

African Crop Science Journal by African Crop Science Society is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 Uganda License. Based on a work at www.ajol.info/ and www.bioline.org.br/cs
DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/acsj.v32i1.1>



VARIABILITÉ ET GAIN GÉNÉTIQUE DES GÉNOTYPES DE HARICOT BIOFORTIFIÉS À L'EST DE LA RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO

R.K. KATALIKO^{1,2}, B.K. MUHASA², L.K. NDULANI², A.K. KIGHOMA²,
G.K. MBAHINGANA³, E.F. MUHONGYA³, L.K. SIVIRI², P.M. KIMANI⁴, J.S.Y. ELEBLU¹,
I. ASANTE¹ et K. OFORI¹

¹West Africa Centre for Crop Improvement (WACCI), University of Ghana, Accra, Legon, Ghana

²Faculty of Agricultural Sciences, Université Catholique du Graben (UCG), Butembo, République Démocratique du Congo

³Faculty of Agricultural Sciences, Université Adventiste de Lukanga (UNILUK), République Démocratique du Congo

⁴Department of Plant Science and Crop Protection, Faculty of Agriculture, University of Nairobi, Nairobi, Kenya

Auteur correspondant : richardkataliko23@gmail.com, rkkataliko@wacci.ug.edu.gh

(Received 8 December 2023; accepted 29 February 2024)

RESUME

La compréhension du mécanisme génétique responsable du contrôle des caractères agronomiques est très importante dans la mise en évidence des méthodes de sélection en amélioration végétale. Cette étude veut apprécier le niveau de variabilité et gain génétique au sein des génotypes des haricots biofortifiés à Butembo et Lukanga à l'Est de la République Démocratique du Congo. Une expérimentation a été réalisée sur 164 génotypes biofortifiés en Fe et Zn et cinq variétés locales (non-biofortifiés). Les données ont été prises sur le nombre de jours à la floraison, nombre de jours jusqu'à 75 et 90% de la maturité, nombre de gousses par pied et nombre de graines par gousse, le rendement en graines et le poids de 100 graines et soumises à l'analyse de la variance et au test de Tukey avant d'estimer les paramètres génétiques. La corrélation de Pearson et le clustering ont enfin été réalisés. Des différences significatives ont été observées entre le contraste qui oppose les génotypes biofortifiés aux variétés témoins localement cultivées au regard de tous les caractères étudiés à l'exception du nombre des gousses initiées par plant et le rendement. Les génotypes RW298, BF08-16-36A, BF08-1-77, RWV2359 et MV-14, avec un rendement supérieur à 2000 kg ha⁻¹, ont été les plus prometteurs au regard du rendement. L'estimation des composantes de la variance a montré une héritabilité (sens large) modérée au regard du nombre de jours à la floraison et faible pour tous les autres paramètres. Aussi, le coefficient de variation génotypique a été modéré uniquement au regard du rendement et faible pour tous les autres caractères. Le gain génétique dans les générations courantes a été faible (<10%) pour tous les caractères étudiés impliquant une action non-additive des gènes dans le contrôle des caractères au sein des génotypes étudiés. Une corrélation positive significative a été observée entre le rendement et le nombre de gousses par plant et le nombre de graines par gousse. La construction du dendrogramme a permis de regrouper quatre clusters importants (Cluster 1 = 49 génotypes, Cluster 2 = 30 génotypes,

Cluster 3 = 42 génotypes and Cluster 4 = 48 génotypes). Au regard des résultats observés, il est recommandé d'effectuer des sélections au sein du cluster 2 (couleur bleue du dendrogramme) regroupant les génotypes les plus prometteurs au regard du rendement ou d'exploiter l'hétérosis au sein des génotypes en étude.

Mots Clés : Clustering , hérabilité, *Phaseolus vulgaris*

ABSTRACT

A clear understanding of the genetic mechanism that controls the expression of the agronomic traits is imperative to define appropriate selection methods in bean breeding. The objective of this study was to assess the level of variability and genetic gain within iron and zinc biofortified common bean genotypes in eastern Democratic Republic of Congo. A field study was conducted involving 164 Fe and Zn dense bean genotypes and five local (non-biofortified) varieties. Data was collected on the number of days to flowering, number of days to 75 and 90% of maturity, number of pods per plant and seeds per pod, total grain yield and 100 seed-weight. There were significant differences among genotypes for all the traits monitored except for number of pods per plant and grain yield. The yield for genotypes RW298, BF08-16-36A, BF08-1-77, RWV2359 and MV-14 was more than 2000 kg ha⁻¹. These records make these genotypes the most competitive for this specific trait. The variance components showed moderate broad-sense heritability for the number of days to flowering and low for all the other parameters. Also, genotypic coefficient of variation was moderate only for grain yield but low for all other characters. The genetic gain was low (<10%) for all the traits, suggesting a non-additive gene action controlling the traits considering the study genotypes. Clustering showed that genotypes could be grouped into four important clusters (Cluster 1 = 49 genotypes, Cluster 2 = 30 genotypes, Cluster 3 = 42 genotypes and Cluster 4 = 48 genotypes). It is recommended that selections should be effected within the Cluster 2 (blue part of the dendrogram) which comprised the most promising genotypes for grain yield or to subject the study genotypes to heterosis breeding method.

Key Words: Clustering, heritability, *Phaseolus vulgaris*

INTRODUCTION

Le haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) est une importante composante des régimes alimentaires des populations de l'Afrique subsaharienne pour qui les moyens économiques sont très limités (Baudouin *et al.*, 2001; Nyabyenda, 2006). Ses graines sont riches en protéines (20 à 28%), en glucides (plus de 50%), en fibres alimentaires (0.2%), en micro éléments comme le fer (> 70 ppm) et zinc (> 14 ppm) (Costa *et al.*, 2006 ; Amongi *et al.*, 2018). En 2005, il a été désigné par le Programme National de Nutrition en République Démocratique du Congo (RDC) comme la viande des pauvres (Mbikayi *et al.*, 2018). Contrairement au type traditionnel qui renferme moins de 82.4 ppm de fer et moins

de 44.2 ppm de zinc, le type des haricots biofortifiés contiennent 75 à plus de 130 ppm de fer et 30.1 à plus de 46.6 ppm de zinc (Kimani et Warsame, 2019).

En RDC, la production de haricot est de 264 843 tonnes sur 485 202 hectares (FAOSTAT, 2021). Civava, en 2013, avait déjà mentionné que 50% de la production de haricot en RDC est produit et consommé au Nord et au Sud Kivu. Mbikayi et ses collaborateurs, en 2018, ajoutèrent que la consommation moyenne journalière des graines sèches de haricot en RDC atteint jusque 300 g tenant compte des diverses formes sous lesquelles le haricot est consommé. A part le fait qu'il accompagne les régimes alimentaires à base des céréales ou des tubercules, Ugen *et al.* (2012) mentionnent qu'il est transformé en

farine pour diverses finalités (pâtes, bouillies, etc.) mais aussi qu'il intervient dans les farines composites avec des grains d'amarante. En outre, ces derniers auteurs mentionnent la mise en évidence d'autres recettes à base de haricot comme du pain, des « samosas » et du « madazi ».

En 2012, le CIAT avait mentionné que le rendement de haricot en RDC était estimé à 0.8 t ha⁻¹ (Farrow et Muthoni, 2020). Ugen *et al.* (2012) avait mentionné que le rendement ne dépasse 1 250 kg ha⁻¹. La base des données FAOSTAT (2021) montre que ce rendement a baissé jusqu'à 0.5 t ha⁻¹. Pourtant, le rendement potentiel varie entre 1.35 à plus de 2 t ha⁻¹. Avec l'évolution de la démographie, l'exploitation de haricot à rendement faible laisse une très forte demande devant une très faible production.

Par ailleurs, comme le haricot constitue un aliment qui entre dans le régime alimentaire du quotidien en RDC, il constitue une bonne stratégie de lutte contre les déficiences minérales. En effet, le haricot est consommé par 83.8% de la population (Waluse, 2012). Que d'avantages si le type biofortifié supplante le type traditionnel. Il faut noter que la déficience en fer est à la base des dysfonctionnements entraînant une insuffisance cardiaque chronique, une inflammation intestinale, une maladie rénale mais aussi un cancer (Rocha *et al.*, 2018). La déficience en zinc entraîne des retards de croissance et le développement des maladies infectieuses. En 2019, Scott et ses collaborateurs avaient d'ailleurs mentionné que le zinc était impliqué dans l'inhibition de la réplication des virus, le covid-19 inclus (Kataliko, 2023). Les carences en fer et zinc sont identifiées par le « Kenya Health Policy 2014-2030 » comme une « faim cachée » et qui contribuent à l'augmentation de la morbidité et, dans le cas de zinc, de la mortalité particulièrement chez les femmes enceintes et les enfants de moins de cinq ans (Kimani et Warsame, 2019).

Dans son rapport relatif à l'amélioration des taux des minéraux dans le haricot en Afrique

centrale et orientale, Kimani (2009) avait mentionné que plus de trois milliards d'individus sont affectés par diverses déficiences alimentaires globalement (en particulier le fer, le zinc, les protéines et la vitamine A), particulièrement en Afrique et plus encore chez les femmes enceintes et les enfants. En RDC, 36 et 47% des enfants d'âge préscolaire dans les provinces du Nord et du Sud-Kivu souffraient d'anémie ferriprive (Beebe *et al.*, 2000). Au niveau national, en 2005, le Programme National de Nutrition avait rapporté 53 et 71% des cas d'anémie chez les femmes enceintes et les enfants d'âge préscolaire (Mbikayi *et al.*, 2018). Il a ainsi été évident de développer des haricots plus concentrés en fer et zinc et dont le rendement est élevé.

Dans cette logique, des activités pour la première phase dans le cadre de la biofortification en fer et zinc avaient été initiées par HarvestPlus en 2003 (Kimani, 2009). En 2010, les premières variétés biofortifiées en fer étaient ainsi développées et adoptées au Rwanda. Les activités se sont ainsi étendues en Ouganda et RDC (particulièrement à l'Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomique – INERA Mulungu au Sud-Kivu, INERA Kipoko au Katanga, INERA Mvuazi dans le Bas Congo et INERA Gandajika au Kasai Oriental) (Mulambu *et al.*, 2017). Cependant, le mécanisme génétique responsable du contrôle des caractères agronomiques n'est pas encore mis en évidence en vue d'envisager des bonnes pratiques de sélection et de profiter des gains de celle-ci.

Dans la seconde phase (2009-2013), des croisements résultèrent des variétés dont la teneur en fer est plus élevée (jusqu'à 100 ppm). Six de ces variétés dont HM 21-7, RWR 2245, PVA 1438, Namulenga, COD MLV 059 et Cuarentino furent ainsi utilisés en RDC depuis 2008 à 2013 (Mulambu *et al.*, 2017).

Par ailleurs, dans un autre programme de biofortification en fer et zinc mené à « University of Nairobi » et au « Malawi National Bean Program », six variétés riches

en fer et zinc et 11 variétés commerciales résistantes ou tolérantes aux trois principales maladies les plus communes chez le haricot dans les tropiques (tâches angulaires, anthracnose et pourritures racinaires) choisies au sein de plus de 2 800 accessions criblées (la première génération) furent croisées et avancées jusqu'à la F_{4,7} pour développer la seconde génération des haricots biofortifiés. Ces génotypes renferment 66 à 136 ppm de fer, 10 à 60 ppm de zinc et produisent 50 à 90% de plus comparés à la première génération. Leur rendement varie en effet entre 803 et 3 323 kg ha⁻¹ (Kimani et Warsame, 2019). Cependant, l'exploitation de ces génotypes dans différentes conditions écologiques n'est encore envisagée pourtant importante en vue de comprendre leur variabilité génétique.

Cette étude se veut comprendre la variabilité génétique des génotypes de haricot biofortifiés en fer et zinc et d'estimer l'héritabilité et le gain génétique au regard des caractères agronomiques dans les limites écologiques de Butembo et Lukanga à l'Est de la RDC. A plus, elle établit la corrélation entre les caractères et regroupe les génotypes en étude en différents clusters au regard des caractères étudiés.

MATERIELS ET METHODES

Milieu. Cette étude a été conduite de mars à juillet 2023 dans deux sites écologiques différents ; à Butembo au Centre de Recherche Agronomique et Vétérinaire du Graben (CRAVEG) dans la concession de l'Université Catholique du Graben (UCG) au site Horizon et à Lukanga dans le campus de l'Université

Adventiste de Lukanga. Le CRAVEG est situé en commune Kimemi ; précisément sur la colline Vutula, à environ 1761 m d'altitude et à 029.26823° de longitude Est et 00.12421° de latitude Nord. Le site expérimental installé à Lukanga était à 0°03' de latitude Sud, 29°1.8' de longitude Est et à 1952 m d'altitude.

Avec une température moyenne variant entre 17.2 et 18.8°C en Ville de Butembo et entre 15.8 et 17.1°C à Lukanga, le milieu d'étude appartient au climat équatorial tempéré par l'altitude. Ce climat est aussi caractérisé par deux saisons de pluie (de Mars à Mai et d'Août, à mi-Décembre). La pluviométrie moyenne annuelle est d'environ 1365 et 1510 mm à Butembo et Lukanga respectivement (Vyakuno, 2006).

Les résultats des analyses physico-chimiques du sol des sites expérimentaux conduites en mars 2023 au laboratoire central de l'UCG sont présentés sans le Tableau 1.

Matériels et méthodes. Le matériel végétal utilisé dans cette étude est constitué de 164 génotypes de haricot biofortifiés en fer et zinc et cinq variétés localement cultivées (DEMAI, IKINIMBA, KALANGITI, MAFUTALA et OBUSOSERA dont le niveau de biofortification en ces minéraux n'est disponible). Les génotypes biofortifiés sont de trois différentes origines : University of Nairobi, CIAT Uganda et Bukavu. Ils avaient été améliorées dans l'objectif d'augmenter leurs teneurs en fer et zinc mais aussi le rendement (Mulambu *et al.*, 2017 ; Amongi *et al.*, 2018 ; Kimani et Warsame, 2019). Le diammonium phosphate (18% N et 46% P₂O₅) a été utilisé comme

TABLEAU 1. Caractéristiques du sol des sites expérimentaux

Site	pH eau	pH KCl	M. minérale (%)	M. organique (%)	Phosphore (%)	Potassium (%)	Azote (%)	Fer (ppm)
Butembo	5.61	4.99	69.4	12.2	0,253	1,17	0,126	78,12
Lukanga	5.28	4.74	80.9	4.5	0.512	0.4056	0.12	0,7

fertilisant à la dose de 100 kg ha⁻¹ (Ejigu *et al.*, 2018).

L'essai a été planifié suivant un « augmented design » à quatre blocs incomplets. Dans ce dispositif, seules les variétés témoins ont été répétées dans différents blocs (Dagnelie, 2012). Chaque bloc comptait 46 modalités qui constituent les génotypes considérés dont 41 biofortifiés et cinq témoins. Chaque modalité était constituée par une ligne comportant 10 poquets distants de 30 cm. Cet arrangement est justifié d'une part par le fait que le haricot est une espèce autogame et cléistogame et de l'autre par la taille importante des génotypes en étude. Ces modalités étaient distantes les unes des autres de 60 cm alors que les blocs étaient distants les uns des autres de 1 m. La dimension totale du champ était ainsi de 29 m x 15.8 m. Au sein de chaque bloc la distribution des différents traitements dans différentes parcelles était effectuée au hasard en procédant par un tirage au sort sans remise. Pour assurer une bonne croissance, trois sarclages étaient effectués à des intervalles de 25 jours du semis.

Les paramètres de croissance sur lesquels les données ont été recueillies sont le nombre de jours à la floraison (DTF), le nombre de jours jusqu'à 75% (DT75M) et 90% (DT90M) de la maturité. Les composantes de rendement considérées ont été le nombre de gousses par

pied (NPP), le nombre de graines par gousse (NSP), le rendement en graines (GY) (sur une base parcellaire) et le poids de 100 graines (100SW). Le nombre de jours à la floraison ou à 75 et 90% de la maturité a été considéré comme le nombre de jours nécessaires jusqu'à voir apparaître au moins une fleur ouverte sur 50% des plants ; ou que 75% et 90% des plants atteignent la maturité complète. Le nombre de gousses par pied a été estimé comme la moyenne des gousses portées par cinq plants pris comme échantillon alors que le nombre de graines par gousse a été estimé comme le nombre moyen des graines portées par cinq gousses prises au hasard. Le rendement en graines (kg ha⁻¹) a été estimé après récolte et séchage des graines comme la quantité (g) récoltée dans chaque parcelle, et extrapolée à l'hectare. Enfin, le poids de 100 graines a été déterminé comme la moyenne de la masse obtenue après trois opérations de pesage de 100 graines de chaque unité expérimentale.

Les données ont été soumises à une analyse de la variance (grâce au logiciel R) à deux critères de classification entre autre les génotypes et les milieux d'étude. Le facteur génotypes (169) a fait l'objet d'une décomposition en trois composantes : les génotypes biofortifiés (164), les témoins (5) et le contraste entre les génotypes biofortifiés contre les témoins (Tableau 2) au regard des

TABLEAU 2. Modèle utilisé de l'analyse de la variance

Source de variation	Ddl	Variance	Composantes de la variance
Location (s)	s-1	-	-
Block (b)	b-1	-	-
Genotypes vs checks	1	-	-
Checks (c)	c-1	-	-
Genotypes (g)	g-1	CM _g	$VG = \frac{CM_g - CM_{gl}}{bl}$
Genotypes x Location	(g+c)-1	CM _{gl}	-
Erreur	s(n-(g+c))-b+1	CM _e	VE

n = b(k+c) où k est le nombre de génotypes biofortifiés dans un bloc ; VG et VE = variances génotypique et environnementale et VP = Variance phénotypique (VP=VG+VE)

caractères en étude (Gupta *et al.*, 2015). La séparation de la variance totale a été suivie comme présentée par Ejigu *et al.* (2018) ajustée pour deux sites. Pour séparer les moyennes, le test de Tukey a été employé à 95% d'intervalle de confiance.

L'héritabilité (%) au sens large (H^2) a été estimée comme $H^2 = \frac{vG}{vP} \times 100$ (Falconer et Mackay, 1996). Selon ces derniers, les coefficients (%) de variation génotypique, phénotypique et environnemental (GCV, PCV et ECV) sont estimés pour un caractère X comme

$$GCV = \frac{\sqrt{vG}}{\bar{x}} \times 100 ; PCV = \frac{\sqrt{vP}}{\bar{x}} \times 100$$

et $ECV = \frac{\sqrt{vE}}{\bar{x}} \times 100$ où \bar{x} est la moyenne pour le caractère considéré et le gain génétique attendu par sélection EGA et GAM (%) comme

$$EGA = \sqrt{vP} \times k \times H^2 \text{ et } GA (\%) = \frac{EGA}{\bar{x}} \times 100$$

où k est la sélection différentielle (k=2.06 à 5% de l'intensité de la sélection) (Tiwari *et al.*, 2019). L'héritabilité est jugée faible si elle est inférieure à 40%, modérée entre 40 et 60% et élevée lorsqu'elle est supérieure à 60% alors que les GCV, PCV et ECV sont jugés faibles lorsqu'ils sont inférieurs à 10% et élevés lorsqu'ils sont supérieurs à 20%. Entre 10 et 20%, ils sont modérés. Comme le proposent Hari et Narayan (2019), si le gain génétique est faible pour un caractère, ce dernier est contrôlé par un mode d'action non-additive ou dominante des gènes impliquant que l'hétérosis est la méthode de sélection à soumettre aux génotypes considérés en vue d'améliorer ce caractère. Si par contre, le gain génétique est élevé, le caractère est contrôlé par une action additive des gènes et une sélection récurrente peut être soumise aux génotypes.

La corrélation de Pearson a été réalisée grâce au logiciel Statistix, version 8. La distribution des génotypes en étude en différents clusters a été réalisée suivant la

méthode « Ward.D » alors que la distribution des données quantitatives récoltées a été faite suivant la méthode « euclidean » grâce au logiciel R.

RESULTATS

Variabilité et performance agronomique

Nombre de jours à 50% de la floraison. Des différences très significatives ($P < 0.01$) sont observées au sein de l'interaction entre l'ensemble des génotypes biofortifiés et les sites. Ces différences se révèlent très hautement significatives entre les sites mais aussi entre les génotypes en étude ($P < 0.001$) (Tableau 3). Ceci implique que chaque site réagit différemment vis-à-vis de chaque génotype. Des différences très hautement significatives sont également observées au sein du contraste qu'il y a entre les génotypes en étude et les témoins utilisés ($P < 0.001$). Ces derniers sont donc significativement différents des génotypes en étude au regard de ce paramètre. Cependant, au sein des témoins (checks), des différences se sont révélées non significatives (Tableau 3).

La période nécessaire pour atteindre 50% de la floraison varie de 35 à 52 jours à Butembo et de 41 à 62 jours à Lukanga. Mais au sein des génotypes en étude, elle varie de 40 à 56.5 jours. A Lukanga, la floraison est atteinte en moyenne, 10 jours après le début de la floraison à Butembo. Au regard de ce caractère, à Butembo en l'occurrence, plus de 50 génotypes biofortifiés ne sont pas significativement différents de la variété locale IKINIMBA ayant atteint en premier la floraison dans les deux sites. A Lukanga, seuls trois génotypes (BF08-1-27, BF08-16-52 et BF08-7-19A) ont atteint leur floraison après un nombre de jours significativement supérieur à celui du témoin ayant fleuri en premier (IKINIMBA) (Appendix A, <https://ln.run/8s6tx>).

TABLEAU 3. Analyse de la variance des paramètres agronomiques considérés

Source de variation	Ddl	DTF	DT75M	DT90M	NPP	NSP	GY	100SW
Location	1	9604.3***	15806***	81426***	5913.1***	0.0042ns	571476ns	180.62**
Block	3	27.8***	66***	79ns	96.9**	6.5279***	1072656**	64.33**
Genotypes vs checks	1	1499.0***	3746***	3999***	0.0ns	4.3834**	135475ns	1504.66***
Checks	4	18.6 ns	10 ns	10 ns	35.1 ns	0.9935 ns	201446 ns	5.93 ns
Genotypes	163	26.7***	46 ***	64*	31.9**	2.6257***	550454**	121.03***
Genotypes x Location	168	7.8**	21 ***	35ns	27.8*	0.9146*	404741*	88.62***
Erreur	27	3.4	6	36	13.8	0.4733	232081	13.86

*** significative à 99,9% ; ** significative à 99% ; * significative à 95% ; ns = variation non significative ; DTF = nombre de jours à la floraison ; DT75M et DT90M = nombre de jours jusqu'à 75% et 90% de la maturité ; NPP = nombre de gousses par plant ; NSP = nombre de graines per gousse ; GY = rendement en graines ; 100SW = poids de 100 graines

Nombre de jours pour atteindre 75% et 90% de la maturité. Des différences très hautement significatives ($P < 0.001$) se sont observées entre les géotypes en étude et leur interaction avec les milieux d'étude au regard du nombre des jours à 75 % de la maturité. Les milieux d'étude agissent différemment sur chaque géotype au regard de ce caractère. Des différences très hautement significatives ($P < 0.001$) au sein du contraste entre les géotypes biofortifiés en étude et les témoins mais aussi entre les milieux d'étude sont observées au regard de ces deux caractères. Alors qu'au regard du nombre de jours à 90% de la maturité, les différences sont significatives ($P < 0.05$) au sein des géotypes biofortifiés en étude, au regard du nombre de jours à 75% de la maturité, ces différences se sont révélées hautement significatives ($P < 0.001$) (Tableau 3).

La période nécessaire pour atteindre 75% de la maturité varie de 70 à 100 jours et de 101.25 à 135 jours respectivement à Butembo et à Lukanga. Mais au sein des géotypes biofortifiés, elle varie entre 90.12 et 113.5 jours. Le géotype KMA13-10-18 a été le plus précoce que même les témoins à Butembo. La variété locale KALANGITI a été en général celui ayant atteint à premier 75% de la maturité. A Lukanga, 75% de maturité est atteint, en moyenne, 33 jours après le début de la maturité à Butembo (Appendix B, <https://ln.run/8s6tx>). Le nombre de jours à 90% de la maturité varie entre 79 à 111 jours à Butembo et entre 118 à 130 jours à Lukanga au sein des variétés locales. Au sein des géotypes biofortifiés, il varie entre 79 et 111 jours et 108 à 145 jours respectivement à Butembo et Lukanga. Le nombre de jours 90% de la maturité n'a pas varié de manière significative au sein des variétés de haricot localement utilisées. Seuls six géotypes (BF08-16-52, UGK72, CAB2, MAC49, RWV2359 et ICYANA) ont atteint 90% de la maturité après une période significativement supérieure à celle du témoin ayant muri en premier (KALANGITI) à Lukanga. Ces géotypes prennent plus de quatre mois et demi pour mûrir (Appendix C,

<https://ln.run/8s6tx>). En général, six génotypes biofortifiés et une variété locale, avec moins de 100 jours de culture, ont significativement été plus précoces que BF08-16-52, l'unique génotype qui a été plus tardif.

Nombre de gousses par plant. Des différences significatives ($P < 0.05$) sont observées au sein de l'interaction entre l'ensemble des génotypes et les milieux d'étude. Des différences très hautement significatives ($P < 0.001$) sont également observées entre les milieux d'étude considérés et très significatives ($P < 0.01$) au sein des génotypes biofortifiés. Cependant ces différences sont non significatives ($P > 0.05$) entre les témoins (checks) mais aussi au sein du contraste entre les génotypes biofortifiés et les témoins (Tableau 3).

Le nombre de gousses initiées par plant est beaucoup plus supérieur à Lukanga qu'à Butembo. Lukanga a été écologiquement favorable au haricot au regard de ce paramètre. En effet, un plant a initié en moyenne, 14.545 gousses à Lukanga alors qu'à Butembo, 6.528 gousses ont été initiées. Le génotype BF08-13-44 avec 22.7 gousses a initié un nombre significativement élevé à ceux des génotypes KMA13-28-21 (3.375 gousses), RW3006 (3.375 gousses) et BCB11-342 (2.700 gousses) (Appendix D, <https://ln.run/8s6tx>).

Nombre de graines par gousse. Des différences significatives ($P < 0.05$) s'observent au sein de l'interaction entre les génotypes et les milieux d'étude. Des différences très hautement significatives ($P < 0.001$) se révèlent également au sein des génotypes biofortifiés de haricot et très significatives ($P < 0.01$) au sein du contraste qu'il y a entre les génotypes biofortifiés et les témoins (checks) (Tableau 3).

Alors qu'à Lukanga le nombre de graines par gousse n'a significativement varié, à Butembo, le nombre de graines par gousse a été significativement le plus important pour le

génotype BF08-16-21 en comparaison avec les génotypes NGWINxCAB2 21311, RWR1180, BCB11-342 et KMA13-30-14. La compilation des résultats de deux sites d'étude montre que les gousses des génotypes KMA13-23-21, BF08-03-13, BF08-16-21, BF08-16-21 et G2333(B) ont renfermé en général plus de graines. Le génotype KMA13-23-21 initie un nombre moyen de graines par gousse (7.9) significativement supérieur à ceux de deux témoins dont IKINIMBA (5.00) et OBUSOSERA (4.95) (Appendix E, <https://ln.run/8s6tx>).

Rendement en graines. Des différences significatives ($P < 0.05$) sont observées au sein de l'interaction entre tous les génotypes et les milieux écologiques considérés. Ces différences sont très significatives ($P < 0.01$) au sein des génotypes biofortifiés en étude. La diversité génétique des génotypes en étude est importante et significative. Mais les différences observées sont non significatives ($P > 0.05$) au sein des témoins (checks) mais aussi au sein du contraste entre les génotypes biofortifiés et les témoins tout comme entre les milieux d'étude (Tableau 3).

Le rendement associé avec chacun des génotypes en étude n'a pas significativement varié autour de la moyenne à Butembo (1045.9 kg ha⁻¹). Par contre, à Lukanga, les génotypes MCB23, BF08-1-77 et MV-14 ont eu chacun un rendement supérieur à 2660 kg ha⁻¹ significativement supérieur à celui de chacun des variétés utilisées comme témoins à l'exception de la variété MAFUTALA. Ce rendement est aussi supérieur à celui obtenu de chacun de 78 génotypes biofortifiés. Plus globalement, le rendement de 2805.56 kg ha⁻¹ associé avec le génotype RW298 est significativement supérieur à ceux des génotypes BF08-7-75, KMA13-03-35, RWR1180, MV1, KMA13-19-33, UGK72, RW1179 et KMA13-30-14. Cinq génotypes RW298, BF08-16-36A, BF08-1-77, RWV2359 et MV-14 ont donné un rendement supérieur à

2 t ha⁻¹ et seraient les plus prometteurs au regard de ce paramètre. Bien que non significatif, le rendement de haricot à Butembo (1045.9 kg ha⁻¹) a été supérieur à celui obtenu à Lukanga (967.397 kg ha⁻¹) (Appendix F, <https://ln.run/8s6tx>).

Poids de 100 graines. III ressort du Tableau 3 des différences très hautement significatives (P<0.001) au sein du contraste entre les génotypes biofortifiés et les témoins utilisés mais aussi au sein des génotypes biofortifiés en étude. Ces derniers sont d'une importante diversité au regard de caractère et se distinguent des témoins utilisés. Des différences très significatives (P<0.01) sont également observées entre les milieux d'étude. Cependant, les différences se sont révélées non significatives (P>0.05) au sein des témoins (checks).

Le poids de 100 graines est significativement supérieur à Lukanga probablement par le fait que la période de culture reste supérieure dans ce milieu qu'à Butembo (Appendix C). Cependant, pour les témoins, ce poids est faible à Lukanga qu'à Butembo. A Butembo, le poids de 100 graines pour les génotypes BF08-01-92, BF08-7-112D, KMA13-05-21 et RWR2154 (≥ 53.8 g) a été significativement supérieur à celui de plus 71 génotypes en étude (<29.4 g), les témoins y compris. A Lukanga, le poids de 100 graines pour le génotype BF08-16-68 a été significativement plus supérieur à celui du reste des génotypes considérés dans cette étude. Dans l'ensemble, le poids de 100 graines pour 19 génotypes biofortifiés est significativement supérieur à ceux de tous les témoins. Plus de la moitié de ces génotypes est du CIAT Uganda (Appendix G, <https://ln.run/8s6tx>).

Héritabilité et gain génétique. L'estimation des paramètres génétiques a montré une importance modérée de la variance génotypique au regard du nombre de jours à la floraison et ce faisant, une héritabilité modérée (Tableau 4). Pour tous les autres paramètres étudiés, la variance environnementale a été la plus

TABLEAU 4. Paramètres génétiques des caractères étudiés

	Moyenne	VG	VE	VP	H ² (%)	GCV (%)	ECV (%)	PCV (%)	EGA	GA (%)
DTF	48.18	2.36	3.4	5.76	41.00	3.19	3.83	4.98	2.027	4.208
DT75M	100.89	3.13	6	9.13	34.25	1.75	2.43	2.99	2.131	2.112
DT90M	110.11	3.63	36	39.63	9.15	1.73	5.45	5.72	1.186	1.077
NPP	10.54	0.51	13.8	14.31	3.58	6.79	35.25	35.90	0.279	2.648
NSP	5.54	0.21	0.47	0.69	31.13	8.34	12.41	14.96	0.532	9.590
GY	1006.51	18214.13	232081	250295.1	7.28	13.41	47.86	49.71	74.998	7.451
100SW	31.21	4.05	13.86	17.91	22.62	6.45	11.93	13.56	1.972	6.319

DTF = nombre de jours à la floraison ; DT75M et DT90M – nombre de jours jusqu'à 75% et 90% de la maturité ; NPP = nombre de gousses par plant ; NSP = nombre de graines per gousses ; GY = rendement en graines ; 100SW = poids de 100 graines ; VG, VE et VP = variances génotypique, environnementale et phénotypique ; H² = héritabilité (%) au sens large ; PCV, GCV et ECV = Coefficient (%) de variance phénotypique, génotypique et environnementale ; EGA et GAM (%) = gain génétique attendu par sélection

importante (>60%) dans l'expression du phénotype observé.

Le coefficient de variation génotypique a été modéré uniquement au regard du rendement. Il est faible au regard de tous les autres caractères (Tableau 4). Ceci implique que l'influence des génotypes dans la variabilité observée est modérée au regard du rendement mais faible au regard de tous les autres caractères.

Les coefficients de variation phénotypique et environnementale ont été les plus élevés au regard du rendement suivi du nombre de gousses par plant (Tableau 4) indiquant l'importance de l'influence phénotypique et environnementale dans la variation observée par rapport à ces caractères.

Le gain génétique qu'on peut espérer par sélection dans les générations courantes est faible (<10%) pour tous les caractères étudiés (Tableau 4). Ceci indique que les caractères étudiés sont à fortiori gouvernés par l'action non-additive des gènes.

Corrélation entre les paramètres et répartition des génotypes dans des clusters.

Des corrélations positives très hautement significatives ($P < 0.001$) ont été observées entre le nombre de jours à 75 et 90% de la maturité, entre le nombre de jours à la floraison et le nombre de jours à 75 et 90% de la maturité. Une corrélation positives très

hautement significative ($P < 0.001$) a également été observée entre le nombre de gousses par plant et le nombre de jours à la floraison, le nombre de jours à 75 et 90% de la maturité suggérant que l'augmentation du nombre de jours à la floraison et à la maturité induit une augmentation du nombre de gousses initiées par plant. Une corrélation positive très hautement significative ($P < 0.001$) a été aussi observée entre le nombre de graines par gousse et le nombre de jours à la floraison et le nombre de gousses par plant, mais aussi entre le rendement et le nombre de gousses par plant (Tableau 5).

Une corrélation positive significative ($P < 0.05$) et très significative ($P < 0.01$) a été ensuite observée entre le poids de 100 graines et le nombre de jours à 75 et à 90% de la maturité physiologique, respectivement (Tableau 5). La corrélation positive significative ($P < 0.05$) a aussi été observée entre le nombre de graines par gousse et le nombre de jours à la maturité (à 75 et 90%) et le rendement indiquant que l'augmentation du nombre de graines par gousse induit une augmentation du rendement (Tableau 5).

Les résultats du dendrogramme sur base des données quantitatives recueillies, représentés dans la Figure 1, montre 4 clusters importants (Cluster 1 = 49 génotypes, Cluster 2 = 30 génotypes, Cluster 3 = 42 génotypes

TABLEAU 5. Corrélation entre les paramètres d'étude

	DT75M	DT90M	DTF	NPP	100SW	NSP
DDT90M	0.9588***					
DTF	0.8644***	0.8436***				
NPP	0.6107***	0.5928***	0.5596***			
100SW	0.1294*	0.1472**	0.0842ns	0.0068ns		
NSP	0.1055*	0.1165*	0.2158***	0.3236***	-0.1223*	
GY	0.0007ns	0.0304ns	-0.0622ns	0.2686***	0.0712ns	0.1131*

*** significative à 99.9% ; ** significative à 99% ; * significative à 95% ; ns = corrélation non significative ; DTF = nombre de jours à la floraison ; DT75M et DT90M = nombre de jours jusqu'à 75% et 90% de la maturité ; NPP = nombre de gousses par plant ; NSP = nombre de graines per gousse ; GY – rendement en graines ; 100SW = poids de 100 graines

and Cluster 4 = 48 génotypes). Les variétés locales sont apparues dans deux classes adjacentes 3 et 4 (couleurs verte et violette). Le cluster 2 (couleur bleue) a regroupé la plupart des génotypes dont le rendement a été le plus élevé et particulièrement les génotypes dont le rendement a été supérieur à 2000 kg ha⁻¹. Par contre, le cluster 1 (couleur rouge) a regorgé l'ensemble de génotypes dont le rendement a été le plus faible (<325 kg ha⁻¹).

DISCUSSION

Variabilité et performance agronomique.

La présence d'interactions significatives entre les génotypes et les milieux d'étude en ce qui est des paramètres de croissance et les composantes de rendement (Table 3) serait liée aux différences considérables des milieux d'étude. Ceux-ci disposent des conditions environnementales distinctes. Lukanga se trouve à 1952m d'altitude alors que Butembo est à 1761m. De plus, la température moyenne varie entre 17.2 et 18.8°C en Ville de Butembo alors qu'à Lukanga elle oscille entre 15.8 et 17.1°C. Mais également, les précipitations varient autour de 1365 mm à Butembo et 1510 mm à Lukanga dans le territoire de Lubero (Vyakuno, 2006). Il en est de même pour les analyses des sols des sites expérimentaux qui ont montré que le sol du site expérimental de Butembo est moins acide et plus riche en matière organique que celui de Lukanga. Il est évident que la différence écologique des milieux d'étude constitue un facteur important. Wery et Turc (1990) dans leur étude avaient également indiqué que la contrainte hydrique représente le facteur environnemental le plus limitant du développement normal de haricot. Des différences significatives ont également été observées au sein des génotypes biofortifiés de haricot au regard de tous les paramètres d'étude. Ces différences seraient dues à leur variabilité génétique importante. Ces génotypes possèdent différents backgrounds génétiques (Mulambu *et al.*, 2017 ; Amongi *et al.*, 2018 ;

Kimani et Warsame, 2019) et avaient été développés sous différentes conditions écologiques. Hari et Narayan (2019) avaient trouvé, dans leur étude sur la variabilité génétique de 13 génotypes de haricot au Nepal, des différences très significatives au regard des paramètres phénologiques de croissance. De façon similaire, l'interaction entre les génotypes et les milieux d'étude au regard du rendement et des composantes du rendement a été significative (Tableau 3). Des différences significatives ont été également observées au sein des génotypes biofortifiés au regard de ces paramètres. Cependant, le contraste entre les génotypes biofortifiés et les variétés localement cultivées n'a été significatif qu'au regard du nombre de graines par gousse et le poids de 100 graines. Travaillant sur 84 F_{4,7} de haricot biofortifié en fer et zinc au Kenya, Kimani et Warsame (2019) avaient également trouvé des différences très significatives au regard du rendement. Mondo *et al.* (2019), dans leur étude d'interaction entre les génotypes et l'environnement sur 78 lignées de haricot de la F_{1,7} issues des sélections assistées par des marqueurs pour une résistance horizontale au Kenya, avaient trouvé une interaction hautement significative au regard du rendement en graines. Des différences hautement significatives avaient également été observées au sein de ces lignées. Mirindi *et al.* (2018) avaient trouvé, dans leur étude sur l'évaluation de 14 variétés biofortifiées en fer et zinc et une variété locale, des différences significatives au regard du rendement en graines, du poids de 100 graines et du nombre de jours à la maturité. Le poids de 100 graines est un caractère de qualité chez le haricot et influence le marché. Le génotype RW298 a eu un rendement de 2805.56 kg ha⁻¹ significativement supérieur à ceux des génotypes BF08-7-75, KMA13-03-35, RWR1180, MV1, KMA13-19-33, UGK72, RW1179 et KMA13-30-14. A Lukanga, trois génotypes biofortifiés MCB23, BF08-1-77 et MV-14 ont eu des rendements significativement supérieurs à ceux de quatre

témoins à l'exception de MAFUTALA. Plus de la moitié des géotypes biofortifiés ont eu en effet des rendements supérieurs, bien que non significatifs, à ceux de la plupart des témoins. Cette évidence est inhérente à l'objectif poursuivi dans le programme d'amélioration des géotypes biofortifiés, celui d'augmenter le taux de fer et zinc et le rendement en graines (Kimani et Warsame, 2019). Les différences observées pourraient aussi se justifier par la taille importante des géotypes d'étude. Dans cette étude, 169 différents géotypes sont utilisés. A plus de l'influence des conditions écologiques différentes, le bagage génétique serait sûrement différent pour la plupart des géotypes en étude.

Héritabilité et gain génétique. Les résultats des paramètres génétiques ont montré une importance modérée de la variance génotypique uniquement au regard du nombre de jours pour atteindre 50% de la floraison (DTF) (Tableau 4). Cette évidence induit ainsi une héritabilité (sens large) modérée faisant que le phénotype observé au regard de ce caractère soit dû à plus de 40% au géotype. Pour tous les autres paramètres (DT75M, DT90M, NPP, NSP, GY et 100SW), la composante environnementale de la variance l'a emporté sur la composante génotypique (Table 4). La pression de sélection doit ainsi être plus accélérée dans les futures générations pour pouvoir espérer profiter des gains qu'offre celle-ci. Des gains au regard de ces caractères ne sont donc évidents si la sélection au sein des géotypes est réalisée dans les générations courantes. Hari et Narayan (2019) avaient réalisé une importance de la variance génotypique induisant une importance de l'héritabilité (>60%) dans l'expression des caractères considérés dans leur étude sur 13 géotypes de haricot.

Alors que les coefficients de variation phénotypique ont été modérés au regard du nombre de graines par gousse et du poids de 100 graines, et élevés au regard du nombre de gousses par plant et du rendement, le

coefficient de variation génotypique a été trouvé modéré uniquement au regard du rendement en graines (Tableau 4) impliquant une influence modérée des géotypes dans la variabilité observée au regard du rendement. Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Tiwari *et al.* (2019) qui avaient trouvé ce coefficient modéré uniquement pour le rendement (12.86%). Ceci indique que la sélection au sein des géotypes de haricot biofortifiés est possible pour le rendement. Mendez-Natera *et al.* (2012) dans leur étude sur l'étude génétique de coton, avaient également trouvé un coefficient de variation génotypique associé au rendement modéré (14.5%). Par contre, Hari et Narayan (2019) avaient trouvé un coefficient de variation génotypique élevé (29.18%) au regard du rendement en graines de haricot. Les géotypes en étude sont ainsi à soumettre à une pression de sélection au sein des générations futures pour pouvoir augmenter et fixer l'influence des géotypes dans la variabilité au regard des caractères d'étude.

Le gain génétique qu'on peut espérer par sélection dans les générations courantes a été trouvé faible (<10%) pour tous les caractères étudiés (Tableau 4). Ceci implique que la pression de sélection doit s'intensifier dans les générations futures avant de pouvoir profiter des gains de sélection. Ceci serait lié au fait que les gènes ne se sont pas encore suffisamment fixés comme la plupart des géotypes ne sont pas des lignées pures en particulier ceux obtenus de University of Nairobi ». Ils sont en effet à la $F_{4,7}$ (Kimani et Warsame, 2019). Au regard de ce résultat, les caractères étudiés seraient gouvernés par l'action non-additive des gènes. Pour profiter des gains dans les prochaines générations, Hari et Narayan (2019) recommandent l'hétérosis comme la méthode de sélection.

Corrélation entre les paramètres et répartition des géotypes dans des clusters.

Les résultats ont montré une corrélation positive significative entre le rendement et le

nombre de gousses par plant et le nombre de graines par gousse (Tableau 5). L'amélioration en vue d'augmentation du nombre de gousses par plant et du nombre de graines par gousse résulterait en une augmentation du rendement. Ces résultats sont similaires avec ceux trouvés par Hari et Narayan (2019) sur 13 génotypes de haricot au Nepal. Mondo *et al.* (2019) avaient trouvé dans leur étude une corrélation positive significative entre le rendement en graines et le nombre de gousses par plant et celui de graines par gousse. Jules *et al.* (2017) avaient, dans leur étude menée sur quatre génotypes de haricot biofortifiés en fer et en zinc à Mushinga et Mulungu en RDC, également observé une corrélation positive significative entre le rendement en graines et le nombre de gousses par plant. Batumike (2018) avait également, dans son étude sur l'évaluation de 24 génotypes de haricot sur deux saisons différentes à Lugari au Kenya, trouvé une corrélation positive significative entre le rendement en graines et le nombre de gousses par plant et le poids de 100 graines. Comme tous ces paramètres sont des composantes du rendement, leur augmentation résulterait en une augmentation du rendement en graines chez le haricot.

Les données quantitatives recueillies ont permis de construire un dendrogramme regroupant quatre clusters importants. Alors que les variétés locales sont apparues dans deux clusters adjacents (3 et 4), la plupart des génotypes biofortifiés et dont le rendement a été supérieur à celui des variétés locales et en particulier ceux qui ont eu un rendement supérieur à 2 t ha⁻¹ sont apparus dans le cluster 2. La sélection doit ainsi avoir lieu au sein des génotypes retrouvés dans le cluster 2. Hari et Narayan (2019) avaient également réalisé quatre clusters dans leur étude sur 13 génotypes de haricot au Nepal. Kataliko *et al.* (2023) avaient, dans leur étude de caractérisation de 59 génotypes de haricot biofortifiés et six variétés locales en ville de Butembo, réalisé 12 clusters. Yèyinou *et al.* (2018) avaient, quant à eux, réalisé neuf

clusters à partir des données quantitatives recueillies sur 57 génotypes de haricot au Bénin. Les génotypes appartenant à des clusters différents sont d'une dissemblance quantitative importante alors que ceux qui sont adjacents l'un à l'autre dans un même cluster sont d'une ressemblance notable en vertu de leurs caractères quantitatifs.

CONCLUSION

Les génotypes de haricot biofortifiés considérés dans cette étude ont été d'une grande variabilité au regard de tous les caractères de croissance, du rendement et des composantes du rendement, essentiels dans un programmes d'amélioration de haricot. Nombreux sont les génotypes biofortifiés qui se sont distingués des variétés locales au regard des caractères étudiés (nombre de jours à la floraison, à la maturité, nombre de graines par gousse et poids de 100 graines) à l'exception du nombre de gousses par plant mais aussi du rendement en graines. Le génotype RW298 a eu un rendement significativement supérieur à ceux des génotypes BF08-7-75, KMA13-03-35, RWR1180, MV1, KMA13-19-33, UGK72, RW1179 et KMA13-30-14. Et dans l'ensemble les génotypes RW298, BF08-16-36A, BF08-1-77, RWV2359 et MV-14 ont donné un rendement supérieur à 2 t ha⁻¹ et seraient à avancer dans une étude d'analyse de stabilité dans une large gamme environnementale.

L'héritabilité a été faible pour tous les caractères à l'exception du nombre de jours à la floraison où elle a été modérée. Alors que le coefficient de variation génotypique a été modéré uniquement au regard du rendement et faible pour tous les autres caractères, le gain (%) génétique a été faible pour tous les caractères. Ces derniers seraient ainsi gouvernés par l'action non-additive des gènes et l'hétérosis est la méthode de sélection à envisager. Quatre importants clusters (Cluster 1 = 49 génotypes, Cluster 2 = 30 génotypes, Cluster 3 = 42 génotypes and Cluster 4 = 48

génotypes) ont enfin été déterminés. Le cluster 2 (couleur bleue) a regroupé la plupart des génotypes dont le rendement a été le plus élevé, supérieur à 2000 kg ha⁻¹. De cette étude, il est recommandé d'effectuer des sélections au sein du cluster 2 ou d'exploiter l'hétérosis au sein des génotypes en étude.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Centre International d'Agriculture Tropicale (CIAT-Uganda) et University of Nairobi pour nous avoir fourni les génotypes biofortifiés en fer et zinc utilisés dans cette étude.

REFERENCES

- Amongi, W., Mukankusi, C., Sebuliba, S. and Mukamuhirwa, F. 2018. Iron and zinc grain concentrations diversity and agronomic performance of common bean germplasm collected from east Africa. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development* 18(3):13717-13742.
- Batumike, N.R. 2018. Resistance of common bean genotype to foliar fungal and bacterial diseases. Doctoral dissertation, University of Nairobi, Nairobi, Kenya. 141pp.
- Baudoin J-P, Vanderborcht T., Kimani P.M., and Mw'angombe A.W. 2001. Légumes à grains / : Haricot (Raemaekers (Ed.)). *Agriculture en Afrique Tropicale. Bruxelles, DGCI*. pp. 337-355.
- Beebe, S., Gonzalez, A.V. and Rengifo, J. 2000. Research on trace minerals in the common bean. *Food and Nutrition Bulletin* 21:387-391.
- Civava, M. 2013. Amélioration des agrosystèmes intégrant le haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) au Sud-Kivu montagneux. Gestion durable des agrosystèmes en milieu tropical humide, 23 p. <https://www.orbi.uliege.be/handle/2268/164008> consulted 17/4/2018.
- Costa, G.E.A., Queiroz-Monici, K.S., Reis, S.M.P.M. and Oliveira, A.C. 2006. Chemical composition, dietary fiber and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes. *Food Chemistry* 94:327-330.
- Dagnelie, P. 2012. Principes d'expérimentation. Planification des expériences et analyse de leurs résultats, Gembloux, Presses agronomiques de Gembloux. ISBN 978-2-87016-117-3. 413pp.
- Ejigu, E., Wassu, M. and Berhanu, A. 2018. Genetic variability, heritability and expected genetic advance of yield and yield related traits in common bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.) at Abaya and Yabello, Southern Ethiopia. *African Journal of Biotechnology*, 17(31):973-980. <https://doi.org/10.5897/ajb2016.15701>
- Falconer, D.S. and Mackay, T.E.C. 1996. Introduction to Quantitative Genetics, 4th edition; John Wiley, New York, ISBN 0-582-016428
- Farrow, A. and Muthoni, R.A. 2020. Atlas of common bean production in Africa. 2nd ed. Nairobi, Kenya: PABRA/CIAT Publication. 260pp.
- FAOSTAT. 2021. Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database, Rome, Italy.
- Gupta, V.K., Parsad, R. and Mandal, B.N. 2015. Significance of Experimental Designs in Agricultural Research. ICAR-IASRI, New Delhi, India. I.A.S.R.I./T.B.-01/2015
- Hari, N.G. and Narayan, H.M. 2019. Genetic variability, heritability and genetic advance of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes at mountain environment of Nepal. *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences* 6(10):46-56.
- Jules, N.B., Téléphore, M.C., Dieudonne, P.M.L., Espérance, B.M., Adrien, M.M., Josué, K.W. et Antoine, K.L. 2017. Évaluation agronomique des variétés de haricot volubile riches en micronutriments dans un système intégré d'Agroforesterie sur deux sols contrastés à l'Est de la RD

- Congo. *Journal of Applied Biosciences* 114:11368-11386.
- Kataliko, R.K., Mbahingana, G.K., Muhongya, E.F., Muyandula, J.M., Ndaliko, T.M., Wasukundi, M., Kimani, P.M. et Ofori, K. 2023. Caractérisation de variétés biofortifiées en fer et zinc et Variétés locales de haricot commun. *African Crop Science Journal* 31(2):133-149.
- Kimani, P.M. 2009. Breeding Micronutrient Dense Bean Varieties in East and Central Africa, Conference PABRA-ECABREN, 6-9 July, Nakuru, Kenya. pp. 11-18.
- Kimani, P.M. and Warsame, A. 2019. Breeding second-generation biofortified bean varieties for Africa. *Food and Energy Security* 8:e00173. <https://doi.org/10.1002/fes3.173>
- Mbikayi, N., Mumba, A.D., Kimani, P.M., Kizungu, R. and Mirindi, C. 2018. Identification of biofortified beans (*Phaseolus vulgaris* L): Case study on genetic diversity, relationship and rates of iron and zinc concentrations in farmer's accession, in eastern DR Congo. *International Journal of Innovation and Applied Studies* 25(1):131-139.
- Méndez-Natera, J.R., Rondón, A., Hernández, J. and Merazo-Pinto, J.F. 2012. Genetic studies in upland cotton. III. Genetic parameters, correlation and path analysis. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics* 44(1):112-128.
- Mondo, J.M., Kimani, P.M., and Narla, R.D. 2019. Genotype x Environment Interactions on Seed Yield of Inter-racial Common Bean Lines in Kenya. *World Journal of Agricultural Research* 7(3):76-87. doi: 10.12691/wjar-7-3-1.
- Mirindi, C., Mongana, E., Mbikayi, N., Kijana, R., Rudahaba, N., Civava, M. et Irengé, C., 2018. Evaluation agronomique des variétés biofortifiées du haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.) en essais comparatifs d'adaptation: cas des variétés grimpances «Nutritionally enhanced climbing beans (NUV)». *International Journal of Innovation and Applied Studies* 25(1):76-85.
- Mulambu, J., Andersson, M., Palenberg, M., Pfeiffer, W., Saltzman, A., Birol, E., Oparinde, A., Boy, E., Herrington, C., Asare-Marfo, D., Lubobo, A., Mukankusi, C. and Nkalubo, S. 2017. Iron beans in Rwanda: Crop development and delivery experience. *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 17(2):12026-12050
- Nyabyenda, P. 2006. Les plantes cultivées en région tropicales d'altitude d'Afrique/ : généralités, légumineuses alimentaires, plantes à tubercules et racines, céréales. *Presses Agronomiques de Gembloux* 1: 223.
- Rocha, B.M.L., Cunha, G.J.L., Menezes and Falcão, L.F. 2018. The burden of iron deficiency in heart failure. *Journal of the American College of Cardiology* 71:782-793.
- Scott, A., Read, Stephanie Obeid, Chantelle Ahlenstiel and Golo Ahlenstiel. 2019. The role of zinc in antiviral immunity. *Advances in Nutrition* 10(4): 696-710. doi:10.1093/advances/nmz013
- Tiwari, D.N., Tripathi, S.R., Tripathi, M.P., Khatri, N. and Bastola, B.R. 2019. Genetic variability and correlation coefficients of major traits in early maturing rice under rainfed lowland environments of Nepal. *Advances in Agriculture*, <https://doi.org/10.1155/2019/5975901>.
- Ugen, M., Musoni, A., Cheminingwa, G., Kimani, P., Mucharo, M. and Katafire, M. 2012. Utilization of common bean for improved health and nutrition in eastern and central Africa. <https://www.asareca.org/sites/default/files/publications/Utilization%20of%20common%20bean%20for%20improved%20health%20and%20nutrition.pdf>. Accessed on 31/12/2021.
- Vyakuno, K. 2006. Pression anthropique et aménagement rationnel des hautes terres de Lubero en RDC. Rapports entre société et milieu physique dans une montagne

- équatoriale, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse II, France. 294pp.
- Waluse, K.S. 2012. Determinants of common bean productivity and efficiency: A case of smallholder farmers in eastern Uganda. MSc. thesis, Egerton University, Kenya, 114pp.
- Yêyinou, L.E.L., Orobiyi, A., Adjatin, A., Akpo, J., Toffa, J., Djedatin, G. and Dansi, A. 2018. Morphological characterization of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) landraces of Central region of Benin Republic. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 10(11):304-318.