



Associations céréale-légumineuse pour stabiliser les rendements en régions tropicales : évaluation du modèle de culture STICS

Mathilde de Freitas, Antoine Couëdel, Gatien N. Falconnier, Mathias Christina, Alpha B. Balde, François Affholder, Amadou Traore, Aminata Ganeme, Myriam Adam, Yolande Senghor, et al.

► To cite this version:

Mathilde de Freitas, Antoine Couëdel, Gatien N. Falconnier, Mathias Christina, Alpha B. Balde, et al.. Associations céréale-légumineuse pour stabiliser les rendements en régions tropicales : évaluation du modèle de culture STICS. Innovations Agronomiques, 2025, 99, pp.133-146. 10.17180/ciag-2025-vol99-art11 . hal-04927975

HAL Id: hal-04927975

<https://hal.inrae.fr/hal-04927975v1>

Submitted on 4 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License



Associations céréale-légumineuse pour stabiliser les rendements en régions tropicales : évaluation du modèle de culture STICS

Mathilde DE FREITAS^{1,2}, Antoine COUËDEL^{1,2}, Gatien N. FALCONNIER^{1,3,4,5}, Mathias CHRISTINA^{1,2}, Alpha B. BALDE^{6,7}, François AFFHOLDER^{1,8,9}, Amadou TRAORE¹⁰, Aminata GANEME¹¹, Myriam ADAM^{12, 13,14}, Yolande SENGHOR^{1,6,15}, Sidy SOW^{15,16,17}, Eric JUSTES¹⁸

¹AIDA, Univ Montpellier, CIRAD, Montpellier, France

²CIRAD, UPR AIDA, F-34398 Montpellier, France

³CIRAD, UPR AIDA, Harare, Zimbabwe

⁴International Maize and Wheat Improvement Centre (CIMMYT)-Zimbabwe, Harare, Zimbabwe

⁵Department of Plant Production Sciences and Technologies, University of Zimbabwe, Harare, Zimbabwe

⁶ISRA-CNRA, BP53, Bambey, Sénégal

⁷SODAGRI, Dakar, Sénégal

⁸CIRAD, UPR AIDA, Maputo, Mozambique

⁹Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal, Maputo, Mozambique

¹⁰Institut d' Economie Rurale, Bamako, Mali

¹¹Université Joseph Ki-Zerbo, Unité de Formation et de Recherche en Sciences de la Vie et de la Terre, Ouagadougou, Burkina Faso

¹²AGAP Institut, Univ. Montpellier, INRAE, CIRAD, Inst. Agro. F-34398 Montpellier, France

¹³CIRAD, UMR AGAP Institut, F-34398 Montpellier, France

¹⁴Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agronomique (INERA), Ouagadougou, Burkina Faso

¹⁵Université Gaston Berger, Saint-Louis, Sénégal

¹⁶Centre National de Recherches Forestières, ISRA, Dakar, Sénégal

¹⁷LMI IESOL, Centre IRD-ISRA de Bel Air, Dakar, Sénégal

¹⁸CIRAD, Département Persyst, Montpellier, France

Correspondance : mathilde.de_freitas@cirad.fr

Résumé

La capacité de l'association céréale-légumineuse à augmenter et stabiliser les rendements en climat tropical n'a pas été vérifiée sur une large gamme d'environnements. Nous avons évalué le modèle de culture STICS puis avons simulé des séries climatiques historiques de 20 années pour des cultures pures et des associations sur des sites aux climats contrastés en régions tropicales. Lors de l'évaluation, le modèle a simulé les rendements avec précision, sauf dans le cas des légumineuses à très faible rendement en association. Les simulations ont ensuite suggéré que les cultures associées augmentaient la productivité protéique et la stabilité des rendements par rapport à la culture pure de céréale, mais que ces bénéfices diminuaient avec l'augmentation de la fertilisation azotée. Un travail d'amélioration du modèle, publié récemment, permettra de consolider ces résultats prometteurs.

Mots-clés : association de cultures, légumineuse, modélisation, résilience, intensification



Abstract: Cereal-legume intercropping to stabilise yields in tropical regions: evaluation of the STICS soil-crop model

The ability of cereal-legume intercropping to increase and stabilise yields in tropical climates has not been tested over a wide range of environments. We evaluated the STICS crop model and simulated a 20-year historical climate series for sole crops and cereal-legume intercropping on sites with contrasting climates in tropical regions. During the evaluation, the model simulated yields accurately except in the case of very low-yielding legumes in intercropping. The simulations then suggested that intercropping increased protein productivity and yield stability compared with cereal sole cropping, although these benefits diminished as nitrogen fertilisation increased. Recently published work on improvements to the model will enable these promising results to be consolidated.

Keywords: intercropping, legumes, modelling, resilience, intensification

1. Introduction

Dans le contexte du changement climatique, il est urgent d'identifier et d'améliorer des pratiques pour adapter les systèmes de culture à l'augmentation des températures, à la modification des régimes de pluviométrie et à l'augmentation de la fréquence des événements extrêmes. En Afrique subsaharienne, l'agriculture pluviale repose principalement sur des systèmes multi-espèces (Auricht, 2000) permettant de réduire les risques de pertes de récoltes et de mieux utiliser les ressources disponibles que sont les surfaces agricoles, éléments nutritifs du sol et précipitations (Malézieux et al., 2009). L'association céréale-légumineuse est un de ces systèmes pratiqués de manière traditionnelle, qui pourrait être un levier important d'intensification durable dans les régions tropicales. Ce système est souvent considéré comme plus productif que les cultures pures sur une même surface cultivée (notion de Land Equivalent Ratio ou LER). Une revue de littérature récente de Namatsheve et al. (2020) a identifié qu'il faudrait 26% à 42% de terres arables supplémentaires en Afrique subsaharienne pour produire autant de grains avec des cultures pures de céréales et de niébé que si ces cultures étaient associées. L'association de céréales et de légumineuses pourrait également augmenter la stabilité des rendements face à la variabilité du climat dans les conditions tropicales (Raseduzzaman et Jensen, 2017). Ces avantages sont des propriétés émergentes du fonctionnement du système et des processus écologiques définissant les effets d'interaction entre cultures (Justes et al., 2021). La complémentarité dans l'acquisition des ressources est un processus pouvant expliquer l'augmentation et la stabilisation des rendements en association par rapport à la culture pure. L'association céréale-légumineuse bénéficie d'une complémentarité de niche pour l'azote, puisque la légumineuse fixe l'azote atmosphérique. Elle augmente également la couverture du sol ce qui rend l'utilisation de l'eau et du rayonnement solaire plus efficace (Bedoussac et al., 2015) et crée un microclimat qui atténue les effets des extrêmes climatiques (Altieri et al., 2017). La facilitation est un second processus écologique lié à des transferts directs (renouvellement racinaire) et indirectes (modification des communautés microbiennes de la rhizosphère) de nutriments de la légumineuse à la céréale (Namatsheve et al., 2020). Enfin la compétition entre cultures pour les ressources du sol (eau et nutriments) et pour le rayonnement intercepté peut impacter les performances de l'association. Le niébé souffre d'une compétition très importante pour la lumière en association avec une céréale dont la canopée est dominante (Namatsheve et al., 2020). La compétition entre céréales et légumineuses pour l'azote du sol augmente le pourcentage d'azote fixé par la légumineuse (Bedoussac et al., 2015). Enfin, les équilibres entre ces processus écologiques sont très sensibles à l'itinéraire technique, par exemple, la fertilisation azotée limite la fixation de l'azote par les légumineuses (Justes et al., 2021).

L'augmentation de la productivité et de la stabilité des rendements des cultures associées par rapport aux cultures pures n'a pas été vérifiée de façon large ni sur le long terme dans le contexte du changement climatique. De plus, les régions tropicales où l'association de cultures est largement pratiquée de manière traditionnelle souffrent de rendements très faibles (Ganeme et al., 2021) et en conséquence de problèmes d'insécurité alimentaire chronique. Les gains de productivité permis en associant des légumineuses aux céréales seraient cependant insuffisants pour augmenter de manière satisfaisante les rendements en



fourrage et en grains (Falconnier et al., 2023). L'intensification durable des cultures nécessite de mobiliser un ensemble de leviers comme la fertilisation azotée et l'usage de variétés améliorées. Peu de connaissances sont disponibles sur l'effet de la fertilisation azotée sur les performances de l'association céréale-légumineuse. Les approches de modélisation permettent de compléter le travail expérimental au champ et d'aborder des questions à plus grande échelle sur une diversité de pédoclimats et systèmes de production.

Le modèle STICS (Simulateur multiDisciplinaire pour les Cultures Standard) est un modèle de culture développé par l'INRAE en 1996 (Brisson et al., 1998), puis adapté à la simulation d'associations de culture bispécifiques (Brisson et al., 2004 ; Beaudoin et al., 2023). Dans cette étude nous avons évalué la capacité de STICS à simuler les performances des associations céréale-légumineuse sur des données expérimentales dans des conditions pédoclimatiques contrastées. Nous avons ensuite utilisé le modèle calibré sur les cultures pures et l'avons évalué sur des associations, pour mesurer la capacité des associations céréale-légumineuse, fertilisées ou non, à augmenter et à stabiliser les rendements en Afrique subsaharienne par rapport aux systèmes de culture pure de céréale. Une première hypothèse testée est que l'association céréale-légumineuse non fertilisée produirait des rendements en grains plus élevés et plus stables que la culture pure de céréale dans les mêmes conditions pour une période longue de manifestation de la variabilité interannuelle du climat. La seconde hypothèse de l'expérience virtuelle supposait que les bénéfices de l'association de céréale-légumineuse par rapport à la culture pure de céréale diminuaient lorsque le niveau de fertilisation azotée était augmenté.

2. Matériels and méthodes

2.1. Calibration du modèle STICS

Des données expérimentales collectées en station ont été utilisées pour calibrer le modèle STICS. Des expérimentations sur 4 sites présentant des conditions pédoclimatiques contrastées ont été menées pendant deux saisons culturales. Ces sites situés en Afrique de l'Ouest et en Amérique latine étaient représentatifs des climats semi-aride et tropical subhumide (Tableau 1). Cela a permis de tester le modèle STICS sur un gradient de précipitations. Chacun des essais factoriels avait pour traitement principal le mode de culture, c'est-à-dire la culture pure de céréale (mil, sorgho ou maïs) et de légumineuse (niébé ou pois cajan) et l'association des deux espèces (Tableau 2). Différents modes de gestion des cultures ont également été testés : variétés locales ou améliorées, fertilisation azotée ou non, irrigation ou non, différentes dates de semis. Ces modes de gestion n'ont pas systématiquement été testés en interaction avec les modes de culture. Les itinéraires techniques contrastés en culture pure ont permis de calibrer plus finement le modèle sur ces unités de simulation avant l'évaluation de la calibration en culture associée.

Tableau 1: Conditions climatiques sur chaque site expérimental

Sites	Climats	Températures annuelles moyennes (°C)	Précipitations annuelles moyennes (mm)	Coordonnées du site	Références
Sénégal	Semi-aride	28,3	615	14,7 ; -16,5	Senghor et al., 2023 ; Sow et al., 2024
Burkina Faso	Semi-aride	28,1	802	12,2 ; -2,1	Ganeme, 2022
Mali	Semi-aride	27,8	870	12,6 ; -5,7	Traoré et al., 2022
Brésil	Tropical humide	23,6	1260	-16,4 ; -47,9	Baldé et al., 2020

Températures et précipitations moyennes observées de 1983 à 2020 (NASA, POWER Data Access Viewer)

**Tableau 2:** Description des associations céréale-légumineuse étudiées sur chaque site

Sites	Types d'association	Espèces de céréales	Espèces de légumineuses	Références
Sénégal	Additif	Mil <i>Pennisetum glaucum</i>	Niébé <i>Vigna unguiculata</i>	Senghor et al., 2023 ; Sow et al., 2024
Burkina Faso	Substitutif	Sorgho <i>Sorghum bicolor</i>	Niébé <i>Vigna unguiculata</i>	Ganeme, 2022
Mali	Additif	Sorgho <i>Sorghum bicolor</i>	Niébé <i>Vigna unguiculata</i>	Traoré et al., 2022
Brésil	Additif	Maïs <i>Zea mays</i>	Pois cajan <i>Cajanus cajan</i>	Baldé et al., 2020

Les données expérimentales utilisées pour calibrer le modèle correspondent à une saison culturale d'expérimentation sur chaque site. Le modèle a été calibré en conditions de culture pure (céréales et légumineuses de manière distincte), puis les conditions en association de la même saison ont été utilisées pour valider le modèle (De Freitas, 2023). L'erreur quadratique moyenne relative (rRMSE) et l'efficacité (Ef) ont été évalués pour quantifier la capacité du modèle à reproduire le rendement en grains des cultures. Le modèle a également été évalué pour sa capacité à reproduire le Land équivalent ratio (LER) et le LER partiel. Le LER partiel correspond au rapport entre le rendement en association d'une culture et son rendement en culture pure. Un LER partiel très inférieur à 1 signifie que les effets de compétition sont plus importants que les effets de complémentarité et de facilitation. Un LER partiel proche de 1 signifie que peu de compétition a lieu ou qu'elle est compensée par des effets de complémentarité. Un LER partiel supérieur à 1 suggère que de la facilitation a lieu. Le LER correspond à la somme des LER partiels des deux cultures (Willey, 1979). Un LER supérieur à 1 indique que l'association a un usage plus efficient des terres.

2.2. Simulations virtuelles de cultures pures et associées sur le long terme

Une fois calibré, le modèle a ensuite été utilisé pour tester l'intérêt des associations sur 20 saisons culturales historiques dans des sites d'Afrique subsaharienne (2000-2019 au Burkina Faso et au Sénégal, 1991-2010 au Mali). Les cultures pures et l'association sorgho-niébé ont été simulées au Mali et au Burkina Faso, et mil- niébé au Sénégal. Une analyse de sensibilité sur 10 doses de fertilisation azotée (N) a été réalisée, de 0 à 180 kg N ha⁻¹ (De Freitas, 2023). Seules les variétés améliorées du jeu de données de calibration ont été utilisées. Pour la simulation, la densité de semis des céréales (sorgho : 6 plantes m⁻², mil : 1,2 plantes m⁻²) et du niébé (5, 6 et 4 plantes m⁻² au Sénégal, Burkina Faso et Mali, respectivement) était identique en association et en culture pure.

La date de semis des légumineuses a été fixée à deux semaines après celle des céréales en association et en culture pure, ce qui était la pratique majoritaire dans les expérimentations. Les céréales ont été fertilisées avec de l'urée au moment du semis pour éviter un stress azoté précoce, et 35 à 52 jours plus tard. L'azote minéral initial du sol a été fixé à 0 sur tous les sites et pour toutes les années.

Pour évaluer la productivité de l'association en comparaison aux cultures pures nous avons calculé les rendements caloriques et protéiques des grains à partir des rendements simulés par le modèle et de la teneur en calories (assumée constante) et en protéines d'un kilogramme de grains de chaque culture (USDA). Pour évaluer la stabilité des rendements en association et en culture pure nous avons calculé les écarts-interquartiles (ou interquartile range en anglais - IQR) des rendements simulés sur les 20 saisons culturales.

Enfin, pour comparer l'association à la culture pure de céréale sur les 20 saisons culturales, des gains de productivité et de variabilité des rendements simulés ont été calculés en pourcentage. Les gains ont été calculés en faisant la différence entre une variable d'intérêt mesurée en association et la même variable mesurée en culture pure de céréale. Pour le passage en pourcentage, cette différence a été divisée par



la variable d'intérêt mesurée en culture pure de céréale et multipliée par 100. Des gains ont été calculés pour le rendement calorique ou protéique moyen des grains simulé sur 20 saisons culturales et pour l'écart interquartile du rendement calorique ou protéique des grains simulé sur 20 années culturales.

3. Résultats

3.1. Calibration

Le modèle STICS a reproduit avec une précision satisfaisante les rendements de céréales en culture pure ainsi qu'en association. La précision des simulations de rendements de légumineuses en culture pure est dégradée en association. La calibration des cultures pures de céréales et légumineuses a montré dans l'ensemble une bonne adéquation entre les rendements observés et simulés sur l'ensemble des sites ($E_f > 0,74$) avec une simulation satisfaisante de leur variabilité ($rRMSE < 34$, Figures 1 et 2 A). Les céréales ont été mieux simulées que les légumineuses. Le modèle a pu reproduire les tendances observées en reproduisant les forts et faibles rendements en grains des céréales (Figure 1). En revanche, la variabilité des rendements en grains du niébé au Sénégal n'a pas été reproduite (Figure 2).

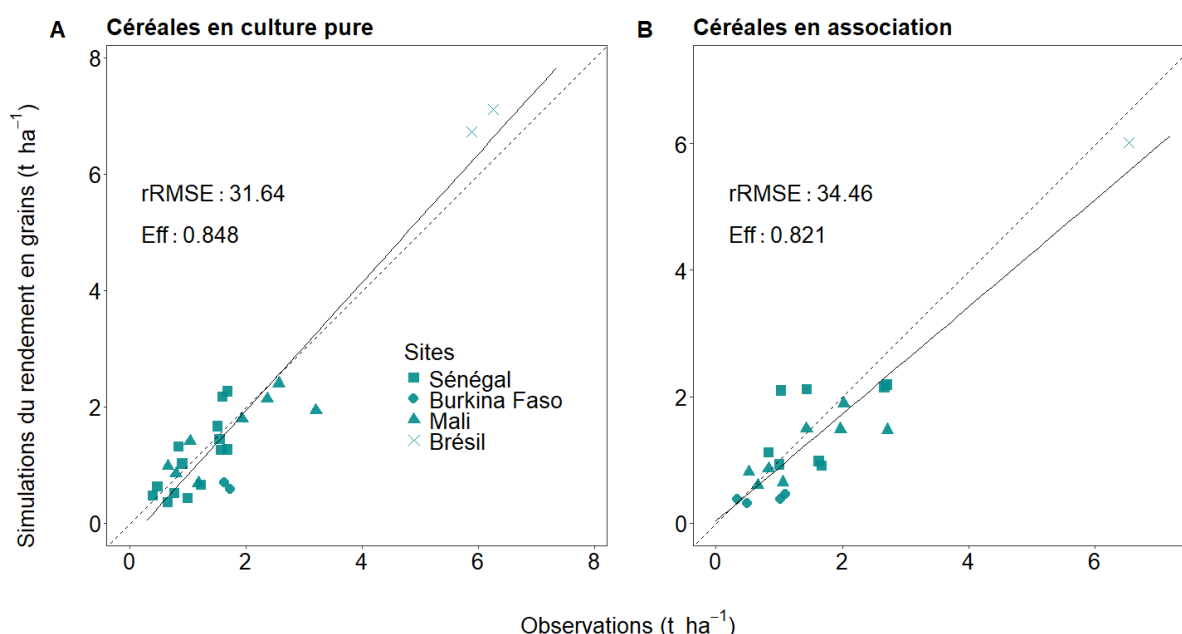


Figure 1: Comparaison entre les observations et les simulations de STICS du rendement en grains des céréales en culture pure (A) et en association (B).

La précision de la simulation du rendement en grains des céréales en association n'a été que légèrement diminuée par rapport à la simulation en culture pure ($E_f = 0,82$, $rRMSE = 34\%$) (Figure 1B). Au contraire, la simulation des associations a eu un impact plus important sur les performances du modèle pour les légumineuses (Figure 2B). Les rendements en grains les plus élevés ont été correctement simulés, mais les rendements faibles ont été surestimés ($E_f = 0,58$, $rRMSE = 62\%$).

Le modèle STICS a simulé de manière satisfaisante les interactions entre céréale et légumineuse en association (Figure 3A). Cependant, le modèle n'était pas suffisamment précis pour comparer l'efficacité de l'usage des terres (LER) des associations par rapport aux cultures pures. Le modèle a pu simuler les interactions à l'œuvre entre cultures en association (pLER) avec une assez bonne précision ($E_f = 0,67$) mais un biais significatif ($rRMSE = 40\%$, Figure 3A). Les simulations indiquent une surestimation des pLER pour les légumineuses et une sous-estimation pour les céréales au Brésil et surtout au Sénégal. De plus, les pLER très faibles du niébé ont été surestimés en raison d'une surestimation des rendements en associations comme mentionné précédemment. L'efficacité de l'usage des terres des associations a donc été simulée de façon peu précise par le modèle ($E_f = 0,12$), en



particulier au Sénégal, où le LER du mil et du niébé a été fortement sous-estimé ; au Mali et au Burkina Faso, où le LER du sorgho et du niébé a été surestimé (Figure 3B). Toutefois, il faut souligner la simulation des bons ordres de grandeur pour le pLER, ce qui est intéressant pour cet indicateur qui est un ratio de variables simulées.

Le travail de calibration du modèle a été réalisé sur 4 sites, dont une station expérimentale au Brésil afin de tester le modèle dans une gamme large de situations pédoclimatiques. Pour la suite de l'article, nous nous sommes concentrés sur les sites en Afrique subsaharienne pour une étude des bénéfices de l'association céréale-légumineuse vis-à-vis de la sécurité alimentaire.

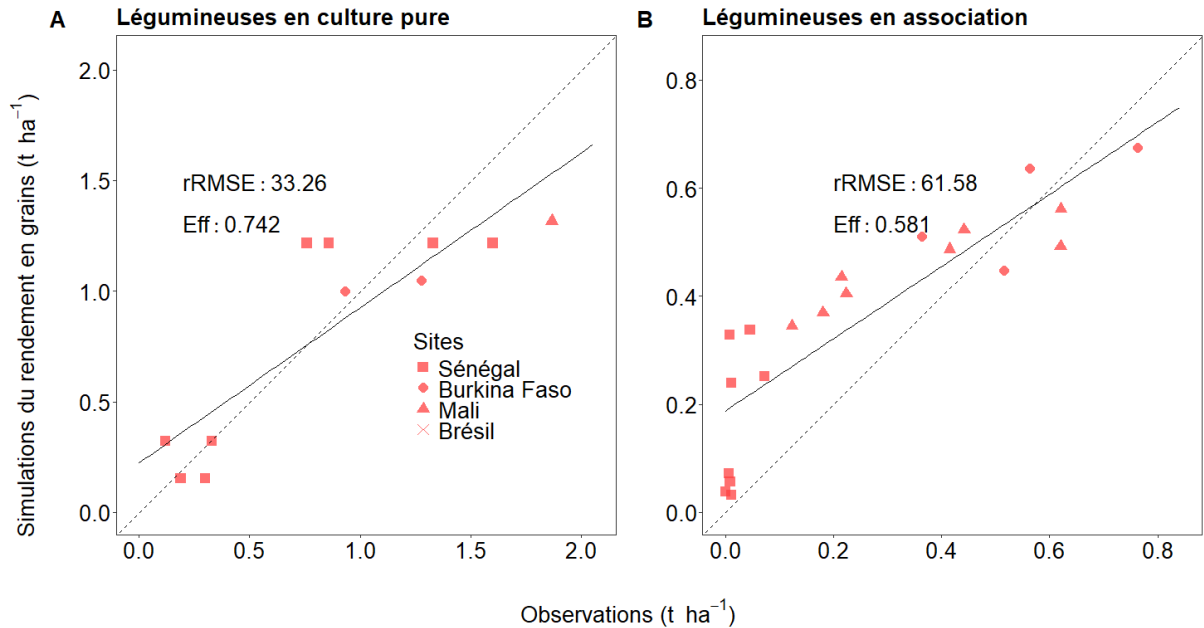


Figure 2: Comparaison entre les observations et les simulations de STICS du rendement en grains des légumineuses en culture pure (A) et en association (B).

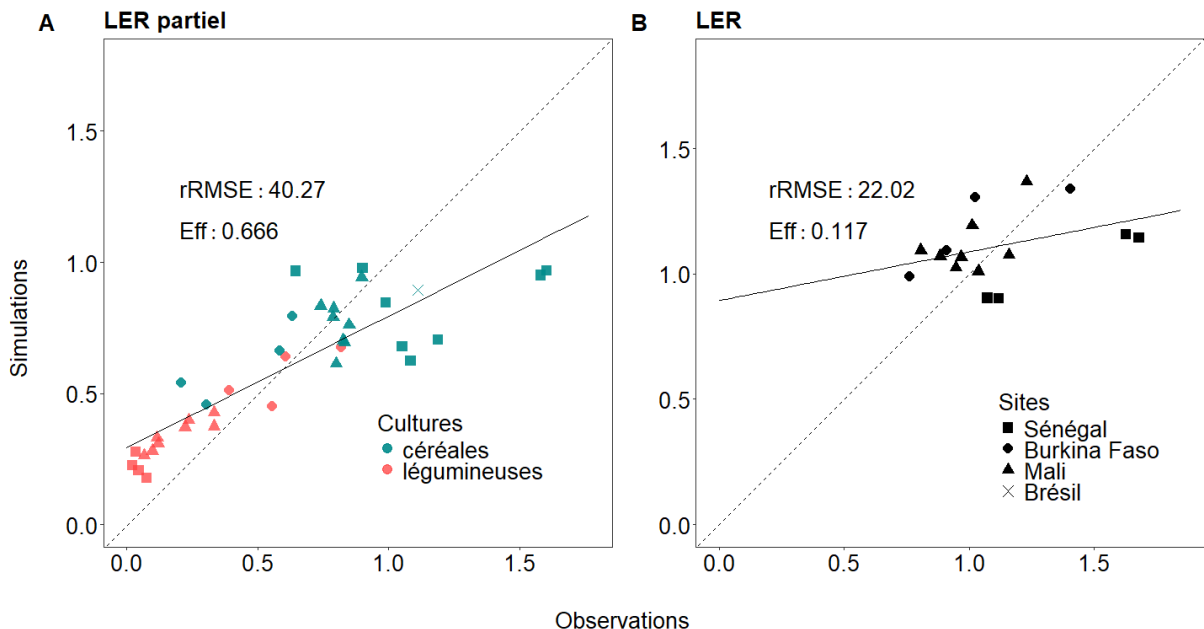


Figure 3: Comparaison entre les observations et les simulations de STICS des effets d'interactions entre cultures en association par rapport aux cultures pures (pLER – A) et de l'efficacité d'usage des terres en association par rapport aux cultures pures (LER – B).



3.2. Evaluation des bénéfices de l'association en termes de variabilité interannuelle des rendements en Afrique subsaharienne

D'après nos simulations, la culture associée n'a pas permis d'augmenter les rendements caloriques simulés des grains par rapport à la culture pure de céréale, alors qu'elle a permis d'améliorer les rendements protéiques simulés. En outre, l'association a réduit l'amplitude des variations interannuelles des rendements caloriques et protéiques simulés des grains par rapport à ceux de la culture pure de céréale (écart interquartile plus faible).

L'association n'a pas eu d'effet net sur le rendement calorique simulé des grains, malgré une tendance moyenne à augmenter le rendement calorique simulé au Mali et à le diminuer au Sénégal (+16% et -12% respectivement, Figure 4A). Le rendement protéique des grains a, dans nos simulations, fortement augmenté en association par rapport à la culture pure de céréale au Burkina Faso et au Mali (Sénégal : +5%, Burkina Faso : +33%, Mali : +67% en moyenne, Figure 4B).

L'association permettrait de stabiliser les rendements caloriques et protéiques. Sur l'ensemble des sites, l'écart interquartile (IQR) sur 20 saisons culturales des rendements caloriques simulés a diminué de 25 à 32% en association par rapport à la culture pure de céréale, et de 33 à 41% pour les rendements protéiques des grains simulés (Figure 4).

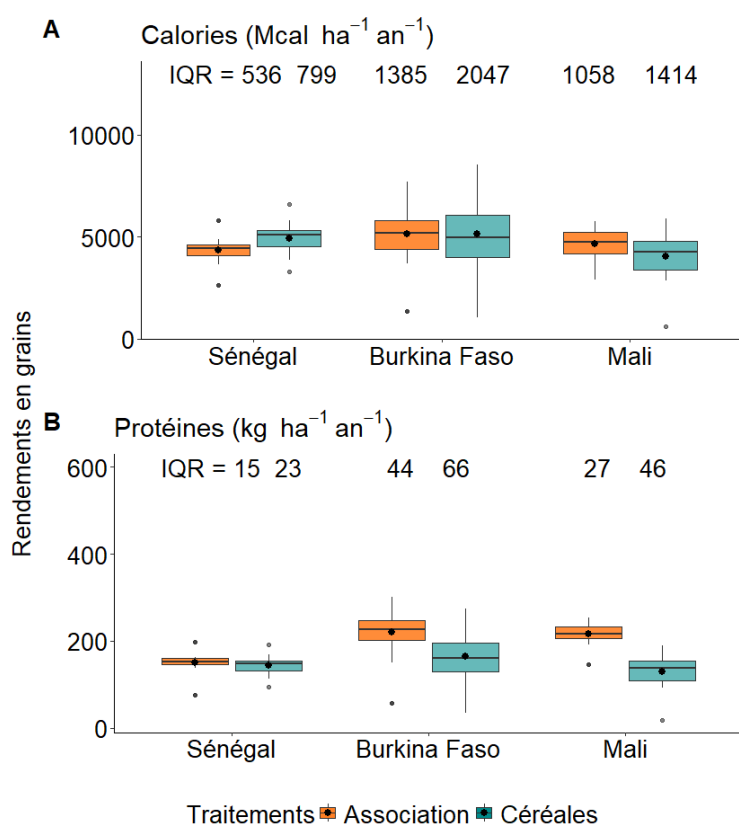


Figure 4: Rendements caloriques (A) et protéiques (B) des grains en culture pure de céréale (bleu) et culture associée (orange) dans des conditions non fertilisées pour les sites d'étude en Afrique subsaharienne, sur vingt saisons culturales. Le point noir représente la moyenne de chaque groupe. L'écart interquartile (IQR) a été calculé pour chaque diagramme en boîte.

Concernant la seconde hypothèse testée, nos simulations indiquent que la fertilisation azotée a réduit le bénéfice de productivité protéique simulé de l'association, sans permettre une augmentation substantielle des rendements caloriques simulés en Afrique subsaharienne par rapport à la culture pure de céréales. La fertilisation azotée a diminué le gain de productivité protéique simulé de l'association par rapport à la culture pure de céréale sur tous les sites, à l'exception du Sénégal où il n'y avait pas de bénéfice simulé de l'association (Figure 5B). La productivité protéique de l'association est restée supérieure à celle de la céréale en culture pure pour tous les apports d'azote au Burkina Faso et au Mali. Ensuite, les faibles apports de fertilisation azotée ont diminué le gain de productivité calorique simulé (Figure 5A). Au Mali et au Burkina Faso, l'association est devenue moins productive en calories que la céréale à partir d'apports de 40 kg N ha⁻¹ et 20 kg N ha⁻¹ respectivement. Les apports plus élevés de fertilisation azotée ont



augmenté les rendements simulés de l'association par rapport à ceux de la céréale à partir de 140 kg N ha⁻¹ au Mali et 80 kg N ha⁻¹ au Burkina Faso, sans que ce bénéfice ne dépasse les 5%. Au Sénégal, des apports de fertilisation azotée supérieurs à 40 kg N ha⁻¹ ont permis de diminuer la perte de rendement calorique simulée en association par rapport à la culture pure de céréales.

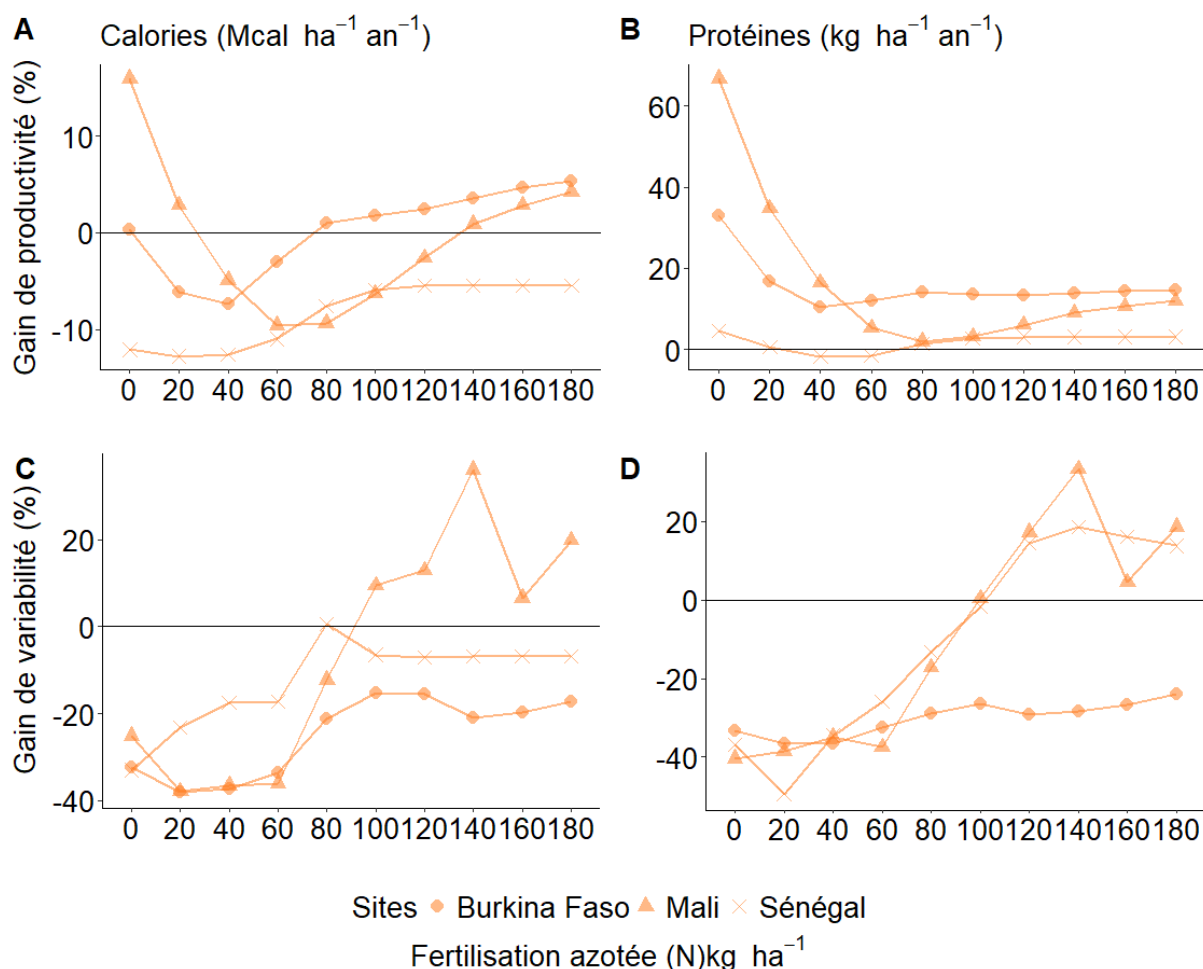


Figure 5: Gain de rendement calorique (A) et protéique (C) des grains en culture associée par rapport à la culture pure de céréale (en %), simulé sur vingt saisons culturales. Gain de variabilité des rendements caloriques (B) et protéiques (D) des grains en culture associée par rapport à la culture pure de céréale (en %).

Un gain de rendement positif indique une productivité plus élevée en association par rapport à la culture pure de céréale. Un gain de variabilité de rendement négatif signifie que les rendements en association sont plus stables que les rendements en culture pure de céréale.

La fertilisation azotée a diminué l'effet de stabilisation de l'association par rapport à la culture pure de céréale sur les rendements caloriques et protéiques simulés des grains en Afrique subsaharienne. En effet, la fertilisation azotée a diminué l'effet de stabilisation de l'association par rapport à la culture pure de céréale sur les rendements caloriques et protéiques simulés des grains en Afrique subsaharienne. En effet, la fertilisation azotée a eu tendance à augmenter le gain de variabilité des rendements simulés en association par rapport à la culture pure de céréale (Figure 5C, D). Bien que l'effet de stabilisation des rendements simulés de l'association ait été diminué par la fertilisation, il était toujours effectif quel que soit le niveau d'apport d'azote au Burkina Faso. **Enfin, l'association a permis de stabiliser les rendements en grains simulés, même avec fertilisation azotée, jusqu'à un certain niveau d'apport d'azote, autour de 100 kg N ha⁻¹ dans le cas du Sénégal et du Mali.**



4. Discussion

4.1. Calibration

Cette étude a confirmé la capacité du modèle STICS à reproduire de manière satisfaisante les performances de différentes espèces de céréales et de légumineuses dans des conditions tropicales. La précision des simulations se situe dans la gamme de ce que l'on trouve dans la littérature en conditions tempérées et tropicales, avec une efficacité du modèle de 0,85 pour les céréales et de 0,74 pour les légumineuses et une rRMSE de 32% et 33%. A titre de comparaison, la rRMSE obtenue pour le blé d'hiver, l'orge de printemps et le pois de printemps était inférieure à 17% dans les travaux en conditions tempérées de Paff et al. (2020). En milieu tropical, les calibrations des céréales ont généralement conduit à une précision moindre par rapport aux calibrations en milieux tempérés: rRMSE = 43% pour le maïs au Brésil (Balde et al., 2011) ; $E_f = 0,38$ et rRMSE = 41% pour le sorgho au Mali (Traoré et al., 2022) ; $E_f = 0,41$ et rRMSE = 29% pour le mil au Sénégal (Sow et al., 2024). En ce qui concerne les légumineuses, la rRMSE du rendement en grains du niébé était de 87% au Mali (Traoré et al., 2022) avec une efficacité de 0,2 et la rRMSE au Burkina Faso était de 13% (Ganeme, 2022). Le modèle STICS a été initialement développé pour simuler les cultures dans les climats tempérés et des développements supplémentaires sont nécessaires pour adapter pleinement ses formalismes aux conditions tropicales, en améliorant par exemple les formalismes régissant l'évaporation du sol ou la minéralisation de la matière organique.

Le défi de ce travail a été d'évaluer la capacité de STICS à reproduire les principales interactions entre 2 espèces de l'association céréale-légumineuse. La précision des simulations de la croissance des céréales n'a été que marginalement réduite par la simulation de l'association avec une légumineuse. En revanche, pour les légumineuses, la précision des simulations a nettement diminué dans les situations d'association par rapport aux situations de cultures pures. Bien que le modèle ait reproduit les tendances observées sur le rendement en grains du niébé en association ($E_f = 0,58$), la dispersion entre observations et simulations était élevée (rRMSE > 60%). Traoré et al. (2022) avaient calibré le sorgho et le niébé en culture pure et en culture associée avec une efficacité du modèle de 0,56 et une rRMSE de 49%. Dans les deux études, les très faibles rendements en grains du niébé étaient la principale cause d'erreurs de la calibration. Cela suggère que la modélisation des effets de forte compétition sur les cultures associées, observés dans ces situations, doit être améliorée. Une calibration plus précise des systèmes racinaires de chaque espèce pourrait augmenter la précision des simulations, mais le manque de données est un obstacle à ce travail.

La dispersion entre observations et simulations des effets d'interactions entre cultures en association par rapport à la culture pure (rRMSE > 40 % pour le pLER) était principalement le fait de la surestimation des faibles pLER et de la sous-estimation des pLER élevés. Dans les régions tempérées, la précision du modèle pour la simulation du pLER des céréales et des légumineuses était similaire à cette étude avec une rRMSE de 56% (Paff et al., 2020). Dans notre travail, le pLER simulé des céréales n'a jamais dépassé 1, ce qui est en cohérence avec les formalismes du modèle où les processus de facilitation ne sont pas considérés, alors que les observations sur le terrain témoignaient de ce cas de figure. D'après Senghor et al. (2023), une explication plausible des pLER observés supérieurs à 1 pourrait être i) le transfert direct d'azote des légumineuses vers les céréales (Stern, 1993 ; Laberge et al., 2011), et ii) la modification de la composition microbienne de la rhizosphère en association (Lian et al., 2019), conduisant à une plus grande minéralisation de l'azote organique du sol et à une disponibilité de l'azote plus élevée pour la céréale. Ce dernier point n'est actuellement pas simulé par le modèle STICS. Or dans des situations où les rendements sont si faibles, il suffit de quelques kilogrammes d'azote supplémentaires pour obtenir un effet significatif sur le rendement des cultures ; il est donc possible que nous soyons dans des situations correspondant à la limite de précision du modèle. Les transferts directs d'azote par le biais du renouvellement des racines des légumineuses sont potentiellement simulables par le modèle, mais des observations détaillées seraient nécessaires pour calibrer les paramètres régissant ce processus (durée de vie des racines et ratio C/N des racines sénescents).



4.2. Bénéfices des cultures associées en conditions non fertilisées

L'association céréale-légumineuse pourrait contribuer à stabiliser la production de calories et de protéines en Afrique subsaharienne dans des conditions non fertilisées, d'après nos simulations.

A ce titre, nos résultats sont en accord avec la méta-analyse récente réalisée à l'échelle mondiale par Li et al. (2023). **Les associations sont presque aussi productives que la culture la plus productive en grains, mais leur rendement protéique et la stabilité des rendements en grains sont plus élevés.** L'introduction de légumineuses grâce à l'association de culture permet de produire une plus grande quantité de protéines par unité de surface, malgré la diminution du rendement des céréales dans l'association comparativement à la culture pure. Bouras et al. (2023) ont observé qu'associer des légumineuses avec des céréales améliorait l'accumulation de protéines dans le rendement en grains de l'association de plus de 30 kg ha⁻¹ par rapport au blé dur cultivé seul, dans un climat subhumide et pour un apport d'azote de 60 N kg ha⁻¹. Cet effet a pu être sous-estimé dans notre étude car le rendement en protéines des grains n'a pas été calibré dans le modèle, faute de données disponibles, mais directement calculé à partir du rendement en grains et des concentrations génériques en protéines de chaque culture (USDA). Le processus menant à l'augmentation de la concentration en protéines du rendement de céréale en association avec une légumineuse, montrée par Bedoussac et Justes (2010), n'a pas été pris en compte dans ce travail.

Contrairement à ce qui était simulé dans les cas étudiés au Burkina Faso ou au Mali, dans le cas étudié au Sénégal, l'association ne permettrait pas d'augmenter le rendement protéique moyen du mélange des grains récoltés par rapport à la culture pure de céréale et induirait une diminution du rendement calorique. Au Sénégal, notre hypothèse est que l'association n'a pas eu de bénéfice simulé de productivité en raison d'une trop forte concurrence entre cultures pour la ressource en eau. Senghor et al. (2023) avaient obtenu avec les données observées, cette fois, un avantage de l'association pour les rendements du mil uniquement en condition irriguée et non avec stress hydriques, comme dans notre simulation virtuelle. Il convient aussi de noter que les densités de semis du jeu de données de calibration étaient beaucoup plus faibles au Sénégal, soit 0,6 plante.m⁻² contre 5 plantes.m⁻² dans l'expérimentation virtuelle, ce qui a pu induire une plus forte compétition dans nos simulations que dans les expérimentations sur le terrain. Les céréales et les légumineuses cultivées en association à des densités égales à celles de la culture pure pourraient être peu adaptées à un environnement où les contraintes sur l'eau sont très fortes. Réaliser une analyse de sensibilité sur les densités de légumineuses dans le mélange pourrait permettre d'identifier une densité plus faible pour laquelle les bénéfices de l'association se manifesteraient, via une meilleure valorisation des ressources abiotiques disponibles.

4.3. Bénéfices des cultures associées en conditions fertilisées

L'expérience virtuelle a tout d'abord suggéré que l'association pourrait être plus productive que la culture pure de céréale, sans ou avec de faibles apports d'azote. Avec l'augmentation de la fertilisation azotée, les céréales augmentent leur compétitivité par rapport aux légumineuses dans les simulations, ce qui explique que le bénéfice simulé de l'association soit réduit ou inexistant par rapport à la culture pure de céréale. Ce résultat simulé doit être considéré de manière critique puisque la gamme de variation des gains de productivité en association était souvent du même ordre de grandeur que la rRMSE. Notre travail par simulation converge tout de même avec des résultats expérimentaux, dans lesquels la fertilisation azotée donne un avantage compétitif à la céréale par rapport à la légumineuse dans l'association (Bedoussac et al., 2015 ; Yu et al., 2016). D'après les simulations, cette concurrence résulte principalement de la compétition pour la lumière. En effet, la céréale est la culture dominante du système associé et induit une compétition qui diminue la radiation solaire disponible pour la légumineuse. Par ailleurs, d'après des travaux d'expérimentation réels, la fertilisation azotée diminue la fixation symbiotique des légumineuses (Andersen et al., 2005) et donc la complémentarité entre céréale et légumineuse dans l'absorption de l'azote en association (Bedoussac et Justes, 2010). Elgharably et al. (2021) ont mis en évidence un seuil de concentration élevé d'azote dans le sol (≥ 60 mg N kg⁻¹ dans le cas de la luzerne dans un sol non salin) qui inhibe la formation de nodules. Cela expliquerait



l'absence de bénéfice simulé de l'association en termes de productivité pour des apports azotés au-dessus d'un certain seuil. Ce processus d'inhibition est considéré dans le formalisme du modèle STICS, mais nous avons manqué de données pour le paramétrer spécifiquement dans les situations tropicales.

La fertilisation azotée induirait une réduction de l'effet stabilisateur de l'association sur le rendement calorique et protéique des grains par rapport à la culture pure de céréale. La fertilisation réduit le stress azoté et permet d'augmenter le rendement en grains des céréales, ce qui pourrait avoir induit davantage de stress hydrique. Il est possible que, plus l'association est fertilisée, moins elle réduit la sensibilité au stress hydrique du système par rapport à la culture pure de céréale. Une autre explication pourrait être que le rendement en grains du niébé devient marginal dans l'association à mesure que la fertilisation augmente et ne contribue plus à stabiliser la production (Traore et al., 2023) et que la complémentarité de niche pour l'azote est annihilée.

5. Conclusion

Ce travail de modélisation a étudié les bénéfices potentiels de l'association céréale-légumineuse par rapport à la culture pure de céréale, en interaction avec une analyse de sensibilité de la fertilisation azotée sur 3 sites contrastés. L'expérience virtuelle réalisée sur 20 saisons culturales suggère qu'en Afrique subsaharienne, les cultures associées réduiraient peu le rendement calorique des grains par rapport à la culture pure de céréale, mais elles permettraient une augmentation significative du rendement protéique. L'association stabiliserait également les rendements face à la variabilité climatique. Une analyse de sensibilité sur les doses de fertilisation a simulé des résultats qui corroborent l'hypothèse selon laquelle les bénéfices de l'association céréale-légumineuse en termes de productivité et de stabilité des rendements diminueraient avec la fertilisation azotée, mais seraient néanmoins effectifs pour des apports faibles.

La calibration du modèle réalisée sur une année de données expérimentales a donné une bonne confiance dans les résultats de l'expérimentation virtuelle et a donc montré la pertinence du modèle STICS pour représenter le fonctionnement des cultures associées bispécifiques céréale-légumineuse. Toutefois, un travail plus développé sur la capacité du modèle à simuler les forts stress azotés et hydriques permettraient d'améliorer encore les performances en vue de simuler plus précisément les conditions culturales tropicales.

Un effet potentiel important de l'introduction de légumineuses dans les systèmes de culture n'a pas été considéré dans cette étude : leur effet « précédent cultural » qui peut considérablement améliorer les rendements en grains d'un système de rotation entre céréales et légumineuses. L'effet cumulé de la monoculture ou de l'association d'année en année pourrait être testé dans les simulations afin de comparer ces systèmes avec une autre alternative agroécologique à la monoculture, à savoir la rotation. La rotation pourrait présenter des bénéfices par rapport à l'association, si comme en climat tempéré, les légumineuses tropicales sont plus productives en culture pure qu'en association et fixent donc davantage d'azote de l'atmosphère (Bedoussac et al., 2015). Des données expérimentales sur l'effet précédent des légumineuses seraient alors utiles pour calibrer les simulations chaînées dans le modèle STICS et ainsi tester cette hypothèse.

Ethique

Les auteurs déclarent que les expérimentations ont été réalisées en conformité avec les réglementations nationales applicables.

Déclaration sur la disponibilité des données et des modèles

Les données qui étayent les résultats évoqués dans cet article sont accessibles sur demande auprès de l'auteur de correspondance de l'article.



Déclaration relative à l'Intelligence artificielle générative et aux technologies assistées par l'Intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

Les auteurs n'ont pas utilisé de technologies assistées par intelligence artificielle dans le processus de rédaction.

ORCIDs des auteurs

Mathilde De Freitas : 0009-0006-7615-450X

Antoine Couëdel : 0000-0002-5786-0939

Gatien N. Falconnier : 0000-0003-3291-650X

Mathias Christina : 0000-0003-3618-756X

Eric Justes : 0000-0001-7390-7058

Contributions des auteurs

Mathilde de Freitas, Antoine Couëdel, Gatien Falconnier, Mathias Christina et Eric Justes ont contribué à la détermination des questions, hypothèses et méthodes de recherche, à l'analyse et l'interprétation des résultats. Alpha B. Balde, François Affholder, Amadou Traore, Aminata Ganeme, Myriam Adam, Yolande Senghor et Sidy Sow ont produit les données issues des expérimentations ayant permis ce travail de modélisation. Eric Justes a rendu possible ce travail en obtenant les financements nécessaires. Tous les auteurs et autrices ont participé à la rédaction et à la révision critique de l'article. Ils ont lu et approuvé le manuscrit final.

Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas travailler, conseiller, posséder de parts, recevoir pas de fonds d'une organisation qui pourrait tirer profit de cet article, et ne déclarent aucune autre affiliation que celles citées en début d'article.

Déclaration de soutien financier

Cet article a reçu le soutien du CIRAD et de l'Union Européenne, dans le cadre du projet IntercropVALUES, financé par le fond Horizon Europe Research and Innovation programme (Grant agreement No.101081973). L'acquisition des données qui ont permis ce travail a reçu le soutien du Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP) du Ministère Français des Affaires Etrangères et du Développement International (MAEDI), de la Fondation Avril via le projet ORACLE, du projet "Ecological Intensification and Inequality" de l'AFD, du projet USAID SIMCO (Grant agreement No.201403286-10), du projet UE LEAP-Agri RAMSES II (Grant agreement No.840727715) et du projet UE H2020 SustainSAHEL.

Références bibliographiques :

Altieri M.A., Nicholls C.I. & Montalba R., 2017. Technological Approaches to Sustainable Agriculture at a Crossroads: An Agroecological Perspective. *Sustainability* **9**(3), 349, DOI:10.3390/su9030349.

Andersen M.K., Hauggaard-Nielsen H., Ambus P. & Jensen E.S., 2005. Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops. *Plant Soil* **266**(1), 273–287, DOI:10.1007/s11104-005-0997-1.

Auricht C., 2000. Farming Systems and Poverty IMPROVING FARMERS' LIVELIHOODS IN A CHANGING WORLD.

Baldé A.B., Scopel E., Affholder F., Da Silva F.A.M., Wery J. & Corbeels M., 2020. Maize relay intercropping with fodder crops for small-scale farmers in central Brazil. *Ex. Agric.* **56**(4), 561–573, DOI:10.1017/S0014479720000150.

Balde A.B., Wery J. & Scopel E., 2011. Analyse intégrée du partage des ressources (eau, azote et rayonnement) et des performances dans les systèmes de culture en relais sous semis direct en zone tropicale subhumide.



- Beaudoin N., Lecharpentier P., Ripoche-Wachter D., Strullu L., Mary B., Léonard J., Launay M. & Justes E. (Eds.), 2023. *STICS soil-crop model: Conceptual framework, equations and uses*, éditions Quae.
- Bedoussac L., Journet E.-P., Hauggaard-Nielsen H., Naudin C., Corre-Hellou G., Jensen E.S., Prieur L. & Justes E., 2015. Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **35**(3), 911–935, DOI:10.1007/s13593-014-0277-7.
- Bedoussac L. & Justes E., 2010. Dynamic analysis of competition and complementarity for light and N use to understand the yield and the protein content of a durum wheat–winter pea intercrop. *Plant Soil* **330**(1), 37–54, DOI:10.1007/s11104-010-0303-8.
- Bouras F.-Z., Hadjout S., Haddad B., Malek A., Aitmoumene S., Gueboub F., Metrah L., Zemmouri B., Kherif O., Rebouh N.-Y. & Latati M., 2023. The Effect of Nitrogen Supply on Water and Nitrogen Use Efficiency by Wheat–Chickpea Intercropping System under Rain-Fed Mediterranean Conditions. *Agriculture* **13**(2), 338, DOI:10.3390/agriculture13020338.
- Brisson N., Bussi re F., Ozier-Lafontaine H., Tournebize R. & Sinoquet H., 2004. Adaptation of the crop model STICS to intercropping. Theoretical basis and parameterisation. *Agronomie* **24**(6–7), 409, DOI:10.1051/agro:2004031.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoulaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R. & Durr C., 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. *Agronomie* **18**(5–6), 311–346.
- De Freitas M., 2023. Intercropping cereals and legumes to stabilise yield in the tropics: evaluation of the STICS soil-crop model to simulate bi-specific intercrops (thesis).
- Elgharably A. & Benes S., 2021. Alfalfa Biomass Yield and Nitrogen Fixation in Response to Applied Mineral Nitrogen Under Saline Soil Conditions. *J Soil Sci Plant Nutr* **21**(1), 744–755, DOI:10.1007/s42729-020-00397-6.
- Falconnier G.N., Cardinael R., Corbeels M., Baudron F., Chivenge P., Cou  del A., Ripoche A., Affholder F., Naudin K., Benaillon E., Rusinamhodzi L., Leroux L., Vanlauwe B. & Giller K.E., 2023. The input reduction principle of agroecology is wrong when it comes to mineral fertilizer use in sub-Saharan Africa. *Outlook Agric* **52**(3), 311–326, DOI:10.1177/00307270231199795.
- Ganeme A., 2022. Performances agronomiques et modélisation des associations sorgho-niébé en zone Soudano-sahélienne du Burkina Faso (thesis).
- Ganeme A., Douzet J.-M., Traore S., Dusserre J., Kabore R., Tirogo H., Nabaloum O., Ouedraogo N.W.-Z.S. & Adam M., 2021. L'association sorgho/niébé au poquet, une pratique traditionnelle en zone soudano-sahélienne à faible rendement: Etat des lieux et pistes d'amélioration **31**(4).
- Justes E., Bedoussac L., Dordas C., Frak E., Louarn G., Boudsocq S., Journet E.-P., Lithourgidis A., Pankou C., Zhang C., Carlsson G., Jensen E.S., Watson C. & Li L., 2021. THE 4C APPROACH AS A WAY TO UNDERSTAND SPECIES INTERACTIONS DETERMINING INTERCROPPING PRODUCTIVITY. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* **8**(3), DOI:10.15302/J-FASE-2021414.
- Laberge G., I. G. Haussmann B., Ambus P. & H  gh-Jensen H., 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. *Plant Soil* **340**(1), 369–382, DOI:10.1007/s11104-010-0609-6.
- Li C., Stomph T.-J., Makowski D., Li H., Zhang C., Zhang F. & van der Werf W., 2023. The productive performance of intercropping. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **120**(2), e2201886120, DOI:10.1073/pnas.2201886120.



- Lian T., Mu Y., Jin J., Ma Q., Cheng Y., Cai Z. & Nian H., 2019. Impact of intercropping on the coupling between soil microbial community structure, activity, and nutrient-use efficiencies. *PeerJ* **7**, e6412, DOI:10.7717/peerj.6412.
- Malézieux E., Crozat Y., Dupraz C., Laurans M., Makowski D., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., de Tournonnet S. & Valantin-Morison M., 2009. Mixing Plant Species in Cropping Systems: Concepts, Tools and Models: A Review. In: Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Véronique, S., Alberola, C. eds. *Sustainable Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, 329–353.
- Namatsheve T., Cardinael R., Corbeels M. & Chikowo R., 2020. Productivity and biological N₂-fixation in cereal-cowpea intercropping systems in sub-Saharan Africa. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **40**(4), 30, DOI:10.1007/s13593-020-00629-0.
- Paff K., Munz S., Vezy R., Gaudio N., Bedoussac L. & Justes E., 2020. Calibration and Evaluation of the STICS Intercrop Model for Two Cereal-Legume Mixtures. Presented at the ICROPM 2020 - Crop Modelling for the future.
- Raseduzzaman Md. & Jensen E.S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy* **91**, 25–33, DOI:10.1016/j.eja.2017.09.009.
- Senghor Y., Balde A.B., Manga A.G.B., Affholder F., Letourmy P., Bassene C., Kanfany G., Ndiaye M., Couedel A., Leroux L. & Falconnier G.N., 2023. Intercropping millet with low-density cowpea improves millet productivity for low and medium N input in semi-arid central Senegal. *Heliyon* **9**(7), e17680, DOI:10.1016/j.heliyon.2023.e17680.
- Sow S., Senghor Y., Sadio K., Vezy R., Roupsard O., Affholder F., N'dienor M., Clermont-Dauphin C., Gaglo E.K., Ba S., Tounkara A., Balde A.B., Agbohessou Y., Seghieri J., Sall S.N., Couedel A., Leroux L., Jourdan C., Diaite D.S. & Falconnier G.N., 2024. Calibrating the STICS soil-crop model to explore the impact of agroforestry parklands on millet growth. *Field Crops Research* **306**, 109206, DOI:10.1016/j.fcr.2023.109206.
- Stern W.R., 1993. Nitrogen fixation and transfer in intercrop systems. *Field Crops Research, Intercropping-Bases of Productivity* **34**(3), 335–356, DOI:10.1016/0378-4290(93)90121-3.
- Traoré A., Falconnier G.N., Ba A., Sissoko F., Sultan B. & Affholder F., 2022. Modeling sorghum-cowpea intercropping for a site in the savannah zone of Mali: Strengths and weaknesses of the Stics model. *Field Crops Research* **285**, 108581, DOI:10.1016/j.fcr.2022.108581.
- Traore A., Falconnier G.N., Couedel A., Sultan B., Chimonyo V.G.P., Adam M. & Affholder F., 2023. Sustainable intensification of sorghum-based cropping systems in semi-arid sub-Saharan Africa: The role of improved varieties, mineral fertilizer, and legume integration. *Field Crops Research* **304**, 109180, DOI:10.1016/j.fcr.2023.109180.
- Willey R.W., 1979. Intercropping Its Importance And Research Needs Part 1. Competition And Yield Advantages Vol-32.
- Yu Y., Stomph T.-J., Makowski D., Zhang L. & van der Werf W., 2016. A meta-analysis of relative crop yields in cereal/legume mixtures suggests options for management. *Field Crops Research* **198**, 269–279, DOI:10.1016/j.fcr.2016.08.001.



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue *Innovations Agronomiques* et son DOI, la date de publication.