficit azoté limite la croissance, qui limite à son tour la capacité de fixation. Le modèle reproduit donc le bon mécanisme (niche azotée différenciée, domination de la céréale), mais l’amplifie au point de sous-estimer de 35 à 60 % la biomasse de la légumineuse. L’analyse détaillée de l’origine de cette sur-pénalisation est développée en §6.2.2.

6 Discussion et perspectives

6.1 Analyse critique des résultats et comparaison avec la littérature

6.1.1 Le maïs : des performances conformes aux références tropicales

La qualité de restitution du maïs en culture conventionnelle (§5.2) se compare favorablement aux évaluations publiées de STICS. Les nRMSE obtenus en validation (8,8 % en 2023, 9,0 % en 2024 sur la biomasse aérienne) se situent dans la catégorie "excellente" des grilles de validation des indicateurs. Cette performance mérite toutefois une lecture critique. L'efficacité de conversion du rayonnement calibrée ($\text{efcroiveg} = \text{efcroirepro} = 2,52 \text{ g MJ}^{-1}$) est nettement inférieure aux valeurs rapportées pour le maïs en conditions tempérées ($3,8 \text{ g MJ}^{-1}$; Beaudoin et al. 2023). Cette réduction est cohérente avec les conditions tropicales soudanaises car les fortes températures, la demande évaporatoire élevée et la variabilité pluviométrique abaissent l'efficacité d'utilisation du rayonnement. Des étalonnages similaires ont été rapportés en Afrique de l'Ouest pour le sorgho, autre céréale C4 tropicale (Traoré et al., 2022). La calibration n'a donc pas "forcé" artificiellement le paramètre, mais a convergé vers une valeur cohérente.

6.1.2 Le niébé en culture pure : dans les fourchettes de référence

Faute de données expérimentales de niébé pur sur le site d'Okpara, l'évaluation de cette configuration s'est appuyée sur les plages de référence issues de la littérature pour des conditions pédoclimatiques comparables (Tableau 17). Pour la campagne de référence 2022, l'ensemble des variables simulées (biomasse de $4,51 \text{ t ha}^{-1}$, rendement grain de $1,22 \text{ t ha}^{-1}$, indice de récolte de 0,27 et maturité physiologique à 87 JAS) s'inscrit pleinement dans les fourchettes attendues.

L'analyse pluriannuelle confirme la bonne cohérence et la stabilité du module phénologique simulé par STICS. Les durées de cycle obtenues sur les trois campagnes (87 JAS en 2022, 76 JAS en 2023 et 78 JAS en 2024) s'inscrivent de façon homogène dans la plage de 70 à 90 jours rapportée pour les cultivars soudanais précoces à intermédiaires. Les légères variations interannuelles traduisent fidèlement les contrastes thermiques entre saisons à travers le cumul des sommes de températures ($\text{stdrpmat} = 380 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{j}$). Contrairement au maïs où les stades ont été calés sur des observations directes, la phénologie du niébé fonctionne ici en mode purement prédictif, ce qui valide l'autonomie et le réalisme du fichier plante pour la culture pure avant son évaluation en situation de compétition.

6.1.3 L’association : une dominance correctement orientée

En association, le sens des interactions simulées est conforme à la connaissance agromique du système maïs–niébé. Le maïs associé subit une réduction modérée de sa biomasse (-14%) et de son rendement (-10%) par rapport à la culture pure, réduction cohérente avec la compétition exercée par une légumineuse dominée dans les associations céréale–légumineuse d’Afrique de l’Ouest (Namatsheve et al., 2020 ; Dimande et al., 2024). La stabilité de l’indice de récolte du maïs ($0,37\text{--}0,38$) indique que la compétition affecte la production totale de biomasse sans déformer la partition vers les grains. Réciproquement, la dominance compétitive de la céréale sur la légumineuse qui est quantifiée dans la littérature par un ratio de compétition de 1,96 pour le maïs contre 0,58 pour le niébé (Dimande et al., 2024) est qualitativement reproduite par le modèle, qui simule un niébé fortement pénalisé sous l’ombrage du maïs.

Le modèle reproduit donc la *structure* attendue de l’association : domination de la céréale, niche azotée différenciée, pénalisation de la légumineuse. C’est sur l’*intensité* de cette pénalisation que se concentre l’écart au réel. La biomasse ainsi que le rendement sont sous-estimés d’environ 50% pour le niébé, dont l’analyse est détaillée dans la suite.

6.2 Performance du modèle STICS et limites

6.2.1 Sensibilité aux conditions de nodulation en culture pure

L’analyse des simulations du niébé en culture pure révèle un contraste marqué entre les campagnes 2022–2023 ($\sim 4,0$ à $4,5$ t MS ha $^{-1}$) et la campagne 2024, où la biomasse finale plafonne à $1,79$ t MS ha $^{-1}$. Le modèle ne simulant aucun stress hydrique ou d’anoxie direct ($\text{exofac} = 0,00$; $\text{swfac} = 0,99$), l’analyse fine des variables d’état (Tableau 37) permet de retracer la chaîne causale de ce décrochage.

L’indice de nutrition azotée en phase végétative est similaire entre 2023 et 2024 (INNS_{veg} de $0,83$ et $0,82$, respectivement), permettant au niébé d’atteindre un indice foliaire maximal plus élevé en 2024 ($\text{LAI}_{\text{max}} = 1,7$) qu’en 2023 ($\text{LAI}_{\text{max}} = 1,3$). La divergence s’opère durant la phase reproductive : alors que l’état azoté se rétablit en 2023 ($\text{INNS}_{\text{repro}} = 0,98$), il se dégrade continuellement en 2024 ($\text{INNS}_{\text{repro}} = 0,80$), limitant la fixation symbiotique totale à 17 kg N ha $^{-1}$ (contre 81 kg N ha $^{-1}$ en 2022).

Cette dégradation tardive déclenche une boucle de rétroaction propre aux formalismes de STICS. D’une part, l’arrêt de la croissance racinaire dès le début de la sénescence ($\text{stoprac} = \text{sen}$) bloque l’enracinement à 57 cm en 2024 (contre 85 cm en 2023), restreignant fortement l’accès aux réserves minérales du profil. D’autre part, l’offre de fixation symbiotique étant directement proportionnelle au taux d’accumulation de biomasse dans le modèle, ce ralentissement de croissance brise la dynamique de fixation, ce qui accentue en retour le déficit azoté et précipite la chute complète du feuillage (LAI nul dès fin

septembre).

Privé prématurément de surface assimilatrice active, le système dissipe alors l'eau sous forme d'évaporation directe du sol (269 mm, soit 83,8 % de l'ETR) au détriment de la transpiration productive (53 mm). Ce comportement illustre la forte sensibilité du couplage croissance-fixation-sénescence dans le modèle : une contrainte modérée en début de phase reproductive peut s'amplifier par rétroaction interne et provoquer l'arrêt prématuré du cycle foliaire.

6.2.2 Une limite structurelle, pas une erreur de calibration

La forte sous-estimation du niébé en association (Table 19) n'est pas un artefact propre à notre paramétrage variétal. Le test du niébé en culture pure (§5.4) démontre que, libéré de la compétition lumineuse, le cultivar présente un comportement tout à fait réaliste avec le même fichier plante : c'est donc bien la situation d'association, et non le paramétrage intrinsèque de l'espèce, qui dégrade la simulation.

Ce résultat rejoint un comportement documenté pour STICS. De Freitas et al. (2026) identifient le niébé en association comme la culture la plus difficile à simuler de leur jeu d'évaluation, l'erreur sur la biomasse à maturité passant d'environ 38 % en culture pure à 76 % en association, avec un nombre de grains et un indice foliaire particulièrement sous-évalués. Traoré et al. (2022) rapportent une dégradation analogue pour le couple sorgho-niébé au Mali, où le rRMSE du rendement grain du niébé associé atteint 87 %. Les difficultés rencontrées sont donc pleinement cohérentes avec une limite structurelle connue du formalisme dans la représentation de la légumineuse dominée, et non avec une erreur de calage propre au cultivar 58-74f.

La biomasse aérienne du niébé associé reste plafonnée entre 1,69 et 2,49 t ha⁻¹ et l'indice de récolte entre 0,21 et 0,31, tandis que le maïs associé est restitué de façon stable et conforme aux observations sur les trois années (biomasse de 4,79 à 5,12 t ha⁻¹, HI de 0,38 à 0,43). Surtout, la chronologie qui fonde le diagnostic se répète chaque saison : la fraction de rayonnement reçue par le niébé (**rsoleil**) chute sous l'effet de la fermeture du couvert du maïs bien avant que l'indice de nutrition azotée (**inns**) ne décroche, ce dernier se maintenant à 1,00 au moment même de l'effondrement radiatif (Figure 8). Cette reproductibilité interannuelle écarte l'hypothèse d'un artefact climatique ponctuel et conforte l'interprétation d'une limite structurelle du module radiatif intercrop.

6.2.3 Caractérisation mécaniste : le stress radiatif déclenche le stress azoté

Au-delà du constat d'erreur, l'examen des sorties journalières du modèle permet d'identifier précisément le mécanisme qui déclenche la sous-estimation de la légumineuse. Deux variables d'état quotidiennes sont déterminantes : **rsoleil**, la fraction du rayonnement incident reçue par le niébé sous le couvert du maïs, et **inns**, l'indice de nutrition azo-

tée de la plante (1 = nutrition optimale). Leurs dynamiques temporelles présentent un déphasage systématique sur l'ensemble des campagnes (Figure 8).

Au jour julien 240 pour la campagne 2022, alors que *rsoleil* a déjà chuté à 0,31 sous l'effet de la fermeture rapide de la canopée du maïs, le niébé n'éprouve encore aucun stress azoté (*inns* = 1,00). Ce n'est qu'à partir du jour 250, soit une dizaine de jours plus tard, que *inns* commence à fléchir (0,90 à J250 puis 0,65 à J260), pour atteindre 0,43 vers la maturité (J290) tandis que *rsoleil* reste bridé entre 0,20 et 0,33. L'extinction radiative précède strictement l'apparition de la déficience azotée.

Le déficit de lumière bride l'assimilation carbonée et la croissance végétative du niébé, ce qui restreint l'allocation d'assimilats aux racines. Cette inhibition limite l'extension du système racinaire et altère directement l'entretien des nodosités, la fixation symbiotique étant proportionnelle au taux de croissance de la plante hôte qui alimente les nodules en photosynthétats (Brisson et al., 2009 ; Fan et al., 2018). Le déficit azoté n'est donc pas le moteur initial du verrou, mais sa conséquence directe : l'incapacité du niébé à prélever l'azote du sol ou à fixer l'azote atmosphérique résulte de son sous-développement induit par l'ombrage. Le verrou devient ensuite auto-entretenu, la carence azotée restreignant à son tour l'expansion foliaire et la capacité de fixation.

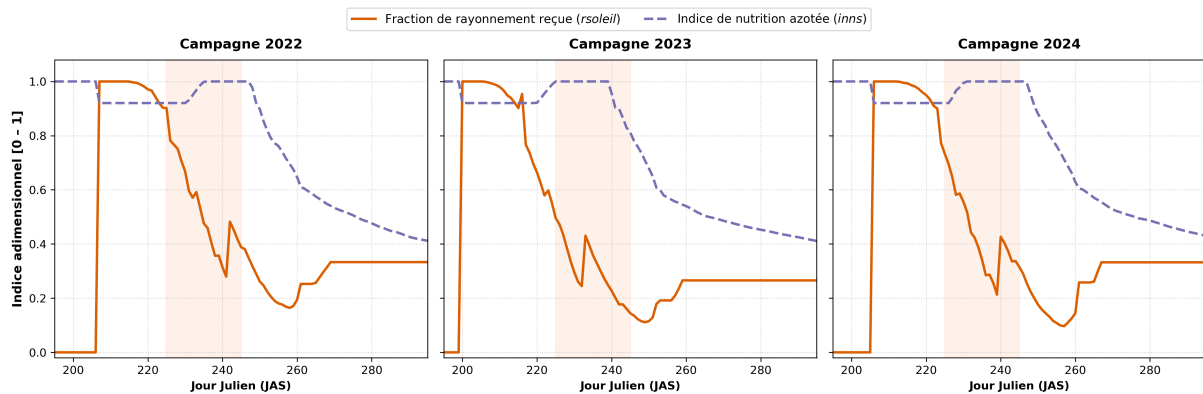


FIGURE 8 – Dynamique journalière comparée du stress radiatif (*rsoleil*) et du stress azoté (*inns*) du niébé associé (S2) pour les campagnes 2022, 2023 et 2024

Cet ensemble causal est conforté par la variabilité observée entre les trois campagnes. Les montants de fixation symbiotique simulés en association (17 kg N ha⁻¹ en 2022, 11 kg N ha⁻¹ en 2023 et 6 kg N ha⁻¹ en 2024) reflètent directement la précocité et la sévérité du déficit lumineux subi par la légumineuse. Lors de la campagne 2023, le niébé subit l'effondrement le plus précoce du rayonnement reçu (*rsoleil* chute à 0,30 dès le jour julien 230 et atteint un minimum de 0,12 à J250), ce qui raccourcit fortement la fenêtre lumineuse nécessaire à l'établissement de la masse nodulaire par rapport à 2022. La baisse de la fixation symbiotique coïncide donc avec la précocité du déficit radiatif, confirmant le rôle de l'interception lumineuse dans le déclenchement de la compétition interspécifique.

6.2.4 Le verrou confirmé par une analyse de sensibilité exhaustive

Pour vérifier qu’aucun paramètre du niébé ne permettait de corriger la sous-estimation en association sans dégrader la simulation en culture pure, un ensemble de leviers a été testé en analyse de sensibilité de chaque paramètre isolé sur la campagne 2022 (Tableau 35).

TABLE 20 – Analyse de sensibilité des principaux leviers du paramétrage niébé sur la simulation en association (S2 2022). Biomasse du niébé pur de référence simulée : 4,37 t ha⁻¹. Biomasse du niébé associé observée : 4,16 t ha⁻¹.

Ressource	Levier (paramètre)	Effet en association	Verdict
<i>Azote</i>			
Absorption racinaire	Vmax1/2 × 3	Biomasse 2,18 → 2,27 ; N absorbé 17 → 21 kg	Sans effet
Fixation – plafond	fixmax = 4,2 (De Freitas et al., 2025)	Produit des fixations faibles (si augmentation de fixmax, fixation explose en culture seule)	on garde 4,2 (De Freitas et al., 2025)
Fixation – seuil	concNrac0 1,2 vs 3,0	Effet négligeable, mais explose en culture seule	1,2 retenu
Fixation – cinétique	stlevdno 354 → 200 ; vitno 0,003 → 0,006	Pas d’effet significatif	Sans effet
Disponibilité totale	Pré-semis +15 kg N	Biomasse +10 % ; fixation inhibée	Effet marginal
<i>Lumière</i>			
Opacité couvert maïs	ktrou 0,35 → 0,20	Niébé +45 % (2,18 → 3,16) ; N absorbé 18 → 31 kg ; mais le maïs subit -41 %	Démonstratif, non retenu
<i>Croissance et enracinement (suggestions M. de Freitas)</i>			
Croissance foliaire	dlaimaxbrut 0,012 → 0,020	2,18 → 2,52 (sole crop inchangé)	ne résout pas le problème donc rejeté
Enracinement	croirac 0,05 → 0,10	Sole crop 4,37 → 7,02 ; association 2,18 → 2,36	Rejeté (dégrade le sole crop du niébé)

Note méthodologique : Cette analyse de sensibilité a été conduite sur le jeu de paramètres de référence initial du niébé pur (4,37 t ha⁻¹ sous *INFIL* = 5,0 mm j⁻¹). La légère réévaluation de la biomasse en culture pure à 4,51 t ha⁻¹ issue du réajustement hydrodynamique, Tableau 17) ne modifie pas les conclusions relatives aux leviers de compétition interspécifique analysés ici.

Aucun levier azoté ne corrige durablement la sous-estimation. Le triplement des cinétiques d’absorption ne produit qu’une augmentation marginale de la biomasse (+4 %), parce que le réservoir d’azote minéral du sol partagé est déjà épuisé en fin de cycle (sortie **azomes** ≈ 0, quantité d’azote dans les différentes couches). La cinétique de nodulation et le seuil d’inhibition nitrique sont sans effet significatif, et le plafond de fixation (**fixmax**)

est inopérant puisque la fixation simulée (12 kg N ha^{-1}) reste très en deçà de ce plafond. Un apport pré-semis de 15 kg N ha^{-1} n'augmente la biomasse que de 10 % tout en inhibant partiellement la fixation symbiotique. La sphère azotée est donc inopérante, ce qui est attendu si l'azote n'est pas le facteur premier.

Le test **croirac** (vitesse de progression du front racinaire) est une preuve indépendante du diagnostic radiatif et est le test le plus instructif. Doubler **croirac** ($0,05 \rightarrow 0,10$) fait exploser la biomasse du niébé en culture pure, de $4,37$ à $7,02 \text{ t ha}^{-1}$ (LAI 5,3, hors de toute fourchette réaliste), tandis qu'en association la même modification ne déplace la biomasse que de $2,18$ à $2,36 \text{ t ha}^{-1}$ (+8 %). Un paramètre qui agit puissamment sur la mobilisation des ressources du sol devient ainsi quasi inopérant lorsque la légumineuse est dominée. Cette asymétrie nous donne une preuve indépendante du diagnostic radiatif : en culture pure, le niébé n'est pas limité par la lumière, et accélérer l'enracinement augmente l'accès à l'eau et à l'azote, qu'il convertit en biomasse ; en association, la lumière étant le facteur premier, l'allocation supplémentaire aux racines ne se traduit pas en croissance aérienne.

Le test du paramètre **ktrou** (Coefficient d'extinction du rayonnement dans le couvert) montre que les deux stress, bien que liés, sont ordonnés dans le temps et non symétriques. Il ne faut pas oublier que les deux stress se renforcent mutuellement dans la cascade simulée. Rendre le couvert du maïs plus transparent ($0,35 \rightarrow 0,20$) augmente simultanément la biomasse du niébé (+45 %) et son absorption azotée (de 18 à 31 kg N ha^{-1}) mais pénalise fortement le maïs (-41 % de biomasse). Si le déficit azoté avait été le déclencheur primaire, lever le verrou radiatif aurait aggravé la situation azotée, un niébé plus gros et plus demandeur dans un sol épuisé ; or c'est l'inverse qui est observé. Le rayonnement libère donc à la fois la croissance et l'accès à l'azote du sol, ce qui confirme la hiérarchie établie par la chronologie de **rsoleil** et **inns**. Ce test reste néanmoins une expérience numérique : la valeur 0,35 de **ktrou** est documentée pour le maïs et ne peut être abaissée pour des raisons biophysiques et sa manipulation ne sert ici que de diagnostic, pas de calibration.

L'ensemble de ces résultats converge vers une interprétation structurelle du verrou niébé. Couplée à la convergence avec De Freitas et al. (2026) et Traoré et al. (2022), cette liste plaide pour une limite intrinsèque du module radiatif intercrop dans la représentation des couverts céréale-légumineuse, et non pour une erreur de calage du cultivar 58-74f. Le choix retenu est donc de documenter cette limite plutôt que de la masquer par un surajustement : parmi tous les leviers testés, seul **dlaimaxbrut** améliore l'association sans dégrader la culture pure, mais trop marginale (+16 % en association) pour combler l'écart de 48 %. Conformément au principe rappelé par M. de Freitas (communication personnelle, 2026), ne pas toucher aux paramètres plante en association si la culture pure est correctement simulée. Ce verrou est donc analysé comme un résultat en soi, et non corrigé artificiellement.

6.2.5 Limites techniques et précautions d'interprétation

Une limite technique, distincte de la question du niébé dominé, doit être signalée. En association maïs-niébé (S2), la restitution des résidus racinaires morts au sol est fortement surestimée par le modèle : la masse totale de carbone racinaire mort restituée au sol atteint $9,76 \text{ t C ha}^{-1}$ (dont $8,57 \text{ t C ha}^{-1}$ issues du maïs et $1,19 \text{ t C ha}^{-1}$ du niébé), contre seulement $1,27 \text{ t C ha}^{-1}$ pour le maïs en culture pure. Cet artéfact gonfle artificiellement le pool de carbone des résidus du sol ($\text{Crtout} = 32,5 \text{ t C ha}^{-1}$) et surestime la minéralisation de la matière organique ($\text{Mineralisation} - \text{PE} = 6,07 \text{ t C ha}^{-1}$).

L'analyse des variables journalières montre que ce biais provient d'une sur-allocation carbonée massive vers le système racinaire de la céréale dominante, où la biomasse racinaire vivante maximale (msrac) atteint la valeur irréaliste de $22,54 \text{ t MS ha}^{-1}$ (soit un ratio Racine/Tige $R/S = 4,37$, contre $0,51$ en culture pure). Des tests de sensibilité spécifiques conduits sur le paramètre de sensibilité à la densité racinaire (adens) n'ont réduit cette masse que très marginalement ($20,97 \text{ t MS ha}^{-1}$ pour le maïs), ce qui confirme une limite de structure du formalisme d'allocation C en situation de compétition interspécifique.

Cet artéfact se limite toutefois au compartiment souterrain et n'exerce aucune rétroaction négative sur la canopée : les variables de production aérienne simulées (biomasse aérienne masec , rendement grain mafruit , indice de récolte HI et indices de stress inns , swfac) restent stables. La démonstration du verrou radiatif du niébé dominé (§6.2.2) demeure donc parfaitement valide, mais les bilans de carbone et d'azote du sol en association ne sont pas exploités dans ce travail.

Par ailleurs, le niébé en culture pure a été simulé dans les conditions pédologiques et de fertilisation du système S2 (densité 12.5 plants/m^2 , résidus de coton restitués, 49 kg N/ha hérités de l'itinéraire maïs), et non en conditions de niébé pur optimisé. Ce choix garantit que le paramétrage de référence et l'évaluation en association partagent le même environnement sol-azote, isolant ainsi l'effet propre de la compétition. Enfin, l'absence de phénologie niébé mesurée sur le site implique que le calage de la somme thermique de remplissage repose sur la cohérence de l'indice de récolte avec les données expérimentales, et non sur une date de floraison mesurée, ce qui en fait une limite à garder à l'esprit. Une autre limite importante de notre modélisation est l'absence du phosphore dans STICS v10.5.0, dont le moteur se concentre exclusivement sur les cycles de l'eau et de l'azote. Pourtant, sur les Lixisols du Bénin, le phosphore disponible est très souvent le véritable facteur limitant de la fertilité des sols (Barthès et al., 2000; Botula et al., 2012). Pour une légumineuse comme le niébé, le phosphore joue un rôle biologique crucial : il conditionne la croissance des racines, le développement des nodosités et fournit l'énergie (sous forme d'ATP) indispensable à la fixation symbiotique de l'azote. Néanmoins, le fait que STICS n'intègre pas le phosphore ne remet pas en cause notre diagnostic principal sur

l'association. En effet, l'analyse au pas de temps quotidien montre que l'effondrement du niébé sous le maïs est déclenché d'abord par le manque de lumière (*rsoleil*), bien avant que la nutrition azotée (*inns*) ne commence à chuter. Le déficit lumineux reste donc le premier verrou structurel. L'ajout d'un module phosphore représenterait malgré tout une belle opportunité pour affiner la modélisation des légumineuses sur ces sols tropicaux P-fixateurs.

6.2.6 Implications pour la question de recherche

La question posée en introduction (§1.7) interrogeait la capacité de STICS à simuler fidèlement la croissance, la phénologie et les performances du maïs en culture pure et en association avec le niébé, et ce que le modèle révèle des mécanismes par lesquels la légumineuse influence le système. Les résultats permettent d'y répondre de façon nuancée. Sur le plan prédictif, STICS constitue un outil fiable pour le maïs, pur comme associé, et pour le niébé en culture pure. La défaillance n'intervient vraiment que sur la légumineuse dominée lors de l'association. Toutefois, la contribution de ce travail ne se réduit pas à ce constat de performance : son apport principal est d'avoir caractérisé le mécanisme de cette défaillance. Le modèle expose, à travers ses variables, une chaîne causale cohérente, où la fermeture radiative du couvert du maïs précède et déclenche le déficit azoté du niébé qui verrouille en retour sa croissance et sa fixation. Le modèle reproduit ainsi le bon mécanisme qualitatif, à savoir la domination de la céréale et la niche azotée différenciée, mais en surestime l'intensité. Autrement dit, l'intérêt de STICS dans le cadre de ce mémoire n'aura pas été de prédire le rendement du niébé associé mais plutôt d'aider à comprendre pourquoi ce rendement est si difficile à simuler.

Plusieurs pistes peuvent affiner la représentation de la légumineuse dominée sans recourir au surajustement. La première concerne la longueur spécifique racinaire du niébé (*longsperac*) : ce paramètre influence à la fois la masse racinaire restituée, à l'origine de l'artefact signalé au paragraphe 6.2.5, et l'accès de la plante à l'azote du sol. Le réexaminer à partir de mesures racinaires permettrait de découpler ces deux effets. La deuxième porte sur le module de partage radiatif, que l'analyse de sensibilité (§6.2.4) désigne comme le moteur de toute la cascade : l'évaluer sur des couverts céréale-légumineuse contrastés dirait si la sous-estimation vient bien de ce module. La dernière, plus fondamentale, est la confrontation à des mesures de fixation symbiotique in situ, absentes ici, sans lesquelles le bilan azoté de l'association ne peut être pleinement validé. Ces pistes dépassent le cadre de ce mémoire mais en constituent les prolongements naturels.

6.2.7 Implications pour la durabilité et la modélisation future

Au-delà du cas spécifique du site d'Okpara, ce travail apporte deux enseignements de portée plus générale. Le premier concerne l'utilisation du modèle STICS comme outil

d'aide à la décision en milieu tropical. Le second touche à la portée des évaluations agro-écologiques des systèmes maïs-niébé.

Le premier enseignement constitue une mise en garde sur le domaine de validité du modèle. STICS simule de façon fiable le maïs et le niébé en culture pure dans les conditions pédoclimatiques béninoises. Toutefois, cette validation a été obtenue pour des campagnes bénéficiant d'une fertilisation azotée optimale et sans stress hydrique majeur. L'évaluation de la robustesse du modèle mériterait d'être élargie à des années plus sèches ou à des niveaux de fertilisation plus faibles (plus proches des contraintes réelles des exploitations paysannes). En revanche, le modèle sous-estime systématiquement le niébé dès lors qu'il se trouve en situation de domination en association. Un utilisateur qui mobiliserait STICS pour évaluer le rendement du niébé associé (par exemple pour comparer des arrangements spatiaux ou des scénarios de fertilisation) obtiendrait une légumineuse sur-pénalisée. Il risquerait alors de conclure à tort à un faible intérêt de l'association. La connaissance des verrous caractérisés dans ce travail (verrou radiatif et artéfact d'allocation racinaire) est donc indispensable pour un usage averti. Tant que le module de compétition interspécifique n'est pas révisé, les sorties du niébé associé doivent être interprétées comme des bornes basses conservatrices, et les variables de bilan du sol en association doivent être écartées.

Le second enseignement concerne la portée des conclusions de durabilité et l'importance d'une représentation fidèle des itinéraires techniques. L'intérêt agronomique du niébé comme plante améliorante repose en grande partie sur la restitution de ses résidus au sol (source d'azote et de matière organique pour la culture suivante). Or, dans le dispositif d'Okpara mobilisé dans ce travail, les résidus de niébé ont été dispersés à la surface des parcelles après récolte, de sorte que les fanes contribuent activement au maintien du stock organique. Cette situation s'écarte des pratiques paysannes dominantes de la région. En effet, les fanes y sont le plus souvent récoltées comme fourrage durant la saison sèche ou valorisées commercialement (Samireddypalle et al., 2017). Lorsque ces résidus aériens sont exportés, la restitution au sol se limite aux seules racines, qui ne représentent que 6 à 8 % de la biomasse sèche totale (Binacchi et al., 2022). Cela peut rendre le bilan d'azote du système nul, voire négatif (Franke et al., 2018). Il convient toutefois de souligner que cette divergence n'est pas une limite intrinsèque au modèle STICS (qui permet parfaitement de simuler la reprise des fanes via la gestion des résidus dans le fichier technique) mais plutôt dans la construction des scénarios. Toute projection des bénéfices simulés doit donc intégrer le devenir réel des résidus sous peine de surestimer l'effet régénérateur de la légumineuse.

Ces deux enseignements convergent vers une même conclusion. La valeur de STICS pour les systèmes céréale-légumineuse tropicaux ne tient pas seulement à sa précision prédictive (démontrée en culture pure sous conditions favorables). Elle réside aussi dans sa capacité à rendre explicites les mécanismes, les contraintes de paramétrage et l'impact

des choix de gestion. C'est en l'utilisant comme un outil de compréhension autant que de prédiction que la modélisation pourra éclairer la conception de systèmes maïs-niébé adaptés aux réalités ouest-africaines.

7 Conclusion

Ce mémoire visait à évaluer la capacité du modèle STICS v10.5.0 à simuler la croissance, la phénologie et les performances agronomiques du maïs en culture pure et en association avec le niébé sous les conditions pédoclimatiques d’Okpara (Bénin). Il avait également pour but de caractériser les mécanismes écophysiologiques de la compétition interspécifique et d’identifier les limites de structure du module d’association. Les résultats obtenus permettent de répondre successivement aux trois questions de recherche définies en introduction.

Concernant la **transférabilité du paramétrage maïs (Q1)**, le jeu de paramètres calibré sur la campagne 2022 en culture pure (*S1*) reproduit fidèlement la biomasse, le rendement et la dynamique du *LAI*. Cette précision se maintient sur les campagnes 2023 et 2024 (hormis pour le *LAI*, caractérisé par une forte variabilité sur les 3 campagnes), pourtant climatiquement contrastées, sans aucun réajustement des paramètres. La *nRMSE* reste inférieure à 11 %, avec un biais très faible sur l’ensemble des variables clés. Ce résultat confirme la robustesse du paramétrage du maïs pour les Lixisols de la région de Parakou et valide son usage comme référence pour l’analyse du système associé.

Ce paramétrage du maïs une fois validé, il convenait de s’assurer que celui du niébé cultivé seul soit tout aussi fiable avant d’aborder l’association. C’est ce que confirme l’évaluation de la **plausibilité du paramétrage niébé (Q2)** : le jeu de paramètres adapté au cultivar local 58-74f fournit des résultats agronomiquement cohérents avec la littérature ouest-africaine. La biomasse, le rendement grain, l’indice de récolte et la fixation symbiotique s’inscrivent dans les fourchettes observées en culture pure, malgré l’absence de suivis phénologiques continus sur site. Un décalage subsiste toutefois sur la fixation symbiotique de la campagne 2024.

Ces deux validations en culture pure laissaient présager une simulation du système associé tout aussi robuste. Ce n’est pourtant pas ce que révèlent les **verrous et mécanismes de l’association maïs-niébé (Q3)** : si le module reproduit correctement la direction qualitative de la dominance du maïs, il sous-estime d’environ 35 % à 60 % la biomasse et le rendement du niébé dominé (*S2*). L’analyse de sensibilité exhaustive, étayée par la réactivité du paramètre *fixmax* en culture pure (+16,0 % de fixation N_2) face à son inopérabilité totale en association, écarte l’hypothèse d’un simple défaut de calibration. L’écart provient d’une limite structurelle du module de partage radiatif : la fermeture précoce de la canopée du maïs entraîne une carence en photo-assimilats qui prive les nodosités d’énergie carbonée, verrouillant secondairement la nutrition azotée.

Au-delà de ces limites, ce diagnostic doit être remis en perspective avec la réalité des systèmes agricoles tropicaux. Le bénéfice du niébé comme plante améliorante de la fertilité azotée, mis en avant en introduction, dépend étroitement du mode de gestion des résidus d’une campagne à l’autre. Alors que le dispositif expérimental d’Okpara applique une

restitution intégrale des fanes au sol, les exploitations paysannes pratiquent fréquemment leur exportation pour l'alimentation du bétail en saison sèche, ce qui atténue grandement l'effet régénérateur sur le bilan azoté du sol observé.

Pour surmonter ces contraintes et fiabiliser l'usage de STICS en association dans les travaux futurs, deux axes de recherche prioritaires se dégagent :

1. **Sur le plan expérimental** : l'intégration de mesures continues du LAI et des mesures de fixation symbiotique permettrait de contraindre plus rigoureusement les paramètres du module azoté de la légumineuse.
2. **Sur le plan de la modélisation** : un réexamen des formalismes de partage du rayonnement sous canopée s'impose, couplé à une correction algorithmique de l'allocation racinaire chez la céréale pour résoudre l'artéfact d'accumulation de biomasse souterraine en mode intercrop.

En définitive, ce mémoire démontre que STICS v10.5.0 constitue un outil robuste pour simuler le maïs et le niébé en culture pure sous climat soudanien (sous réserve de la sensibilité du module de fixation identifiée en 2024, [6.2.1](#)). Pour le système associé, l'intérêt majeur du modèle n'aura pas été de prédire avec précision le rendement du niébé dominé, mais d'avoir permis de décortiquer la chaîne causale de son échec. Ce diagnostic mécaniste offre une feuille de route claire pour les développements futurs du module d'association en zone tropicale.

8 Annexes

Annexe A : Dispositif expérimental et Caractérisation climatique

Annexe A.1 : Succession des cultures par parcelle sur le site d'Okpara (2017–2024)

TABLE 21 – Rotation des cultures par parcelle et par système (2017–2024)

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+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj
4	3	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	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+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr
8	2	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp	Ct	Ma+Cp
9	3	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	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+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj
13	1	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct	Ma	Ct
14	3	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct
15	3	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	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+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	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+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj	Ct	Ma+St+Crr	Sg+Soy+Cj

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

Annexe A.2 : Synthèse climatique des trois campagnes

Les données climatiques journalières (température min./max., rayonnement global, précipitations, vent, humidité) sont issues de la station météorologique d'Okpara. Les données couvrent l'année civile complète pour chaque campagne. Le Tableau 22 en présente les indicateurs synthétiques.

TABLE 22 – Indicateurs climatiques annuels et par cycle cultural du maïs, site d'Okpara, campagnes 2022–2024. Le cycle cultural est défini du semis à la maturité physiologique.

Indicateur	Unité	2022	2023	2024
<i>Bilan annuel (janvier–décembre)</i>				
Cumul pluviométrique	mm	1320	1132	1041
Cumul mai–octobre (saison pluies)	mm	1183	991	963
Nb. jours pluvieux (>1 mm)	jours	168	174	153
Température moyenne annuelle	°C	26,2	27,1	27,4
Température minimale moyenne	°C	20,7	21,6	21,4
Température maximale moyenne	°C	31,8	32,6	33,4
Rayonnement solaire moyen	MJ/m ² /j	19,1	18,9	19,0

Vitesse du vent moyenne	m/s	1,98	1,85	2,16
<i>Cycle cultural du maïs (semis → maturité)</i>				
Durée du cycle	jours	104	100	103
Cumul pluviométrique sur cycle	mm	796	663	598
Nb. jours pluvieux sur cycle	jours	95	89	83
Température moyenne sur cycle	°C	25,0	25,8	26,2
Température maximale moy. cycle	°C	28,5	29,3	29,9
Rayonnement moyen sur cycle	MJ/m ² /j	16,8	16,6	16,8

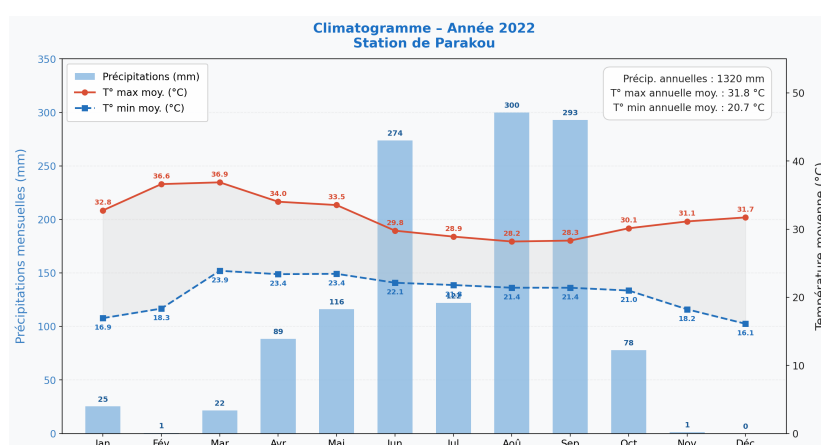


FIGURE 9 – Climatogramme mensuel 2022 à la station d'Okpara. (NASA POWER | Data Access Viewer (DAV), 2026)

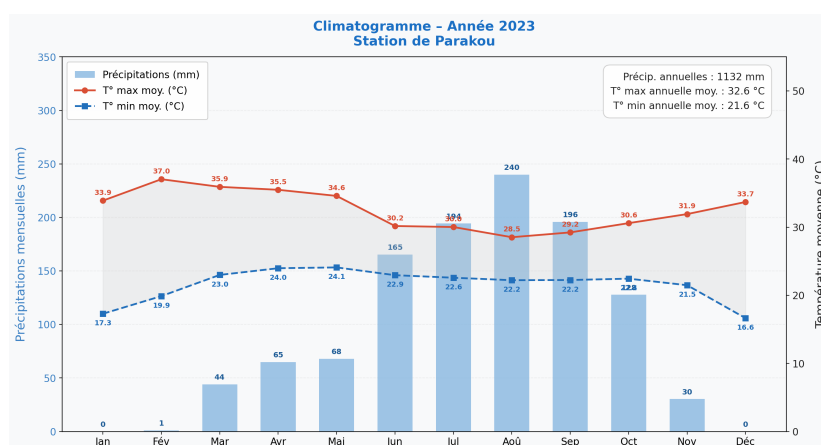


FIGURE 10 – Climatogramme mensuel 2023 à la station d'Okpara. (NASA POWER | Data Access Viewer (DAV), 2026)

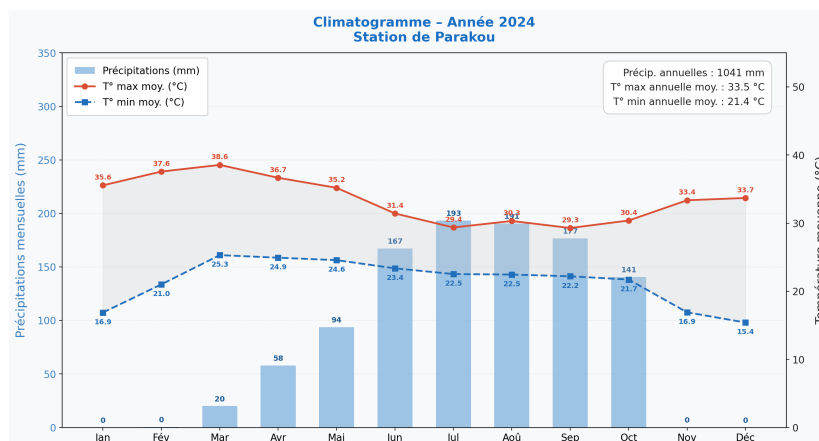


FIGURE 11 – Climatogramme mensuel 2024 à la station d’Okpara.(NASA POWER | Data Access Viewer (DAV), 2026)

Annexe B : Paramètres pédologiques appliqués à STICS

Le Tableau 23 présente les paramètres généraux du fichier sol utilisé pour toutes les simulations. Le Tableau 24 détaille les propriétés par couche.

Annexe B.1 : Paramètres généraux du sol

TABLE 23 – Paramètres généraux du fichier sol (.sol) pour le site d’Okpara.

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Méthode
<i>Composition et pH</i>				
argi	Teneur en argile (surface)	%	7,4	Allakonon (2024) ; Neujean (2025)
calc	Teneur en calcaire	%	1,0	Défaut STICS sols tropicaux
pH	pH eau, horizon A	–	6,12	Neujean (2026), horizon A
<i>Matière organique et azote</i>				
norg	Azote organique	%	0,05	Moyenne pondérée des mesures de Neujean (2025) sur les horizons 0–30 cm (0,039 %). Le seuil plancher de STICS impose ce report vers 0,05
0-profhum				
profhum	Prof. horizon biologiq. actif	cm	30	Ajusté sur A + moitié AB
CsurNsol	Rapport C/N du sol	–	10,5	Neujean (2025), horizon A
finert	Fraction inerte du C organique	–	0,92	Nicolardot et al. (2001)

(suite page suivante)

(suite de la Table 23)

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Méthode
concseuil	Seuil N min. flux nul	g/L	0,20	Défaut STICS
<i>Bilan hydrique de surface</i>				
albedo	Albédo du sol nu	–	0,25	Défaut STICS sol sableux
q0	Seuil évaporation cumulée	mm	12,0	Défaut STICS
zesx	Prof. max. extraction évap.	cm	30	Défaut STICS
cfes	Coef. fonction d'évaporation	–	1,0	Défaut STICS
z0solnu	Rugosité sol nu	m	0,01	Défaut STICS
<i>Ruissellement et battance</i>				
ruisolnu	Ruissellement sol nu	–	0,00	Défaut STICS
pluiebat	Pluie déclench. battance	mm/h	50	Le Bissonnais (1996), sol kaolinitique
mulchbat	Seuil mulch anti-battance	t/ha	0,50	Défaut STICS
penterui	Pente pour ruissellement	%	0,33	Terrain (1,3 % → tan)
<i>Enracinement et dénitrification</i>				
obstarac	Prof. max. enracinement	cm	90	NeuJean (2025), observations
profdenit	Prof. de dénitrification	cm	20	Défaut STICS
vpotdenit	Vitesse potentielle de dénitrif.	kg N ha ⁻¹ j ⁻¹	2,0	Défaut STICS

Options désactivées : fissures (`codefente` = 2, sol non gonflant), drainage artificiel (`codrainage` = 2), remontées capillaires (`codereumontcap` = 2), nitrification et dénitrification explicites (`codenitrif` = 2, `codedenit` = 2). Macroporosité et cailloux activés (`codemacropor` = 1, `codecailloux` = 1) mais teneur en cailloux nulle par couche.

Annexe B.2 : Propriétés par couche

TABLE 24 – Propriétés physiques et hydrodynamiques par couche du fichier sol STICS. Les couches 1 à 4 correspondent aux horizons pédologiques A, AB, B1 et B2. La couche 5 (100–125 cm) est une extension imposée par STICS pour couvrir la profondeur d’enracinement potentielle ; elle reprend les valeurs de la couche 4.

Couche	Prof. (cm)	épc (cm)	HCCF (% mass.)	HMINF (% mass.)	DAF (g/cm ³)	infil (mm/j)	épd (cm)
1 (A)	0–25	25	13	5	1,65	360	10
2 (AB)	25–45	20	11	4	1,60	240	10
3 (B1)	45–75	30	8	3	1,50	180	10
4 (B2)	75–100	25	7	3	1,50	120	10
5 (extension)	100–125	25	7	3	1,50	120	10

Légende : épc = épaisseur ; HCCF = capacité au champ (% mass.) ; HMINF = point de flétrissement (% mass.) ; DAF = densité apparente ; infil = infiltrabilité max. ; épdp = épaisseur d’agrégat.

L’application des fonctions de pédotransfert de Saxton et Rawls (2006) indique que la prédominance du sable maintient une conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) élevée sur l’ensemble du profil ($\geq 13 \text{ mm h}^{-1}$ en profondeur, soit $> 300 \text{ mm j}^{-1}$). La réduction progressive d’*INFIL* avec la profondeur traduit ainsi fidèlement l’enrichissement en argile de l’horizon B_t tout en garantissant un drainage réaliste et sans engorgement artificiel.

Les concentrations initiales en azote minéral (NO_3^- et NH_4^+) sont issues de la Table 3.1 de la thèse d’Allakonon (2024), site expérimental de l’Université de Parakou (à quelques kilomètres du site d’Okpara, même zone agroécologique) : $\text{NO}_3^- = 3,4 \text{ mg/kg}$ (0–20 cm), 2,1 (20–40) et 0,5 (40–100) ; $\text{NH}_4^+ = 1,4$ (0–20), 1,3 (20–40) et 0,1 (40–100). L’humidité initiale du sol est fixée à la capacité au champ au 1^{er} janvier de chaque campagne.

Annexe C : Données Expérimentales de Terrain (2022–2024)

Annexe C.1 : Stades phénologiques observés du maïs par parcelle

Le Tableau 25 rassemble les dates de relevé des stades phénologiques du maïs (*Zea mays* L., cv. EVDT 97 STR W) pour les trois campagnes (2022, 2023, 2024) sur les neuf parcelles élémentaires du dispositif d’Okpara, réparties entre les trois systèmes de culture (S1 conventionnel, S2 strip-tillage avec niébé, S3 strip-tillage avec association complexe). Les valeurs sont exprimées en jours après semis (JAS). Les moyennes par traitement et par campagne sont arrondies à l’entier le plus proche.

TABLE 25 – Stades phénologiques observés du maïs en jours après semis (JAS) sur le dispositif d’Okpara, par parcelle, traitement et campagne. 1^{ère} fleur = apparition de la première inflorescence ; 50 % Flor. = 50 % des plants en floraison ; 50 % Anth. = 50 % en anthèse mâle ; 50 % Fem. = 50 % en émission des soies ; 50 % Épi. = 50 % des épis formés ; Mat. phys. = maturité physiologique observée. Les lignes en italique donnent la moyenne des trois parcelles de répétition pour chaque traitement.

Année	Parc.	Trait.	1 ^{ère} fl. (JAS)	50 % Flor. (JAS)	50 % Anth. (JAS)	50 % Fem. (JAS)	50 % Épi. (JAS)	Mat. phys. (JAS)
2022	6	Maïs S1	47	58	59	63	77	89
2022	10	Maïs S1	47	58	59	61	77	91
2022	16	Maïs S1	47	60	61	61	77	89
		<i>Moyenne S1</i>	<i>47</i>	<i>59</i>	<i>60</i>	<i>62</i>	<i>77</i>	<i>90</i>
2022	5	Maïs S2	47	60	61	65	79	91
2022	8	Maïs S2	48	60	61	65	77	89
2022	17	Maïs S2	47	60	61	63	77	89
		<i>Moyenne S2</i>	<i>47</i>	<i>60</i>	<i>61</i>	<i>64</i>	<i>78</i>	<i>90</i>
2022	4	Maïs S3	47	60	62	65	81	91
2022	14	Maïs S3	47	60	61	61	79	89
2022	15	Maïs S3	48	60	61	63	79	91
		<i>Moyenne S3</i>	<i>47</i>	<i>60</i>	<i>61</i>	<i>63</i>	<i>80</i>	<i>90</i>
2023	2	Maïs S1	45	55	57	59	75	90
2023	13	Maïs S1	44	55	57	59	75	92
2023	19	Maïs S1	44	53	57	59	75	90
		<i>Moyenne S1</i>	<i>44</i>	<i>54</i>	<i>57</i>	<i>59</i>	<i>75</i>	<i>91</i>
2023	1	Maïs S2	49	56	58	62	78	91
2023	11	Maïs S2	49	56	58	62	78	89
2023	20	Maïs S2	47	54	58	62	76	91
		<i>Moyenne S2</i>	<i>48</i>	<i>55</i>	<i>58</i>	<i>62</i>	<i>77</i>	<i>90</i>
2023	3	Maïs S3	47	56	60	60	76	89
2023	12	Maïs S3	47	54	56	60	76	91
2023	21	Maïs S3	47	54	58	60	76	91
		<i>Moyenne S3</i>	<i>47</i>	<i>55</i>	<i>58</i>	<i>60</i>	<i>76</i>	<i>90</i>
2024	6	Maïs S1	45	55	59	61	76	89
2024	10	Maïs S1	46	54	56	58	77	90
2024	16	Maïs S1	47	55	57	60	76	89
		<i>Moyenne S1</i>	<i>46</i>	<i>55</i>	<i>57</i>	<i>60</i>	<i>76</i>	<i>89</i>
2024	5	Maïs S2	48	55	58	62	77	90
2024	8	Maïs S2	48	56	59	61	78	91

(suite page suivante)

(suite de la Table 25)

Année	Parc.	Trait.	1 ^{ère} fl. (JAS)	50 % Flor. (JAS)	50 % Anth. (JAS)	50 % Fem. (JAS)	50 % Épi. (JAS)	Mat. phys. (JAS)
2024	17	Maïs S2	46	54	56	59	76	90
		<i>Moyenne S2</i>	<i>47</i>	<i>55</i>	<i>58</i>	<i>61</i>	<i>77</i>	<i>90</i>
2024	7	Maïs S3	47	55	58	62	77	92
2024	9	Maïs S3	46	56	59	62	78	90
2024	18	Maïs S3	47	56	58	60	77	91
		<i>Moyenne S3</i>	<i>47</i>	<i>56</i>	<i>58</i>	<i>61</i>	<i>77</i>	<i>91</i>

Source : observations terrain, dispositif d'Okpara (9,35 °N, Parakou, Bénin), campagnes 2022–2024. Les stades sont relevés sur les trois parcelles de répétition de chaque traitement (S1, S2, S3). Les moyennes (en italique) sont arrondies à l'entier le plus proche ; les valeurs exactes diffèrent de moins d'une demi-journée.

Annexe C.2 : Itinéraires techniques appliqués aux traitements simulés

Le Tableau 27 récapitule les dates et modalités des opérations culturales appliquées aux traitements S1 (maïs conventionnel) et S2 (maïs–niébé en association) sur les trois campagnes, telles que consignées dans les registres de terrain du dispositif d'Okpara. Ces informations alimentent les fichiers techniques (.tec) des simulations STICS.

TABLE 27 – Itinéraires techniques par campagne et par traitement, site d'Okpara (2022–2024). Densité de semis maïs : 6,25 pl/m², profondeur 3 cm. Densité de semis niébé : 12,5 pl/m². Dose NPK 13-17-17 : 200 kg/ha. Dose urée 46 % N : 50 kg/ha.

Année	Trait.	Opération	Date	Détails
2022	S1	Labour	23/06/2022	Charrue à disque, 20 cm
2022	S1	Semis maïs	29/06/2022	
2022	S1	Fertilisation NPK	14/07/2022	15 JAS, N = 26 kg/ha
2022	S1	Fertilisation urée	13/08/2022	45 JAS, N = 23 kg/ha
2022	S1	Récolte maïs	12/10/2022	
2022	S2	Strip-tillage	30/05/2022	Sur ligne, 10 cm
2022	S2	Semis maïs	23/06/2022	
2022	S2	Fertilisation NPK	08/07/2022	15 JAS du maïs
2022	S2	Semis niébé	11/07/2022	18 JAS du maïs
2022	S2	Fertilisation urée	07/08/2022	45 JAS du maïs
2022	S2	Récolte maïs	06/10/2022	
2023	S1	Labour	26/06/2023	Charrue à disque, 20 cm
2023	S1	Semis maïs	27/06/2023	

(suite page suivante)

(suite de la Table 27)

Année	Trait.	Opération	Date	Détails
2023	S1	Fertilisation NPK	12/07/2023	15 JAS
2023	S1	Fertilisation urée	11/08/2023	45 JAS
2023	S1	Récolte maïs	10/10/2023	
2023	S2	Strip-tillage	17/05/2023	Sur ligne, 10 cm
2023	S2	Semis maïs	20/06/2023	
2023	S2	Fertilisation NPK	05/07/2023	15 JAS du maïs
2023	S2	Semis niébé	10/07/2023	20 JAS du maïs
2023	S2	Fertilisation urée	04/08/2023	45 JAS du maïs
2023	S2	Récolte maïs	03/10/2023	
2024	S1	Labour	21/06/2024	Charrue à disque, 20 cm
2024	S1	Semis maïs	01/07/2024	
2024	S1	Fertilisation NPK	16/07/2024	15 JAS
2024	S1	Fertilisation urée	15/08/2024	45 JAS
2024	S1	Récolte maïs	14/10/2024	
2024	S2	Strip-tillage	14/06/2024	Sur ligne, 10 cm
2024	S2	Semis maïs	21/06/2024	
2024	S2	Fertilisation NPK	06/07/2024	15 JAS du maïs
2024	S2	Semis niébé	16/07/2024	25 JAS du maïs
2024	S2	Fertilisation urée	05/08/2024	45 JAS du maïs
2024	S2	Récolte maïs	04/10/2024	

Source : registres de terrain, dispositif d'Okpara (CPE d'Okpara, Université de Parakou), campagnes 2022-2024.

Annexe C.3 : Dynamique de la biomasse aérienne du maïs

Le Tableau 28 présente la dynamique temporelle de la biomasse aérienne sèche du maïs (t MS ha^{-1}) mesurée de 30 à 90 JAS, convertie sur la base des densités réelles à la récolte mesurées sur la surface utile de chaque parcelle.

TABLE 28 – Dynamique d’accumulation de la biomasse aérienne du maïs observée (t MS ha⁻¹) par stade de développement sur le site d’Okpara (2022–2024).

Traitement	Campagne	30 JAS	45 JAS	60 JAS	75 JAS	90 JAS
Maïs S1	2022	0,47 ± 0,03	2,38 ± 0,10	3,47 ± 0,22	5,33 ± 0,31	8,73 ± 0,35
	2023	1,10 ± 0,77	3,52 ± 0,70	4,90 ± 1,03	8,21 ± 2,85	9,20 ± 2,03
	2024	0,64 ± 0,06	2,23 ± 0,18	3,66 ± 0,26	5,94 ± 0,47	9,04 ± 0,47
Maïs S2	2022	0,25 ± 0,00	1,63 ± 0,02	3,15 ± 0,06	4,72 ± 0,04	8,62 ± 0,22
	2023	1,07 ± 0,50	2,08 ± 0,86	3,32 ± 1,17	6,11 ± 2,89	8,06 ± 2,98
	2024	0,47 ± 0,13	1,98 ± 0,57	3,01 ± 0,97	4,90 ± 1,20	8,07 ± 2,08

Note : Valeurs exprimées en moyenne ± écart-type des 3 parcelles de répétition.

L’écart observé entre la biomasse maximale mesurée à 90 JAS ($\sim 8,7\text{--}9,2$ t MS ha⁻¹) et la biomasse finale à la récolte ($\sim 6,1\text{--}6,3$ t MS ha⁻¹) reflète un phénomène écophysiologique (Kamara et al., 2003). Durant la phase de dessèchement sur pied, la remobilisation massive de l’azote des organes végétatifs vers le grain accélère la sénescence de la canopée et rend les limbes foliaires extrêmement friables (Ciampitti & Vyn, 2012). Il y a alors une perte importante de débris foliaires desséchés et cassés qui ne sont plus comptabilisés lors de la coupe finale à la récolte.

Annexe C.4 : Dynamique de LAI du maïs

TABLE 29 – Indice de surface foliaire (LAI, cm²/cm²) du maïs mesuré à 30, 45, 60, 75 et 90 JAS pour les traitements S1 et S2, site d’Okpara, campagnes 2022–2024. Valeurs : moyenne ± écart-type sur 3 parcelles de répétition.

Année	Trait.	30 JAS	45 JAS	60 JAS	75 JAS	90 JAS
2022	S1	0,53 ± 0,13	1,70 ± 0,32	2,65 ± 0,22	2,48 ± 0,11	1,48 ± 0,22
2022	S2	0,75 ± 0,24	1,23 ± 0,24	2,17 ± 0,32	2,07 ± 0,31	1,30 ± 0,33
2023	S1	1,04 ± 0,38	2,92 ± 0,92	3,25 ± 0,54	2,98 ± 0,49	1,08 ± 0,04
2023	S2	1,57 ± 0,44	3,04 ± 1,04	3,42 ± 1,03	2,95 ± 0,90	1,19 ± 0,56
2024	S1	0,75 ± 0,16	2,54 ± 0,46	4,22 ± 0,38	3,90 ± 0,27	1,82 ± 0,12
2024	S2	0,73 ± 0,33	2,15 ± 0,41	3,49 ± 0,38	3,31 ± 0,38	1,76 ± 0,42

Annexe C.5 : Dynamique du LAI du maïs associé (observés vs simulés) pour les 3 campagnes

Tout comme lors du traitement S1, STICS sous-estime l’établissement foliaire précoce (30–45 JAS) sur les trois campagnes (Falconnier et al., 2017). En phase de plateau, le $LAI_{\max}$ simulé reste très stable (2,26 à 2,36). Le modèle restitue fidèlement le plateau observé en calibration 2022 (2,36 simulé vs $2,17 \pm 0,32$ observé), mais sous-estime nettement

les maxima mesurés en validation ($3,42 \pm 1,03$ en 2023 et $3,49 \pm 0,38$ en 2024), avec un sous-dimensionnement 35%.

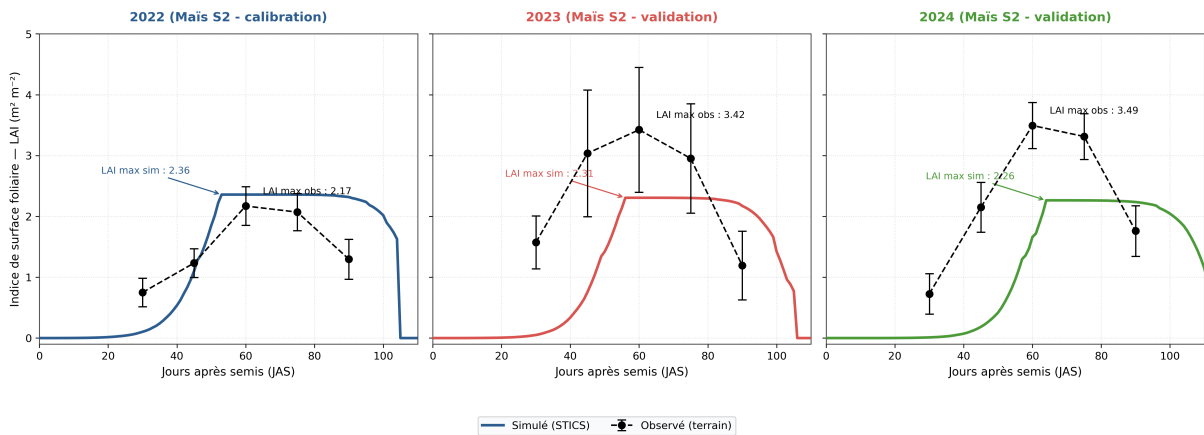


FIGURE 12 – Comparaison de la dynamique du LAI simulé (STICS v10.5.0) et observé pour le maïs en culture associée avec les écarts-types pour les valeurs observées, site d’Okpara, 2022-2024

Annexe C.6 : Dynamique de la biomasse du niébé associé

TABLE 30 – Biomasse aérienne sèche du niébé (t/ha) en association (S2, DR), mesurée à 30, 45, 60, 75 et 90 JAS après semis du niébé, site d’Okpara, campagnes 2022–2024. Valeurs : moyenne $\pm$ écart-type sur 3 parcelles.

Année	30 JAS	45 JAS	60 JAS	75 JAS	90 JAS
2022	0,31 $\pm$ 0,01	1,74 $\pm$ 0,18	2,95 $\pm$ 0,26	3,99 $\pm$ 0,06	4,16 $\pm$ 0,13
2023	0,28 $\pm$ 0,09	0,98 $\pm$ 0,07	1,53 $\pm$ 0,06	2,67 $\pm$ 0,24	3,80 $\pm$ 0,48
2024	0,17 $\pm$ 0,02	0,98 $\pm$ 0,12	1,57 $\pm$ 0,06	2,22 $\pm$ 0,19	4,01 $\pm$ 0,54

Note : la biomasse observée du niébé associé à 90 JAS (4,0–4,2 t/ha) est remarquablement stable d’une campagne à l’autre, tandis que la dynamique intermédiaire varie fortement : 2022 présente une accumulation précoce plus soutenue que 2023 et 2024, ce qui peut refléter la fenêtre de rayonnement disponible avant fermeture du couvert du maïs.

Annexe D : Paramètres de calibration du Modèle STICS

Annexe D.1 : Paramètres de calibration du maïs dans le modèle STICS

Ce tableau récapitule les paramètres du fichier plante utilisés pour la calibration du maïs. Les valeurs notées “Défaut STICS” correspondent aux paramètres standards documentés dans Brisson et al. (2003) et Beaudoin et al. (2023).

TABLE 31 – Paramètres calibrés du maïs dans STICS v10.5.0 pour le site d’Okpara.

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Méthode
<i>Émergence et Phénologie</i>				
tgmin	Température minimale d’émergence	°C	10,0	Défaut STICS
stpltger	Somme thermique de germination	°C.j	35,0	Défaut STICS
tdmin	Temp. min. de développement	°C	6,2	Défaut STICS
tdmax	Temp. max. de développement	°C	40,0	Défaut STICS
stlevamf	Levée → fin phase juvénile (AMF)	°C.j	900	Sans importance car forcé
stamflax	AMF → LAI maximal	°C.j	130	Sans importance car forcé
stlevdrp	Levée → début remplissage grains (DRP)	°C.j	995	Sans importance car forcé
stdrpmat	DRP → maturité physiologique	°C.j	500	Calage sur maturité observée
stdrpdess	DRP → début dessiccation	°C.j	585	Fichier plt calibré
<i>Dynamique foliaire (LAI)</i>				
tcmin	Temp. min. de croissance foliaire	°C	7,3	Défaut STICS
tcxstop	Temp. d’arrêt de croissance foliaire	°C	41,3	Défaut STICS
vlaimax	LAI où l’accroissement est maximal	m ² /m ²	2,5	Défaut STICS
innsturgmin	Stress N sur l’expansion foliaire	–	0,30	Défaut STICS
dlaimaxbrut	Taux max. d’accroissement du LAI	m ² .°C ⁻¹ .pl ⁻¹ .j ⁻¹	0,0033	Calage sur dynamique LAI
durvieF	Durée de vie feuille adulte	°C.j	195	Calage sur dynamique LAI
innssen	Stress N sur la sénescence foliaire	–	1,0	Défaut STICS
hautmax	Hauteur maximale de la culture	m	2,5	Observation terrain

(suite page suivante)

(suite de la Table 31)

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Méthode
slamax	Surface foliaire spécifique maximale	cm ² /g	290	Défaut STICS
<i>Interception du rayonnement</i>				
forme	Profil de densité foliaire (1 = rect.)	–	1,0	Fichier Falconnier
rapforme	Rapport hauteur/largeur du couvert	–	4,0	Fichier Falconnier
ktrou	Coefficient d'extinction du PAR	–	0,35	Calage sous-couvert
<i>Croissance de la biomasse</i>				
temin	Temp. min. pour la croissance	°C	8,0	Défaut STICS
teopt	Début de la plage optimale	°C	24,0	Défaut STICS
teoptbis	Fin de la plage optimale	°C	32,0	Défaut STICS
temax	Temp. max. pour la croissance	°C	38,9	Défaut STICS
efcroijuv	RUE phase juvénile	g·MJ ⁻¹	1,90	Calage sur biomasse
efcroiveg	RUE phase végétative	g·MJ ⁻¹	2,52	Calage sur biomasse
efcroirepro	RUE phase reproductive	g·MJ ⁻¹	2,52	Calage sur biomasse
<i>Racines et Bilan Hydrique</i>				
croirac	Taux d'élongation racinaire	cm·°C ⁻¹ ·j ⁻¹	0,15	Défaut STICS
debsenrac	Début de sénescence racinaire	°C·j	1500	Défaut STICS
longsperac	Longueur spécifique des racines	cm·cm ⁻³	11000	Défaut STICS
kmax	Coefficient cultural maximal	–	1,20	Défaut STICS
psisto	Potentiel de fermeture stomatique	bars	12,0	Défaut STICS
psiturg	Potentiel de réduction turgescence	bars	5,0	Défaut STICS
<i>Formation du rendement</i>				

(suite page suivante)

(suite de la Table 31)

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Méthode
cgrain	Pente nb. grains / taux croissance	grains/g.j	0,0685	Calage rendement
cgrainv0	Grains produits à taux nul	grains·m ⁻²	0,111	Défaut STICS
nbgrmax / nbgrmin	Nb. max. / min. de grains	nb·m ⁻²	900 / 0	Calage rendement
nbjgrain	Jours de calcul des grains viables	j	20	Défaut STICS
pgrainmaxi	Poids max. d'un grain (0% eau)	g	0,318	Données terrain
vitircarbT	Taux d'augment. de l'IR carboné	°C·j ⁻¹	0,002	Calage rendement
irazomax	Indice de récolte azoté maximal	–	0,847	Défaut STICS

Annexe D.2 : Paramètres de calibration du niébé dans le modèle STICS

Ce tableau présente les paramètres du fichier plante du niébé utilisés pour les simulations en culture pure et en association (site d'Okpara, Bénin, 2022–2024). Le fichier plante est identique dans les deux configurations ; seuls les paramètres de gestion et la méthode d'évapotranspiration diffèrent.

TABLE 32 – Paramètres du niébé dans STICS v10.5.0 pour Okpara.

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Méthode
<i>Émergence et Phénologie</i>				
tgmin	Température minimale d'émergence	°C	8,0	Défaut STICS légumineuse
stpltger	Somme thermique de germination	°C·j	60,0	Calage levée
tdmin	Temp. min. de développement	°C	6,2	De Freitas et al. (2025)
tdmax	Temp. max. de développement	°C	30,0	De Freitas et al. (2025)
stlevamf	Levée → fin phase juvénile (AMF)	°C·j	650	Calage phénologie
stamflax	AMF → LAI maximal	°C·j	400	Calage phénologie

(suite page suivante)

(suite de la Table 32)

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Méthode
stlevdrp	Levée → début remplissage grains (DRP)	°C.j	950	Calage sur HI
stdrpmat	DRP → maturité physiologique	°C.j	380	Calage maturité
stdrpdess	DRP → début dessiccation	°C.j	520	Fichier plt calibré
<i>Dynamique foliaire (LAI)</i>				
tcmin	Temp. min. de croissance foliaire	°C	6,2	De Freitas et al. (2025)
tcxstop	Temp. d'arrêt de croissance foliaire	°C	40,4	De Freitas et al. (2025)
vlaimax	LAI où l'accroissement est maximal	m ² /m ²	2,0	Calage dynamique LAI
dlaimaxbrut	Taux max. d'accroissement du LAI	m ² .°C ⁻¹ .pl ⁻¹	0,0120	Calage dynamique LAI
durvieF	Durée de vie feuille adulte	°C.j	300	Calage dynamique LAI
innsen	Stress N sur la sénescence foliaire	–	–1,80	De Freitas et al. (2025)
hautmax	Hauteur maximale du niébé	m	1,00	Observation terrain
slamax	Surface foliaire spécifique maximale	cm ² /g	500	De Freitas et al. (2025)
<i>Interception du rayonnement et Photosynthèse</i>				
forme	Profil de densité foliaire	–	1,0	De Freitas et al. (2025)
rapforme	Rapport hauteur/largeur du couvert	–	0,70	Architecture rampant/port
ktrou	Coefficient d'extinction du PAR	–	0,85	Couvert foliaire dense
efcroijuv	RUE phase juvénile	g.MJ ⁻¹	1,20	De Freitas et al. (2025)
efcroiveg	RUE phase végétative	g.MJ ⁻¹	1,80	Calage sur biomasse
efcroirepro	RUE phase reproductive	g.MJ ⁻¹	1,80	Calage sur biomasse
<i>Fixation Symbiotique et Nutrition N</i>				
fixmax	Capacité max. de fixation N symbiotique	kg N ha ⁻¹ j ⁻¹	4,20	De Freitas et al. (2025)

(suite page suivante)

(suite de la Table 32)

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Méthode
profnod	Profondeur maximale de nodulation	cm	30	Horizon superficiel
adil / bdil	Courbe de dilution N (légumineuse)	–	5,35 / 0,44	De Freitas et al. (2025)
<i>Racines et Bilan Hydrique</i>				
croirac	Taux d'élongation racinaire	cm·°C ⁻¹ ·j ⁻¹	0,05	Latati et al., 2014
debsenrac	Début de sénescence racinaire	°C·j	1400	Calage
longsperac	Longueur spécifique des racines	cm·g ⁻¹	9091	Calage
kmax	Coefficient cultural maximal	–	1,30	Légumineuse dense
psisto	Potentiel de fermeture stomatique	bars	2,55	De Freitas et al. (2025)
psiturg	Potentiel de réduction turgescence	bars	4,00	De Freitas et al. (2025)
<i>Formation du rendement</i>				
cgrain	Pente nb. grains / taux croissance	grains/g·j	0,110	Calage rendement
nbgrmax	Nb. max. de grains par m ²	nb·m ⁻²	1200	Calage rendement
nbggrain	Jours de calcul des grains viables	j	15	De Freitas et al. (2025)
pgrainmaxi	Poids max. d'un grain (0% eau)	g	0,143	De Freitas et al. (2025)
irazomax	Indice de récolte azoté maximal	–	0,900	Défaut STICS

Annexe D.3 : Composition des résidus de culture (paille de coton)

Le Tableau 33 présente les paramètres décrivant la paille de coton incorporée au sol au démarrage de chaque campagne, en cohérence avec la rotation coton-maïs du système S2. Ces valeurs alimentent les fichiers techniques (.tec) des simulations STICS.

TABLE 33 – Paramètres STICS de la paille de coton (variété OKP768, Bénin) utilisés pour initialiser les résidus au démarrage des simulations. Valeurs exprimées sur base de matière sèche.

Paramètre	Signification	Unité	Valeur	Source / Justification
Crespc	Teneur en carbone des résidus	% MS	41,3	Valeur choisie de Ma et al. (2021) : 41,3 % (Chine).
CsurNres	Rapport C/N des résidus	–	24	Fourchette littérature : 24 (tige fraîche) à 41 (revue Zhang et al., 2021).
Nminres	Teneur en azote minéral des résidus	% MS	1,69	Valeur choisie dans Ma et al. (2021).
eaures	Teneur en eau des résidus	% frais	0	Résidus considérés comme secs au moment de l'incorporation (fin de saison sèche).

Annexe E : Analyses de Sensibilité

Annexe E.1 : Calculated Penman vs. Shuttleworth-Wallace

Afin d'évaluer l'impact du choix de la méthode de calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) sur les performances du maïs en culture pure (traitement S1, campagne 2022), une analyse de sensibilité comparative a été conduite entre la méthode standard de calculated Penman et la méthode de Shuttleworth-Wallace. Cette vérification préalable était indispensable car la simulation des associations culturales (*intercrop*) impose l'activation du formalisme de Shuttleworth-Wallace pour distribuer l'énergie et l'ETP entre les deux couverts associés.

Le Tableau 34 présente la comparaison des principales sorties de développement, de production et de bilans hydrique et azoté issues des simulations STICS v10.5.0 pour les deux configurations.

TABLE 34 – Comparaison des sorties du modèle STICS v10.5.0 pour le maïs en culture pure (S1, 2022) selon la méthode de calcul de l’ETP (Calculated Penman vs. Shuttleworth-Wallace).

Variable de sortie	Calculated Penman	Shuttleworth-Wallace	Écart relatif (%)
<i>Performances agronomiques à la récolte</i>			
Biomasse aérienne totale (t ha^{-1})	6,31	6,30	−0,2
Rendement grain (t ha^{-1})	2,24	2,23	−0,4
Indice de récolte (HI)	0,35	0,35	0,0
Nombre de grains par m^2	704	703	−0,1
<i>Nutrition et bilan azoté</i>			
Azote total absorbé (kg ha^{-1})	128	130	+1,5
Teneur en azote de la plante (% MS)	2,04	2,07	−0,5
Efficience de l’engrais N	0,85	0,85	0,0
<i>Indices de stress moyens</i>			
Stress hydrique (<i>swfac / turf</i>)	1,00	1,00	0,0
Nutrition azotée (<i>inns</i>)	1,00	1,00	0,0
<i>Partition du bilan hydrique (mm)</i>			
Évapotranspiration maximale cumulée (ETM)	224	362	+61,6
Évaporation du sol cumulée	262	214	−17,9
Transpiration de la culture cumulée	0 ^a	148	—

^a Dans le bilan synthétique global de STICS en mode calculated Penman, la transpiration est regroupée au sein du bilan d’évapotranspiration globale.

Les résultats confirment que le passage au formalisme de Shuttleworth-Wallace n’induit que des variations négligeables sur les performances agronomiques du maïs à la récolte, avec un écart relatif limité à −0,2 % sur la biomasse aérienne totale (soit −10 kg MS ha^{-1}) et −0,4 % sur le rendement grain (−10 kg ha^{-1}). L’indice de récolte ($\text{HI} = 0,35$), l’efficience de l’engrais azoté (0,85) ainsi que l’ensemble des indices de stress écophysologique moyen ($\text{swfac} = 1,00$ et $\text{inns} = 1,00$) demeurent strictement invariants entre les deux méthodes de calcul.

Sur le plan hydrique, la méthode de Shuttleworth-Wallace apporte en revanche un

gain déterminant de réalisme physique en résolvant explicitement la partition entre la transpiration du couvert (148 mm) et l'évaporation directe du sol (214 mm), là où le bilan synthétique sous Penman calculé regroupe l'ensemble des flux au sein de l'évaporation globale (262 mm). Ce test confirme que la mobilisation du formalisme à double source de Shuttleworth-Wallace préserve fidèlement la calibration de croissance et de productivité de la céréale, tout en offrant une formalisation mécaniste et découplée des transferts d'eau au sein du système sol-plante-atmosphère.

Annexe E.2 : Analyse de sensibilité du niébé en association

Note méthodologique : Les simulations ont été conduites sur la campagne 2022 sous le profil d'infiltrabilité standard du Lixisol. Chaque paramètre a été modifié individuellement à partir de la simulation de référence S2 (maïs : 5,09 t MS ha⁻¹ et 1,91 t ha⁻¹ de grain ; niébé associé : 1,69 t MS ha⁻¹, 0,52 t ha⁻¹ de grain et 17 kg N ha⁻¹ fixés).

TABLE 35 – Impact des paramètres cibles sur les biomasses et rendements simulés en association (Okpara, 2022).

Processus	Paramètre testé	Réf.	Test	Niébé / Maïs (t MS ha ⁻¹)
Lumière	Opacité maïs (ktrou)	0,35	0,20	2,73 (+61 %) / 3,01 (-41 %)
Racines	Vitesse elongation (croirac)	0,05	0,10	1,86 (+10 %) / 5,09 (0 %)
Azote	Plafond fixation (fixmax)	4,2	8,0	1,72 (+2 %) / 5,09 (0 %)
Densité	Compétition inter-plants (adens)	-0,12	-0,45	2,05 (+21 %) / 4,92 (-3 %)

Synthèse des enseignements biophysiques :

- **Primauté absolue du verrou radiatif (ktrou) :** Seule l'augmentation de la lumière transmise sous la canopée débloque significativement la biomasse (+61,5 %) et la fixation d'azote (47 kg N ha⁻¹) du niébé, au détriment direct du maïs dominant.
- **Inefficacité des leviers souterrains (croirac, fixmax) en association :** Doubler la croissance racinaire ou débrider la fixation symbiotique stimule fortement le niébé en culture pure (+55 % de biomasse), mais reste inopérant en association (+2 à +10 %). Privées d'énergie lumineuse sous l'ombrage du maïs, les nodosités subissent une famine carbonée qui bride secondairement l'activité fixatrice.
- **Effet marginal de la compétition intra-spécifique (adens) :** Le relâchement de la densité du maïs n'apporte qu'un gain modeste au niébé (+0,36 t MS ha⁻¹), confirmant que l'interaction dominante s'exerce par l'interception du rayonnement.

Annexe E.3 : Artéfact d'allocation carbonée racinaire du maïs (msrac) en mode *intercrop*

Mise en évidence de l'anomalie

L'activation du module *intercrop* de STICS v10.5.0 entraîne une sur-accumulation irréaliste de la biomasse racinaire vivante du maïs (**msrac**), qui passe de 3.15 t ha^{-1} en culture pure (S1) à 22.54 t ha^{-1} en association (S2). Une simulation diagnostique à densité de niébé quasi nulle ($0.05 \text{ plants m}^{-2}$) a été conduite pour isoler le mécanisme responsable (Tableau 36).

TABLE 36 – Diagnostic comparatif du compartiment racinaire du maïs en culture pure (S1) et sous simulation d'isolation intercrop (S2 avec densité niébé ≈ 0 , site d'Okpara, 2022).

Variable de simulation (STICS v10.5.0)	Maïs pur (S1)	Maïs en "faux" Intercrop	Diagnostic algorithmique
Densité de la culture associée (plants m^{-2})	0,00	0,05	Niébé virtuellement absent
Biomasse aérienne du niébé masec (t ha^{-1})	0,00	0,00014	Compétition interspécifique nulle
Biomasse aérienne du maïs masec (t ha^{-1})	6,38	5,18	Canopy maïs conforme (S2)
Biomasse racinaire max. maïs msrac (t ha^{-1})	3,15	22,54	Emballlement persistant ($\times 7,2$)
Accroissement racinaire post-DRP (Δmsrac)	$0,00 \text{ t ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$	$0,38 \text{ t ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$	Absence de désactivation du puits
Carbone issu des racines mortes (kg C ha^{-1})	1 198	8 583	Influx organique artificiel ($\times 7,2$)
Respiration hétérotrophe du sol (kg C ha^{-1})	2 111	5 336	Surestimation du bilan C (+121 %)

Défaut algorithmique identifié dans STICS v10.5.0

1. **Indépendance de la compétition interspécifique** : L'artéfact persiste à l'identique (**msrac** = $22,54 \text{ t ha}^{-1}$) malgré l'absence totale de biomasse du niébé ($0.00014 \text{ t ha}^{-1}$). Le biais est donc strictement d'origine algorithmique au sein du code *intercrop*.
2. **Absence de commutation phénologique au stade DRP** : En culture pure (S1), l'allocation C vers les racines s'arrête au début du remplissage des grains (DRP, jour julien 233). En mode *intercrop* (S2), la désactivation de ce puits est omise : STICS continue d'allouer $\approx 0,38 \text{ t ha}^{-1} \text{ j}^{-1}$ aux racines pendant 50 jours jusqu'à la récolte.

Conséquences sur la validité du travail

- **Parties aériennes et rendements préservés** : Le calcul de la biomasse aérienne (**masec**) et du grain (**mafruit**) étant antérieur à l'allocation racinaire dans l'algorithme, l'emballement souterrain n'exerce aucune rétroaction négative. Les

prédictions de rendement et les indices de compétition (CR_i , LER) restent totalement valides.

- **Biais limité au bilan carbone du sol** : L'injection artificielle de $8583 \text{ kg C ha}^{-1}$ de racines mortes surestime la respiration hétérotrophe (+121 %) et le stock d'humus final. Le modèle ne doit pas être utilisé pour simuler le bilan de carbone du sol à long terme en association sans correction préalable du module.

Annexe E.4 : Diagnostic de la sous-estimation du niébé pur en 2024

Le Tableau 37 synthétise les variables d'état simulées par STICS v10.5.0 pour le niébé en culture pure (cv. 58-74f, itinéraire S2).

TABLE 37 – Comparaison pluriannuelle des variables d'état et des bilans du niébé pur simulés à Okpara.

Variable de sortie STICS	2022	2023	2024
Biomasse aérienne récoltée (t MS ha^{-1})	4,51	4,01	1,79
Rendement grain sec (t MS ha^{-1})	1,22	0,75	0,67
Indice de surface foliaire maximal (LAI_{max})	3,6	1,3	1,7
Profondeur racinaire maximale (Z_{rac} , cm)	72	85	57
<i>Bilan azoté de la culture (kg N ha^{-1})</i>			
Prélèvement d'azote du sol	44	62	49
Fixation symbiotique (N_{fix})	81	54	17
Azote total accumulé	125	116	66
Indice de nutrition azotée végétatif ($INNS_{\text{veg}}$)	0,88	0,83	0,82
Indice de nutrition azotée reproducteur ($INNS_{\text{rep}}$)	1,00	0,98	0,80
<i>Partition du bilan hydrique (mm)</i>			
Transpiration du couvert (T)	122	101	53
Évaporation directe du sol (E)	228	254	269
Part de l'évaporation sur l'ETR	65,1 %	71,5 %	83,8 %

Synthèse des processus à l'origine du décrochage en 2024 :

- **Divergence reproductive et blocage racinaire** : Bien que l'installation végétative soit normale ($INNS_{\text{veg}} = 0,82$; $LAI_{\text{max}} = 1,7$), l'apparition précoce d'une contrainte azotée en phase de remplissage ($INNS_{\text{rep}} = 0,80$) et l'asservissement de l'enracinement au début de la sénescence (**stoprac = sen**) stoppent le front racinaire à 57 cm (contre 85 cm en 2023).
- **Boucle de rétroaction croissance-fixation** : L'offre de fixation N_2 étant proportionnelle au taux d'accumulation journalier de biomasse (ΔMS), le ralentissement de la croissance bride immédiatement l'activité des nodosités (17 kg N ha^{-1} fixés). Ce déficit accentue la sénescence, provoquant la chute complète du couvert (LAI nul dès fin septembre).

- **Dissipation évaporatoire de l'eau :** Privé prématurément de surface transpirante active, l'agrosystème dissipe l'eau sous forme d'évaporation directe du sol (269 mm, soit 83,8 % de l'ETR) au détriment de la transpiration productive (53 mm).

Références bibliographiques

- ABBASI, M. K., M. M. TAHIR et N. RAHIM (mars 2013). « Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir–Pakistan ». In : *Geoderma* 195-196, p. 87-93. ISSN : 0016-7061. DOI : [10.1016/j.geoderma.2012.11.013](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.013).
- ABDUL RAHMAN, N., A. LARBI, B. KOTU, M. O. ASANTE, D. B. AKAKPO, S. MELLON-BEDI et I. HOESCHLE-ZELEDON (2021). « Maize–legume strip cropping effect on productivity, income, and income risk of farmers in northern Ghana ». en. In : *Agronomy Journal* 113.2. _eprint : <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/agj2.20536>, p. 1574-1585. ISSN : 1435-0645. DOI : [10.1002/agj2.20536](https://doi.org/10.1002/agj2.20536).
- ADIGOUN, R. F. R., A. C. HOUDEGBE, N. V. FASSINOU HOTEgni, A. C. SEGNON, S. N'DANIKOU, C. A. O. ADJÉ, R. P. M. ADADJA et E. G. ACHIGAN-DAKO (nov. 2022). « Enabling effective maize seed system in low-income countries of West Africa : Insights from Benin ». English. In : *Frontiers in Sustainable Food Systems* 6. ISSN : 2571-581X. DOI : [10.3389/fsufs.2022.1045629](https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1045629).
- ADJEI, E. O., B. E. AYAMBA, M. M. BURI, N. BINEY et K. APPIAH (mars 2023). « Soil quality and fertility dynamics under a continuous cassava-maize rotation in the semi-deciduous forest agro-ecological zone of Ghana ». English. In : *Frontiers in Sustainable Food Systems* 7. ISSN : 2571-581X. DOI : [10.3389/fsufs.2023.1095207](https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1095207).
- ADJIBA, C., P. TOVIHOUDJI, O. NOUROUDINE, G. AIHOUNTON, P. IRENIKATCHE et J. YABI (jan. 2021). « Analyse financière de la production du maïs sous différentes pratiques de gestion de la fertilité des sols au Nord Bénin ». In : 33, p. 383-395.
- AFFHOLDER, F., C. POEYDEBAT, M. CORBEELS, E. SCOPEL et P. TITTONELL (mars 2013). « The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics : Assessment and analysis through field surveys and modelling ». In : *Field Crops Research. Crop Yield Gap Analysis – Rationale, Methods and Applications* 143, p. 106-118. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/j.fcr.2012.10.021](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.021).
- AKPLO, T. M., F. KOUELO ALLADASSI, M. C. C. ZOUNDJI, E. FULAJTAR, M. BENMANSOUR, N. RABESIRANANA, F. M. AKINSEYE et P. HOUNGNANDAN (2024). « Effect of no-tillage on soil redistribution estimated by beryllium-7, soil moisture, and carbon fractions loss in central Benin ». en. In : *Agrosystems, Geosciences & Environment* 7.1. _eprint : <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/agg2.20452>, e20452. ISSN : 2639-6696. DOI : [10.1002/agg2.20452](https://doi.org/10.1002/agg2.20452).
- AKPLO, T. M., P. L. YEMADJE, L. IMOROU, B. SANNI, S. BOULAKIA, E. SEKLOKA et P. TITTONELL (avr. 2025). « Minimum tillage reduces variability and economic risks in cotton-maize rotations in Northern Benin ». In : *Field Crops Research* 324, p. 109795. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/j.fcr.2025.109795](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109795).

- ALLAKONON, M. G. B., P. G. TOVIHOUDJI, P. B. I. AKPONIKPÈ et C. L. BIELDERS (nov. 2024). « Optimizing deficit irrigation and fertilizer application for off-season maize production in Northern Benin ». In : *Field Crops Research* 318, p. 109613. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/j.fcr.2024.109613](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109613).
- AMATO, M. et J. T. RITCHIE (jan. 2002). « Spatial Distribution of Roots and Water Uptake of Maize (*Zea mays* L.) as Affected by Soil Structure ». en. In : DOI : [10.2135/cropsci2002.7730](https://doi.org/10.2135/cropsci2002.7730).
- AMEGNAGLO, C. (mars 2018). « Determinants of maize farmers' performance in Benin, West Africa ». In : *Kasetsart Journal of Social Sciences*. DOI : [10.1016/j.kjss.2018.02.011](https://doi.org/10.1016/j.kjss.2018.02.011).
- ANTOINE, N., D. NAFAN, N. OUATTARA et K. PÉLAGIE (jan. 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 ». In : *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology* 4, p. 1923-1932. DOI : [10.22161/ijeab.46.43](https://doi.org/10.22161/ijeab.46.43).
- ATAKOUN, A. M., P. G. TOVIHOUDJI, R. V. C. DIOGO, P. L. YEMADJE, O. BALARABE, P. B. I. AKPONIKPÈ, E. SEKLOKA, A. HOUGNI et P. TITTONELL (nov. 2023). « Evaluation of cover crop contributions to conservation agriculture in northern Benin ». In : *Field Crops Research* 303, p. 109118. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/j.fcr.2023.109118](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109118).
- BADO, B. V., M. SEDOGO, F. LOMPO et S. M. MAMAN LAMINOU (2018). « Biological Nitrogen Fixation by Local and Improved Genotypes of Cowpea in Burkina Faso (West Africa) : Total Nitrogen Accumulated can be used for Quick Estimation ». en. In : *Advances in Agriculture* 2018.1, p. 9641923. ISSN : 2314-7539. DOI : [10.1155/2018/9641923](https://doi.org/10.1155/2018/9641923).
- BARTHÈS, B., A. AZONTONDE, B. Z. BOLI, C. PRAT et E. ROOSE (2000). « Field-scale run-off and erosion in relation to topsoil aggregate stability in three tropical regions (Benin, Cameroon, Mexico) ». en. In : *European Journal of Soil Science* 51.3, p. 485-495. ISSN : 1365-2389. DOI : [10.1046/j.1365-2389.2000.00322.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2000.00322.x).
- BATIONO, A., B. WASWA, J. KIHARA et J. KIMETU (fév. 2007). « Advances in integrated soil fertility management in sub Saharan Africa : challenges and opportunities ». en. In : *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. ISSN : 1573-0867. DOI : [10.1007/s10705-007-9096-4](https://doi.org/10.1007/s10705-007-9096-4).
- BEAUDOIN, N., P. LECHARPENTIER, D. RIPOCHE, L. STRULLU, B. MARY, J. LÉONARD, M. LAUNAY et E. JUSTES (2023). *Stics Soil Crop Model. Conceptual Framework, Equations and Uses*. en. Pages : 516 pages. Editions Quae.
- BEILLOUIN, D., T. BEN ARI, E. MALÉZIEUX, V. SEUFERT et D. MAKOWSKI (juill. 2021). « Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services ». In : *Global Change Biology* 27, p. 4697-4710. DOI : [10.1111/gcb.15747](https://doi.org/10.1111/gcb.15747).

- BELLOCCHI, G., M. RIVINGTON, M. DONATELLI et K. MATTHEWS (mars 2010). « Validation of biophysical models : issues and methodologies. A review ». en. In : *Agronomy for Sustainable Development* 30.1, p. 109-130. ISSN : 1773-0155. DOI : [10.1051/agro/2009001](https://doi.org/10.1051/agro/2009001).
- BINACCHI, F., L. RUSINAMHODZI et G. CADISCH (oct. 2022). « The potential of conservation agriculture to improve nitrogen fixation in cowpea under the semi-arid conditions of Kenya ». English. In : *Frontiers in Agronomy* 4. ISSN : 2673-3218. DOI : [10.3389/fagro.2022.988090](https://doi.org/10.3389/fagro.2022.988090).
- BOANSI, D., VICTOR OWUSU et EMMANUEL DONKOR (juin 2024). « Impact of integrated soil fertility management on maize yield, yield gap and income in northern Ghana ». en-US. In : *Sustainable Futures* 7, p. 100185. ISSN : 2666-1888. DOI : [10.1016/j.sftr.2024.100185](https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100185).
- BOUREIMA, S. (s. d.). « L'Impact de la Dégradation du Sol sur la Production Agricole et la Sécurité Alimentaire au Burkina Faso ». fr. In : ().
- BRISSON, N., C. GARY, E. JUSTES, R. ROCHE, B. MARY, D. RIPOCHE, D. ZIMMER, J. SIERRA, P. BERTUZZI, P. BURGER, F. BUSSIÈRE, Y. CABIDOCHÉ, P. CELLIER, P. DEBAEKE, J. GAUDILLÈRE, C. HÉNAULT, F. MARAUX, B. SEGUIN et H. SINOQUET (jan. 2003). « An overview of the crop model STICS ». en. In : *European Journal of Agronomy* 18.3-4, p. 309-332. ISSN : 11610301. DOI : [10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7).
- BRISSON, N., F. BUSSIÈRE, H. OZIER-LAFONTAINE, R. TOURNEBIZE et H. SINOQUET (sept. 2004). « Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation ». en. In : *Agronomie* 24.6-7, p. 409-421. ISSN : 0249-5627, 1297-9643. DOI : [10.1051/agro:2004031](https://doi.org/10.1051/agro:2004031).
- BRISSON, N., M. LAUNAY, B. MARY et N. BEAUDOIN (2009). *Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model*. en. Update Sciences and Technologies Series. Versailles : Quæ. ISBN : 978-2-7592-0290-4 978-2-7592-0169-3.
- BRISSON, N., B. MARY, D. RIPOCHE, M.-H. JEUFFROY, F. RUGET, B. NICOULLAUD, P. GATE, F. DEVIENNE-BARRET, R. ANTONIOLETTI, C. DÜRR, G. RICHARD, N. BEAUDOIN, S. RECOUS, X. TAYOT, D. PLENET, P. CELLIER, J.-M. MACHET, M. JEAN-MARC et R. DELÉCOLLE (juin 1998). « STICS : A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn ». In : <http://dx.doi.org/10.1051/agro:19980501> 18. DOI : [10.1051/agro:19980501](https://doi.org/10.1051/agro:19980501).
- BUERKERT, A., A. BATIONO et H.-P. PIEPHO (août 2001). « Efficient phosphorus application strategies for increased crop production in sub-Saharan West Africa ». In : *Field Crops Research* 72.1, p. 1-15. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/S0378-4290\(01\)00166-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00166-6).
- C. BROUWER et M. HEIBLOEM (1986). *CHAPTER 2 : CROP WATER NEEDS*.

- CANADA, G. du (mai 2021). *Biologie du Zea mays L. (maïs)*. fra. Matériel de référence. Last Modified : 2021-05-07.
- CHIKOYE, D., S. SCHULZ et F. EKELEME (oct. 2004). « Evaluation of integrated weed management practices for maize in the northern Guinea savanna of Nigeria ». In : *Crop Protection* 23.10, p. 895-900. ISSN : 0261-2194. DOI : [10.1016/j.cropro.2004.01.013](https://doi.org/10.1016/j.cropro.2004.01.013).
- Classification des sols au Bénin / PDF / Sol (pédologie) / Maïs* (2026). fr.
- CLEMENT, T., C. L. BIELDERS, A. DEGRÉ, G. MANSENS, G. FOUCART, O. PIGEON, A. BLONDEL et B. HUYGHEBAERT (2025). « Suitability of Strip-Tillage and Under-sowing in Maize Crops to Control Runoff, Soil Erosion and Herbicide Loss : Field Trials and Modelling ». en. In : *Hydrological Processes* 39.7. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/hyp.70170>, e70170. ISSN : 1099-1085. DOI : [10.1002/hyp.70170](https://doi.org/10.1002/hyp.70170).
- COUCHENEY, E., S. BUIS, M. LAUNAY, J. CONSTANTIN, B. MARY, I. GARCÍA DE CORTÁZAR-ATAURI, D. RIPOCHE, N. BEAUDOIN, F. RUGET, K. S. ANDRIANARISOA, C. LE BAS, E. JUSTES et J. LÉONARD (fév. 2015). « Accuracy, robustness and behavior of the STICS soil-crop model for plant, water and nitrogen outputs : Evaluation over a wide range of agro-environmental conditions in France ». In : *Environmental Modelling & Software* 64, p. 177-190. ISSN : 1364-8152. DOI : [10.1016/j.envsoft.2014.11.024](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.024).
- DE FREITAS, M., A. COUËDEL, G. N. FALCONNIER, A. B. BALDE, F. AFFHOLDER, A. TRAORE, M. ADAM, Y. SENGHOR, S. SOW et E. JUSTES (avr. 2025). « Cereal-legume intercropping to stabilise yields in tropical regions : evaluation of the STICS soil-crop model ». en. In.
- DE FREITAS, M., A. COUËDEL, G. N. FALCONNIER, M. CHRISTINA, A. B. BALDE, F. AFFHOLDER, A. TRAORÉ, A. GANEME, M. ADAM, Y. SENGHOR, S. SOW et E. JUSTES (mai 2026). « The STICS intercrop model accurately reproduces interspecific interactions and yield in semi-arid West African cereal-legume intercropping systems ». en. In : *Field Crops Research* 342, p. 110468. ISSN : 03784290. DOI : [10.1016/j.fcr.2026.110468](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2026.110468).
- DIMANDE, P., M. ARROBAS et M. Â. RODRIGUES (jan. 2024). « Intercropped Maize and Cowpea Increased the Land Equivalent Ratio and Enhanced Crop Access to More Nitrogen and Phosphorus Compared to Cultivation as Sole Crops ». en. In : *Sustainability* 16.4, p. 1440. ISSN : 2071-1050. DOI : [10.3390/su16041440](https://doi.org/10.3390/su16041440).
- DJOHY, G., A. EDJA et G. NOUATIN (jan. 2015). « Variation climatique et production vivrière : la culture du maïs dans le système agricole péri-urbain de la commune de Parakou au Nord-Bénin ». In.
- DOSSA, K. F., C. TODOTA, Y. MIASSI et A. ABDEL-AZIZ (oct. 2018). « Analyse comparée de la performance économique des cultures de coton et de maïs au Nord-Bénin : cas de la commune de Kandi ». In : *International Journal of Current Advanced Research* 1, p. 118-130.

- FALCONNIER, G. N., M. CORBEELS, K. J. BOOTE, F. AFFHOLDER, M. ADAM, D. S. MACCARTHY, A. C. RUANE, C. NENDEL, A. M. WHITBREAD, É. JUSTES, L. R. AHUJA, F. M. AKINSEYE, I. N. ALOU, K. A. AMOUZOU, S. S. ANAPALLI, C. BARON, B. BASSO, F. BAUDRON, P. BERTUZZI, A. J. CHALLINOR, Y. CHEN, D. DERYNG, M. L. ELSAYED, B. FAYE, T. GAISER, M. GALDOS, S. GAYLER, E. GERARDEAUX, M. GINER, B. GRANT, G. HOOGENBOOM, E. S. IBRAHIM, B. KAMALI, K. C. KERSEBAUM, S.-H. KIM, M. van der LAAN, L. LEROUX, J. I. LIZASO, B. MAESTRINI, E. A. MEIER, F. MEQUANINT, A. NDOLI, C. H. PORTER, E. PRIESACK, D. RIPOCHE, T. S. SIDA, U. SINGH, W. N. SMITH, A. SRIVASTAVA, S. SINHA, F. TAO, P. J. THORBURN, D. TIMLIN, B. TRAORE, T. TWINE et H. WEBBER (2020). « Modeling climate change impacts on maize yields under low nitrogen input conditions in sub-Saharan Africa ». en. In : *Global Change Biology* 26.10. _eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcb.15261>, p. 5942-5964. ISSN : 1365-2486. DOI : [10.1111/gcb.15261](https://doi.org/10.1111/gcb.15261).
- FAO (2020). « Sustainable Agricultural Mechanization for Africa ». en. In.
- (2025). *Qu'est-ce que l'agriculture de conservation ? / L'agriculture de conservation / Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture*.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS et OUR WORLD IN DATA (2025). *Global Food Data Explorer*. en.
- FRANCAVIGLIA, R., M. ALMAGRO et J. L. VICENTE-VICENTE (mars 2023). « Conservation Agriculture and Soil Organic Carbon : Principles, Processes, Practices and Policy Options ». en. In : *Soil Systems* 7.1, p. 17. ISSN : 2571-8789. DOI : [10.3390/soilsystems7010017](https://doi.org/10.3390/soilsystems7010017).
- FRANKE, A. C., G. J. van den BRAND, B. VANLAUWE et K. E. GILLER (juill. 2018). « Sustainable intensification through rotations with grain legumes in Sub-Saharan Africa : A review ». In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 261, p. 172-185. ISSN : 0167-8809. DOI : [10.1016/j.agee.2017.09.029](https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.029).
- GRASSINI, P., L. G. VAN BUSSEL, J. VAN WART, J. WOLF, L. CLAESSENS, H. YANG, H. BOOGAARD, H. DE GROOT, M. K. VAN ITTERSUM et K. G. CASSMAN (juin 2015). « How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis ». en. In : *Field Crops Research* 177, p. 49-63. ISSN : 03784290. DOI : [10.1016/j.fcr.2015.03.004](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.004).
- GUEDOU, M., M. HOUNDONOUGBO, G. S. T. ATCHADÉ, I. GBÉGO, TOSSA et G. MENSAH (déc. 2019). « Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB) Performances zootechniques et économiques de poulets locaux nourris avec des rations alimentaires à base de quatre variétés de grains de maïs au Bénin ». In.
- HANNAH RITCHIE, PABLO ROSADO, AND MAX ROSER (avr. 2026). *Corn : Yield gap*. en.

- HODNETT, M. G. et J. TOMASELLA (août 2002). « Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils : a new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils ». In : *Geoderma* 108.3, p. 155-180. ISSN : 0016-7061. DOI : [10.1016/S0016-7061\(02\)00105-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00105-2).
- HOUNKPATIN, K. O. L., A. Y. BOSSA, Y. YIRA, M. A. IGUE et B. A. SINSIN (mars 2022). « Assessment of the soil fertility status in Benin (West Africa) – Digital soil mapping using machine learning ». In : *Geoderma Regional* 28, e00444. ISSN : 2352-0094. DOI : [10.1016/j.geodrs.2021.e00444](https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00444).
- IFAD (2021). *Transforming food systems for rural prosperity*. en.
- IFDC (déc. 2024). *The Soil Values Program Combats Soil Degradation*. en-US.
- IGUÉ, J. SOGBEDJI, K. S. EZUI et J. OUEDRAOGO (jan. 2013). « Evaluation de la fertilité des sols au sud et centre du Bénin ». In.
- ISHIKAWA, H., B. J. BATIENO, C. FATOKUN et O. BOUKAR (fév. 2022). « A High Plant Density and the Split Application of Chemical Fertilizer Increased the Grain and Protein Content of Cowpea (*Vigna unguiculata*) in Burkina Faso, West Africa ». en. In : *Agriculture* 12.2, p. 199. ISSN : 2077-0472. DOI : [10.3390/agriculture12020199](https://doi.org/10.3390/agriculture12020199).
- ISRIC (2026). *SoilGrids web portal*. en.
- JAMIESON, P. D., J. R. PORTER et D. R. WILSON (nov. 1991). « A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand ». In : *Field Crops Research* 27.4, p. 337-350. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/0378-4290\(91\)90040-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(91)90040-3).
- JOANNE LIOU (nov. 2019). *Nuclear Techniques Help Reveal High Rate of Soil Erosion in Benin*. en. text.
- KAMARA, A. Y., J. G. KLING, A. MENKIR et O. IBIKUNLE (2003). « Association of Vertical Root-Pulling Resistance with Root Lodging and Grain Yield in Selected S1 Maize Lines Derived from a Tropical Low-Nitrogen Population ». en. In : *Journal of Agronomy and Crop Science* 189.3, p. 129-135. ISSN : 1439-037X. DOI : [10.1046/j.1439-037X.2003.00023.x](https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2003.00023.x).
- KAMARA, A. Y., R. SOLOMON, A. I. TOFA, I. I. GARBA, O. B. ESEIGBE, J. M. JIBRIN, L. O. OMOIGUI, K. T. ALIYU, M. A. ADELEKE, J. F. BEBELEY et H. P. JEROME (août 2025). « Evaluation and application of the CROPGRO – Cowpea model for simulating appropriate sowing window and planting density of cowpea varieties across contrasting environments ». In : *Field Crops Research* 331, p. 109988. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/j.fcr.2025.109988](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109988).
- KANDA, E. K., A. SENZANJE et T. MABHAUDHI (déc. 2021). « Calibration and validation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) ». In : *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. Integrated Water Resources Management for Sustainable Development in Eastern and Southern Africa 124, p. 102941. ISSN : 1474-7065. DOI : [10.1016/j.pce.2020.102941](https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102941).

- KASCHUK, G., T. W. KUYPER, P. A. LEFFELAAR, M. HUNGRIA et K. E. GILLER (juin 2009). « Are the rates of photosynthesis stimulated by the carbon sink strength of rhizobial and arbuscular mycorrhizal symbioses ? » In : *Soil Biology and Biochemistry* 41.6, p. 1233-1244. ISSN : 0038-0717. DOI : [10.1016/j.soilbio.2009.03.005](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.03.005).
- KASSAM, A., T. FRIEDRICH, F. SHAXSON et J. PRETTY (nov. 2009). « The Spread of Conservation Agriculture : Justification, Sustainability and Uptake ». In : *International Journal of Agricultural Sustainability* 7, p. 292-320. DOI : [10.3763/ijas.2009.0477](https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0477).
- KAYE, J. P. et M. QUEMADA (jan. 2017). « Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review ». en. In : *Agronomy for Sustainable Development* 37.1, p. 4. ISSN : 1773-0155. DOI : [10.1007/s13593-016-0410-x](https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x).
- KOBAYASHI, K. et M. SALAM (mars 2000). « Comparing Simulated and Measured Values Using Mean Squared Deviation and Its Components ». In : *Agronomy Journal* 92, p. 345-352. DOI : [10.1007/s100870050043](https://doi.org/10.1007/s100870050043).
- KOCHIAN, L. V., O. A. HOEKENGA et M. A. PINEROS (2004). « How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency ». eng. In : *Annual Review of Plant Biology* 55, p. 459-493. ISSN : 1543-5008. DOI : [10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655).
- KOH, I. et M. HAILE (mai 2025). *Revitaliser les sols d'Afrique de l'Ouest*. fr.
- KOMBAT, R. K., K. GYASI SANTO, K. ATAKORA et A. A. KHALID (déc. 2024). « Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) - maize (*Zea mays* L.) intercropping and fertilizer application affected maize yield and yield components in Guinea Savannah agro-ecological zone of Ghana ». In : *Archives of Agronomy and Soil Science* 70.1, p. 1-19. ISSN : 0365-0340. DOI : [10.1080/03650340.2024.2419969](https://doi.org/10.1080/03650340.2024.2419969).
- KUSSIE, B., Y. TADELE et A. ASRESIE (nov. 2024). « Effect of maize (*zea mays* l.) and cowpea (*vigna unguiculata* l.) intercropping on agronomic performance, yield and nutritional values of maize and cowpea under supplementary irrigation ». In : *Heliyon* 10.21, e39817. ISSN : 2405-8440. DOI : [10.1016/j.heliyon.2024.e39817](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39817).
- KWABIAH, A. B. (2002). *Performance of silage corn (Zea mays L.) in a cool climate ecosystem : effects of photodegradable plastic mulch*. en. DOI : [10.4141/P02-131](https://doi.org/10.4141/P02-131).
- LABERGE, G., B. I. G. HAUSSMANN, P. AMBUS et H. HØGH-JENSEN (mars 2011). « Cowpea N rhizodeposition and its below-ground transfer to a co-existing and to a subsequent millet crop on a sandy soil of the Sudano-Sahelian eco-zone ». en. In : *Plant and Soil* 340.1, p. 369-382. ISSN : 1573-5036. DOI : [10.1007/s11104-010-0609-6](https://doi.org/10.1007/s11104-010-0609-6).
- LATATI, M., D. BLAVET, N. ALKAMA, H. LAOUFI, J.-J. DREVON, F. GÉRARD, M. PANSU et S. OUNANE (déc. 2014). « The intercropping cowpea-maize improves soil phosphorus availability and maize yields in an alkaline soil ». In : *Plant and Soil* 385, p. 181-191. DOI : [10.1007/s11104-014-2214-6](https://doi.org/10.1007/s11104-014-2214-6).

- LI, C., Y. DONG, H. LI, J. SHEN et F. ZHANG (jan. 2016). « Shift from complementarity to facilitation on P uptake by intercropped wheat neighboring with faba bean when available soil P is depleted ». In : *Scientific Reports* 6, p. 18663. DOI : [10.1038/srep18663](https://doi.org/10.1038/srep18663).
- LIEBMAN, M. et E. DYCK (fév. 1993). « Crop Rotation and Intercropping Strategies for Weed Management ». In : *Ecological Applications* 3, p. 92. DOI : [10.2307/1941795](https://doi.org/10.2307/1941795).
- MADDONNI, G. A. et M. E. OTEGUI (sept. 1996). « Leaf area, light interception, and crop development in maize ». In : *Field Crops Research* 48.1, p. 81-87. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/0378-4290\(96\)00035-4](https://doi.org/10.1016/0378-4290(96)00035-4).
- MAGBONDÉ, K. G., D. MIGNOUNA, V. MANYONG, R. ADÉOTI et A. O. SOSSOU (mars 2023). « Impact of informal institutions on youth agribusiness participation in Southern Benin ». en. In : *Agricultural and Food Economics* 11.1, p. 11. ISSN : 2193-7532. DOI : [10.1186/s40100-023-00250-1](https://doi.org/10.1186/s40100-023-00250-1).
- MANTEL, S., S. DONDEYNE et S. DECKERS (2023). « World reference base for soil resources (WRB) ». en. In : *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, p. 206-217. ISBN : 978-0-323-95133-3. DOI : [10.1016/B978-0-12-822974-3.00161-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00161-0).
- MEAD, R. et R. W. WILLEY (juill. 1980). « The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping ». en. In : *Experimental Agriculture* 16.3, p. 217-228. ISSN : 0014-4797, 1469-4441. DOI : [10.1017/S0014479700010978](https://doi.org/10.1017/S0014479700010978).
- MIASSI, Y., S. AKDEMIR et K. F. DOSSA (fév. 2024). « Analyse de l'influence du réchauffement climatique sur la sécurité alimentaire au Bénin : analyse approfondie des implications potentielles de la variabilité climatique sur la production de maïs ». In : *Journal of Taibah University for Science* 18, p. 1-17. DOI : [10.1080/16583655.2024.2316361](https://doi.org/10.1080/16583655.2024.2316361).
- MIHRET, Y. C., G. M. KETSELA et S. M. MINTESINOT (mai 2024). « Implementation and application of APSIM for crop modelling in Ethiopia : A comprehensive review ». In : *Heliyon* 10.10, e31612. ISSN : 2405-8440. DOI : [10.1016/j.heliyon.2024.e31612](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31612).
- MORIASI, D., M. GITAU, N. PAI et P. DAGGUPATI (déc. 2015). « Hydrologic and Water Quality Models : Performance Measures and Evaluation Criteria ». In : *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 58, p. 1763-1785. DOI : [10.13031/trans.58.10715](https://doi.org/10.13031/trans.58.10715).
- MUELLER, N. D., J. S. GERBER, M. JOHNSTON, D. K. RAY, N. RAMANKUTTY et J. A. FOLEY (oct. 2012). « Closing yield gaps through nutrient and water management ». en. In : *Nature* 490.7419, p. 254-257. ISSN : 1476-4687. DOI : [10.1038/nature11420](https://doi.org/10.1038/nature11420).
- NAMATSHEVE, T., R. CARDINAELE, M. CORBEELS et R. CHIKOWO (juill. 2020). « Productivity and biological N₂-fixation in cereal-cowpea intercropping systems in sub-Saharan Africa. A review ». en. In : *Agronomy for Sustainable Development* 40.4, p. 30. ISSN : 1773-0155. DOI : [10.1007/s13593-020-00629-0](https://doi.org/10.1007/s13593-020-00629-0).
- NASA POWER / Data Access Viewer (DAV) (2026). en-US.

- NEUJEAN, O. (2025). « Évaluation des pratiques d'agriculture de conservation sur la culture cotonnière : analyse expérimentale et modélisation avec DSSAT ». In.
- OKEBALAMA, C., A. IBRAHIM, E. SAFO, E. YEBOAH, R. ABAIDOO, V. LOGAH et I. UZOH (avr. 2017). « Fertilizer micro-dosing in West African low-input cereals cropping : Benefits, challenges and improvement strategies ». In : 12, p. 1169-1176. DOI : [10.5897/AJAR2016.11559](https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11559).
- PITTELKOW, C., X. LIANG, B. LINQUIST, K. J. van GROENIGEN, J. LEE, M. LUNDY, N. VAN GESTEL, J. SIX, R. VENTEREA et C. KESSEL (oct. 2014). « Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture ». In : *Nature* 517. DOI : [10.1038/nature13809](https://doi.org/10.1038/nature13809).
- RAES, D., P. STEDUTO, T. C. HSIAO et E. FERERES (2009). « AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water : II. Main Algorithms and Software Description ». en. In : *Agronomy Journal* 101.3, p. 438-447. ISSN : 1435-0645. DOI : [10.2134/agronj2008.0140s](https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s).
- RAVELOJAONA, N., G. JÉGO, N. ZIADI, A. MOLLIER, J. LAFOND, A. KARAM et C. MOREL (oct. 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) ». en. In : *Agronomy* 13.10, p. 2540. ISSN : 2073-4395. DOI : [10.3390/agronomy13102540](https://doi.org/10.3390/agronomy13102540).
- RITCHIE, J. T. (1985). « A User-Orientated Model of the Soil Water Balance in Wheat ». en. In : *Wheat Growth and Modelling*. Sous la dir. de W. DAY et R. K. ATKIN. Boston, MA : Springer US, p. 293-305. ISBN : 978-1-4899-3665-3. DOI : [10.1007/978-1-4899-3665-3_27](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3665-3_27).
- RITCHIE, S. W., JOHN J. HANWAY et GARREN O. BENSON (1993). *How a Corn Plant Develops*.
- SAMIREDDYPALLE, A., O. BOUKAR, E. GRINGS, C. A. FATOKUN, P. KODUKULA, R. DEVULAPALLI, I. OKIKE et M. BLÜMMEL (jan. 2017). « Cowpea and Groundnut Haulms Fodder Trading and Its Lessons for Multidimensional Cowpea Improvement for Mixed Crop Livestock Systems in West Africa ». English. In : *Frontiers in Plant Science* 8. ISSN : 1664-462X. DOI : [10.3389/fpls.2017.00030](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00030).
- SARR, A., A. BODIAN, MAME CODOU GUEYE et BADARA GUEYE (mai 2022). *Ethnobotanical study of cowpea (Vigna unguiculata (L.) Walp.) in Senegal | Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine | Springer Nature Link*.
- SAXTON, K. et W. RAWLS (sept. 2006). « Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions ». In : *Soil Science Society of America Journal* 70. DOI : [10.2136/sssaj2005.0117](https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117).
- SEGHOUANI, M., M. N. BRAVIN, P. LECHARPENTIER et A. MOLLIER (mars 2025). « Simulating phosphorus dynamics between the soil and the crop with the STICS model : Formalization and multi-site evaluation on maize in temperate area ». en. In : *Euro-*

- pean *Journal of Agronomy* 164, p. 127475. ISSN : 11610301. DOI : [10.1016/j.eja.2024.127475](https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127475).
- SILESHI, G., FESTUS K. AKINNIFESI, OLUYEDE C. AJAYI et FRANK PLACE (2009). *Evidence for impact of green fertilizers on maize production in sub-Saharan Africa : a meta-analysis*. en. OCLC : 428823555. Nairobi : World Agroforestry Centre. ISBN : 978-92-9059-246-4.
- SULTAN, B. et M. GAETANI (août 2016). « Agriculture in West Africa in the Twenty-First Century : Climate Change and Impacts Scenarios, and Potential for Adaptation ». en. In : *Frontiers in Plant Science* 7. ISSN : 1664-462X. DOI : [10.3389/fpls.2016.01262](https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01262).
- THIERFELDER, C. et P. C. WALL (avr. 2010a). « Investigating Conservation Agriculture (CA) Systems in Zambia and Zimbabwe to Mitigate Future Effects of Climate Change ». en. In : *Journal of Crop Improvement* 24.2, p. 113-121. ISSN : 1542-7528, 1542-7536. DOI : [10.1080/15427520903558484](https://doi.org/10.1080/15427520903558484).
- (juill. 2010b). « Rotation in conservation agriculture systems of Zambia : effects on soil quality and water relations ». en. In : *Experimental Agriculture* 46.3, p. 309-325. ISSN : 1469-4441, 0014-4797. DOI : [10.1017/S001447971000030X](https://doi.org/10.1017/S001447971000030X).
- TIMKO, M. et B. SINGH (mars 2008). « Cowpea, a Multifunctional Legume ». In : *Genomics of Tropical Crop Plants*. Journal Abbreviation : Genomics of Tropical Crop Plants, p. 227-258. ISBN : 978-0-387-71218-5. DOI : [10.1007/978-0-387-71219-2_10](https://doi.org/10.1007/978-0-387-71219-2_10).
- TOBI MORIAQUE AKPLOA, , FÉLIX KOUELO ALLADASSIA, , MAHOUGNON CHARLOTTE CARMELLE ZOUNDJIA, B, JULIEN AVAKOUDJOC, PASCAL HOUNGNANDANA, B, DIEUDONNÉ GUSTAVE DAGBÉNONBAKIND, , ALIOU SAÏDOUE, , MONCEF BENMANSOURF, , EMIL FULAJTARG, GUILLAUME LUCIEN AMADJIE, , HESSOU ANASTASE AZONTONDÉ, , ACHILLE EPHREM ASSOGBADJOC et , AND ROMAIN GLÈLÈ KAKAÏH (fév. 2022). « impact of conservation tillage on runoff, soil loss, and soil properties on acrisols and ferralsols in central Benin ». In.
- TOVIHOUDJI, P. G., F. I. AKPO, F. TASSOU ZAKARI, N. OLLABODÉ, R. N. YEGBEMEY et J. A. YABI (fév. 2023). « Diversity of soil fertility management options in maize-based farming systems in northern Benin : A quantitative survey ». English. In : *Frontiers in Environmental Science* 11. ISSN : 2296-665X. DOI : [10.3389/fenvs.2023.1089883](https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1089883).
- TOVIHOUDJI, P. G., P. B. I. AKPONIKPÈ, E. K. AGBOSSOU, P. BERTIN et C. L. BIELDERS (nov. 2017). « Fertilizer microdosing enhances maize yields but may exacerbate nutrient mining in maize cropping systems in northern Benin ». In : *Field Crops Research* 213, p. 130-142. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/j.fcr.2017.08.003](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.003).
- TOVIHOUDJI, P. G., B. M. BAGRI, M. BATAMOSSI HERMANN, Z. E. H. TONNANG et P. B. I. AKPONIKPÈ (mars 2022). « Interactive Effects of Drought-Tolerant Varieties and Fertilizer Microdosing on Maize Yield, Nutrients Use Efficiency, and Profitability in the Sub-Humid Region of Benin ». English. In : *Frontiers in Agronomy* 3. ISSN : 2673-3218. DOI : [10.3389/fagro.2021.763430](https://doi.org/10.3389/fagro.2021.763430).

- TOVIHOUDJI, P. G., E. L. SOSSA, J. EGAH, E. C. AGBANGBA, P. B. I. AKPONIKPÈ et J. A. YABI (mai 2024). « Resource endowment and sustainable soil fertility management strategies in maize farming systems in northern Benin ». English. In : *Frontiers in Sustainable Resource Management* 3. ISSN : 2813-3005. DOI : [10.3389/fsrma.2024.1354981](https://doi.org/10.3389/fsrma.2024.1354981).
- TRAORÉ, A., G. N. FALCONNIER, A. BA, F. SISSOKO, B. SULTAN et F. AFFHOLDER (sept. 2022). « Modeling sorghum-cowpea intercropping for a site in the savannah zone of Mali : Strengths and weaknesses of the Stics model ». en. In : *Field Crops Research* 285, p. 108581. ISSN : 03784290. DOI : [10.1016/j.fcr.2022.108581](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108581).
- UNGER, P. W. et M. F. VIGIL (juill. 1998). « Cover crop effects on soil water relationships ». In : *Journal of Soil and Water Conservation* 53.3. _eprint : <https://doi.org/10.1080/00224561.1998.12457219>. p. 200-207. ISSN : 0022-4561. DOI : [10.1080/00224561.1998.12457219](https://doi.org/10.1080/00224561.1998.12457219).
- VALBUENA, D., O. ERENSTEIN, S. HOMANN-KEE TUI, T. ABDOULAYE, L. CLAESSENS, A. J. DUNCAN, B. GÉRARD, M. C. RUFINO, N. TEUFEL, A. van ROOYEN et M. T. van WIJK (juin 2012). « Conservation Agriculture in mixed crop–livestock systems : Scoping crop residue trade-offs in Sub-Saharan Africa and South Asia ». In : *Field Crops Research*. Conservation Agriculture in Dry Areas 132, p. 175-184. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/j.fcr.2012.02.022](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.022).
- VANDERMOERE, S., T. VAN DE SANDE, G. TAVERNIER, L. LAUWERS, E. GOOVAERTS, S. SLEUTEL et S. DE NEVE (déc. 2021). « Soil phosphorus (P) mining in agriculture – Impacts on P availability, crop yields and soil organic carbon stocks ». en. In : *Agriculture, Ecosystems & Environment* 322, p. 107660. ISSN : 01678809. DOI : [10.1016/j.agee.2021.107660](https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107660).
- VANLAUWE, B., J. RAMISCH et N. SANGINGA (mars 2006). « Integrated Soil Fertility Management in Africa ». In : *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*. Journal Abbreviation : Biological Approaches to Sustainable Soil Systems, p. 257-272. ISBN : 978-1-57444-583-1. DOI : [10.1201/9781420017113.ch18](https://doi.org/10.1201/9781420017113.ch18).
- VÂTCĂ, S. D., V. A. STOIAN, T. C. MAN, C. HORVATH, R. VIDICAN, Ș. GÂDEA, A. VÂTCĂ, A. ROTARU, R. VÂRBAN, M. CRISTINA et V. STOIAN (jan. 2021). « Agrometeorological Requirements of Maize Crop Phenology for Sustainable Cropping—A Historical Review for Romania ». en. In : *Sustainability* 13.14, p. 7719. ISSN : 2071-1050. DOI : [10.3390/su13147719](https://doi.org/10.3390/su13147719).
- WIKIPÉDIA (jan. 2026). *Maïs*. fr. Page Version ID : 232892146.
- WILLEY, R. W. et M. R. RAO (juill. 1979). « A competitive ratio for quantifying competition between intercrops ». en. In.
- WORLD BANK, G. (2023). « Bénin – Rapport national sur le climat et le développement ». In.

- WÖSTEN, J. H. M., A. LILLY, A. NEMES et C. LE BAS (juill. 1999). « Development and use of a database of hydraulic properties of European soils ». In : *Geoderma* 90.3, p. 169-185. ISSN : 0016-7061. DOI : [10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3).
- YALLOU, C.-G., K. J. TOTONGNON et A. A. ADEGBIDI (2025). *Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest - Le maïs au Bénin : atouts et perspectives*.
- YEMADJE, P. L., T. M. AKPLO, L. IMOROU, E. SEKLOKA et P. TITTONELL (jan. 2025). « No-tillage and intercropping improve the yield and profitability of maize-cotton rotations in Northern Benin ». en. In : *Experimental Agriculture* 61, e23. ISSN : 0014-4797, 1469-4441. DOI : [10.1017/S0014479725100136](https://doi.org/10.1017/S0014479725100136).
- YOUSOUF, I. et M. LAWANI (jan. 2000). « Les sols béninois : classification dans la Base de référence mondiale ». In : *Rapport de la Quatorzième réunion du Sous-Comité ouest et centre africain de corrélation des sols*, p. 29-50.
- ZHANG, D., S. SHEN, Z. BAI, M. T. HARRISON, K. LIU, R. M. REES, C. F. E. TOPP, J. ZOU, Y. YANG, Z. SONG, H. CHEN et X. YIN (mars 2025). « Optimizing N rate in wheat-maize rotation to match long-term and inter-seasonal N turnover for high yield and sustainability using STICS ». In : *Field Crops Research* 322, p. 109718. ISSN : 0378-4290. DOI : [10.1016/j.fcr.2024.109718](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109718).

Dans quelle mesure le modèle STICS est-il capable de simuler les performances agronomiques de l'association maïs-niébé dans les conditions pédoclimatiques de Parakou (Bénin), et que nous apprend-il sur les mécanismes par lesquels le niébé influence la productivité du système ?

Bastien d'Argembeau

L'association maïs-niébé (*Zea mays* L. – *Vigna unguiculata* (L.) Walp.) constitue une option d'intensification écologique prometteuse pour renforcer la résilience des agrosystèmes du Nord-Bénin. Réalisé sur le site d'Okpara dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Parakou et l'UCLouvain, ce mémoire évalue la capacité du modèle biophysique STICS v10.5.0 à simuler les performances du maïs et du niébé, en culture pure et en association, tout en identifiant les verrous écophysiologiques et les limites du module intercrop. Les résultats démontrent une

excellente transférabilité interannuelle du paramétrage du maïs sur trois campagnes climatiques contrastées ($nRMSE < 11\%$), tandis que le paramétrage du niébé en culture pure fournit des sorties agronomiquement plausibles. En association, bien que le modèle reproduise la dominance du maïs, il sous-estime de 37 à 60 % la biomasse du niébé dominé. L'analyse de sensibilité écarte un simple défaut de calibration : l'écart découle d'une limite structurelle du partage radiatif, où l'ombrage précoce du maïs induit une carence en photo-assimilats privant les nodosités d'énergie carbonée et verrouillant secondairement la fixation de N_2 . En définitive, STICS s'avère fiable en

culture pure sous climat soudanien (sous réserve de la sensibilité du couplage nodulation-sénescence identifiée). Pour l'association, la valeur majeure du modèle réside dans sa capacité à décortiquer la chaîne causale de son échec. Ce diagnostic offre une feuille de route claire pour les développements futurs : acquisition de mesures de fixation symbiotique in situ, correction de l'algorithme d'allocation racinaire en intercrop et amélioration des formalismes de transfert radiatif sous canopée hétérogène.

Université catholique de Louvain

Faculté des bioingénieurs

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