



VOLUME 4 N° 2 (ORIGINAL ARTICLE)

## ***Variabilité phénotypique des lignées intraspécifiques *Oryza sativa* et interspécifiques (*O. glaberrima* x *O. sativa*) du riz de bas-fonds et leur tolérance à la sécheresse***

**Josias TOVIHO<sup>1</sup>, Yves AGNOUN<sup>2</sup>, Vital ANATO<sup>1</sup>, Sognigbé NDANIKOU<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Université d'Abomey-Calavi

<sup>2</sup>Université Nationale d'Agriculture

### **Résumé**

La caractérisation agro-morphologique est essentielle pour fournir des informations pertinentes sur les matériaux génétiques développés par les programmes de sélection variétale. Cette étude vise à caractériser 61 lignées de riz pluvial de bas-fonds et à identifier celles présentant une meilleure tolérance à la sécheresse sur la base de dix descripteurs agro morphologiques qualitatifs et quantitatifs. L'essai a été conduit sur le site expérimental d'AfricaRice à Sowé (Commune de Glazoué), suivant un dispositif Alpha-lattice avec trois répétitions. L'Analyse des Correspondances Multiples (ACM), suivie d'une classification hiérarchique basée sur des traits qualitatifs, a révélé une variabilité limitée mais a permis d'identifier la classe 1 comme étant la plus tolérante à la sécheresse. Du point de vue quantitatif, l'analyse de variance réalisée sur les lignées a montré des différences hautement significatives ( $P < 0,001$ ). La classification hiérarchique basée sur l'Analyse en Composantes Principales a regroupé le matériel génétique évalué en trois classes distinctes ( $P < 0,001$ ), traduisant une variation phénotypique interclasses importante pour des caractères comme : le pourcentage de levée, le tillage à 30 et 60 jours après semis et la date de floraison. Les lignées de la classe 2 (24 individus) présentent un tillage modéré et un cycle relativement court ( $100,7 \pm 1,26$  JAS) tandis que celles de la classe 3 (23 individus) se caractérisent par un fort pourcentage de levée et un tillage plus abondant. A l'issus de cette étude, les lignées interspécifiques WAB2104-WAC4-1-TGR2-WAT3-1, WAB2104-WAC5-2-TGR1-WAT8-3b et WAB2152-WAT13-1-2-TGR1 ont montré une floraison précoce associée à une meilleure tolérance à la sécheresse. Les résultats de cette expérimentation présentent une précieuse base de données avec des traits distinctifs pour la sélection des lignées de riz tolérantes à la sécheresse tout en mettant en lumière des caractères morpho-physiologiques associés à une meilleure adaptation au stress hydrique chez le riz. Ces informations contribuent de ce fait à une meilleure compréhension du déterminisme génétique de la tolérance à la sécheresse chez le riz pluvial de bas-fonds et ouvrent de nouvelles perspectives pour son amélioration variétale.

**Mots-clés :** Riz, *O. glaberrima*, *O. sativa*, hybridation, évaluation agro-morphologique, tolérance à la sécheresse.

### **Abstract**

Agro-morphological characterization is essential for providing relevant information on genetic materials developed through varietal breeding programs. This study aimed to characterize 61 rainfed lowland rice lines and to identify those exhibiting better drought tolerance based on ten qualitative and quantitative agro-morphological descriptors. The trial was conducted at the AfricaRice experimental site in Sowé (Glazoué Municipality) using an alpha-lattice design with three replications. Multiple Correspondence Analysis (MCA), followed by hierarchical clustering based on qualitative traits, revealed limited variability but identified class 1 as the most drought-tolerant group. From a quantitative perspective, analysis of variance performed on the lines showed highly significant differences ( $P < 0.001$ ). Hierarchical clustering based on Principal Component Analysis grouped the evaluated genetic material into three distinct classes ( $P < 0.001$ ), reflecting substantial inter-class phenotypic variation for traits such as emergence rate, tillering at 30 and 60 days after sowing, and flowering date. Lines in class 2 (24 individuals) exhibited moderate tillering and a relatively short growth cycle ( $100.7 \pm 1.26$  DAS), whereas those in class 3 (23 individuals) were characterized by a high emergence rate and more profuse tillering. At the end of this study, the interspecific lines WAB2104-WAC4-1-TGR2-WAT3-1, WAB2104-WAC5-2-TGR1-WAT8-3b, and WAB2152-WAT13-1-2-TGR1 showed early flowering associated with improved drought tolerance. The results of this experiment provide a valuable database of distinctive traits for the selection of drought-tolerant rice lines, while highlighting morpho-physiological characters associated with better adaptation to water stress in rice. These findings thus contribute to a better understanding of the genetic determinism of drought tolerance in rainfed lowland rice and open new perspectives for its varietal improvement.

**Keywords:** Rice, *Oryza glaberrima*, *Oryza sativa*, hybridization, agro-morphological evaluation, drought tolerance.

Corresponding author: *Josias TOVIHO*

Received in Aug 2025 and accepted in dec 2025

E-mail address: [josiatovih@gmail.com](mailto:josiatovih@gmail.com)

## 1. Introduction

La sécheresse demeure le principal stress abiotique impactant à la fois la végétation naturelle et les cultures agricoles (Juenger, 2023). Elle est intrinsèquement liée au cycle naturel de l'eau et se définit comme une insuffisance de l'humidité du sol pendant des périodes critiques, limitant la croissance, le développement et le rendement des cultures (Jarin et al., 2024). Plusieurs études confirment son impact particulièrement sévère sur le développement du riz (*Oryza spp.*), notamment dans les systèmes pluviaux et faiblement irrigués (Torres et al., 2013 et Adzigbe et al., 2025). Dans les rizicultures pluviales de bas-fonds, le stress hydrique peut survenir à différentes périodes du cycle de culture, affectant divers stades de développement physiologiques (Ndikuryayo et al., 2023). Trois types de sécheresse y sont fréquemment identifiés : la sécheresse au stade végétatif, la sécheresse intermittente et la sécheresse terminale (Kamoshita et al., 2008). La sécheresse au stade végétatif survient généralement lorsque les précipitations bimodales diminuent du début à la mi-saison pluvieuse. La sécheresse intermittente se manifeste entre deux périodes de pluie, bien qu'elle soit de courte durée, elle peut entraîner des poches répétées. Enfin, la sécheresse terminale qui est la plus fréquente. Elle se développe généralement vers la fin de la saison et débute souvent avant la floraison. Les effets de la sécheresse sur les plantes vont de modifications physiologiques légères à une dessiccation complète. Chez le riz, les premiers signes incluent l'enroulement et le flétrissement des feuilles, en particulier aux extrémités (Sié et al., 2010), causés par une perte de turgescence des cellules végétales (Zinolabedin et al., 2008). Ces altérations physiologiques s'expliquent aussi par la fermeture stomatique, la baisse de la photosynthèse et le stress oxydatif entraînant des pertes remarquables du rendement (Jarin et al., 2024). En outre, une sécheresse précoce retarde la germination et celle tardive freine la floraison et la maturation du riz, tout en affectant négativement le tallage, la hauteur des plants, le nombre et la surface des feuilles et peut compromettre la fertilisation des panicules et le rendement en grains (Ndjondjop et al., 2010a ; Hu et al., 2025). Les pertes de rendement peuvent atteindre 30%, 31-65% et 65-85%, respectivement dans les zones faiblement, moyennement, et fortement touchées par la sécheresse (Kumar et al., 2008 ; Swamy et Kumar, 2012). Plusieurs pratiques agronomiques, notamment une gestion optimisée de l'eau, sont proposées pour atténuer les effets de la sécheresse dans les périmètres rizicoles. Cependant, ces solutions restent souvent impraticables ou inaccessibles pour les riziculteurs à faibles revenus en Afrique subsaharienne. A cet effet, l'identification et le développement des variétés de riz tolérantes à la sécheresse et à fort potentiel de rendement représentent une meilleure alternative pour atténuer la crise alimentaire croissante (Kumar et al., 2007 ; Torres et al., 2013, Adzigbe et al., 2025). Le riz africain (*Oryza glaberrima*), malgré un potentiel de rendement souvent inférieur à celui des variétés améliorées, est toujours cultivé pour sa rusticité, son goût et son arôme. Mieux, il est très adapté aux multiples conditions de cultures et aux différents stress environnementaux (Agnoun et al., 2012). Fort de son histoire, il constitue un précieux réservoir de gènes de résistances exploité ces dernières décennies dans le développement et la création de nouvelles

variétés de riz. L'exploitation de ce patrimoine génétique, à travers des croisements interspécifiques (*O. glaberrima* × *Oryza sativa*) a permis au Centre du Riz pour l'Afrique (AfricaRice), de développer des génotypes potentiellement résistants et productifs à plusieurs stress dont les variétés de riz NERICA (Nouveau Riz pour l'Afrique) (Sié et al., 2005). Ainsi, AfricaRice a développé des génotypes tolérants à la sécheresse, tels que SEN-L13-2, MPL-15-3, SEN-L10-1, SEN-L26-3 et SEN-L21-2, issus de croisements entre la variété asiatique (IR64) et celle africaine (Tog5681). Par ailleurs, la recherche de nouvelles variétés tolérantes et productives reste une priorité dans les programmes d'amélioration du riz. AfricaRice a également entrepris le développement de soixante et un (61) nouveaux génotypes issus de croisements interspécifiques (*O. glaberrima* × *O. sativa*) et intraspécifiques (*O. sativa*). La présente étude vise donc à évaluer la variabilité agro-morphologique de ces lignées et à identifier les plus tolérantes à la sécheresse dans les conditions du bas-fond sous régime pluvial. Par conséquent, nous faisons l'hypothèse que certaines lignées interspécifiques *O. glaberrima* × *O. sativa* présentent une meilleure tolérance à la sécheresse grâce à la combinaison de gènes de rusticité et de productivité.

## 2. Matériels et Méthodes

### 2.1. Site expérimental

L'essai a été conduit sur le site expérimental d'AfricaRice à Sowé, dans la commune de Glazoué situé entre 7°58'5" de latitude Nord et 2°10'47" de longitude Est et à 160 m d'altitude. Cette zone se caractérise par un climat soudano-guinéen et des sols hydromorphes adaptés à la riziculture de bas-fond.

### 2.2. Matériel végétal

L'étude a porté sur 61 lignées de riz pluvial de bas-fond, incluant 22 lignées issues de croisements interspécifiques (*O. glaberrima* × *O. sativa*) et de 39 lignées provenant de croisements intraspécifiques (*O. sativa* × *O. sativa*). Ces lignées issues de 20 croisements au total et développées à partir de 27 parents ont été fournies par le Centre du Riz pour l'Afrique (AfricaRice). Trois (03) génotypes à savoir : Nerica-L 19, Wita 4 et le témoin local "Otchou-medji" ont été utilisés comme témoins.

### 2.3. Dispositif expérimental

Les observations ont été réalisées en 2014 selon un dispositif Alpha-lattice à trois répétitions, permettant de contrôler la variabilité environnementale (Yates, 1936 ; Patterson et Williams, 2022).

Chaque parcelle comporte cinq lignes de 5 m de long à une densité de 20 cm x 20 cm. Après le semis, l'engrais NPK (15-15-15) a été appliqué en fumure de fond à raison de 200 kg/ha. Un premier apport de 35 kg/ha d'urée (46% N) a été effectué au début du tallage suivi d'un second apport de 65 kg/ha intervenu à l'initiation paniculaire. Par ailleurs, aucun apport complémentaire d'eau n'a été effectué en cas de déficit hydrique. Pour ce qui concerne l'entretien des parcelles, un herbicide post-levé, sélectif du riz (Garil) a été appliqué deux (02) semaines après semis à une dose de 5 l/ha. Il est suivi d'un premier sarclage réalisé à 35 jours après le désherbage chimique puis d'un

second, 21 jours après le premier. Les caractères qualitatifs et quantitatifs observés et évalués sont récapitulés de même que les méthodes de mesure dans le tableau 1. Au total, 10 caractères ont été mesurés sur 10 plants/parcelle conformément à l'échelle de notation référentielle des descripteurs du riz, *Oryza* spp. (Bioversity International et al., 2007) et le Standard Evaluation System (IRRI, 2002). Les dix critères retenus, mêlant caractères qualitatifs et quantitatifs, offrent une évaluation complète de la variabilité des 61 lignées. Les traits qualitatifs (vigueur, port, exsertion, architecture paniculaire, enroulement et flétrissement foliaire) reflètent directement les réponses morpho-physiologiques au stress hydrique et servent d'indicateurs rapides de tolérance. Les critères quantitatifs (levée, tallage, floraison) apportent des mesures objectives du potentiel de croissance et de la précocité, essentielles pour identifier des génotypes adaptés aux environnements contraignants. Ensemble, ils couvrent les dimensions clés de la croissance, de la tolérance au stress et du rendement potentiel, justifiant leur pertinence pour la caractérisation et la sélection.

#### 2.4. Analyse statistique des données

L'analyse des données a été réalisée grâce au logiciel R version 3.0.2 (R Core Team, 2012). Les valeurs moyennes de chaque caractère quantitatif ont été calculées sur les 10 plants sélectionnés par parcelle et par répétition. Par contre, les valeurs des caractères qualitatifs par parcelle sont les scores directement affectés à l'ensemble de la parcelle.

Les analyses statistiques effectuées sont l'Analyse en Composantes Principales (ACP), la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et l'Analyse de Variance (ANOVA) pour les variables quantitatives. En effet, l'ACP a été effectuée à partir des moyennes ajustées (précision dans le contrôle des hétérogénéités du milieu) préférées à celles arithmétiques. Elle permet en effet d'extraire les principaux axes qui vont servir de macro-variables au regroupement des lignées en classes (Abdi & Williams, 2010 ; Kassambara, 2017). La Classification Ascendante Hiérarchique des lignées en groupes homogènes a été réalisée en utilisant l'algorithme de Ward (Ward, 1963 ; Sow, 2013 ; Murtagh & Legendre, 2014). Par ailleurs, l'analyse de la variance des classes a permis de préciser les performances de chaque groupe de lignées. En ce qui concerne les variables qualitatives, une analyse factorielle des correspondances multiples (AFCM) a été exécutée. Les axes factoriels retenus à partir de la règle de Kaiser (Ledesma et al., 2022) ont servi à la réalisation d'une classification ascendante hiérarchique afin d'estimer la variabilité phénotypique existante au sein des lignées testées et de caractériser chaque classe à partir des caractéristiques qui lui sont spécifiques.

Tableau 1. Caractères agro-morphologiques quantitatifs et qualitatifs et méthodes de mesure

Caractères		Méthodes de mesure	Phase d'évaluation
Qualitatifs	Vigueur (vig)	<i>1 = extra vigoureux ; 3 = vigoureux ; 5 = normal ; 7 = faible ; 9 = très faible</i>	Végétative
	Port des talles (port)	<i>1 = érigé ; 3 = semi-érigé ; 5 = ouvert ; 7 = étalé ; 9 = rampant</i>	Végétative
	Exsersion paniculaire (expan)	<i>1 = bonne exsersion ; 3 = exsersion modérée ; 5 = exsersion juste ; 7 = base de la panicule légèrement engainée ; 9 = panicule entièrement engainée</i>	Reproductive
	Attitude des ramifications (atram)	<i>1 = compacte ; 3 = semi-compacte ; 5 = ouvert ; 7 = horizontale ; 9 = tombante</i>	Reproductive
	Enroulement des feuilles (rol1, rol2, rol3)*	<i>0 = feuilles immunes ; 1 = feuilles commencent par s'enrouler ; 3 = début d'enroulement des feuilles en V ; 5 = feuilles complètement évasées en U ; 7 = feuilles ne présentant plus de bordures ; 9 = feuilles complètement enroulées</i>	Végétative Reproductive Maturation
	Flétrissement des feuilles (des1, des2, des3)*	<i>0 = absence de symptômes ; 1 = léger flétrissement de la pointe des feuilles ; 3 = flétrissement de la feuille au 1/4 à partir de la pointe ; 5 = 1/4 à 1/2 des feuilles sont flétries ; 7 = 2/3 des feuilles sont flétries 9 = tous les plants sont apparemment morts</i>	Végétative Reproductive Maturation
Quantitatifs	Pourcentage de levée (lev)	<i>Pourcentage de plants ayant levé 7 jours après semis</i>	Végétative
	Tallage à 30 jours (tal30)	<i>Comptage sur 10 plants par parcelle, du nombre de talles par plant à 30 jours après semis</i>	Végétative
	Tallage à 60 jours (tal60)	<i>Comptage sur 10 plants par parcelle, du nombre de talles par plant à 60 jours après semis</i>	Végétative
	Date de floraison (flor)	<i>Nombre de jours qui sépare la date de semis à celle d'apparition de 50% de floraison</i>	Reproductive

\* Observations d'enroulement et de flétrissement des feuilles réalisées au cours des 3 phases du cycle de développement du riz

**NB.** Les observations d'enroulement et de flétrissement des feuilles s'effectuent au 14<sup>ème</sup> jour d'absence de précipitations

### 3. Résultats

#### 3.1. Variabilité des caractères qualitatifs

L'Analyse Factorielle des Correspondances Multiples révèle que les sept premiers axes expliquent 62.73% de la variance totale. Chaque axe a une valeur propre supérieure à  $(1.818/20 = 0.091)$ ; ce qui est suffisant pour garantir une précision d'interprétation. Par ailleurs, la classification numérique révèle une répartition en trois (03) classes des génotypes (Figure 1 ; tableau 2). La classe 1, composée de 18 lignées ne comporte pas de variété témoin. Toutes les lignées de la classe résistent au flétrissement foliaire aussi bien à la phase végétative que reproductive. De même, 57.89% d'entre elles conservent cette caractéristique à la phase de maturation. Aussi, 52.63% des lignées de cette classe ont-elles un port érigé et sont immunes à l'enroulement foliaire notamment à la phase végétative. Outre ces caractéristiques, respectivement 84.21 et 68.42 % des lignées de la classe sont très résistantes à un enroulement foliaire au cours de la phase reproductive et de maturation. Par ailleurs, cette classe 1 est majoritairement constituée des lignées (notamment de lignées intraspécifiques *O. sativa* et interspécifiques (*O. glaberrima x O. sativa*) à ramifications compactes (63.16%) et des lignées ayant une vigueur normale au stade plantule (78.95%). La classe 2 quant à elle regroupe huit lignées et les témoins Nerica-L 19 et Wita 4. Elle est majoritairement caractérisée par des lignées ayant un port ouvert (90%) et résistantes au flétrissement foliaire à la phase reproductive. Toutes ces lignées sont résistantes au flétrissement foliaire exceptée à la phase de maturation où 60% d'entre elles sont sensibles en particulier les lignées *O. sativa*. La classe 3 comporte 36 génotypes dont le témoin local Otchou-medji. 51.43% de ces génotypes sont extra-vigoureux. Par ailleurs, la majorité des génotypes de cette classe (94%) sont très résistants au flétrissement foliaire durant les phases végétative et reproductive. Par contre, à la maturation, seuls 8.57% parmi eux sont restés très résistants au flétrissement foliaire. Enfin, 68.57% des génotypes sont résistants à l'enroulement foliaire à la phase végétative tandis qu'à la maturation, 28.57% d'entre eux sont très résistants au stress hydrique. Les individus de cette classe sont majoritairement constitués de lignées interspécifiques (*O. glaberrima x O. sativa*). La figure 1 présente l'histogramme de fréquences des modalités relatives à l'enroulement et au flétrissement foliaire suivant les classes obtenues.

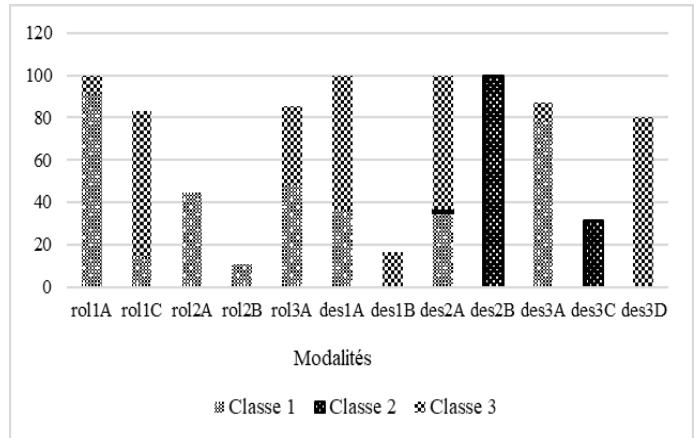


Figure 1. Histogramme de fréquences des classes suivant les variables qualitatives.

#### Légende :

**rol1A**, immunes ; **rol1C**, résistantes ; **rol2A**, très résistantes ; **rol2B**, résistantes ; **rol3A**, très résistantes ;  
**des1A**, très résistantes ; **des1B**, résistantes ; **des2A**, très résistantes ;  
**des2B**, résistantes ; **des3A**, très résistantes ; **des3C**, sensibles ; **des3D**, très sensibles.

Tableau 2. Caractéristiques des classes par les modalités des caractères qualitatifs.

		Classe 1			Classe 2			Classe 3		
Caractère	Modalité	Cla/mod	Mod/cla	P. value	Clas/mod	Mod/cla	P. value	Cla/mod	Mod/cla	P. value
vig	vigA	4.0	5.26	1.9e-4***	-	-	-	72.0	51.43	0.029*
	vigC	60	78.95	3.5e-5***	-	-	-	32.0	22.86	0.004**
port	portA	90.91	52.63	5.8e-6***	-	-	-	9.09	2.86	0.001**
	portC	12.50	21.05	3.1e-3**	28.13	90.0	6.8e-3*	-	-	-
attram	attramA	48	63.16	1.4e-2*	-	-	-	-	-	-
	attramB	15.38	21.05	4.2e-2*	-	-	-	-	-	-
expan	expanC	52.63	52.63	1.4e-2*	-	-	-	31.58	17.14	0.019*
rol1	rol1A	90.91	52.63	5.8e-6***	-	-	-	9.09	2.86	0.001**
	rol1C	14.29	26.32	3.9e-3**	-	-	-	68.57	68.57	0.017*
rol2	rol2A	44.44	84.21	3.6e-3**	-	-	-	-	-	-
	rol2B	10.71	15.79	3.6e-3**	-	-	-	-	-	-
rol3	rol3A	48.15	68.42	7.6e-3*	-	-	-	37.04	28.57	0.018*
des1	des1A	36.54	100.0	8.6e-3*	0.0	0.0	4.4e-10***	63.46	94.29	0.004**
	des1B	0.0	0.0	8.6e-3*	83.33	100.0	4.4e-10***	16.67	5.71	0.004**
des2	des2A	34.55	100	3.2e-2*	1.82	10.0	3.6e-10***	63.64	100.0	3.6e-4***
	des2B	0.0	0.0	3.2e-2*	100.0	90.0	3.6e-10***	0.0	0.0	3.6e-4***
des3	des3A	78.57	57.89	2.5e-5***	-	-	-	21.43	8.57	0.006
	des3C	0.0	0.0	2.8e-4***	31.58	60.0	3.8e-2*	-	-	-
	des3D	0.0	0.0	2.1e-3**	-	-	-	80.0	34.29	0.028*

\*Significatif ( $P < 0.05$ ) ; \*\* Très significatif ( $P < 0.005$ ) ; \*\*\* Hautement significatif ( $P < 0.001$ )

#### Légende

**vigA**, extra-vigoureux ; **vigC**, vigueur normale ; **portA**, port érigé ; **portC**, port ouvert ; **attramA**, compact ; **attramB**, semi-compact ; **expanC**, base de la panicule légèrement engainée ;

### 3.2. Variabilité des caractères quantitatifs

L'analyse de la variance des moyennes estimées des caractères quantitatifs des lignées (pourcentage de levée, tallage à 30 jours, tallage à 60 jours et date de floraison) a révélé une différence très hautement significative ( $F < 0.001$ ). Les résultats de l'ACP ont révélé que les deux premières composantes expliquent 77% de la variance totale des caractères mesurés. En effet, les variables : pourcentage de levée, tallage à 30 jours et la floraison sont fortement corrélés à l'axe 1 tandis que l'axe 2 est celui des lignées ayant un fort tallage à 60 jours après semis. La figure 2 illustre la répartition des lignées dans le premier plan factoriel de l'ACP.

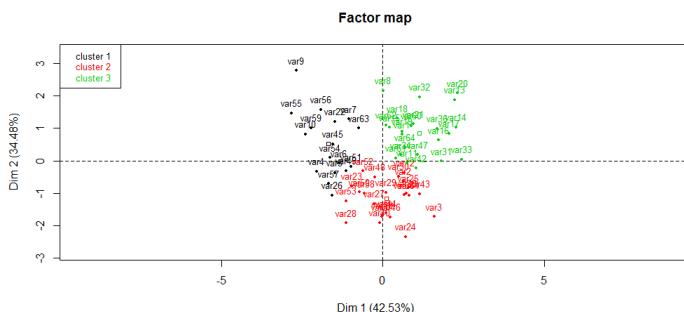


Figure 2. Répartition des lignées par classe dans le premier plan factoriel de l'ACP

La classification ascendante hiérarchique, basée sur la méthode de Ward ( $R^2 \geq 50\%$ ), regroupe l'ensemble du matériel végétal testé en trois classes (figure 3).

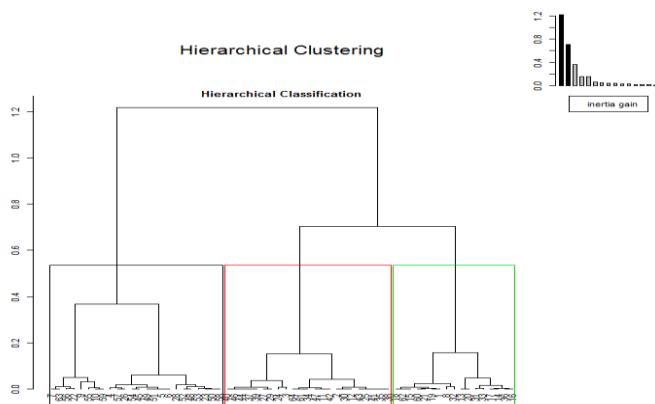


Figure 3. Dendrogramme des classes obtenues suivant les caractères quantitatifs

Les valeurs moyennes des lignées dans chaque classe sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3. Analyse de variance des 03 classes du dendrogramme

	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Pr > F
	Moy $\pm \sigma$	Moy $\pm \sigma$	Moy $\pm \sigma$	
lev	65.69 $\pm$ 1.68 <sup>a</sup>	81.25 $\pm$ 1.18 <sup>b</sup>	83.01 $\pm$ 1.49 <sup>b</sup>	1.95e-10 ***
	0.0248 <sup>a</sup>	0.0337 <sup>b</sup>	0.058 <sup>c</sup>	5.1e-14 ***
tal30	1.117 $\pm$ 0.0248 <sup>a</sup>	1.264 $\pm$ 0.0337 <sup>b</sup>	1.706 $\pm$ 0.058 <sup>c</sup>	0.0135 *
	15.38 $\pm$ 0.5736 <sup>a</sup>	14.04 $\pm$ 0.4815 <sup>a</sup>	17.86 $\pm$ 0.4448 <sup>b</sup>	
tal60	116.1 $\pm$ 2.062 <sup>a</sup>	100.7 $\pm$ 1.264 <sup>b</sup>	108.2 $\pm$ 1.683 <sup>c</sup>	
				0.333

\* Significatif ( $P < 0.05$ ) ; \*\* hautement significatif ( $P < 0.005$ ) ; \*\*\* Très hautement significatif ( $P < 0.001$ )

La classe 1 du CAH est composée de 17 lignées ayant un cycle long ( $116.1 \pm 2.06$ ) et les plus faibles pourcentages de levée. Toutefois, elles présentent un tallage moyen à 60 JAS. La classe 2 regroupe 24 génotypes dont deux variétés témoins à savoir le Nerica-L 19 et le témoin local, Otchou-medji. Les génotypes de cette classe sont moyennement précoces ( $100.7 \pm 1.26$  JAS). Parmi ces lignées, seule la lignée (WAB 2104-WAC4-1-TGR2-WAT3-1) a un cycle plus court (92.7 JAS) que celui du témoin le plus précoce, Otchou-medji (92.9 JAS). Par ailleurs, les lignées de cette classe ont un tallage moyen (1.26 et 14.04 talles par plant respectivement à 30 et 60 JAS). De plus, cette classe est constituée de lignées ayant un fort taux de levée. Enfin, la classe 3 regroupe 22 lignées et le témoin Wita 4. Elle est caractérisée par des lignées ayant un tallage abondant (Respectivement 1.7 et 17.9 talles/plant à 30 et à 60 JAS). Parmi elles, certaines lignées présentent des valeurs supérieures (18.6 à 20.26 talles à 60 JAS) à celle du témoin Wita 4 (18.58 à 60 JAS). En outre, les lignées de cette classe présentent les plus forts taux de levée, en moyenne 83 JAS.

### 3.3. Groupement des génotypes selon les traits agro-morphologiques

Une analyse croisée des résultats issus de la classification des lignées aussi bien suivant les variables quantitatives que qualitatives révèle l'existence de lignées qui associent des caractéristiques d'intérêts utilisables dans un programme de sélection et d'amélioration variétale. En effet, les lignées obtenues dans la classe 1 de la classification effectuée sur les variables qualitatives sont plus tolérantes du point de vue de l'enroulement et du flétrissement foliaires. Quant aux variables quantitatives, ce sont celles de la classe 2 qui ont un cycle court et un fort tallage. Ainsi, certaines lignées combinent une meilleure réponse à l'enroulement et au flétrissement foliaire, un cycle précoce et un fort tallage. Ces lignées sont toutes des intraspécifiques *O. sativa*. Par ailleurs, d'autres lignées portent des performances similaires à celles-citées. Il s'agit de certaines lignées obtenues dans la classe 3 à partir de la classification suivant les variables qualitatives (c'est-à-dire très résistantes à l'enroulement et flétrissement foliaire) et ayant qui ont un cycle relativement court ( $100.7 \pm 1.26$ ). Ces lignées sont des interspécifiques (*O. glaberrima* x *O. sativa*). Enfin, nous avons certaines

lignées de la classe 3 obtenues de la classification à partir des variables qualitatives et ayant un cycle relativement moyen ( $108.2 \pm 1.68$ ) et un très fort tallage à 60 jours après semis ( $17.86 \pm 0.44$ ). Il s'agit également des lignées interspécifiques (*O. glaberrima x O. sativa*).

### 3.4. Génotypes les plus tolérants à la sécheresse

En définitive, l'analyse croisée des classifications qualitatives et quantitatives montre que des lignées aussi bien intraspécifiques (*O. sativa*) et interspécifiques (*O. glaberrima x O. sativa*) présentent de forts potentiels exploitables en sélection variétale relatifs à la tolérance au stress hydrique et à l'expression du rendement dans cette condition hostile. A l'issus de cette étude, les lignées interspécifiques WAB2104-WAC4-1-TGR2-WAT3-1, WAB2104-WAC5-2-TGR1-WAT8-3b et WAB2152-WAT13-1-2-TGR1 ont montré une floraison précoce associée à une meilleure tolérance à la sécheresse. Elles sont donc sélectionnées et proposées à d'autres expérimentations afin de confirmer le potentiel de tolérance/résistance au stress hydrique.

## 4. Discussion

Le dispositif en lattice constitue un groupe important de dispositifs en blocs incomplets dans lesquels tous les traitements étudiés ne sont pas présents dans chaque bloc (Dagnélie, 2012). Initialement, ce dispositif a été conçu pour comparer un grand nombre de variétés de plantes cultivées dans des essais agricoles expérimentaux (Varghese *et al.*, 2004).

### 4.1. Variabilité phénotypique et diversité des génotypes

Les effets de la sécheresse varient de modifications physiologiques mineures à la dessiccation complète des plantes. Chez le riz, les premières réactions incluent l'enroulement des feuilles (Sié *et al.*, 2010) et le flétrissement de leurs extrémités, conséquences d'une perte de turgescence (Zinolabedin *et al.*, 2008). Ces symptômes sont considérés comme d'excellents indicateurs de sensibilité à la sécheresse (Henderson *et al.*, 1995 ; Bocco *et al.*, 2011). La sécheresse occasionne par ailleurs, les retards de floraison et de maturation des grains et affecte négativement le tallage, la hauteur des plants, le nombre de feuilles et le développement de la surface foliaire (Ndjiondjop *et al.*, 2010a). Ces manifestations morpho-physiologiques constituent des mécanismes d'évitement du stress hydrique. En effet, la principale contrainte abiotique est l'irrégularité des pluies qui expose le riz pluvial de bas-fond à de fréquents épisodes de sécheresse et accentue le stress hydrique dans ces écosystèmes. A cet effet, Gana (2011), rapporte et souligne l'importance d'un faible enroulement des feuilles comme critère clé d'évitement de la déshydratation. Une plante capable de maintenir un potentiel hydrique élevé présente généralement un faible enroulement foliaire. Les lignées de classe 1, qui manifestent un faible enroulement et flétrissement des feuilles durant les phases végétative, reproductive et de maturation, pourraient être considérées comme particulièrement tolérantes à la sécheresse. Ces résultats corroborent ceux de Price *et al.* (2022), qui notent que l'enroulement des feuilles est utilisé comme indicateur de la gravité de la sécheresse et comme critère négatif de

sélection (Pantuwan *et al.*, 2002). Des lignées de classe 3 présentent une faible sensibilité à l'enroulement et au flétrissement des feuilles, ce qui les rend également aptes à être intégrées dans des programmes de sélection pour la tolérance à la sécheresse. Ces résultats peuvent aussi être liés aux pratiques agronomiques notamment la maîtrise et la gestion de l'eau administrée avec les producteurs pour réduire l'effet de la sécheresse sur les périmètres rizicoles. Toujours sur le plan agronomique, dans la gestion de la nutrition minérale du riz, il est reconnu que la silice (faiblement biodisponible dans le sol) joue également un rôle bénéfique dans la tolérance contre certains stress abiotiques. A cet effet, elle contribue à atténuer les effets négatifs des chocs thermiques sur certaines cultures dont le riz, le maïs et la Canne à sucre (Epstein, 1999 ; Ma, 2004 ; Liang *et al.*, 2007). Son impact positif a également été démontré pour le contrôle de la sécheresse chez le concombre (Savant *et al.*, 1997).

### 4.2. Performances des croisements interspécifiques

Les analyses de classification révèlent que la classe 2 regroupe 22 lignées et deux témoins (Nerica-L 19 et Otcou-medji). La similarité phénotypique des lignées au sein de cette classe suggère que les témoins possèdent des performances morphologiques et agronomiques comparables à celles des autres lignées. La précocité du cycle est identifiée comme un caractère d'intérêt majeur pour minimiser les effets des aléas climatiques, notamment la sécheresse (Bernier *et al.*, 2009). Elle permet aux plantes de terminer leur cycle de développement avant l'apparition d'un stress hydrique sévère (Ndjiondjop *et al.*, 2010a). Selon Raemaekers (2001), une floraison précoce intervient avant 70 jours après semis (JAS), une floraison intermédiaire entre 71 et 90 JAS, et une floraison tardive au-delà de 90 JAS. Bien que les lignées étudiées soient considérées comme tardives, celles de la classe 2 fleurissent plus tôt ( $100,7 \pm 1,26$  JAS) que celles des autres classes. Toujours dans cette classe, les lignées présentant une aptitude élevée au tallage sont particulièrement prometteuses. Ces lignées expriment jusqu'à 20,26 talles par plant à 60 JAS, surpassant ainsi le témoin Wita 4 (18,58 talles par plant). Au-delà de l'observation descriptive, la meilleure tolérance des lignées issues de croisements interspécifiques s'explique par l'introgression d'allèles de développement végétatif et de tolérance au stress hydrique d'*O. glaberrima*; l'espèce étant globalement reconnue pour son potentiel adaptatif aux différents stress locaux de la riziculture africaine. Par ailleurs, son système racinaire profond, sa canopie et la densité de son développement végétatif ; son efficacité d'absorption de l'eau et sa robustesse face aux stress abiotiques sont des atouts essentiels valorisables dans les programmes de sélection contre la sécheresse (Ndjiondjop *et al.*, 2010a ; Agnoune *et al.*, 2012). Ces apports génétiques, incluant l'introgression des gènes / QTLs liés au maintien de la turgescence, à la stabilité des tissus et à la réduction de la stérilité en conditions de stress, renforcent la résilience des lignées hybrides. La combinaison de cette base génétique avec une précocité modérée et un tallage élevé explique ainsi la bonne performance des lignées de la classe 2 dans des environnements de bas-fonds soumis à la variabilité hydrique.

#### 4.3. Implications pour la sélection variétale

Les lignées alliant tolérance à la sécheresse et bon potentiel au rendement représentent des ressources clés pour l'amélioration variétale dans les environnements soumis aux contraintes hydriques (Serraj *et al.*, 2009). Dans notre étude, plusieurs génotypes, qu'ils soient interspécifiques ou intraspécifiques, se sont distingués. Parmi eux, trois lignées issues de croisements interspécifiques (*O. glaberrima* × *O. sativa*), à savoir WAB2104-WAC4-1-TGR2-WAT3-1, WAB2104-WAC5-2-TGR1-WAT8-3b et WAB2152-WAT13-1-2-TGR1, se démarquent par leur précocité (92,7 à 97,9 JAS) et leur tolérance à la sécheresse. Ces performances sont en grande partie attribuables à leur parent commun Tog5681, un génotype de *O. glaberrima* largement reconnu pour sa robustesse dans les milieux difficiles d'Afrique subsaharienne et utilisé comme parent donneur dans de nombreux programmes d'amélioration des stress biotiques et abiotiques (Ndjiondjop *et al.*, 2010b).

Les progrès récents en génomique du riz renforcent l'intérêt de ces lignées pour la sélection. Des travaux de cartographie ont identifié plusieurs QTLs majeurs associés à la tolérance à la sécheresse (Jiao *et al.*, 2024 ; Pan *et al.*, 2021), et des gènes impliqués dans le maintien de la turgescence, la régulation stomatique ou la gestion de l'oxydation ont été caractérisés (Zhu & Xiong, 2013 ; Chen *et al.*, 2014 ; Bernier *et al.*, 2009 ; Geng *et al.*, 2023). Plus récemment, Jiao *et al.* (2024) ont cartographié 39 QTLs sur neuf chromosomes et identifié un gène clé, *Os04g0574600*, fortement exprimé sous stress hydrique et jouant un rôle de régulateur positif de la tolérance, principalement chez les variétés *Indica*. Ces résultats confirment le potentiel d'intégration de marqueurs moléculaires dans les programmes de sélection assistée.

Sur le plan pratique, les génotypes identifiés dans cette étude présentent plusieurs atouts pouvant orienter les stratégies d'amélioration variétale. Leur précocité constitue un caractère majeur pour les programmes ciblant les environnements à pluviométrie irrégulière, car elle permet d'éviter la sécheresse terminale. De même, les lignées à fort tallage et à levée vigoureuse constituent des candidats idéaux pour les schémas de sélection visant à renforcer la compétitivité des plants et optimiser la production de talle fertile, caractéristiques essentielles dans les systèmes de bas-fonds où la régénération végétative est un facteur clé de performance.

En intégrant ces résultats, les programmes de sélection, qu'il s'agisse de sélection récurrente, de croisements ciblés ou de sélection assistée par marqueurs peuvent mieux orienter le choix des parents donneurs ou receveurs et prioriser les traits agronomiques déterminants. À long terme, la valorisation conjointe des caractères de précocité, de vigueur au tallage et de tolérance génétique à la sécheresse associée à l'utilisation des outils moléculaires permettra de développer des variétés plus résilientes à la sécheresse et adaptées aux défis climatiques, contribuant ainsi à améliorer durablement la productivité rizicole dans les écosystèmes de bas-fonds pluviaux.

#### 4.4. Limites et perspectives

L'étude s'est limitée à une seule campagne expérimentale et à une analyse agro-morphologique des données observées. L'intégration d'outils moléculaires et de paramètres physiologiques permettrait d'affiner la compréhension des mécanismes de tolérance au stress hydrique observés. Des essais multi-environnements seraient également nécessaires pour valider la constance des comportements de résistance/tolérance observée chez les lignées.

#### 5. Conclusion

Cette étude a permis de caractériser la variabilité agro-morphologique de 61 lignées inter et intraspécifiques avec trois témoins évaluées et de mettre en évidence des différences notables dans leurs comportements face à la sécheresse. Les analyses multivariées ont révélé des groupes distincts de génotypes partageant des profils de performance similaires. WAB2104-WAC4-1-TGR2-WAT3-1, WAB2104-WAC5-2-TGR1-WAT8-3b et WAB2152-WAT13-1-2-TGR1, issues de croisements interspécifiques (*O. glaberrima* × *O. sativa*), se distinguent par leur précocité (92,7 à 97,9 JAS), leur potentiel de développement au tallage et leur tolérance à la sécheresse. Ces lignes offrent ainsi une base pertinente et de sélection adaptée à la riziculture subsaharienne. Toutefois, les résultats obtenus demeurent limités par l'absence d'analyses moléculaires permettant d'affiner la compréhension du déterminisme génétique des mécanismes sous-jacents. Pour consolider ces premières conclusions, des évaluations multi-environnementales complémentaires seraient nécessaires afin de tester la stabilité des réponses observées dans des contextes agro-climatiques variés. Par ailleurs, l'intégration d'outils moléculaires ainsi que la mise en place d'essais participatifs en milieu paysan contribueraient à renforcer la robustesse et la transposabilité des résultats, tout en accélérant l'identification de génotypes adaptés et performants à la riziculture locale pluviale de basfond.

#### Remerciements

Nous tenons à adresser tous nos remerciements au Centre du Riz pour l'Afrique (AfricaRice), plus spécifiquement au Dr Sié Moussa responsable de l'Unité Lowland Breeding et à toute son équipe et pour le soutien technique et financier accordé dans le cadre de cette étude.

#### 6. Références bibliographiques

- Adzigbe J., Frimpong F., Danquah A., Danquah E.Y., Asante I.K., Abebrese S.O., Dormatey R., Afriyie-Debrah C., Ribeiro P.F., Danquah E.O., Agyeman K., Kwame Bam R., Asante M.D., 2025. The responses and adaptations of rice (*Oryza sativa* L.) to drought stress: A review. *Climate Smart Agriculture*, Volume 2, Issue 4, November 2025, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.csag.2025.100080>
- Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*.
- Agnoun Yves, Samadori S. H. Biaou, M. Sié, R. S. Vodouhè & A. Ahanchédé.2012. The African Rice *Oryza glaberrima* Steud: Knowledge Distribution and Prospects. *International Journal of Biology*. Vol. 4, No. 3; 2012. pp. 158 à 180. URL:

- http://dx.doi.org/10.5539/ijb.v4n3p158. ISSN 1916-9671 E-ISSN 1916 968X Published by Canadian Center of Science and Education.
- Akoègninou, A., van der Burg, W.J., van der Maesen, L.J.G., Adjakidjè, V., Essou, J.P., Sinsin, B. and Yédomonhan, H., 2006. Flore analytique du Bénin. Backhuys Publishers, Leiden, the Netherlands. 1063p.
- Bernier, J., Serraj, R., Kumar, A., Venuprasad, R., Impa, S., Veeresh Gowda, R.P., Oane, R., Spaner, D., Atlin, G., 2009. The large-effect drought-resistance QTL qtl12.1 increases water uptake in upland rice. *Field Crops Research*. 110, 139-146.
- Bioversity International, IRRI, AfricaRice, 2007. Descriptors for wild and cultivated rice (*Oryza* spp.). Bioversity International, Rome, Italy. International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines; WARDA, Africa Rice Center, Cotonou, Benin. 72 p.
- Bocco, R., Lorieux, M., Seck, P.A., Futakuchi, K., Manneh, B., Baimey, H., Ndjidjondjop, M.N., 2011. Agro-morphological characterization of a population of introgression lines derived from crosses between IR 64 (*Oryza sativa indica*) and Tog 5681 (*Oryza glaberrima*) for drought tolerance. *Plant Science*. 183, 65-76.
- Chen DJ, Neumann K, Friedel S et al (2014) Dissecting the phenotypic components of Crop Plant Growth and Drought responses based on high-throughput image analysis. *Plant Cell* 26(12):4636–4655. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.129601>
- Dagnelie, P., 2012. Principes d'expérimentation: planification des expériences et analyse de leurs résultats. Edition électronique, [www.Dagnelie.be](http://www.Dagnelie.be), 413p.
- Epstein E (1999). Silicon. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 50, 641–664.
- Gana, A.S., 2011. Screening and resistance of traditional and improved cultivars of rice to drought stress at Badeffi, Niger State, Nigeria. *Agriculture and Biology Journal of North America*. 2(6): 1027-1031.
- Geng LY, Zhang W, Zou T et al (2023) Integrating linkage mapping and comparative transcriptome analysis for discovering candidate genes associated with salt tolerance in rice. *Front Plant Sci* 14(1):1065334. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1065334>
- Ghesquière, A., Séquier, J., Secong, G., & Lorieux, M. (1997). First step towards a rational use of African rice *Oryza glaberrima*, in rice breeding through a contig line concept. *Euphytica*, 96, 31-39. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1003045518236>
- Hammami, I., Allagui, M.B., Chakroun, M., El-Gazzeh, M., 2008. Agronomic Characterization of Tunisian Spontaneous Oat Accessions Resistant to Oat Crown Rust and Potential in Plant Breeding. *Tunisian Journal of Plant Protection*. 35(3): 13-27.
- Henderson, S.A., Kamboonruang, V., Cooper, M., 1995. Evaluation of a glasshouse screening method to select for drought resistance in rainfed lowland rice, in: *Fragile Lives in Fragile Ecosystems: Proceedings of the International Rice Research Conference, 13–17 February 1995*, International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, 783-806 pp.
- Hu W.F., Qin Y.B., Lin J.J., Chen T.T., Li S.F., Chen Y.T., Xiong J., Fu G.F., 2025. Unraveling the nexus of drought stress and rice physiology: mechanisms, mitigation, and sustainable cultivation. *Plant Stress*. Volume 17, September 2025, 100973. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.100973>
- IRRI, 2002. Standard Evaluation System for Rice. International Rice Research Institute. Los Baños, Philippines, 56 p.
- Jarin, A.S.; Islam, M.M.; Rahat, A.; Ahmed, S.; Ghosh, P.; Murata, Y. Drought Stress Tolerance in Rice: Physiological and Biochemical Insights. *Int. J. Plant Biol.* 2024, 15, 692-718. <https://doi.org/10.3390/ijpb15030051>
- Jiao, A., Chen, L., Ma, X. et al. Linkage Mapping and Discovery of Candidate Genes for Drought Tolerance in Rice During the Vegetative Growth Period. *Rice* 17, 53 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12284-024-00733-9>
- Jongdee, B., Pantuwat, G., Fukai, S., Fischer, K., 2006. Improving drought tolerance in rainfed lowland rice: An example from Thailand. *Agriculture Water Management*. 80, 225-240.
- Juenger, T.E., 2013. Natural variation and genetic constraints on drought tolerance. *Current Opinion in Plant Biology*. 16, 274-281.
- Kamoshita, A., Babu, R.C., Boopathi, N.M., Fukai, S., 2008. Phenotypic and genotypic analysis of drought-resistance traits for development of rice cultivars adapted to rainfed environments. *Field Crops Research*. 109, 1-23.
- Kassambara, A. (2017). *Practical Guide to Principal Component Methods in R*.
- Kumar, R., Venuprasad, R., Atlin, G.N., 2007. Genetic analysis of rainfed lowland rice drought tolerance under naturally-occurring stress in eastern India: heritability and QTL effects. *Field Crops Research*. 103, 42-52.
- Kumar, A., Bernier, J., Verulkar, S., Lafitte, R., Atlin, G., 2008. Breeding for drought tolerance: direct selection for yield, response to selection and use of drought-tolerant donors in upland and lowland-adapted populations. *Field Crops Research*. 107, 221-231.
- Leedesma, R. D., Martín, F., & Navarro-Pardo, E. (2022). The Kaiser rule revisited: Visual and analytical improvements. *Psychological Reports*, 125(5).
- Liang, Y.C., Sun W.C., Zhu Y.G., Christie P., 2007. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environ. Poll.* 147: 422-428.
- Louati-Namouchi, I., Louati, M., Chriki, A., 2000. A quantitative study of some agronomic characters in Sulla (*Hedysarum coronarium* L.). *Agronomie*. 20, 223-231.
- Ma, J.F., 2004. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil Sci. Plant Nutr* 50, 11-18.
- Murtagh, F., & Legendre, P. (2014). Ward's hierarchical clustering method: A comparison of implementations. *Journal of Classification*
- Ndikuryayo C., Ndayiragije A., Kilasi N. L., Kusolwa P., 2023. Identification of Drought Tolerant Rice (*Oryza Sativa* L.)

- Genotypes with Asian and African Backgrounds. *Plants* 2023, 12(4), 922; <https://doi.org/10.3390/plants12040922>.
- Ndjiondjop, M.N., Manneh, B., Cissoko, M., Drame, N.K., Glele-Kakai, R., Bocco, R., Baimey, H., Wopereis, M., 2010a. Drought resistance in an interspecific backcross population of rice (*Oryza* spp.) derived from the cross WAB56-104 (*O. sativa*) × CG14 (*O. glaberrima*). *Plant Science*. 179, 364-373.
- Ndjiondjop, M.N., Cissé, F., Girma, G., Sow, M., Bocco, R., Djedatin, G., Fatondji, B., 2010b. Morpho-agronomic and molecular characterization of *Oryza glaberrima* germplasm from Mali. *African Journal of Biotechnology*. 9(44):7409-7417.
- Pan CY, Zhang Y, Lin H et al (2021) QTL mapping and Candidate Gene Analysis on Rice Leaf Water potential. *Chin Bull Bot* 56(3):275-283. <https://doi.org/10.11983/CBB21039>
- Pantuwan, G., Fukai, S., Cooper, M., Rajatasereekul, S., o'Toole, J.C., 2002. Yield response of rice (*Oryzae sativa* L.) genotypes to different types of drought under lowlands : Grain yield and yield components. *Field Crops Research*. 73, 153-168p.
- Patterson, H. D., & Williams, E. R. (2022). *Designs for field experiments: Developments and applications*. Springer.
- Price, A.H., Townend, J., Jones, M.P., Audebert, A., Courtois, B., 2002. Mapping QTLs associated with drought avoidance in upland rice grown in the Philippines and West Africa. *Plant Molecular and Biology*. 48, 683-695.
- Raemaekers, R.H., 2001. Agriculture en Afrique Tropicale, Direction Générale de la Coopération Internationale (DGC), Brussels, Belgique 52p.
- R Core Team, 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Savant, N. K., Snyder, G. H., and Datnoff, L. E. 1997. Silicon management and sustainable rice production. Pages 151-199 in: Advances in Agronomy, vol. 58. D. L. Sparks ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Serraj, R., Kumar, A., McNally, K.L., Slamet-Loedin, I., Bruskiewich, R., Mauleon, R., Cairns, J., Hijmans, R.J., 2009. Improvement of drought resistance in rice. *Advanced Agronomy*. 103, 41-99.
- Sié, M. S. Dogbe, Y., & Coulibaly, M. (2005). Selection of interspecific hybrids (*O. sativa* x *O. glaberrima* or lowland NERICAs) and intraspecifics adapted to rained lowland growing conditions. *Int. Rice Comm. Newslett*, 54, 47-51.
- Sié, M., Dramé, K.N., Dakouo, D., Traoré, K., Dogbé, S.Y., Somado, E.A., Ogunbayo, S.A., Semon, M., Bamba, I., Futakuchi, K., 2008. Biodiversité et Amélioration Génétique du riz en Afrique Sub-saharienne. 12p.
- Sié, M., Ogunbayo, S.A., Dakouo, D., Sanou, I., Dembélé, Y., N'dri, B., Dramé, K.N., Sanni, K.A., Toulou, B., Glèlè, R.K., 2010. Evaluation of intra and interspecific rice varieties adapted to valley fringe conditions in Burkina Faso. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 2(3): 44-54.
- Sow, M., Sido, A., Laing, M., Ndjiondjop, M.N., 2013. Agromorphological variability of rice species collected from Niger. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*, 1-13.
- Swamy, M.B.P., Kumar, A., 2012. Sustainable Rice Yield in Water-Short Drought-Prone Environments: Conventional and Molecular Approaches, Irrigation Systems and Practices in Challenging Environments, Dr. Teang Shui Lee (Ed.), ISBN: 978-953-51-0420-9, InTech,
- Tenenhaus, M., 2006. *Statistique : Méthodes pour décrire, expliquer et prévoir*. Dunod, 256p.
- Torres, R.O., McNally, K.L., Vera Cruz, C., Serraj, R., Henry, A., 2013. Screening of rice Genebank germplasm for yield and selection of new drought tolerance donors. *Field Crops Research*. 147, 12-22.
- Varghese, C., Sharma, V.K., Jaggi, S., Sharma, A., 2004. Three-associate class partially balanced incomplete block designs and their application to partial diallel cross. Project Report, IASRI Publication, New Delhi.
- Ward, J.J., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of American Statistical Association*. 58, 236-244.
- Yates, F., 1936. A new method of arranging variety trial involving a large number of varieties. *Journal of Agriculture Science*. 26, 424-455.
- Zinolabedin, T.S., Hemmatollah, P., Seyed, A.M., Modarres, S., Hamidreza, B., 2008. Study of water stress effects in different growth stages on yield and yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. *Pakistan Journal of Biology and Science*. 11, 1303-1311.
- Zhu XY, Xiong LZ (2013) Putative megaenzyme DWA1 plays essential roles in drought resistance by regulating stress-induced wax deposition in rice. *Proc Natl Acad Sci USA* 110:17790-17795. <https://doi.org/10.1073/pnas.1316412110/-/DCSupplemental>
- Zou GH (2007) Study on the water requirement of Paddy and Upland rice and the genetic basis of drought tolerance at reproductive stage rice. HuaZhong Agriculture University, WuHan.