

# Potentiel d'adaptation des associations sorgho-niébé au changement climatique en zone soudano-sahélienne

---

Aminata GANEME<sup>1\*</sup>, Florian LARUE<sup>2</sup>,  
Salifou TRAORE<sup>1,3</sup>, Myriam ADAM<sup>2,4</sup>

## Résumé

Dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso, les agriculteurs pratiquent l'association de culture pour diverses raisons dont la minimisation des risques climatiques. Notre étude a eu pour objectif d'évaluer la résilience des associations sorgho-niébé au changement climatique. Une étude a été menée en 2017 et 2018 à la station de recherche de Saria. Deux couples de variétés de sorgho et de niébé ont été évalués en association et en culture pure. Le modèle STICS a été calibré et validé sur ces données. Deux scénarii d'émissions de CO<sub>2</sub> et cinq modèles climatiques futurs probables ont été utilisés pour analyser l'impact climatique sur les rendements à l'horizon 2050. Les résultats ont montré que le modèle a simulé de manière satisfaisante la phénologie et le rendement en grains des deux cultures avec des valeurs NRMSE comprises dans les erreurs d'observation. En outre, notre étude a montré que les systèmes de cultures associées ont mieux stabilisé les rendements pour la plupart des variétés avec des coefficients de variation plus faibles que dans les systèmes de cultures pures. Dans l'ensemble, les résultats ont montré que l'association culturale peut contribuer à la résilience des cultures au changement climatique dans la zone soudano-sahélienne.

**Mots clés :** système de culture, modélisation, diversité variétale, stabilité de production, climats futurs

## Adaptation potential of intercropping sorghum-cowpea systems to climate change in sudano-sahelian zone

### Abstract

In the sudano-sahelian zone of Burkina Faso, farmers practice intercropping for several reasons, such as minimizing climatic risk. Our study aimed to evaluate the

---

<sup>1</sup> Université Joseph Ki-Zerbo, Laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales (LaBEV, UFR/SVT), Ouagadougou, 03 BP 7021, Tel : +226 67 36 05 37, Ouagadougou. Burkina Faso

<sup>2</sup> UMR AGAP Institute, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, 34398 Montpellier Cedex 5. France

<sup>3</sup> LMI-IESOL, Dakar BP 1386 Dakar. Sénégal

<sup>4</sup> Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA/CNRST), Ouagadougou, 04 BP 8645, Ouagadougou. Burkina Faso

**Auteur correspondant :** Aminata GANEME, [aminata.ganeme@ujkz.bf](mailto:aminata.ganeme@ujkz.bf) ; [amiganame@yahoo.fr](mailto:amiganame@yahoo.fr)

resilience of sorghum-cowpea intercropping systems to climate change. An experiment was conducted in 2017 and 2018 at the Saria research station. Two varieties of sorghum and two varieties of cowpea were evaluated in intercropping and sole crop. The STICS model was used and calibrated on these data. Two CO<sub>2</sub> pathway emission scenarios and five future climate models were used to analyze the climate impact on yields for the middle of the century (2050). The results showed that the model satisfactorily simulated the phenology and grain yield of both crops with NRMSE values within the observation errors. Consistent with observed data, simulated yields were higher in sole crop systems, followed by the ones in intercropping systems. Furthermore, our study showed that intercropping systems stabilized grain yields for most varieties with lower coefficients of variation than in sole crops systems. Overall, the results suggested that intercropping can contribute to the resilience of crops to climate change in the sudano-sahelian zone of Burkina Faso.

**Keywords :** cropping systems, modelling, varietal diversity, yield stability, future climate

## Introduction

Le changement climatique est sans équivoque et influence fortement l'agriculture, considérée comme l'activité humaine la plus dépendante des conditions météorologiques (IPCC, 2021). L'Afrique subsaharienne est connue pour être particulièrement vulnérable au changement climatique, en raison de la grande dépendance de l'agriculture à la pluviométrie saisonnière et des moyens économiques limités (ROUDIER et al., 2011; SULTAN et GAETANI, 2016). Cependant, l'impact du climat futur sur les rendements des cultures en Afrique subsaharienne est diversement apprécié dans la littérature. En effet, ROUDIER et al., (2011) ont rapporté des changements de rendements de -50% à +90% de plusieurs cultures à des horizons de temps allant jusqu'à 2080 tandis que SULTAN et al., (2014) prédisent des réductions de 16 à 20% des rendements en Afrique de l'Ouest. Cette variabilité des effets reflète la diversité des régions, des cultures et des systèmes de cultures, des scénarii et modèles climatiques, ainsi que des modèles de cultures choisis dans les études (RUANE et MCDERMID, 2017; CORBEELS et al., 2018).

L'association culturale est de nos jours considérée comme une approche appropriée pour l'intensification durable de l'agriculture, en particulier dans des conditions pluviales limitées (TITTONELL et GILLER, 2013; CHIMONYO et al., 2016). L'augmentation de la biodiversité agricole permet de rendre les écosystèmes agricoles plus résilients et de mieux faire face aux effets prévus du changement climatique

(RASEDUZZAMAN et JENSEN, 2017). Au Burkina Faso, l'association dans le même poquet est la plus pratiquée dans les exploitations familiales de la zone soudano-sahélienne, avec pour objectifs, entre autres, la bonne gestion des terres et la minimisation du risque climatique (GANEME et al., 2021). Une meilleure connaissance du climat futur en Afrique de l'Ouest et de l'impact de son changement sur la productivité des cultures est cruciale et impérative pour la mise en place de mesures d'adaptation et d'amélioration de la productivité (SULTAN et GAETANI, 2016). La présente étude s'inscrit dans ce contexte avec pour principal objectif de déterminer l'effet des climats futurs sur les performances agronomiques de deux couples de variétés de sorgho et de niébé en association et en culture pure. L'importance de cette étude réside également dans la prise en compte de différentes cultures (sorgho et niébé), variétés (locales et améliorées) et systèmes de culture (pure, association en interligne et dans le même poquet). Spécifiquement, l'étude a consisté à (i) calibrer et valider le modèle STICS (Simulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard) pour les rendements du sorgho et du niébé, et (ii) déterminer l'effet des climats futurs (température, pluie, CO<sub>2</sub>) sur la productivité des variétés en fonction des systèmes de culture (pure vs association). A travers cette étude, les hypothèses testées sont (i) les associations culturales stabilisent mieux la productivité du sorgho et du niébé que la culture pure dans les conditions climatiques futures, et (ii) l'association traditionnelle dans le même poquet avec les variétés de cycle court stabilise mieux les rendements que l'association en interligne.

## **I. Matériel et méthodes**

### **I.1. Expérimentation**

#### **I.1.1. Zone d'étude**

La collecte des données a été faite pendant les saisons pluvieuses de 2017 et 2018 à la station de recherche de Saria (12°16'N et 2°09'O), de l'Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agricole (INERA). Pendant la période expérimentale (juillet à novembre), la pluviométrie a été de 538 mm en 2017 et 653 mm en 2018, avec des températures moyennes de 27,5°C pour les deux saisons. La couche superficielle (0-20 cm) de sol des parcelles expérimentales est caractérisée par un pH de 4,86, 2,88 g.kg<sup>-1</sup> de carbone, 0,23 g.kg<sup>-1</sup> d'azote total, 0,06 g.kg<sup>-1</sup> de phosphore total, et un rapport C/N de 12,52 (Tableau 1)

**Tableau I :** Caractéristiques physico-chimiques des sols des parcelles expérimentales à la station de recherche de Saria.

	Paramètres	pHeau	C	N total	P total	K total	C/N	S	CEC	Argile	Limon	Sable
	Unités		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg		cmol/kg	cmol/kg	%	%	%
Profondeur (cm)	0-20	4,86	2.88	0,23	0,06	0,84	12,52	1,35	4,38	9,84	22,27	67,89
	20-40	5,31	2.68	0,22	0,07	1,60	12,16	2,07	8,71	25,86	17,64	56,50
	40-60	5,55	2.47	0,20	0,09	1,92	12,33	2,72	12,23	36,24	17,17	46,59
	60-80	5,75	2.06	0,18	0,08	2,15	11,47	2,75	12,33	37,71	17,10	45,19
	80-120	5,79	1.56	0,13	0,07	1,98	12,00	2,35	12,15	34,34	19,60	46,06

C = carbone, N = azote, P = phosphore, K = potassium, CEC = capacité d'échange cationique, S = somme des bases échangeables

### **I.1.2. Matériel végétal**

L'étude a porté sur deux couples de variétés de sorgho et de niébé. Le premier est un couple de variétés locales, collectées dans la région du Centre-Nord du Burkina Faso. Il s'agit des variétés Rouko (sorgho) et Beng-raaga (niébé), qui sont parmi les plus utilisées en association dans cette région (GANEME et al., 2022). Rouko est une variété de race Guinea avec un cycle semis-maturité de 85 à 90 jours. Bengraaga est une variété à graine, à port rampant, dont le cycle semis-maturité est de 70 à 75 jours. Le deuxième couple est constitué de variétés améliorées de sorgho (Grinkan) et de niébé (K VX 745-11P), qui ont été sélectionnées du fait de leurs traits phéno-morphologiques contrastés avec ceux des variétés locales. Grinkan est une variété de race *Caudatum*, dont la durée de cycle semis-maturité est comprise entre 100 et 120 jours. K VX 745-11P est une variété semi-rampante, à double usage (fourrager et à grains) contrairement à la variété locale qui est une variété à grains. Son cycle semis - maturité varie de 60 à 65 jours.

### **I.1.3. Dispositif expérimental et conduite culturale**

Le dispositif expérimental a été un bloc de Fisher complètement randomisé à 2 facteurs (variétés et systèmes de culture) et 4 répétitions. Les parcelles élémentaires d'une superficie de 64 m<sup>2</sup> (8 m x 8 m) étaient séparées entre elles par une allée de 1 m et les répétitions de 2 m. Les variétés ont été testées dans trois systèmes de cultures à savoir l'association en interligne, l'association dans le même poquet et la culture pure. L'association en interligne a consisté à intercaler une ligne de sorgho avec une ligne de niébé. Pour l'association au poquet, la pratique paysanne a été employée (1/3 de poquets associés et 2/3 de poquets en pure sorgho sur 3, GANEME et al., 2021). Chaque répétition du dispositif était composée de huit parcelles élémentaires dont quatre parcelles en association et quatre en culture pure.

Les semis ont été effectués le 13 juillet en 2017 et le 16 juillet en 2018. Un comptage du nombre de poquets levés a été effectué à 7 jours après semis (JAS) suivi d'un ré-semis. Les écartements ont été de 80cm entre les lignes et 40cm entre les poquets. Les plants ont été démariés à deux par poquet. Dans les poquets associés, le démariage a été fait à un plant de sorgho et un plant de niébé. Les deux modalités d'association utilisées dans cette étude ont été de type substitutif. Ainsi, les densités ont été de 62500 (100%) plantes/ha en culture pure, de 31250 (50%) plantes/ha en association en interligne pour chaque espèce. En association dans le même poquet, les densités ont été de 51875

plantes/ha (83%) pour le sorgho et de 10625 plantes/ha (17%) pour le niébé. L'entretien des cultures a consisté à sarcler manuellement les parcelles à l'aide de la daba. Le premier sarclage, suivi d'un démariage/repiquage a été effectué à 14 JAS en 2017 et 15 JAS en 2018. Le deuxième sarclage a eu lieu à 33 JAS en 2017 et 35 JAS en 2018. Par ailleurs, des arrachages manuels de mauvaises herbes ont été effectués à 47 JAS en 2017 et 52 JAS en 2018. Afin d'avoir des rendements potentiels des cultures (nécessaire à la calibration du modèle), les parcelles ont été fertilisées (apport localisé au poquet) avec de l'engrais NPK 14-23-14 à la dose de 100 kg/ha, correspondant à 14 kg/ha d'azote, 23 kg/ha de Phosphore et 14 kg/ha de potassium. L'apport a été fait au moment du premier sarclage. Une deuxième fertilisation à base d'urée (46% d'azote) à la dose de 50 kg/ha, correspondant à 23 kg/ha d'azote, a été effectuée à 47 JAS en 2017 et 52 JAS en 2018, sur les parcelles pures sorgho.

#### **I.1.4. Collecte des données**

Les principales dates phénologiques des deux cultures ont été collectées. Pour le sorgho, les dates où 50% de plants ont atteint les stades feuille drapeau (FD), floraison et maturité physiologique ont été notées. Pour le niébé, ce sont les dates d'apparition de la première fleur, de la première gousse et de la première gousse mature. Au niveau morphologique, un comptage du nombre de feuilles apparues du sorgho a été fait tous les 14 jours à partir de 30 JAS et ce, jusqu'au stade feuille drapeau du sorgho. Les mesures ont été effectuées sur quatre plants déterminés aléatoirement sur chaque parcelle. Une évaluation de la biomasse des deux cultures a été faite à 32 JAS, au stade FD du sorgho et à la récolte. Pour les deux premières mesures, les prélèvements ont porté sur quatre poquets préalablement identifiés dans chaque parcelle élémentaire. La biomasse à la récolte, ainsi que les rendements en grains du sorgho et du niébé ont été estimés à partir du carré de rendement. Le carré de rendement délimité à partir des lignes et poquets centraux pour chaque parcelle élémentaire, était d'une superficie de 7,68 m<sup>2</sup> (3,2 m x 2,4 m). Les récoltes du niébé ont été effectuées de 64 à 89 JAS en 2017 et de 74 à 89 JAS en 2018. Pour le sorgho, les récoltes ont eu lieu à 102 JAS et 108 JAS pour la variété locale et à 121 et 120 JAS pour la variété améliorée, respectivement en 2017 et 2018.

## **I.2. Modélisation**

### **I.2.1. Calibration et validation du modèle STICS**

Le modèle de culture STICS (Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard) a été utilisé dans cette étude, car c'est l'un des rares modèles de culture permettant de simuler des associations de cultures (Brisson et al., 2008; Coucheney et al., 2015; Berghuijs et al., 2020). Le modèle est également connu pour sa finalité agro-environnementale, son adaptabilité à diverses cultures et sa robustesse résultant des paramétrages effectués dans diverses conditions pédologiques et météorologiques (Launay et al., 2009; Falconnier et al., 2019).

Le modèle a été calibré en utilisant les données d'expérimentation de Saria 2018 en culture pure, qui a été la situation culturale la plus optimale sur les deux campagnes d'expérimentation (meilleures pluviométrie et rendements des cultures). Les données de Saria 2017 et de Saria 2018 en association de cultures ont donc été utilisées pour l'évaluation du modèle. L'évaluation a porté sur les dates de floraison et maturité, le nombre de feuilles, les biomasses ainsi que les rendements en grains des deux cultures.

La calibration était basée sur les paramètres de plante (sorgho vs niébé) et de génotype (Grinkan vs Roukou et Beng-raaga vs Kvx 745-11P) observés dans le système de culture en pure (Tableau II). Les paramètres génotypiques utilisés pour la calibration ont été choisis pour leur forte influence sur les sorties du modèle (FALCONNIER et al., 2019), tout en tenant compte de la disponibilité des données observées. La calibration a été effectuée en trois étapes : (1) calibration des stades phénologiques, (2) des rendements en biomasse et (3) des rendements en grains. Pour les paramètres (sensibilité à la photopériode) dont nous ne disposons pas de données observées, les valeurs issues des travaux de TRAORÉ et al. (2022) au Mali, portant sur des variétés similaires aux nôtres ont été utilisées.

Pour des raisons de comparaison entre les systèmes de culture, toutes les simulations ont été faites en utilisant les mêmes formalismes en pure qu'en association conformément aux recommandations de BRISSON et al. (2008).

Tableau II : Paramètres utilisés pour la calibration du modèle (NA = non applicable)

Processus simulés	Variables ciblées	Paramètres					Valeurs utilisées dans la calibration			
		Acronymes	Descriptions	Unités	Valeurs minimales	Valeurs maximales	Sorgho amélioré	Sorgho local	Niébé amélioré	Niébé local
Développement de la culture	Phénologie	Stlevdrp	Temps thermique cumulé entre la levée et le début du remplissage des grains	degré jour	0	6000	1200	685	900	1000
		Stflodrp	Temps thermique cumulé entre la floraison et le début du remplissage des grains	degré jour	0	500	150	60	250	250
		Stdrpmat	Temps thermique cumulé entre le début du remplissage des grains et la maturité physiologique	degré jour	0	2000	400	500	400	400
		sensiphot	Sensibilité à la photopériode (1=insensible)	SU	0	1	0,6	0,1	NA	NA
Accumulation de biomasse	Biomasse	efcroijuv	Efficacité maximale d'utilisation du rayonnement pendant la phase juvénile	g.MJ <sup>-1</sup>	1	7	1	1,5	1,15	1,15
		Hautmax	Hauteur maximale	m	0,5	5	2	4	0,50	0,25
		Phyllothern	Durée thermique nécessaire à l'apparition de deux feuilles successives sur la même tige	degré jour	10	150	50	45	42	42
Partitionnement de la biomasse entre les organes		Slamax	SLA maximale des feuilles vertes	cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	50	2,50E+08	180	200	250	250
		Slamin	SLA minimale des feuilles vertes	cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	0	500	140	180	140	70
		tigefeuille	Rapport biomasse des tiges sur celle des feuilles	SU	0	3	2,19	3	0	0
Formation du rendement en grains	Rendement en grains	Irmx	Indice de récolte maximal	SU	0,2	1	0,25	0,3	0,65	0,55
		Cgrain	Pente de la relation entre le nombre de grains et le taux de croissance	nb grains. g <sup>-1</sup> . m <sup>2</sup>	0,01	1	0,045	0,025	0,25	0,25
		Pgrainmaxi	Poids maximal d'un grain	g	0	5	0,016	0,02	0,25	0,2
		nbgrmax	Nombre maximal de grains	nb grains.m <sup>2</sup>	0	1000000	11372	25000	1200	1200

### I.2.2. Analyse de scenario

L'effet du changement climatique sur les rendements des cultures en fonction des variétés et des systèmes de culture a été évalué pour le milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2050, climat futur) et comparé avec le climat de 2018 (climat présent). Par ailleurs, l'analyse a porté sur deux projections de concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> (Representative Concentration Pathways (RCP) en anglais) et cinq modèles climatiques (Global Circulation Models (GCM) en anglais), afin de prendre en compte les incertitudes liées aux différents modèles climatiques (CORBEELS et al., 2018). Les RCP 4.5 et 8.5 ont été utilisés dans cette analyse conformément aux travaux de RUANE et MCDERMID (2017) et ADAM et al. (2020b). Cinq GCM pertinents pour notre zone d'étude ont été sélectionnés parmi les 17 disponibles sur le site, conformément à la méthode des quadrants proposée par RUANE et MCDERMID (2017) pour représenter le mieux les scénarii climatiques futurs : froid-humide (MIROC5 = -0,21°C et +30,2% de pluies), froid-sec (MRICGCM3 = +0,83°C et -12,5%), intermédiaire (GFDLESM2M = +1,2°C et +2,5%), chaud-humide (IPSLCM5AMR = +2,4°C et +24,9%) et chaud-sec (CSIROMK360 = +1,84°C et -25,9%). Pour chacun des GCM sélectionnés, 10 répétitions par année et par RCP ont été utilisées pour la création de fichiers climat pour le modèle STICS, afin de prendre en compte l'effet de la variabilité climatique et de l'incertitude de prédiction des modèles (ADAM et al., 2020a).

### I.2.3. Analyse des données

La performance du modèle a été appréciée selon différents indices, qui permettent de mesurer la qualité de l'ajustement du modèle aux observations (COUCHENEY et al., 2015; FALCONNIER et al., 2019). Les indices utilisés dans cette étude ont été l'erreur quadratique moyenne (RMSE Root Mean Square error), l'erreur quadratique moyenne normalisée (NRMSE Normalized Root Mean Square error) et le coefficient de variation (CV). Le CV a été calculé pour chaque variété, selon le système de culture, en tenant compte des saisons interannuelles et des répétitions de chaque essai par saison.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2} \quad (1)$$

$$\text{NRMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{O_i - S_i}{O_i} \right)^2} * 100 \quad (2)$$

$$CV = \frac{\sqrt{\left(\frac{\sum (O_i - \bar{O})^2}{n}\right)}}{\bar{O}} * 100 \quad (3)$$

Avec  $O_i$  = valeurs observées,  $S_i$  = valeurs simulées,  $\bar{O}$  = moyenne des valeurs observées et  $n$  = nombre d'observations

Le RMSE (même unité que la variable considérée) et sa normalisée (en %), mesurent l'ampleur de l'erreur du modèle, c'est-à-dire la différence relative entre les données simulées et observées (AKINSEYE et al., 2017). Selon JAMIESON et al. (1991), la simulation est jugée excellente si  $NRMSE < 10\%$ , bonne si  $10\% < NRMSE \leq 20\%$ , passable si  $20\% < NRMSE \leq 30\%$  et mauvaise si le  $NRMSE > 30\%$ . Par ailleurs, les prédictions du modèle sont également jugées acceptables lorsque l'erreur de prédiction (NRMSE) est comprise dans l'erreur d'observation (CV) (NDIAYE, 2019).

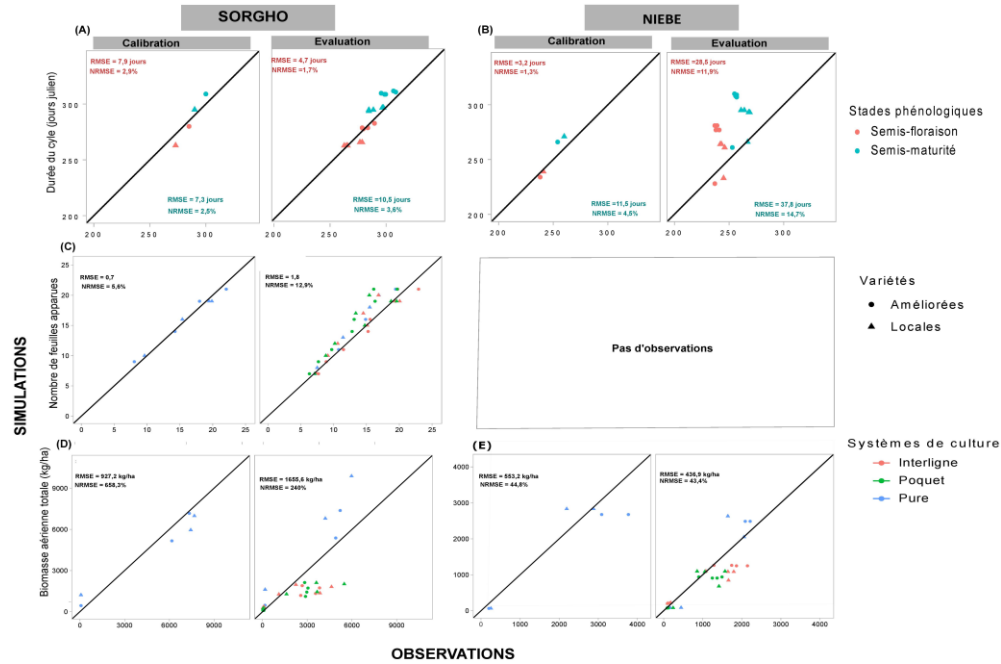
Afin d'évaluer la stabilité des rendements de culture avec les conditions climatiques futures, des coefficients de variation ont été calculés pour chaque système de culture par variété et par RCP, en tenant compte des répétitions pour chaque modèle. Par ailleurs, les changements relatifs (futur -présent) \*100/présent) de rendements en grains ont été calculés, par modèle, RCP, système de culture et variété.

## II. Résultats

### II.1. Calibration et évaluation du modèle

La simulation des stades phénologiques (floraison et maturité) a été satisfaisante en calibration et en évaluation avec des  $NRMSE \leq 5\%$  pour le sorgho (Figure 1) et des  $NRMSE \leq 15\%$  pour le niébé (Figure 1A, B). Les erreurs de prédiction du nombre de feuilles ont été de 5,6% (RMSE = 0,8) en calibration et 13% en évaluation (RMSE = 1,8) (Figure 1C). La dynamique d'apparition des feuilles (phyllochrone) a ainsi été bien simulée par le modèle. Considérant les variétés, les prédictions ont été satisfaisantes à 6,9% (RMSE = 0,9) et 11,9% (RMSE = 1,7) pour la variété améliorée et 3,7% (RMSE = 0,6) et 14% (RMSE = 2) pour la locale, respectivement en validation et en évaluation. Pour ce qui est des systèmes de culture, le modèle simule les mêmes nombres de feuilles à chaque mesure pour les deux modalités d'association, alors que des différences ont été constatées au niveau des observations (Figure 1C). Concernant la biomasse à maturité du sorgho, la simulation a été satisfaisante en calibration avec une erreur relative (NRMSE) de

6,6%. L'erreur de prédiction a été plus élevée en évaluation (NRMSE = 46,7%). Mais ces erreurs de prédiction ont été comprises dans celles d'observation (CV) qui ont varié de 25% à 42% pour le sorgho amélioré et de 21% à 46% pour le local (Figure 1D).

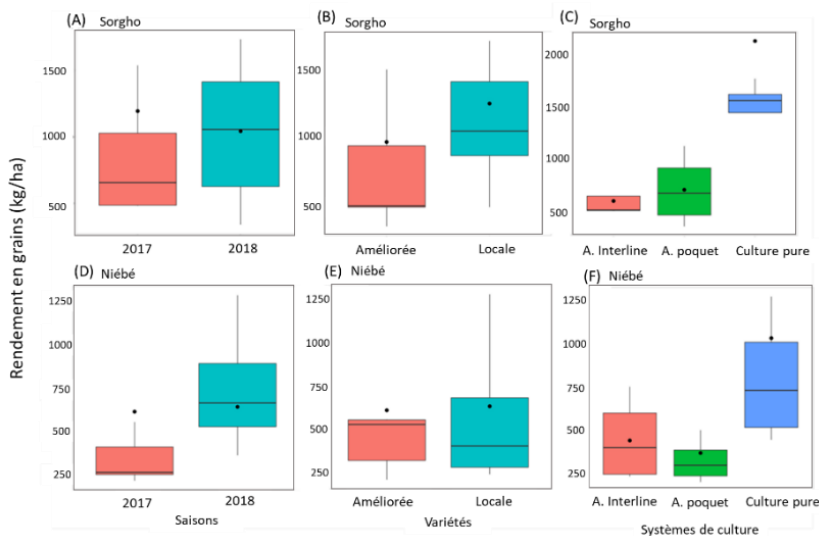


**Figure 1:** Comparaison des données observées et simulées par STICS pour les stades phénologique (A, B), le nombre de feuilles (C) du sorgho et la biomasse (D, E) en calibration et évaluation.

RMSE = Root Mean Square Error (erreur de prédiction), NRMSE = Relative Root Mean Square Error. Le trait correspond à la ligne 1 : 1.

Le modèle a bien simulé le rendement en grains du sorgho avec des NRMSE (15,8% en calibration et 43,8% en évaluation) comprises dans les erreurs d'observation (CV). Les CV ont été compris entre 37% et 55% pour la variété améliorée, entre 19% et 46% pour la variété locale. En outre, le modèle a correctement simulé les différences variétales avec des rendements plus élevés du sorgho local, contrairement aux différences entre les saisons (Figure 2A, B). Concernant les systèmes de culture, tout comme les observations, les rendements simulés en culture pure ont été supérieurs à ceux obtenus en association. Mais contrairement aux données observées, le modèle a simulé des rendements en grains plus élevés en association dans le même poquet qu'en interligne pour le sorgho amélioré. Pour le sorgho local, le modèle a simulé de meilleurs rendements en grains en association dans le même poquet, ce qui est en accord avec les données observées. Par ailleurs, le modèle a tendance à surestimer les rendements en grains du sorgho en culture pure contrairement aux associations (Figure 2C).

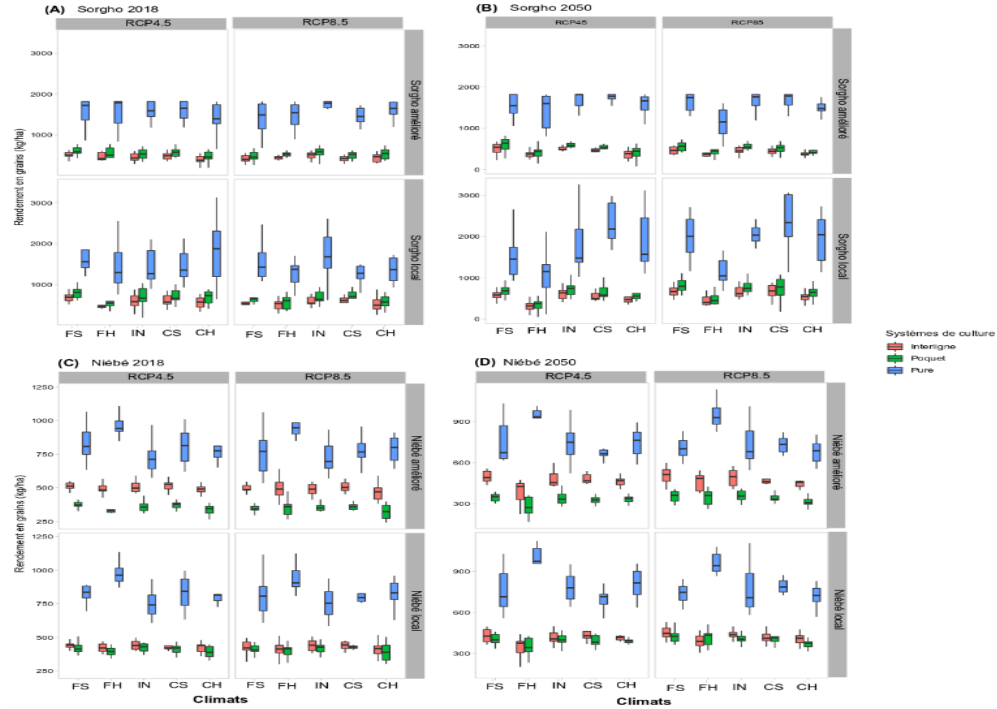
Pour ce qui est des rendements en grains du niébé, les performances du modèle ont été satisfaisantes en calibration (RMSE = 145 kg/ha ; NRMSE = 12,9%). En évaluation, l'erreur de prédiction a été supérieure à 30% (RMSE = 277kg/ha) ; toutefois elle est comprise dans les erreurs d'observations qui ont varié de 32% à 55% pour le niébé amélioré et de 39% à 64% pour le niébé local. En évaluation, les rendements en pure ont été surestimés par le modèle, alors qu'une partie des rendements en association a été sous-estimée. Par ailleurs, les différences de rendements observées entre les deux années expérimentales (Figure 2D) et les variétés (Figure 2E) n'ont pas été bien reproduites par le modèle. Toutefois, le modèle a bien simulé les différences entre les systèmes de cultures. Ainsi, conformément aux données observées, les rendements simulés ont été plus élevés en culture pure, suivi de l'association en interligne et de celle dans le même poquet (Figure 2 F).



**Figure 2** : Comparaison des rendements en grains simulés (points) et observés (boîte à moustache) en fonction des saisons, des variétés et des systèmes de culture. La calibration et l'évaluation sont représentées ensemble.

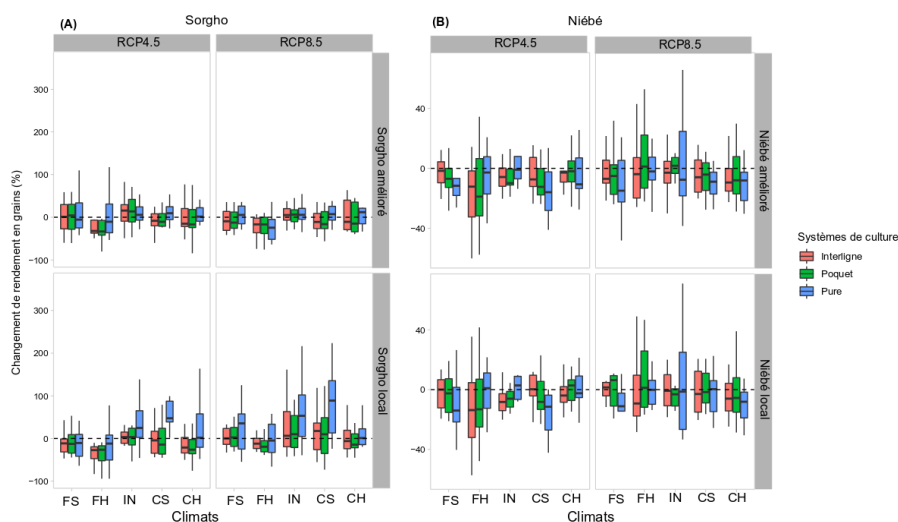
## II.2. Analyse de scenario

Les rendements en grains simulés par STICS pour le milieu du siècle (2050) ont été plus élevés sous RCP8.5 pour le sorgho local, contrairement au sorgho amélioré où les rendements ont été meilleurs sous RCP4.5 dans l'ensemble des systèmes de cultures (Figure3). Par ailleurs, indépendamment du RCP et du système de culture, les rendements en grains simulés ont été meilleurs pour la variété locale (513 - 1932 kg/ha) comparativement à celle améliorée (415 – 1583 kg/ha). Les rendements simulés en 2050 ont été également plus élevés en culture pure (1500 – 2000 kg/ha) qu'en association (410 – 700kg/ha) pour les deux variétés. Les rendements simulés en 2018 pour les deux variétés ont varié en moyenne de 1500 kg/ha à 1600 kg/ha en culture pure et de 440 kg/ha à 700kg/ha en association. Pour l'ensemble des systèmes de culture et des variétés de sorgho, le climat futur relativement froid-humide a été le plus défavorable pour les rendements du sorgho avec des réductions de plus de 45%, tandis que les meilleures performances des deux variétés ont été majoritairement enregistrées sous le climat froid-sec avec des augmentations moyennes de rendements allant de +15% à +108% (Figure 3).



**Figure 3 :** Rendements en grains du sorgho et du niébé, simulés en fonction des années, des RCP et des climats. FS = froid-sec, FH = froid-humide, IN = intermédiaire, CS = chaud-sec, CH = chaud-humide

Les rendements en grain du sorgho local ont été plus stables en association qu'en culture pure, contrairement à la variété améliorée (dispersion de la boxplot Figures 3-4). En effet, indépendamment du RCP, les CV simulés pour le sorgho amélioré en association de culture (CV moyen  $\geq 24\%$ , selon les modèles) ont été supérieurs à ceux de la culture pure (CV  $\leq 20\%$ ) (Figure 2). Inversement, pour le sorgho local, la variation des rendements a été plus importante en culture pure (CV  $\geq 34\%$ ) qu'en association (CV  $\leq 28\%$ ). Comparant les deux modalités d'association, la variabilité des rendements a été plus élevée en association dans le même poquet pour les deux variétés (Figures 3-4).



**Figure 4 :** Changements des rendements simulés en grains entre 2018 et 2050, selon les RCP et les climats. FS = froid-sec, FH = froid-humide, In = intermédiaire, CS = chaud-sec, CH = chaud-humide

### III. Discussion

#### Évaluation des performances du modèle

Avant d'utiliser le modèle pour l'analyse climatique, nous avons évalué sa capacité à reproduire correctement les variables d'intérêt comme la phénologie, la morphologie et les rendements des différentes variétés, en fonction des systèmes de culture. Dans l'ensemble, le modèle STICS a correctement reproduit les dates de floraison et de maturité des variétés, ainsi que le nombre de feuilles apparue du sorgho, avec de faibles NRMSE. Des résultats similaires ont été rapportés avec STICS par TRAORÉ et al. (2022) sur le sorgho et le niébé, et par

FALCONNIER et al. (2019) sur la féverole. Concernant les rendements en biomasse, la simulation a donné des résultats acceptables de la biomasse à la récolte des deux cultures, avec des NRMSE comprises dans les erreurs d'observation. Toutefois, la dynamique de la biomasse nécessite une amélioration au regard des erreurs de prédiction élevées. En effet, STICS a tendance à surestimer la biomasse des cultures, du fait des réserves (RESPERENNE) importantes générées par le modèle. L'amélioration de la simulation de la biomasse pourrait se faire à travers celle de la hauteur des plants car dans STICS, la hauteur de la plante joue un rôle important dans l'interception de la lumière et l'accumulation de la matière sèche (LAUNAY et al., 2009). Enfin, cette étude a montré la capacité de STICS à simuler correctement les rendements en grains du sorgho et du niébé avec des NRMSE  $\leq 30\%$  et/ou comprises dans les erreurs d'observation à la fois pour des systèmes améliorés et des systèmes cultivés au Burkina Faso. Notre travail procure une première calibration et évaluation du modèle STICS en fonction des variétés et des systèmes de cultures dans des conditions pluviales du Burkina Faso. Nous avons montré la capacité du modèle à reproduire correctement la phénologie du sorgho et du niébé, le nombre de feuilles du sorgho, ainsi que les rendements en grains des deux cultures. Ces résultats montrent la capacité du modèle à allouer les ressources différemment aux composantes de l'association, comme rapporté par CHIMONYO et al. (2016) avec le modèle APSIM. Néanmoins une amélioration de la simulation des différences de rendements entre les systèmes de culture s'avère encore nécessaire, notamment entre la culture pure et l'association en interligne.

### **Effet des climats futurs sur la productivité des variétés selon les systèmes de culture**

Nos simulations ont montré que les rendements des deux variétés de sorgho en culture pure connaîtraient des augmentations à l'horizon 2050, contrairement au niébé où des réductions de rendements ont été majoritairement simulées (Figure 3). Les changements trouvés dans notre étude pour le sorgho (-32% à +107,6%) ont été plus importants que ceux rapportés par Sultan et al. (2014) et ADAM et al. (2020b) en Afrique de l'Ouest. En outre, contrairement aux observations de gains de rendements faites sur le sorgho en culture pure, SULTAN et al. (2014) ont simulé des pertes de rendement de -14% à -29% dans la partie Ouest du sahel Africain, et des changements de rendement variant de -13% à +7% dans le centre du sahel. Au niveau des systèmes associés, les changements simulés ont été mitigés en fonction des

modèles et des RCP aussi bien pour le sorgho, que pour le niébé. Les changements de rendements du sorgho en association ont été positifs sous RCP8.5 et négatif sous RCP 4.5 pour la variété locale, contrairement au sorgho amélioré. Pour le niébé en association, des augmentations de rendements ont été simulées sous RCP8.5 alors que des pertes de rendements ont été simulées sous RCP4.5.

Nonobstant, ces changements de rendements mitigés en association pour les deux cultures, la présente étude a montré que l'association de cultures a permis de mieux stabiliser les rendements en grains du sorgho et du niébé avec des CV majoritairement plus faibles que ceux en culture pure. Parmi les deux modalités d'associations, l'association en interligne a été plus stable que celle dans le même poquet, aussi bien pour le sorgho que pour le niébé, contrairement à nos hypothèses. En effet, selon les producteurs de la zone d'étude, l'association dans le même poquet permet de mieux gérer les terres et stabiliser les rendements que celle en interligne (GANEME et al., 2021).

Comparant les variétés, les performances (rendement) du sorgho local simulées pour le climat futur ont été meilleures que celle de la variété améliorée. Toutefois, la variabilité des rendements a été plus faible avec la variété améliorée, du fait de sa faible sensibilité à la photopériode (SULTAN et al., 2014). Ces auteurs ont montré que les variétés de sorgho à cycle court et presque fixe (insensible à la photopériode), sont plus résistantes aux climats futurs en Afrique de l'Ouest. Cependant, le bénéfice de la photopériode est diversement apprécié (SULTAN et al., 2013; SINGH et al., 2017). L'utilisation de variétés à cycle court, pourrait être considérée comme une adaptation aux changements climatiques, notamment aux poches de sécheresse de fin de saison. Cela pourrait également justifier le fait que dans l'ensemble, les changements de rendements du niébé ont été moins importants que ceux du sorgho, la durée du cycle du niébé étant plus courte que celle du sorgho.

## **Conclusion**

Notre travail procure une première calibration et évaluation du modèle STICS en fonction des variétés et des systèmes de cultures dans des conditions pluviales au Burkina Faso. Globalement, la présente étude a montré la capacité du modèle à reproduire correctement (i) les différences de rendements entre le sorgho et le niébé, (ii) entre la culture pure et les associations de cultures.

Les changements de rendements simulés pour le climat futur ont été majoritairement positifs en culture pure pour les deux cultures, alors qu'en association culturale, ces changements ont été mitigés en fonction des modèles climatiques et des RCP. Les rendements des cultures ont été favorisés sous le climat futur relativement froid-sec, contrairement au climat froid-humide qui a été le plus défavorable pour les cultures. Par ailleurs, les rendements des cultures ont été plus stables en association pour la majorité des variétés.

## Références bibliographiques

ADAM M., BOOTE K. J., FALCONNIER G. N., PORTER C. H., EYSHI REZAEI E., WEBBER H., 2020a. *In* Climate Change and Agriculture. *Édité par* D. (ed. . Deryng burleigh dodds, Science Publishing. p. 465-489 doi:10.1016/B978-0-444-63524-2.00028-2.

ADAM M., MACCARTHY D. S., TRAORÉ P. C. S., NENKAM A., FREDUAH B. S., LY M., ADIKU S. G. K., 2020b. Which is more important to sorghum production systems in the Sudano-Sahelian zone of West Africa: Climate change or improved management practices? *Agricultural Systems*, 185: 102920 Elsevier doi:10.1016/j.agsy.2020.102920.

AKINSEYE F. M., ADAM M., AGELE S. O., HOFFMANN M. P., TRAORE P. C. S., WHITBREAD A.M., 2017. Assessing crop model improvements through comparison of sorghum (*sorghum bicolor* L. moench) simulation models: A case study of West African varieties. *Field Crops Research*, 201: 19-31 Elsevier B.V. doi:10.1016/j.fcr.2016.10.015.

BERGHUIJS H. N. C., WANG Z., STOMPH T. J., WEIH M., VAN DER WERF W., VICO G., 2020. Identification of species variables enhancing yield in wheat-faba bean intercropping : development and sensitivity analysis of a minimalist mixture model. *Plant Soil*, 455: 203-226 doi:https://doi.org/10.1007/s11104-020-04668-0.

BRISSON N., LAUNAY M., MARY B., BEAUDOIN N., 2008. *In* *Editons Qu* 301 p. Available à l'adresse <http://www.quae.com/en/r1291-conceptual-basis-formalisations-and-parameterization-of-the-stics-crop-model.html>.

CHIMONYO V. G. P., MODI A. T., MABHAUDHI T., 2016. Assessment of sorghum – cowpea intercrop system under water- limited conditions using a decision support tool. *Water SA*, 42: 316-327

doi:org/10.4314/wsa.v42i2.15.

CORBEELS M., BERRE D., RUSINAMHODZI L., LOPEZ-RIDAURA S., 2018. Can we use crop modelling for identifying climate change adaptation options? *Agricultural and Forest Meteorology*, 256-257: 46-52 Elsevier doi:10.1016/j.agrformet.2018.02.026.

COUCHENEY E., BUIS S., LAUNAY M., CONSTANTIN J., MARY B., GARCÍA DE CORTÁZAR-ATAURI I., RIPOCHE D., BEAUDOIN N., RUGET F., ANDRIANARISOA K.S., LE BAS C., JUSTES E., LÉONARD J., 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. *Environmental Modelling and Software*, 64: 177-190 doi:10.1016/j.envsoft.2014.11.024.

FALCONNIER G. N., JOURNET E. P., BEDOUSSAC L., VERMUE A., CHLÉBOWSKI F., BEAUDOIN N., JUSTES E., 2019. Calibration and evaluation of the STICS soil-crop model for faba bean to explain variability in yield and N<sub>2</sub> fixation. *European Journal of Agronomy*, 104: 63-77 Elsevier doi:10.1016/j.eja.2019.01.001.

FAYE B., WEBBER H., NAAB J. B., MACCARTHY D. S., ADAM M., EWERT F., LAMERS J. P. A., SCHLEUSSNER C. F., RUANE A., GESSNER U., HOOGENBOOM G., BOOTE K., SHELIA V., SAEED F., WISSER D., HADIR S., LAUX P., GAISER T., 2018. Impacts of 1.5 versus 2.0 °C on cereal yields in the West African Sudan Savanna. *Environmental Research Letters*, 13: 034014 doi:10.1088/1748-9326/aaab40.

FRISON E. A., CHERFAS J., HODGKIN T., 2011. Agricultural biodiversity is essential for a sustainable improvement in food and nutrition security. *Sustainability*, 3: 238-253 doi:10.3390/su3010238.

GANEME A., DOUZET J., TRAORE S., DUSSERRE J., KABORE R., TIROGO H., NABALOU M. 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 : état des lieux et pistes d'amélioration. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 31: 836-848 Available à l'adresse <http://www.ijias.issr-journals.org/>.

GANEME A., KONDOMBO C. P., RABOIN L-M., DUSSERRE J., KABORE R., ADAM M., TRAORÉ S., 2022. Characterizing sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) varieties diversity to identify those

with contrasting traits of interest for intercropping systems in the Sudano-Sahelian zone of West Africa . *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*,: 1-11 doi:10.1017/s1479262122000168.

IPCC, 2021. *In* *Ipcc* Cambridge University Press. In Press. 159 p. Available à l'adresse [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_TS.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf).

JAMIESON P. D., PORTER J. R., WILSON D. R., 1991. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Research*, 27: 337-350 doi:10.1016/0378-4290(91)90040-3.

LAUNAY M., BRISSON N., SATGER S., HAUGGAARD-NIELSEN H., CORRE-HELLOU G., KASYNOVA E., RUSKE R., JENSEN E. S., GOODING M. J., 2009. Exploring options for managing strategies for pea-barley intercropping using a modeling approach. *European Journal of Agronomy*, 31: 85-98 doi:10.1016/j.eja.2009.04.002.

NDIAYE M., 2019. Modélisation d'idéotypes variétaux de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) sur la base de la caractérisation du fonctionnement et du potentiel de sorghos multi-usages au Sénégal. Thèse de Doctorat Unique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 175 p.

NELSON R., COE R., HAUSSMANN B. I. G., 2016. Farmer research networks as a strategy for matching diverse options and contexts in smallholder agriculture. *Experimental Agriculture*, 55: 125-144 doi:10.1017/S0014479716000454.

RASEDUZZAMAN M., JENSEN E. S., 2017. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 91: 25-33 Elsevier doi:10.1016/j.eja.2017.09.009.

ROUDIER P., SULTAN B., QUIRION P., BERG A., 2011. The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global Environmental Change*, 21: 1073-1083 Elsevier Ltd doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007.

RUANE A. C., MCDERMID S.P., 2017. Selection of a representative subset of global climate models that captures the profile of regional changes for integrated climate impacts assessment. *Earth Perspectives*,

4: 1 doi:10.1186/s40322-017-0036-4.

SINGH P., BOOTE K.J., KADIYALA M. D. M., NEDUMARAN S., GUPTA S. K., SRINIVAS K., BANTILAN M. C. S., 2017. An assessment of yield gains under climate change due to genetic modification of pearl millet. *Science of the Total Environment*, 601-602: 1226-1237 The Authors doi:10.1016/j.scitotenv.2017.06.002.

SULTAN B., GAETANI M., 2016. Agriculture in West Africa in the twenty-first century: Climate change and impacts scenarios, and potential for adaptation. *Frontiers in Plant Science*, 7: 1-20 doi:10.3389/fpls.2016.01262.

SULTAN B., GUAN K., KOURESSY M., BIASUTTI M., PIANI C., HAMMER G. L., MCLEAN G., LOBELL D. B., 2014. Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa. *Environmental Research Letters*, 9: 104006 IOP Publishing doi:10.1088/1748-9326/9/10/104006.

SULTAN B., ROUDIER P., QUIRION P., ALHASSANE A., MULLER B., DINGKUHN M., CIAIS P., GUIMBERTEAU M., TRAORE S., BARON C., 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters*, 8: 014040 doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040.

TITTONELL P., GILLER K. E., 2013. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crops Research*, 143: 76-90 Elsevier B.V. doi:10.1016/j.fcr.2012.10.007.

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 Contents doi:10.1016/j.fcr.2022.108581.