

Adaptation des hybrides de sorgho en zone soudano-sahélienne au Mali

Bocar DIALLO^{1*}, Abdoulaye DIALLO¹, Yacouba KANE¹, Issa TRAORE¹,
Adama DIALLO¹ et Chiaka DIALLO²

¹ *Institute of Rural Economy (IER), Sotuba Agronomic Research Center, PO Box : 262, Bamako, Mali*

² *Rural Polytechnic Institute for Training and Applied Research (IPR/IFRA)*

(Reçu le 10 Avril 2026 ; Accepté le 23 Juillet 2026)

* Correspondance, courriel : bocadiall@yahoo.fr

Résumé

La productivité du sorgho reste entravée par la variabilité climatique et la fréquence des stress hydriques dans la zone soudano-sahélienne au Mali. Cette étude a évalué la performance agronomique et l'adaptation de 38 hybrides de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), comparés au témoin Fadda dans trois stations expérimentales (Sotuba, Kolombada et Cinzana) au cours des campagnes agricoles 2022 et 2023. Le dispositif expérimental, de type alpha-lattice à deux répétitions, a permis de déterminer le rendement en grain, le rendement en paille ainsi que l'indice d'adaptation basé sur la synchronisation entre les floraisons et la fin de la saison pluvieuse. Les résultats révèlent des différences très significatives entre les hybrides et les environnements pour l'ensemble des caractères étudiés. Les rendements en grains enregistrés ont varié de 842 à 4937 kg/ha, avec des gains de 10 à 57% par rapport au témoin selon les sites. Les rendements en paille ont également enregistrés des améliorations notables, atteignant 19 à 98% de gain. Les hybrides 104P1-2A/021-ECS-71, ICSA176003/021-ECS-25 et 104P3-2A/021-ECS-82 se sont distingués par leur productivité élevée et leur stabilité inter-environnementale. L'analyse de l'indice d'adaptation révèle qu'un nombre important d'hybrides, tels que ICSA03/021-ECS-86 et 12A/021-ECS-81, ont présentés une large plasticité environnementale, contrairement à d'autres, trop tardifs dans les conditions semi aride de Cinzana. Ces résultats confirment le potentiel des hybrides de sorgho à améliorer durablement leur productivité et leur résilience contre les aléas climatiques dans les zones semi-arides du Mali. Toutefois, des efforts de sélection ciblés en fonction des conditions agro écologiques restent indispensables afin d'optimiser l'adaptation phénologique et la durabilité de la production.

Mots-clés : *Sorghum bicolor*, hybrides, adaptation, plasticité environnementale, zone soudano-sahélienne.

Abstract

Adaptation of sorghum hybrids in the Sudanian-Sahelian zone in Mali

Sorghum productivity remains hampered by climate variability and frequent water stress in the Sudanian-Sahelian zone of Mali. This study evaluated the agronomic performance and adaptability of 38 sorghum hybrids (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), compared to the Fadda control at three experimental stations (Sotuba, Kolombada, and Cinzana) during the 2022 and 2023 growing seasons. The experimental design, a two-replicates alpha-lattice pattern, allowed for the determination of grain yield, straw yield, and the adaptation index based on the

synchronization between flowering and the end of the rainy season. The results reveal highly significant differences between the hybrids and the environments for all the traits studied. Grain yields ranged from 842 to 4937 kg/ha, with gains of 10 to 57% compared to the control, depending on the site. Straw yields also showed notable improvements, reaching gains of 19 to 98%. The hybrids 104P1-2A/021-ECS-71, ICSA176003/021-ECS-25, and 104P3-2A/021-ECS-82 stood out for their high productivity and inter-environmental stability. Analysis of the adaptation index revealed that a significant number of hybrids, such as ICSA03/021-ECS-86 and 12A/021-ECS-81, exhibited broad environmental plasticity, unlike others that matured too late in the semi-arid conditions of Cinzana. These results confirm the potential of sorghum hybrids to sustainably improve their productivity and resilience to climate hazards in the semi-arid zones of Mali. However, targeted breeding efforts based on agro-ecological conditions remain essential to optimize phenological adaptation and production sustainability.

Keywords : *Sorghum bicolor*, hybrids, adaptation, environmental plasticity, Sudano-Sahelian zone.

1. Introduction

Le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) occupe la cinquième place parmi les grandes céréales cultivées dans le monde, après le blé, le riz, le maïs et l'orge, avec une production globale estimée à 57298318,42 tonnes sur 39851368 d'hectares avec un rendement moyen de 1437,8 kg/ha [1]. En Afrique de l'Ouest, cette culture constitue une ressource alimentaire essentielle pour des millions de ruraux, jouant un rôle essentiel dans la sécurité alimentaire et nutritionnelle régionale. Au Mali, la production de sorgho en 2023 était de 1528008 tonnes sur une superficie de 1632824 ha avec un rendement moyen de 935,8 kg/ha [1]. Toutefois, malgré sa valeur socio-économique, la productivité du sorgho demeure limitée : les rendements moyens restent inférieurs à 1 t/ha [2] principalement en raison de la variabilité climatique, de la dégradation des sols et de la forte prévalence de variétés locales robustes, mais moins performantes. Les épisodes de sécheresse, l'irrégularité des pluies et la sensibilité photopériodique représentent des contraintes majeures limitant la régularité des récoltes [3]. Face à ces défis, les programmes d'amélioration génétique visent à obtenir des hybrides à haut rendement, associant la vigueur des lignées exotiques à la résilience des variétés locales. Bénéficiant de l'hétérosis, ces hybrides peuvent générer des gains de productivité supérieurs à 30% par rapport aux variétés pures [4]. Les études conduites au Mali [3] et dans plusieurs pays sahéliens démontrent qu'une sélection combinant lignées locales et exotiques améliore la tolérance aux stress abiotiques et le potentiel de production. L'adaptation des variétés aux conditions locales reste toutefois un défi majeur. [2] l'ont souligné que la photopériodicité et la durée du cycle végétatif sont des déterminants essentiels de l'adaptation du sorgho aux différentes zones écologiques. La floraison d'une variété adaptée doit synchroniser avec la fin de la saison pluvieuse, généralement environ vingt jours avant l'arrêt des pluies [4]. Dans ce contexte, l'évaluation agronomique multi-environnementale constitue un outil indispensable pour identifier des hybrides à large adaptation ou à adaptation spécifique selon les conditions pédoclimatiques [6]. L'étude présentée ici vise donc à évaluer la performance agronomique et l'adaptabilité de 38 hybrides de sorgho testés dans trois environnements contrastés au Mali (Sotuba, Kolombada et Cinzana). L'objectif est d'identifier des génotypes capables de concilier haute productivité, stabilité de rendement et résilience climatique, en vue de renforcer la durabilité de la culture du sorgho dans la zone soudano-sahélienne.

2. Matériel et méthodes

2-1. Sites d'implantation des essais

L'étude a été conduite pendant deux campagnes agricoles (2022 et 2023) dans trois stations expérimentales représentatives de la zone soudano-sahélienne au Mali : Sotuba, Kolombada et Cinzana. Ces stations présentent des conditions agro-climatiques contrastées, permettant d'évaluer la stabilité des rendements et l'adaptabilité des hybrides dans différents contextes écologiques.

Tableau 1 : Caractéristiques des différents sites d'expérimentations des essais

N°	Sites	Isohyète (mm)	Type de sol	Coordonnées géographiques
1	Sotuba	800 - 1000	Limono-argileux / sablo-argileux	12°38' N, 7°56' W ; altitude 320m
2	Kolombada	600 - 800	Sablo- argileux / sablo limoneux	12°41' N, 7°59' W ; altitude 310 m
3	Cinzana	400-700	argileux et argilo- sableux	13°24' N, 5°98' W ; altitude 283 m

Ces trois sites ont été choisis afin de représenter un gradient de disponibilité hydrique et de fertilité des sols, facteurs clés de la variabilité de rendement du sorgho dans la région.

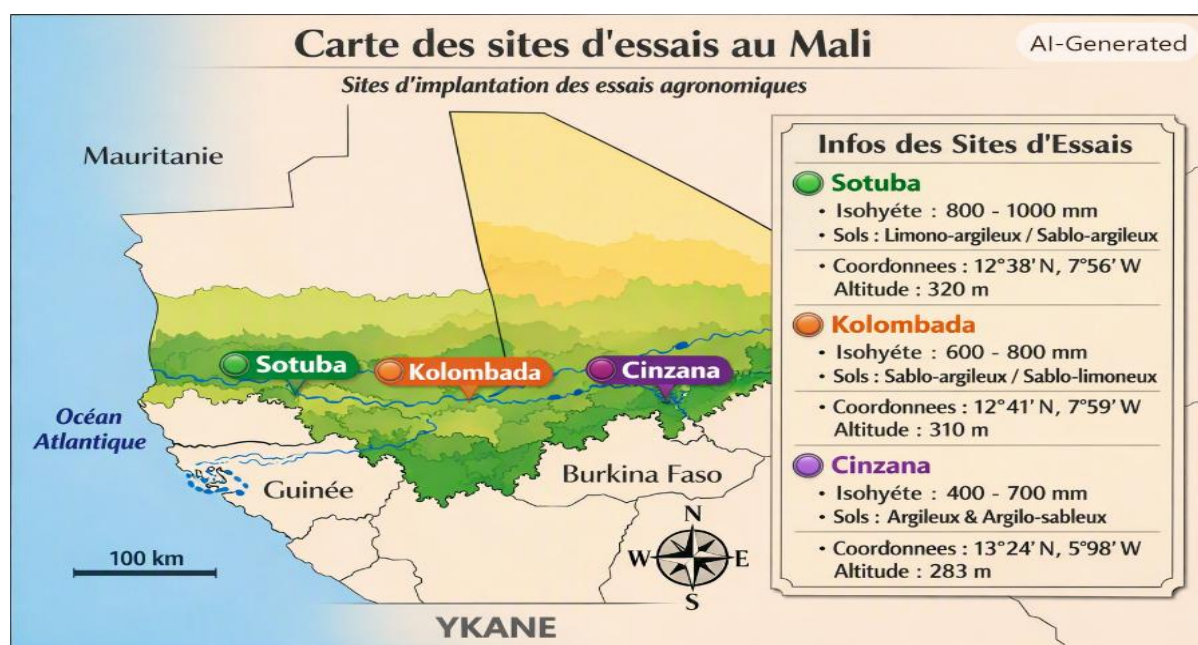


Figure 1 : Carte des sites d'essais

2-2. Matériel Végétal

Le matériel végétal était constitué de 38 hybrides F₁ de sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), issus de croisements entre lignées mâles stériles (A-lignes) et lignées restauratrices fertiles (R-lignes), sélectionnées pour leur complémentarité génétique. Ces hybrides ont été comparés à un témoin :

- Fadda, hybride connu pour sa bonne productivité actuellement très diffusé au Mali en même en production commerciale.

Les hybrides provenaient du Programme sorgho de l'Institut d'Économie Rurale (IER) dans le cadre du programme d'amélioration des sorghos adaptés aux zones semi arides et sèches du Mali.

Tableau 2 : Liste des hybrides F1 et témoins utilisés dans l'étude

N°	Hybride	N°	Hybride
1	104P1-2A/021-ECS-102	21	12A/021-ECS-102
2	104P1-2A/021-ECS-123	22	12A/021-ECS-123
3	104P1-2A/021-ECS-174	23	12A/021-ECS-25
4	104P1-2A/021-ECS-25	24	12A/021-ECS-43
5	104P1-2A/021-ECS-43	25	12A/021-ECS-71
6	104P1-2A/021-ECS-45	26	12A/021-ECS-81
7	104P1-2A/021-ECS-71	27	12A/021-ECS-82
8	104P1-2A/021-ECS-81	28	12A/021-ECS-86
9	104P1-2A/021-ECS-82	29	12A/021-EPDU-134
10	104P1-2A/021-ECS-95	30	ICSA176003/021-ECS-102
11	104P3-2A/021-ECS-102	31	ICSA176003/021-ECS-123
12	104P3-2A/021-ECS-174	32	ICSA176003/021-ECS-174
13	104P3-2A/021-ECS-25	33	ICSA176003/021-ECS-25
14	104P3-2A/021-ECS-43	34	ICSA176003/021-ECS-45
15	104P3-2A/021-ECS-45	35	ICSA176003/021-ECS-81
16	104P3-2A/021-ECS-71	36	ICSA176003/021-ECS-86
17	104P3-2A/021-ECS-82	37	ICSA176003/021-ECS-95
18	104P3-2A/021-ECS-86	38	ICSA176003/021-EPDU-134
19	104P3-2A/021-ECS-95		Témoin
20	104P3-2A/021-EPDU-134	39	Fadda

2-3. Méthologie

2-3-1. Dispositif expérimental et conduite culturale

Le dispositif expérimental est un alpha-lattice avec deux répétitions. Chaque parcelle était constituée de deux lignées de 3 m. Les écartements ont été 0,75 m entre les lignes et 0,30 m entre les poquets. Les semences ont préalablement été traitées avec le fongicide Apron Star à raison de 10 g pour 4 kg de semence, afin d'assurer la protection phytosanitaire à la levée.

2-3-2. Fertilisation

La fertilisation a été réalisée en deux étapes : un apport de 100 kg/ha du complexe 17-17-17 céréale a été effectué quinze jours après le semis, puis une fumure minérale d'entretien de 50 kg/ha d'urée a été appliquée au stade montaison pour soutenir la croissance végétative.

2-3-3. Paramètres mesurés

❖ Rendement (grain) en kg/ha

Il a été calculé à partir du poids grain enregistré dans chacune des parcelles élémentaires. Pour chaque parcelle élémentaire, le rendement parcellaire a été ramené au kg/ha. La **Formule** suivante a été utilisée :

$$RG \text{ (kg/ha)} = PGP/SP \quad (1)$$

RG = Rendement grain (en kg/ha) ; PP = poids grain parcellaire (kg) ; SP = surface parcellaire (m²).

❖ Rendement paille en kg/ha

Il a été calculé de la même manière que le précédent (rendement grain) avec comme **Formule** :

$$RG = (PPp/Sp) \quad (2)$$

RG : Rendement grain (en kg/ha) ; *PPp*= Poids Paille parcellaire (en kg) ; *Sp* = Surface parcellaire (m²).

❖ L'indice d'adaptation (I)

L' indice a été calculé suivant : [4]

$$I = DFS-SFD. \quad (3)$$

où, *DFS* est la date de fin de saison des pluies et *SFD* la date d'apparition de la feuille drapeau.

Si I < 0 : variété tardive ; *Si 0 ≤ I ≤ 20* : variété adaptée ; *Si I > 20* : variété précoce.

2-4. Analyse statistique

Une analyse de variance (ANOVA) a été effectuée par site à l'aide du logiciel GenStat (édition 12). Le modèle suivant a été :

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + R_j + B_{jk} + \varepsilon_{ijk} \quad (4)$$

où, *T_i* représente l'effet traitement, *R_j* la répétition, *B_{jk}* le bloc et *ε_{ijk}* l'erreur résiduelle.

3. Résultats

3-1. Performance des hybrides

3-1-1. Rendement grain (kg/ha)

L'analyse de variance a révélé des différences hautement significatives ($p < 0,001$) entre les hybrides et entre les environnements pour le rendement en grain (**Tableau 3**). Le coefficient de variation variait de 16,96 à 34,98 %, indiquant une variabilité importante liée à l'interaction génotype × environnement. Les rendements moyens enregistrés en général ont oscillé entre 842 et 4937 kg/ha selon les sites. A Sotuba, le rendement moyen enregistré a été 3238 kg/ha, avec des valeurs extrêmes allant de 2065 à 4535 kg/ha. A Kolombada, les rendements moyens enregistrés ont varié de 842 à 4937 kg/ha avec une moyenne de 2900 kg/ha. En revanche, à Cinzana, les rendements moyen enregistrés ont été plus faible (2033 kg/ha). Les gains en rendement grain enregistrés par rapport au témoin Fadda ont varié de -24 à +57 % (**Tableau 4**). Les hybrides 104P1-2A/021-ECS-71, ICSA176003/021-ECS-25 et 104P3-2A/021-ECS-82 ont présenté les gains les plus élevés (de +33 à +57 %). Ces résultats indiquent une forte hétérogénéité de la performance selon le contexte agro climatique, avec un potentiel de productivité plus élevé à Sotuba et Kolombada qu'à Cinz.

Tableau 3 : Analyse de variance de rendement grain et paille dans les localités de Sotuba, Kolombada et Cinzana

Paramètres	Environnement	Sources de variation					
		C.M	F.Cal	F pr.	PPDS	CV%	SE
Rendement grain kg/ha	Sotuba	1076498	3,87	<001	882,4	16,96	52,8
	Kolombada	960207	1,81	0,022	1167	26,09	728
	Cinzana	294731	0,69	0,0373	1334	34,98	653
Rendement paille kg/ha	Sotuba	2,7E+07	3,21	0,003	8609	36,96	2900
	Kolombada	4800759	0,75	0,008	4128	28,82	5228
	Cinzana	3190809	1,79	0,033	2308	28,99	1335

C.M = carré moyen des écarts ; *Fcal* = F calculé ; *Pr*, = probabilité ; *CV%* = coefficient de variation en pourcentage ; *PPDS*= plus petite différence significative ; *SE*= standard erreur.

Tableau 4 : Gain en rendement grain des meilleurs hybrides par rapport au témoin Fadda

Hybrides	Rendement grain (kg/ha)				
	SB	KO	CZ	Moyenne	Gain/MT
104P1-2A/021-ECS-71	4191	4233	3274	3899	57
ICSA176003/021-ECS-25	3833	2916	3507	3419	37
104P3-2A/021-ECS-82	3719	3328	2852	3300	33
104P1-2A/021-ECS-82	2613	4937	2095	3215	29
104P1-2A/021-ECS-25	2835	3811	2868	3171	27
104P1-2A/021-ECS-81	3690	4023	1738	3150	27
104P3-2A/021-ECS-45	3114	3345	2766	3075	24
ICSA176003/021-ECS-45	4535	2940	1657	3044	22
104P3-2A/021-ECS-174	3016	3929	2159	3035	22
ICSA176003/021-EPDU-134	3267	3342	2336	2982	20
ICSA176003/021-ECS-86	2722	3545	2623	2963	19
104P1-2A/021-ECS-43	3488	2483	2741	2904	17
104P3-2A/021-EPDU-134	3875	2959	1737	2857	15
104P1-2A/021-ECS-45	3181	2767	2560	2836	14
12A/021-ECS-71	2699	2782	2845	2775	12
104P3-2A/021-ECS-95	3765	2442	2043	2750	10
ICSA176003/021-ECS-174	3913	2007	2275	2732	10
Témoin					
Fadda	2868	2104	2495	2489	
Moyenne	3238	2900	2033		
Maximum	4535	4937	3298		57
Minimum	2065	842	313		-24

SB = Sotuba, KO = kolombada, CZ = Cinzana, MT : meilleur témoin

3-1-2. Rendement paille

Des différences significatives ($p < 0,01$) ont été enregistrées entre hybrides pour le rendement paille dans toutes les localités, avec des coefficients de variation compris entre 28,82 et 36,96 % (**Tableau 3**). Les rendements paille moyens enregistré à Sotuba ont été, 8022 kg/ha, 9272 kg/ha à Kolombada et 4607 kg/ha à Cinzana. A Sotuba, dix-sept hybrides ont produit entre 8932 et 15566 kg/ha, surpassant largement le témoin Fadda (5930 kg/ha). A Kolombada, seize hybrides ont montré des valeurs supérieures (9822 à 15437 kg/ha) par rapport au témoin Fadda (8290 kg/ha). Enfin, à Cinzana, trente-cinq hybrides ont produit plus de paille que le témoin Fadda (2418 kg/ha). Les gains en rendement paille enregistrés ont varié de -33 à +98 %, confirmant l'importance de la variabilité génétique entre les hybrides (**Tableau 5**). Les hybrides 104P1-2A/021-ECS-82, 104P1-2A/021-ECS-81, 104P1-2A/021-ECS-25 et 12A/021-ECS-43 ont affiché les meilleures performances avec des gains de +71 à +98 %. Ces résultats traduisent la capacité de certains hybrides à valoriser efficacement les ressources disponibles dans les milieux favorables.

Tableau 5 : Gain en rendement paille des 28 meilleurs hybrides par rapport au témoin Fadda

Hybrides	SB	KO	CZ	Moyenne	Gain/Fadda
104P1-2A/021-ECS-82	15566	12497	4809	10957	98
104P1-2A/021-ECS-81	13826	12887	4623	10445	88
104P1-2A/021-ECS-25	14435	8343	6592	9790	77
12A/021-ECS-43	10964	11496	5947	9469	71
ICSA176003/021-ECS-81	12936	10132	4360	9143	65
104P3-2A/021-ECS-95	14211	8821	4296	9109	64
12A/021-ECS-123	12283	10220	4819	9107	64
104P1-2A/021-ECS-95	14511	7518	4716	8915	61
12A/021-ECS-102	7955	9770	8728	8818	59
104P3-2A/021-ECS-43	10879	10384	4523	8595	55
104P1-2A/021-ECS-102	12310	8472	4811	8531	54
104P3-2A/021-EPDU-134	4620	11740	8335	8232	48
104P3-2A/021-ECS-82	10764	8981	4499	8081	46
ICSA176003/021-EPDU-134	3217	15437	5216	7957	43
104P1-2A/021-ECS-71	11188	8238	4378	7935	43
104P1-2A/021-ECS-43	9648	10543	3575	7922	43
ICSA176003/021-ECS-86	5360	12370	4984	7571	37
ICSA176003/021-ECS-45	8583	9822	3759	7388	33
12A/021-ECS-82	5766	12829	3494	7363	33
ICSA176003/021-ECS-102	11570	7418	2591	7193	30
104P3-2A/021-ECS-71	9599	7695	4195	7163	29
104P1-2A/021-ECS-174	4721	10467	6270	7153	29
104P3-2A/021-ECS-174	8932	7211	4879	7007	26
ICSA176003/021-ECS-174	5445	10091	4988	6841	23
ICSA176003/021-ECS-95	3836	12400	3991	6742	22
104P1-2A/021-ECS-45	10395	5213	4350	6653	20
104P1-2A/021-ECS-123	3790	12241	3818	6616	19
104P3-2A/021-ECS-25	6415	8883	4445	6581	19
Témoin					
Fadda	5930	8290	2418	5546	
Moyenne	8022	9272	4728		
Maximum	15566	12887	8728		98
Minimum	1683	4036	2418		-33

3-2. Indice d'adaptation

L'indice d'adaptation (I), défini comme la différence entre la date de fin de saison des pluies (DFS) et la date de floraison (SDF), a permis de classer les hybrides selon leur ajustement phénologique aux contraintes climatiques locales (**Tableau 6**). A Sotuba, les valeurs de l'indice s'étendaient de 3 à 31. En 2022, 37 hybrides ont affichés un indice compris entre 0 et 20, traduisant une bonne synchronisation avec la saison des pluies, tandis que 2 hybrides ont été tardifs ($I < 0$). En 2023, 32 hybrides ont maintenu leur adaptation et 5 se sont révélés trop précoces ($I > 20$). A Kolombada, l'indice a varié de -12 à $+31$, avec seulement 6 hybrides en 2022 et 15 en 2023 présentant une adaptation optimale. A Cinzana, la plupart des hybrides ont enregistré un indice négatif, révélant un caractère tardif et une inadaptation vis-à-vis de brève période favorable pour ce site caractérisé par un climat semi-aride.

Tableau 6 : Indice d'adaptation des hybrides dans les différents environnements

N°	Hybrides	ISB2022	ISB2023	IKO2022	IKO2023	ICZ2022	ICZ2023
1	104P1-2A/021-ECS-102	13	13	-2	-2	-7	-23
2	104P1-2A/021-ECS-123	7	15	-8	1	-7	-22
3	104P1-2A/021-ECS-174	6	11	-7	-3	-8	-29
4	104P1-2A/021-ECS-25	14	12	-3	-1	-9	-21
5	104P1-2A/021-ECS-43	10	10	-3	-2	-8	-16
6	104P1-2A/021-ECS-45	12	16	1	2	-8	-15
7	104P1-2A/021-ECS-71	12	11	-5	-2	-4	-15
8	104P1-2A/021-ECS-81	9	10	-6	-4	-11	-23
9	104P1-2A/021-ECS-82	11	*	-4	*	-10	*
10	104P1-2A/021-ECS-95	11	9	-7	-4	-8	-22
11	104P3-2A/021-ECS-102	6	10	-4	-3	-9	-21
12	104P3-2A/021-ECS-174	12	10	-4	-2	-8	-25
13	104P3-2A/021-ECS-25	6	12	-7	0	-4	-21
14	104P3-2A/021-ECS-43	10	10	-3	-3	-7	-22
15	104P3-2A/021-ECS-45	12	9	-5	-1	-8	-23
16	104P3-2A/021-ECS-71	10	10	-4	-2	-7	-25
17	104P3-2A/021-ECS-82	12	10	-12	-5	-7	-12
18	104P3-2A/021-ECS-86	11	10	-4	-4	-8	-27
19	104P3-2A/021-ECS-95	11	10	-4	-3	-9	-27
20	104P3-2A/021-EPDU-134	10	8	-3	-4	-9	-26
21	12A/021-ECS-102	13	25	-1	7	-7	-17
22	12A/021-ECS-123	10	13	-3	0	-5	-22
23	12A/021-ECS-25	19	-5	5	9	9	-11
24	12A/021-ECS-43	12	13	0	-2	-5	-18
25	12A/021-ECS-71	9	14	-2	-3	-5	-22
26	12A/021-ECS-81	23	23	-1	5	8	-15
27	12A/021-ECS-82	12	13	-4	-6	-9	-21
28	12A/021-ECS-86	13	12	-7	-2	-7	-24
29	12A/021-EPDU-134	29	2	-4	-6	8	-27
30	ICSA176003/021-ECS-102	16	28	-2	12	-1	-11
31	ICSA176003/021-ECS-123	18	25	-2	7	-3	-14
32	ICSA176003/021-ECS-174	16	16	-4	2	1	-18
33	ICSA176003/021-ECS-25	16	31	-1	13	-1	-12
34	ICSA176003/021-ECS-45	*	16	-9	2	5	-15
35	ICSA176003/021-ECS-81	12	15	2	1	-1	-21
36	ICSA176003/021-ECS-86	11	15	3	2	5	-22
37	ICSA176003/021-ECS-95	3	16	-3	2	-7	-14
38	ICSA176003/021-EPDU-134	15	14	0	-1	8	-20
58	Fadda	10	14	-1	1	-3	-22

ISB = indice d'adaptation à Sotuba, IKO = indice d'adaptation à Kolombada, ICZ = indice d'adaptation à Cinzana.

4. Discussion

4-1. Performance agronomique et interaction génotype × environnement

Une forte interaction génotype × environnement (G×E) a été enregistrée dans cette étude. Les performances supérieures observées à Sotuba et Kolombada par rapport à Cinzana illustrent l'influence majeure des facteurs édaphiques et climatiques favorables à la productivité du sorgho dans ces différents environnements. Ces observations corroborent les travaux [2, 4], qui ont établi le rôle déterminant de la durée et de la régularité de la saison des pluies sur la stabilité des rendements dans les zones semi-arides.

Les hybrides les plus performants ont atteint des gains en rendement grain jusqu'à +57 % par rapport au témoin Fadda, illustrant ainsi l'impact positif de la vigueur hybride dans ces milieux. Ces résultats sont cohérents avec ceux de [3, 7], qui ont montré que les gains en rendement grain des hybrides de sorgho par rapport aux variétés locales variaient de +7 à +131 %.

4-2. Production de biomasse et intérêt agronomique

La production de paille, corrélée au rendement grain, constitue un atout majeur dans les systèmes de production sahéliens, où la biomasse représente une ressource économique importante pour l'alimentation du bétail et la restitution de matière organique au sol aussi son utilisation dans la construction des habitats. Les hybrides expriment des caractères de rendements élevés en grain et en biomasse, cette manifestation de capacité agronomique illustrent la possibilité de combiner le rendement grain élevé et la production importante de biomasse. Selon [8] la supériorité des hybrides à forte biomasse est liée à une efficacité photosynthétique accrue et à une meilleure répartition des assimilats entre organes végétatifs et reproducteurs. Ce double avantage contribue à la durabilité des systèmes agropastoraux, particulièrement dans les zones de forte variabilité climatique.

4-3. Adaptation et plasticité environnementale

Trois types de comportements des hybrides se sont manifestés dans cette étude et qui ont abouti à classer ces génotypes en trois groupes de leur cycle végétatif suivant leur indice d'adaptation. Ainsi, des hybrides à large adaptation (I entre 0 et 20) qui sont capables de maintenir des performances stables dans différents environnements, puis des hybrides très précoces ($I > 20$) qui sont sensibles à la sécheresse terminale et enfin des hybrides tardifs ($I < 0$) qui se sont inadaptés aux saisons courtes. La répartition des indices d'adaptation traduit une diversité phénologique marquée, certains hybrides réussissant à synchroniser leur floraison avec la fin de la saison des pluies, gage de meilleur rendement et stabilité, tandis que d'autres trop tardifs ou trop précoces restent pénalisés dans les environnements à saison courte ou instable. L'ensemble de ces comportements illustrent une bonne stabilité interannuelle, d'où une plasticité phénologique favorable observée. Ces comportements confirment les conclusions de [6], selon lesquelles la combinaison entre gènes exotiques et locaux améliore simultanément la productivité et la tolérance aux stress. A Cinzana, l'ensemble des hybrides se sont montrés tardifs, suggérant un désajustement phénologique entre la floraison et la fin de la saison des pluies. D'après [2], les variétés locales possèdent une sensibilité photopériodique ajustée qui leur permet d'adapter leur floraison à la durée de la saison humide. L'intégration de ce caractère dans les programmes de création des hybrides demeure donc une priorité pour améliorer l'adaptation des nouveaux hybrides dans les zones à saisons courtes.

4-4. Implications pour la sélection et la production

L'ensemble des résultats montre que plusieurs hybrides évalués possèdent un potentiel agronomique supérieur et une stabilité de rendement intéressante dans la zone soudano-sahélienne. Les performances observées à Sotuba (zone soudanienne) et à Kolombada (zone peu semi-aride) indiquent que ces environnements sont favorables à l'expression du potentiel génétique, tandis qu'à Cinzana (zone presque semi-aride) une forte pression sélective s'impose due au déficit hydrique. Ces résultats appuient la nécessité d'une approche de sélection régionale différenciée, intégrant les paramètres climatiques, pédologiques et phénologiques. L'ensemble des résultats montre que plusieurs hybrides évalués possèdent un potentiel agronomique supérieur et une stabilité de rendement intéressante dans la zone soudano-sahélienne. Les performances observées à Sotuba et Kolombada indiquent que ces environnements sont favorables à l'expression du potentiel génétique, tandis que Cinzana impose une forte pression sélective due au déficit hydrique. Ces résultats appuient la nécessité d'une approche de sélection régionale différenciée, intégrant les paramètres climatiques, pédologiques et phénologiques.

5. Conclusion

L'évaluation multi-environnementale de 38 hybrides de sorgho menée dans trois stations représentatives de la zone soudano-sahélienne au Mali (Sotuba, Kolombada et Cinzana) a abouti à des résultats intéressants et exploitables dans la lutte contre l'insécurité alimentaire et des perspectives pour le programme de sélection. Ainsi, des caractères importants d'hybrides ont été exprimés et mis en évidence surtout la variabilité génétique importante pour les caractères de rendement grain, rendement paille et adaptation environnementale. L'expérimentation réalisée dans les trois environnements différents pendant deux années successives a révélé la performance des hybrides pour les rendements grain et paille, leur adaptabilité aux conditions du milieu. Les sites de Sotuba et Kolombada ont offert les conditions les plus favorables à la production, avec des gains en rendement grain atteignant jusqu'à +57 % par rapport au témoin Fadda. À Cinzana, les performances ont été globalement plus faibles, traduisant l'impact des contraintes hydriques et de la brièveté de la saison pluvieuse. Plusieurs hybrides, notamment 104P1-2A/021-ECS-71, ICSA176003/021-ECS-25, 104P3-2A/021-ECS-82 et 12A/021-ECS-81, ont montré une productivité élevée et une bonne stabilité à travers les environnements. Les hybrides à large adaptation identifiés (ICSA03/021-ECS-86, 12A/021-ECS-81) pourraient être promus dans les programmes de diffusion, tandis que des croisements spécifiques à cycle plus court devraient être ciblés pour les zones les plus arides. Ainsi, la mise au point d'hybrides combinant haute productivité, stabilité interannuelle et résilience climatique apparaît comme une voie prometteuse pour renforcer la sécurité alimentaire et la durabilité de la culture du sorgho au Mali. Les rendements en paille, également supérieurs au témoin, confirment le potentiel des hybrides pour la production de biomasse, un paramètre essentiel dans les systèmes agropastoraux sahéliens. Les gains en rendement paille ont atteint jusqu'à +98 %, démontrant que les hybrides peuvent contribuer à la fois à la production de grain et à la fourniture de fourrage, favorisant ainsi une approche intégrée des cultures céréalières et de l'élevage. Plusieurs ont un indice d'adaptation caractérisant que plusieurs hybrides possèdent une large plasticité environnementale, leur permettant de s'adapter efficacement aux conditions agro climatiques variables. Toutefois, les résultats obtenus à Cinzana mettent en évidence la nécessité de renforcer la sélection pour des cycles plus courts et une meilleure synchronisation phénologique avec la fin de la saison des pluies. Dans l'ensemble, cette étude confirme le potentiel agronomique élevé des hybrides de sorgho pour améliorer la productivité et la résilience des systèmes de culture dans les zones soudano-sahéliennes du Mali. Elle suggère que l'intégration de lignées locales tolérantes à la sécheresse dans les programmes de création des hybrides combinée à une sélection ciblée selon les zones agro écologiques, constitue une voie durable pour renforcer la sécurité alimentaire nationale. Des travaux complémentaires devraient porter sur la stabilité interannuelle des hybrides, l'évaluation de leurs comportements physiologiques face au stress hydrique, et de leur acceptabilité pour les producteurs, afin de favoriser une adoption à large échelle dans les zones à forte variabilité climatique.

Références

- [1] - FAOSTAT, World Food and Agriculture Statistical Yearbook FAO, (2023), <https://doi.org/10.4060/cb4477en>
- [2] - M. KOURESSY, S. B. TRAORÉ et M. VAKSMANN, xxxxx écrire les autres co-auteurs "Adaptation des sorghos du Mali à la variabilité climatique." *Sécheresse*, 17 (2) (2008) 95 - 100
- [3] - A. G. DIALLO, Aptitude à la combinaison et performance agronomique des hybrides de sorgho de type Guinea au Mali. Thèse de doctorat, FST, Université de Bamako, (2013)
- [4] - S. B. TRAORÉ, M. VAKSMANN, M. OUATTARA, M. KOURESSY & A. YOROTE, Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorgho du Mali. *Sécheresse*, 11 (4) (2000) 227 - 237
- [5] - L. R. HOUSE, B. N. VERMA, G. EJATA, B. S. RANA, I. KAPRAN, A. B. OBILINA et B. V. S. REDDY, Developing Countries Breeding and Potential of hybrid Sorghum, In proceeding of the International Conference on Genetic Improvement of Sorghum and Pearl millet, September 23-27, 1996-Lubbock, Texas, USA, (1996)
- [6] - M. BÄNZIGER, G. O. EDMANDES, D. BECK and M. BELLON, "Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize : From theory to practice", CIMMYT, ? Mexico, (2000)
- [7] - L. R. HOUSE, M. I. GOMEZ & A. R. HALLAUER, Development and evaluation of hybrids in sorghum. *Advances in Agronomy*, 57 (1996) 157 - 200
- [8] - W. ZEGADA-LIZARAZU & A. MONTI, Biomass and bioenergy potential of sorghum hybrids under different environments. *Field Crops Research*, 128 (2012) 1 - 7