

Effets de la fertilisation phosphatée sur la nodulation et le rendement de deux variétés de soja (glycine max) dans les conditions agroécologiques de Lufu-Toto au Kongo Central en République démocratique du Congo.

Effects of phosphate fertilization on nodulation and yield of two soya varieties (glycine max) in the agro-ecological conditions of Lufu-toto in Central Kongo in Democratic Republic of the Congo.

Affermi KUFINU DIA MATONDO¹, Alexis S. VUNI^{2*}, Moïse K. LOSEMBE², Boniface N. LUBAKI³, Hervé NGONDE NSAKALA³, Bode M. MASIALA⁴, Blanchard M. NGOYI⁴, Giresse S. BIFUBIAMBOTE⁴, Serge N. BUNGU TULUENGA⁴, Justin M. BELANI⁴, Jules ALONI KOMANDA²

¹Département de Géostratégie, Géopolitique, Environnement et Aménagement du Territoire (GGEA) Centre de Recherche en Sciences Humaines (CRESH), B.P 3474 Kinshasa, RD Congo.

²Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo.

³Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo.

⁴Mention Economie Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo.

RESUME:

Cette étude a été menée dans l'agglomération de Lufu Toto, dans le territoire de Mbanza Ngungu, dans la province du Kongo Central, en République démocratique du Congo (RDC). Elle a été menée sur deux saisons de culture : d'abord durant la petite saison des pluies (du 3 avril au 13 juillet 2018), puis durant la grande saison des pluies (du 3 novembre 2018 au 9 février 2019). Son objectif était de déterminer l'effet de doses croissantes de phosphore sur le rendement en graines et la nodulation du soja. Deux variétés de soja à maturité précoce (TGX1830-7F et M351) ont été utilisées, avec l'application de trois doses de phosphore (0,70 et 140 kg de P₂O₅ ha⁻¹(-1)). Le dispositif expérimental utilisé est du type split-plot, avec trois répétitions. La variété constituait le facteur principal et le phosphore, le facteur secondaire. Les résultats obtenus montrent que le rendement en graines est influencé par l'application de phosphore. En ce qui concerne les doses de phosphore appliquées, le rendement a augmenté, mais pas de manière proportionnelle aux doses d'engrais, car il a diminué au niveau de la dose la plus élevée (140 kg de P₂O₅) pour les deux essais. Le rendement le plus élevé a été observé lors du deuxième essai. Concernant la nodulation, les résultats montrent que le nombre de nodules a augmenté de manière proportionnelle avec les doses de phosphore appliquées. Le nombre de nodules le plus élevé a été obtenu avec la dose de 140 kg/ha (43,7 nodules par plante pour l'essai 1 et 58,8 nodules par plante pour l'essai 2). Les résultats montrent que la dose de 70 kg de phosphore par hectare permettrait d'améliorer le rendement en graines de soja dans l'agglomération de Lufu Toto, ce qui est encourageant au vu de sa rentabilité. Le rapport entre la valeur et le coût des différentes doses d'engrais montre que la dose de 70 kg de phosphore par hectare est la plus rentable, avec des valeurs de 5,18 USD et 5,61 USD respectivement pour la petite et la grande saison des pluies.

Mots clés : Soja, Nodulation, Productivité, Rentabilité économique, Lufu-Toto.

ABSTRACT :

This study was conducted in the Lufu Toto agglomeration, in the territory of Mbanza Ngungu, in the province of Kongo Central, in the Democratic Republic of Congo (DRC). It was conducted over two growing seasons: first during the short rainy season (3 April to 13 July 2018), then during the long rainy season (3 November 2018 to 9 February 2019). Its objective was to determine the effect of increasing doses of phosphorus on soybean seed yield and nodulation. Two early-maturing soybean varieties (TGX1830-7F and M351) were used, with three doses of phosphorus applied (0,70 and 140 kg P₂O₅ ha⁻¹(-1)). The experimental design used was split-plot, with three replicates. The variety was the main factor and phosphorus was the secondary factor. The results show that seed yield is influenced by phosphorus application. With regard to the phosphorus doses applied, the yield increased, but not proportionally to the fertiliser doses, as it decreased at the highest dose (140 kg P₂O₅) for both trials. The highest yield was observed in the second trial. With regard to nodulation, the results show that the number of nodules increased proportionally with the phosphorus doses applied. The highest number of nodules was obtained with the 140 kg/ha dose (43.7 nodules per plant for trial 1 and 58.8 nodules per plant for trial 2). The results show that a dose of 70 kg of phosphorus per hectare would improve soybean yields in the Lufu Toto agglomeration, which is encouraging in view of its profitability. The ratio between the value and cost of the different fertiliser doses shows that the dose of 70 kg of phosphorus per hectare is the most profitable, with values of USD 5.18 and USD 5.61 for the short and long rainy seasons, respectively.

Keywords : Soybean, Nodulation, Productivity, Economic profitability, Lufu-Toto.

*Adresse des Auteur(s)

Affermi KUFINU DIA MATONDO, Département de Géostratégie, Géopolitique, Environnement et Aménagement du Territoire (GGEA) Centre de Recherche en Sciences Humaines (CRESH), B.P 3474 Kinshasa, RD Congo.;

Alexis S. VUNI, Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

E-mail : alexis.vuni@unikin.ac.cd

Tél : +243 892073362 ;

Moïse K. LOSEMBE, Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

Boniface N. LUBAKI, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

Hervé NGONDE NSAKALA, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

Bode M. MASIALA, Mention Economie Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

Blanchard M. NGOYI, Mention Economie Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

Giresse S. BIFUBIAMBOTE, Mention Economie Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

Serge N. BUNGU TULUENGA, Mention Economie Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

Justin M. BELANI, Mention Economie Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques et Environnement, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo ;

Jules ALONI KOMANDA, Mention Géosciences, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, République démocratique du Congo.

I. INTRODUCTION

Le soja, ou soya (*Glycine max*), est une légumineuse annuelle cultivée pour ses graines comestibles. Sa valeur alimentaire en fait l'une des cultures les plus importantes au monde. Il y a un siècle, il était quasiment inconnu en dehors de l'Asie. Aujourd'hui, il est cultivé partout dans le monde et des centaines de millions de personnes consomment de la viande, des œufs et des produits laitiers provenant d'animaux nourris au soja. On trouve également des traces de soja dans un nombre incalculable d'aliments industriels [1]. Le soja est à la fois une source de protéines et d'énergie : les protéines représentent en effet 40 % du poids de la graine et l'huile 20 % [2]. Si sa culture est répandue en Asie, d'où il est originaire, elle n'a connu une extension remarquable que depuis un siècle. Durant ces vingt à trente dernières années, le soja est la culture qui a connu la croissance la plus rapide au monde. En effet, la surface consacrée à la culture du soja est ainsi passée de moins de 30 millions d'hectares en 1970 à plus de 100 millions d'hectares aujourd'hui [3].

La production mondiale est passée de 130 millions de tonnes en 1996 à 206 millions en 2004, soit une augmentation de 58 % [4], pour finalement atteindre 270 millions de tonnes en 2012 [5]. C'est en Amérique du Sud que la croissance a été la plus rapide, avec une hausse de 123 % entre 1996 et 2004. En 2012, six pays ont produit à eux seuls 93 % du soja mondial, soit 250 millions de tonnes : le Brésil, les Etats-Unis, l'Argentine, la Chine, l'Inde et le Paraguay [6]. La croissance rapide de la production de soja se poursuit. Des projections récentes indiquent qu'elle atteindrait 515 millions de tonnes en 2050 [1], tandis que d'autres [7] penchent pour une augmentation de 2,2 % par an jusqu'en 2030.

Il ne fait donc aucun doute que la demande en soja continuera de croître, ce qui représente un défi colossal à relever. Même avec un meilleur rendement à l'hectare, la FAO estime que la surface consacrée au soja devrait croître de près de 50 % d'ici 2050 pour atteindre 141 millions d'hectares, contre 95 millions d'hectares entre 2005 et 2007. Ces prévisions ne tiennent pas compte de la croissance potentielle de l'utilisation du soja comme agrocultivable, qui pourrait encore accroître la demande [1]. En Afrique, cette culture connaît actuellement un engouement croissant. Même si le continent est le dernier à avoir adopté la culture du soja, celle-ci a d'abord été introduite dans les pays anglophones. L'intérêt pour le soja est principalement dû à la forte teneur en protéines de ses graines (40 %). Cette culture pourrait jouer un rôle primordial et stratégique dans la souveraineté alimentaire en Afrique tropicale, où la population est reléguée au rang de véritable pauvre, avec des revenus journaliers inférieurs à 1 \$ US [8].

Cependant, comme pour d'autres cultures, son rendement est limité en Afrique subsaharienne par plusieurs facteurs : la pauvreté intrinsèque de la fertilité des sols, en particulier en phosphore, due à un climat agressif qui, au cours de la pédogenèse ferrallitique, a provoqué une lixiviation des éléments nutritifs [9]; de mauvaises pratiques culturales et le choix inadapté des terres pour sa culture [10-13]. Le Nigéria est le deuxième producteur de farine de soja en Afrique, avec une production totale de 740 000 tonnes [14].

L'introduction du soja en République démocratique du Congo (RDC) remonte aux années 1915 [15]. Sa production dans ce pays vise à résorber la malnutrition protéique des couches les plus pauvres de la population. Entre 2003 et 2013, sa production et sa superficie ont respectivement varié pour atteindre 14 630 tonnes et 23 000 tonnes, ainsi que 30 000 et 42 000 hectares. Il est donc urgent que la RDC, pays situé à proximité de l'équateur et doté de facteurs de productivité tels que la pluviométrie, la température et la photopériodisme parmi les meilleurs au monde, augmente la production de soja pour répondre aux besoins. La fertilisation phosphatée améliore la nodulation du soja (ce qui permet une meilleure fixation de l'azote), favorise la croissance et le rendement, et améliore la qualité nutritionnelle des graines (protéines et lipides).

Le soja est une bonne source de phosphore, magnésium, fer, zinc, manganèse, cuivre et la graine de soja est très riche en vitamine B9 (acide folique), en vitamine K (coagulation), en B1, B2, B6. Une meilleure disponibilité du soja peut avoir des effets positifs sur la croissance des enfants, la santé maternelle, la prévention de certaines maladies (maladies cardiovasculaires, diabète), et la réduction de l'anémie (indirectement, via l'amélioration de l'apport protéique) [4]. Nous avons vérifié l'effet des doses croissantes de phosphore sur le rendement et la nodulation de deux variétés de soja dans la cité de Lufu-Toto, à Mbanza Ngungu.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Milieu d'étude

Le territoire de Mbanza Ngungu, l'un des 145 territoires de la RDC, est prévu pour l'aménagement par le gouvernement. Il se trouve dans la province du Kongo Central. Il culmine à 785 mètres d'altitude au sommet du mont Bangu et s'étend sur 93 km². La cité de Lufu-Toto a été créée officiellement en 1930. Située entre -5,44655° ou 5° 26' 48" sud et entre 14,76102° ou 14° 45' 40" est à 187 Km au sud de Kinshasa (dans le Territoire de Mbanza-Ngungu) et à environ 260 Km de Matadi, chef-lieu de la province du Kongo central. La cité de Lufu-Toto se trouve à 17 Km de la route nationale n°1 Kinshasa- Matadi. Il est limité par les groupements suivants :

Kifua à l'est, Lukala à l'ouest, Kiazi au nord et Luvaka au sud (figure 1) [16].

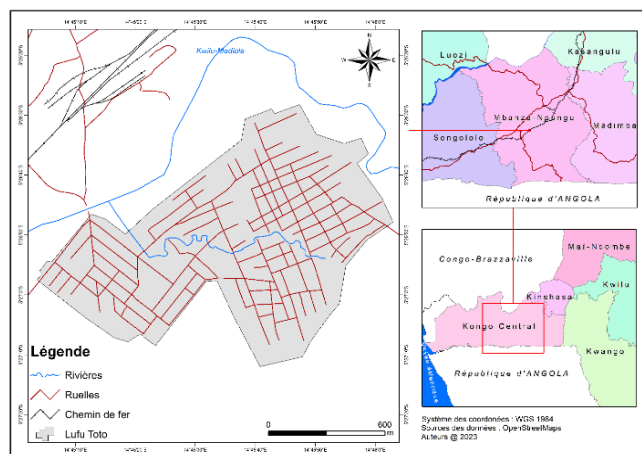


Figure 1. Milieu d'étude.

Selon la classification de Köppen, le territoire de Mbanza Ngungu appartient au climat A_{w4} , caractérisé par une saison des pluies appelée « Masanza » en langue locale, qui s'étend de mi-octobre à mi-mai, avec une petite baisse des précipitations en janvier, appelée « Kianzu » ou « Kundi ». Entre mi-mai et mi-octobre, il y a une saison sèche appelée « Sivu ». Un brouillard matinal et épais couvre la région pendant cette période, avec une visibilité inférieure à 10 mètres. Cette précipitation occulte permet néanmoins de cultiver même en cette saison sèche [16]. Parallèlement, la région présente des karsts souterrains et aériens. Dans cette grotte vit le célèbre poisson aveugle *Caecobarbus gertsii*, endémique, spécifique et unique au monde. Les précipitations annuelles se situent entre 900 et 1 500 mm, tandis que l'humidité atmosphérique relative varie entre 80 et 90%. La température moyenne annuelle tempérée par l'altitude est d'environ 25 °C. Le sol de Mbanza Ngungu est ferralitique, avec une texture sablonneuse en surface qui évolue en texture argileuse en profondeur. La texture sablonneuse en surface provoque des érosions ravinantes dangereuses pendant la saison des pluies. Cette structure élémentaire du sol qui ne permet que la formation d'agrégats instables sablo-argileux dans les sols des vallées et des plateaux [17].

II.2. Méthodes

La délimitation du terrain a été effectuée à l'aide de la technique topographique 3-4-5, basée sur le théorème de Pythagore. Puis, le terrain a été subdivisé en blocs et en parcelles. L'expérimentation a été menée sur un terrain en jachère depuis trois ans. La végétation qui avait colonisé le site était composée d'*Imperata cylindrica*, de *Panicum maximum*, de *Chromolaena odorata* et de *Setaria javanica*. La préparation du terrain a impliqué une phase de désherbage,

suivie d'un labour manuel à la houe à une profondeur d'environ 20 cm. Par la suite, les parties végétales mortes ont été défrichées afin de préparer au mieux le lit de semence pour l'ensemencement.

Dans le cadre de l'expérimentation, un dispositif split plot avec deux facteurs a été adopté : la variété en tant que facteur principal et l'engrais phosphoré en tant que facteur secondaire. L'expérience comprenait trois blocs, chacun composé de six parcelles élémentaires de 3 mètres de long sur 2 mètres de large, soit une surface de 6 mètres carrés. Les parcelles étaient séparées les unes des autres par des barrières de 60 cm. La distance entre les grandes parcelles était de 80 cm, tandis que celle entre les blocs était de 1 m. Le semis a été effectué en ligne, à une profondeur de 5 cm, avec un écartement de 0,40 m $\times$ 0,20 m, ce qui correspond à une densité de 25 000 plants par hectare. Il est à noter en outre que sept lignes ont été disposées dans chaque parcelle, et que dans chaque ligne, 20 grains (10 poquets de deux graines) ont été semés, ce qui correspond à un total de 140 pieds de soja par parcelle. Afin de maintenir la densité et la propreté de chaque parcelle, des soins culturaux ont été effectués. Ces soins comprenaient le regarnissage des vides, le sarclage-binage et l'élimination des pieds malades.

Le regarnissage des vides a été effectué sept jours après le semis. Des interventions telles que le sarclage et le binage, ainsi que des traitements phytosanitaires, ont été réalisés lorsque cela s'est avéré nécessaire. Un échantillon composite du sol a été prélevé à une profondeur de 20 cm afin de réaliser des analyses chimiques au laboratoire de pédologie de l'université Kongo. Les engrais minéraux utilisés sont le triple superphosphate (TSP) à 46 % de P_2O_5 , l'urée à 45 % d'azote (N) et le chlorure de potassium (KCl) à 60 % de K_2O . Le triple superphosphate a été appliqué à trois niveaux de dose pour deux variétés : la dose I (témoin) à 10 kg de P_2O_5 ha^{-2} (-2), la dose II à 70 kg de P_2O_5 ha^{-2} (-1) et la dose III à 140 kg de P_2O_5 ha^{-2} (-1). L'urée et le KCl ont été appliqués en dose unique de 20 kg de N ha^{-2} (-1) et 70 kg de K_2O ha^{-2} (-1) comme complément dans tous les traitements. Pendant la phase de remplissage des gousses, soit vers le 45ème jour après le semis, sept plantes de soja ont été sélectionnées de manière aléatoire dans chaque parcelle afin d'évaluer la nodulation. Pour ce faire, nous avons creusé autour de chaque plante sélectionnée sur l'ensemble de sa surface utile, à 20 cm de profondeur, puis nous avons extrait chaque plante avec son système racinaire. Nous avons ensuite retiré soigneusement la terre collée aux racines, puis compté le nombre de nodules par plante. Ces nodules ont ensuite été séparés des racines, pesés frais, puis séchés à l'étude à 50 °C jusqu'à ce qu'ils atteignent un poids constant, afin d'en déterminer le poids sec.

Effets de la fertilisation phosphatée sur la nodulation...

II.3. Matériels

L'entrée des données, accompagnée d'une analyse statistique, a été réalisée à l'aide de Microsoft Excel 2016. L'analyse a ensuite été effectuée à l'aide du logiciel GenState et une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée pour comparer les moyennes. Les moyennes ont été séparées à l'aide du test de PPDS (Plus Petite Différence Significative) au seuil de probabilité de 5 % chaque fois qu'il y avait des différences significatives. Les résultats sont présentés sous forme de moyennes. Il est à noter que les valeurs identifiées par la même lettre dans la colonne et dans la ligne ne présentent pas de différence significative au seuil de probabilité de 5 %.

III. RESULTATS

Les différents tableaux ci-dessous montrent les résultats de cette étude, notamment : (i) tableau 1 : analyse du sol ; (ii) tableau 2 : conditions climatiques au cours des périodes expérimentales ; (iii) tableau 3 : nombre moyen de nodules par plante/variété/dose de P_2O_5 ; (iv) tableau 4 : poids moyen de nodules secs (g)/variété/dose de P_2O_5 ; (v) tableau 5 : poids moyen de matière sèche des nodules (en %) ; (vi) tableau 6 : rendement en graines (T/ha) ; (vii) tableaux 7 et 8 : rentabilité économique des doses d'engrais appliquées.

Tableau 1. Analyse du sol

Propriété	Valeur	Sol standard pour le soja
pH	5,6	5,2-7,0
Phosphore Total (mg/Kg)	24	36-50
Potassium Echangeable (mg/Kg)	60	390-1170

Le sol étudié présente un pH légèrement acide (5,6), compatible avec la culture du soja. En revanche, les teneurs en phosphore total (24 mg/kg) et en potassium échangeable (60 mg/kg) sont inférieures aux standards recommandés pour le soja, indiquant une faible fertilité initiale et justifiant l'application d'engrais phosphaté et potassique.

Les conditions climatiques au champ pendant les périodes expérimentales (avril, juillet et novembre 2018 et février 2019) sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Conditions climatiques au cours des périodes expérimentales

Saison de culture	Précipitations		Température (°C)		
	Mois	Hauteur mensuelle (mm)	Maximum	Minimum	Moyenne
B	Avril	130	29,6	20,7	24,6
	Mai	155	29,2	20,7	24,6
	Juin	137	27,5	20,2	27
	Juillet	104	24,5	17,3	21,3
	Total	526	110,8	78,9	97,5
	Moyenne	-	27,7	19,7	24,4
A	Novembre	257	28,2	20,2	23,7
	Décembre	180	24,7	20,5	23,7
	Janvier	178	28,2	20,6	23,7
	Février	145	29,1	20,6	24,1
	Total	760	110,2	81,9	95,2
	Moyenne	-	27,6	20,5	23,8

Les conditions climatiques des deux saisons expérimentales montrent une pluviométrie plus élevée en saison A (760 mm) qu'en saison B (526 mm). Les températures moyennes restent favorables au développement du soja (≈ 24 °C). Ces différences pluviométriques pourraient expliquer certaines variations observées dans la nodulation et le rendement entre saisons.

Les données sur le nombre des nodules par plante, la variété et la dose de P_2O_5 en fonction de deux saisons sont résumées au Tableau 3.

Tableau 3. Nombre moyen des nodules par plante/variété/dose P_2O_5

Kg de P_2O_5 /ha	Saison B			Saison A		
	Variété		Moyenne P_2O_5	Variété		Moyenne P_2O_5
	TGX 183	M 351		TGX 183	M 351	
	0-7F			0-7F		
0	25,1c	37,7a bc	31,4b	39,9c	53,4ab c	46,7b
70	33,7bc	43,8a b	38,7a b	48,7bc	58,8ab	53,8ab
140	39,0ab	48,4a	43,7a	53,9ab	63,6a	58,8a
Moyenne variété	32,6a	43,3a		47,5a	58,6a	
CV interaction (%) : 15,5			CV interaction (%) : 11,0			
CV variété (%) : 14,5			CV variété (%) : 10,4			

Il ressort du tableau 3 que l'application croissante de P_2O_5 a entraîné une augmentation significative du nombre de nodules par plante dans les deux saisons. La dose de 140 kg ha^{-1} a donné les valeurs les plus élevées, bien que la réponse varie selon la variété et la saison. Cela confirme le rôle essentiel du phosphore dans la formation des nodules.

Le tableau 4 suivant présente le poids moyen des nodules secs tandis que le tableau 5 donne le poids moyen de matière sèche des nodules (%).

Tableau 4. Poids moyen des nodules secs (g)/ variété/dose P_2O_5

Kg de P ₂ O ₅ ha	Saison B			Saison A		
	Variété		Moye nne	Variété		Moye nne
			P ₂ O ₅			P ₂ O ₅
	TGX 183	M 351		TGX 183	M 351	
	0-7F			0-7F		
0	0,197b	0,377a b	0,287b	0,303b	0,533a b	0,418a
70	0,423a b	0,390a b	0,407a b	0,607a b	0,497a b	0,552a
140	0,567a	0,443a b	0,505a	0,783a	0,583a b	0,683a
Moye nne variété	0,396a	0,403a		0,564a	0,538a	
	CV interaction (%) : 39			CV interaction (%) : 39,0		
	CV variété (%) : 26,7			CV variété (%) : 25,7		

Les données du tableau 4 révèlent que le poids sec des nodules augmente avec les doses de phosphore, particulièrement à 140 kg ha^{-1} . Toutefois, les coefficients de variation relativement élevés indiquent une variabilité importante. L'interaction variété $\times$ phosphore est significative dans certaines conditions, suggérant une réponse spécifique selon le génotype.

Les données du tableau 5 suivant montrent qu'aucune différence significative n'a été observée entre les doses de phosphore ni entre les variétés. Cela suggère que si le phosphore influence le nombre et le poids des nodules, il n'affecte pas significativement leur teneur relative en matière sèche.

Tableau 5. Poids moyen de matière sèche des nodules (%)

Kg de P_2O_5 ha	Saison B		Saison A	
	Variété	Moyenne	Variété	Moyenne
		P_2O_5		P_2O_5

	TGX 183	M 351		TGX 183	M 351	
	0-7F			0-7F		
0	28,0a	30,2a	29,1a	29,1a	39,0a	41,4a
70	33,8a	27,8a	30,4a	42,5a	35,9a	39,2a
140	31,8a	29,4a	30,6a	37,9a	36,9a	37,4a
Moyenne variété	30,9a	29,1a		41,4a	37,3a	
	CV interaction (%) : 16,2			CV interaction (%) : 11,8		
	CV variété (%) : 3,8			CV variété (%) : 2,1		

Quant au Tableau 6 ci-dessous, l'on peut retenir que le rendement en grains augmente significativement jusqu'à la dose de 70 kg ha^{-1} de P_2O_5 , au-delà de laquelle une diminution est observée. Cette réponse en plateau indique une dose optimale autour de 70 kg ha^{-1} . Les variétés n'ont pas montré de différences significatives de rendement.

Tableau 6. Rendement en grains (T/ha)

Kg de P ₂ O ₅ ha	Saison B			Saison A		
	Variété		Moye nne	Variété		Moye nne
			P ₂ O ₅			P ₂ O ₅
	TGX 183	M 351		TGX 183	M 351	
	0-7F			0-7F		
0	0,585a	1,031a	0,808 b	0,630a	1,074a	0,852b
70	1,033a	1,346a	1,189a	1,113a	1,417a	1,265a
140	1,000a	1,082a	1,041a b	1,077a	1,165a	1,121a
Moy enne variété	0,873a	1,153a		0,940a	1,219a	
	CV interaction (%) : 32,7			CV interaction (%) : 33,6		
	CV variété (%) : 7,3			CV variété (%) : 8,1		

La rentabilité économique des doses d'engrais appliquées selon les deux saisons est présentée aux Tableaux 7 et 8.

Tableau 7. Rentabilité économique des doses d'engrais appliquées

Saison B					
Doses	Coût engrais (USD)	Rendement (Tha)	Augmentation du rendement (Tha)	Valeur augmentation (USD)	RVC
0	-	0,808	-	-	-
70	86,1	1,189	0,381	445,77	5,2
140	172,2	1,041	0,233	272,61	1,6

Effets de la fertilisation phosphatée sur la nodulation...

La dose de 70 kg ha⁻¹ présente le meilleur rapport valeur/coût (RVC = 5,2), indiquant une rentabilité économique élevée. La dose de 140 kg ha⁻¹ reste rentable mais avec un RVC nettement inférieur, ce qui la rend moins avantageuse pour les producteurs.

Tableau 8. Rentabilité économique des doses d'engrais appliquées

Saison A					
Doses	Coût engrais (USD)	Rendement	Augmentation du Rendement (Tha ⁻¹)	Valeur augmentation (USD)	RVC
		(Tha ⁻¹)			
0	-	0,852	-	-	-
70	86,1	1,265	0,413	483,21	5,6
140	172,2	1,121	0,69	314,73	1,8

Comme en saison B, la dose de 70 kg ha⁻¹ est la plus rentable (RVC = 5,6). Malgré une augmentation de rendement à 140 kg ha⁻¹, le coût plus élevé de l'engrais réduit la rentabilité. Ces résultats confirment l'intérêt économique de la dose intermédiaire.

IV. DISCUSSION

Le pH du sol, qui est un indicateur de l'acidité ou de la basicité, est acide, comme c'est généralement le cas pour tous les ferralsols. Il demeure toutefois dans les limites acceptables pour la culture du soja. En revanche, les teneurs en phosphore et en potassium sont nettement insuffisantes. Il apparaît donc nécessaire d'apporter ces éléments nutritifs en quantité suffisante au sol afin d'exploiter pleinement le potentiel agronomique de la culture du soja. En saison B, les variétés étudiées n'ont pas montré de différences significatives en termes de nombre de nodules par plante. En revanche, l'application de phosphore a eu un impact significatif sur ce paramètre. L'interaction entre la variété et le phosphore a également influencé le nombre de nodules par plante. En outre, il a été constaté que la combinaison M351 + 140 kg de P₂O₅ avait engendré le nombre le plus élevé de nodules, soit 48,4 nodules par plante.

L'analyse comparative des données présentées dans le tableau 2 révèle que l'apport de phosphore et l'interaction entre la variété et cet apport ont exercé une influence significative sur le nombre de nodules par plante lors du deuxième essai (saison A). En outre, les résultats de la saison B ne révèlent aucune différence significative entre les différentes variétés. En revanche, il a été constaté que le nombre de nodules augmentait de manière proportionnelle aux doses croissantes de phosphore. Cette tendance s'est avérée plus marquée lors de la saison A qu'au cours de la saison B. Cependant, l'analyse des données reprises dans le

tableau 4 révèle que la pluviométrie plus abondante enregistrée durant la saison B a influencé le poids sec des nodules. De plus, le traitement à 140 kg de P₂O₅ a conduit à une augmentation significative du poids des nodules secs.

De même, l'interaction a montré une différence significative. Le traitement TGX 1830-7F + 140 kg de P₂O₅ a donné un poids sec élevé, supérieur à celui des autres combinaisons. L'analyse de la variance sur le poids des nodules secs en saison A a révélé que seule l'interaction entre la variété et le traitement avait entraîné des différences significatives. La combinaison TGX 1830-7F + 140 kg de P₂O₅ a enregistré le poids moyen le plus élevé (0,783 g). Les variétés et l'application de doses croissantes de phosphore n'ont entraîné aucune différence significative.

L'analyse comparée des deux expérimentations a montré que le pourcentage de matière sèche des nodules n'avait pas été influencé par l'application de phosphore, ni par les variétés, ni par l'interaction entre ces deux facteurs. En revanche, l'application d'engrais a influencé de manière significative le rendement en graines de soja. En effet, le rendement variait proportionnellement avec les doses d'engrais appliquées jusqu'à la dose de 70 kg/ha, qui a enregistré le rendement le plus élevé de 1,189 t/ha, avant de chuter à 1,041 t/ha pour la dose de 140 kg/ha. La dose témoin avait enregistré le rendement le plus faible (0,808 t/ha) comme on pouvait s'y attendre. En saison A, l'apport de phosphore a influencé de manière significative le rendement du soja (le tableau 4). Comme en saison B, les variétés et l'interaction variété-phosphore n'ont pas influencé de manière significative le rendement en graines ; celui-ci a varié proportionnellement avec les doses de phosphore, jusqu'à la dose de 70 kg de phosphore par hectare, qui a donné le rendement en graines le plus élevé (1 265 kg). Le rendement le plus faible a été enregistré sur le témoin (852 kg).

Il existe apparemment une dose optimale de 70 kg de P₂O₅, comprise entre 70 et 140 kg de P₂O₅ ha⁻²(-2), qui donnerait un meilleur rendement. Concernant la rentabilité économique, le résultat du tableau 6 semble indiquer que la dose de 70 kg est rentable pour la saison B, son rapport valeur sur coût étant supérieur à 2. Elle est donc recommandable pour les agriculteurs de soja. Pour chaque kilogramme d'engrais investi, l'agriculteur gagnerait 5,18 USD en appliquant la dose de 70 kg de phosphore par hectare. Pour chaque kilogramme d'engrais investi, les résultats de l'essai 2 montrent que l'agriculteur gagnerait 5,12 USD s'il appliquait la dose de 70 kg de phosphore par hectare. Selon Anonyme (1993), la culture du soja exige 60 kg à l'hectare de P₂O₅ et 50 à 100 kg à l'hectare de K₂O. Le phosphore et le potassium ont été épandus dans toutes les parcelles, respectivement sous forme de TSP et de KCl (270 g de TSP et 108 g de KCl par parcelle), dans un sillon situé à 10 cm de la ligne de semis.

[18] ont obtenu une augmentation proportionnelle du rendement en graines de soja, qui a été significativement influencée par l'application de différentes doses d'azote foliaire.

La variation observée a été de 5 % (211 kg/ha) et 6,1 % (259 kg/ha) pour les doses de 5 et 10 kg de N/ha. Des résultats contraires aux nôtres ont été obtenus par [19]. Ils ont observé une diminution du rendement en graines de soja à mesure que les doses d'azote augmentaient, après inoculation des semences avant le semis. Le témoin sans engrais (0 kg/ha) a obtenu un rendement élevé de 4 350 kg/ha, contre 4 251 kg/ha, 4 073 kg/ha et 4 041 kg/ha pour les doses de 30, 60 et 90 kg/ha. Selon Pamba et co-auteurs, l'association du maïs et du soja avec *Mucuna pruriens* pourrait être l'une des solutions pour améliorer la production de ces cultures vivrières dans la région étudiée. En agriculture de conservation, *Mucuna pruriens* fait partie des plantes de couverture en raison de son fort développement, de la grande quantité de biomasse qu'elle produit, de son pouvoir couvrant qui limite l'érosion et l'invasion des mauvaises herbes, et de sa capacité à fixer l'azote pouvant aller jusqu'à 170 kg/ha, ainsi que de la quantité d'azote restituée par les résidus pouvant atteindre 200 kg/ha [21]. Le taux de levée a varié entre 79,6 % et 83 % pour le maïs et entre 80 et 81 % pour le soja. Chez le soja, le développement végétatif le plus important a été observé chez T5.

Le faible développement végétatif observé chez T6 peut être attribué à la concurrence exercée par le *Mucuna* et le soja sur le maïs. Des observations similaires ont été effectuées par Hartman et collaborateurs concernant l'association entre le *Jatropha curcas* L. et le *Stylosanthes guianensis* avec le maïs [20]. Pour le soja, l'analyse statistique n'a pas révélé de différences significatives entre les traitements appliqués, avec un seuil de probabilité de 5 %. La culture du soja sous couvert de *Mucuna* n'a pas influencé de manière significative la production de graines de cette plante vivrière. Dans son étude sur le *Jatropha curcas* [22], une plante a plusieurs vertus thérapeutiques [23], Minengu a constaté une augmentation du rendement du maïs associé au *Jatropha* sous couverture permanente de *Stylosanthes*.

Le soja est une source de protéines dont la qualité nutritionnelle est proche de celle de la viande. Il contient également du fer, du zinc et du calcium (dans les produits enrichis). Il contient également des lipides majoritairement insaturés. Il contient également des phytoestrogènes, notamment des isoflavones (composés chimiques actifs naturels provenant des plantes). Les bénéfices de ces isoflavones seraient nombreux : ils auraient des effets positifs sur la santé cardiovasculaire et le diabète de type 2, ils auraient un effet hypocholestérolémiant et ils réduiraient les bouffées de chaleur lors de la ménopause et l'ostéoporose.

Cependant, les rapports publiés par l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation et par l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments indiquent que la consommation de produits à base de soja doit être limitée à 1 mg/kg/j d'isoflavones, ce qui équivaut à environ un produit à base de soja par jour conseillent également d'éviter les produits à base de soja pour les moins de 3 ans [24, 25].

Les résultats confirment la faible disponibilité initiale en phosphore du sol étudié, justifiant l'application d'engrais phosphaté. L'augmentation du nombre et du poids sec des nodules avec l'apport de P_2O_5 s'explique par le rôle central du phosphore dans le métabolisme énergétique et la formation des nodules symbiotiques.

La dose de 70 kg ha⁻¹ de P_2O_5 a permis d'obtenir les rendements les plus élevés, tandis que la dose de 140 kg ha⁻¹ n'a pas induit d'amélioration supplémentaire significative. Cette réponse en plateau suggère l'existence d'une dose optimale agronomique autour de 70 kg ha⁻¹.

L'absence d'effet significatif de la variété sur le rendement indique que la réponse au phosphore est principalement liée aux conditions édaphiques plutôt qu'au génotype.

L'analyse économique montre que la dose de 70 kg ha⁻¹ présente le meilleur rapport valeur/coût (>5), confirmant sa pertinence pour les producteurs locaux. Ces résultats sont cohérents avec la littérature qui souligne l'importance du phosphore dans les systèmes ferrallitiques tropicaux.

V. CONCLUSION

Après son introduction sur le marché occidental, le soja a été considéré comme un aliment aux nombreuses vertus nutritionnelles et aux effets bénéfiques sur la santé humaine au sens large. Ceci a été observé chez les populations d'Asie de l'Est, comme au Japon ou en Chine, et chez ces populations, on observe une moindre sensibilité aux grandes maladies des pays développés (cancer, hypercholestérolémie). L'intérêt pour le soja tient également à sa richesse en protéines, ce qui en fait un substitut plus léger à la viande. Les produits à base de soja sont aujourd'hui très divers et de plus en plus consommés : lait, huile, etc. Le soja est un aliment riche en acides aminés. Il présente de nombreux avantages pour la santé. S'il est consommé de manière raisonnable, il peut aider l'organisme à fonctionner correctement et à perdre du poids.

La culture du soja pourrait permettre à la République démocratique du Congo de résoudre, à faible coût, ses problèmes d'autosuffisance, voire de souveraineté alimentaire. Située à cheval sur l'équateur, la République démocratique du Congo peut produire cette légumineuse en

Effets de la fertilisation phosphatée sur la nodulation...

organisant alternativement sa culture dans le nord et le sud du pays, en fonction de la gamme de ses sols. Concernant les sols de Lufu-Toto et ses environs, les résultats obtenus indiquent que si les opérations culturales sont bien conduites, l'application de phosphore (P_2O_5) et l'interaction entre la variété et le phosphore influent significativement sur le nombre de nodules par plante et sur le rendement en grains de soja, pour une dose de 70 kg. En ce qui concerne la rentabilité économique (voir le tableau 8), calculée selon le rapport valeur sur coût (RVC), la dose de 70 kg de P_2O_5 s'est montrée plus rentable que celle de 140 kg. Pour chaque kg appliqué, l'agriculture augmentait de 1,58 à 1,82 USD avec 70 kg/ha, et de 5,18 à 5,61 USD avec 140 kg/ha.

REFERENCES

1. Bruinsma J. The resource outlook to 2050: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2009.
2. Boucher D, Elias P, Lininger K, May C, Roquemore S, Saxon E. What's driving tropical deforestation today? Washington (DC): Union of Concerned Scientists; 2011.
3. Agralytica. Connections 2012 soybean market scan. Alexandria (VA): Agralytica; 2012.
4. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Future expansion of soybean 2005–2014. Rome: FAO Regional Office for Latin America and the Caribbean; 2007.
5. United States Department of Agriculture (USDA). 2007 national resources inventory – soil erosion on croplands. Washington (DC): Natural Resources Conservation Service; 2010.
6. Conférence des Nations Unies sur le Commerce et le Développement (CNUCED). Soja: un profil de produit de base par INFOCOMM. Genève: CNUCED; 2016.
7. Masuda T, Goldsmith PD. World soybean production: area harvested, yield, and long-term projections. *Int Food Agribus Manag Rev*. 2009;12:143-61.
8. Van Straaten P. Agrogeology: the use of rocks for crops. Cambridge (ON): Enviroquest Ltd; 2007.
9. Van Wambeke A. Sols des tropiques. Wageningen: CTA; 1995.
10. Kananji G, Yohane E, Siyeni D, Kachulu L, Mtambo L, Chisama B, et al. A guide to soybean production in Malawi. Lilongwe: Department of Agricultural Research Services; 2013.
11. Kihara J, Nziguheba G, Zingore S, Coulibaly A, Esilaba A, Kabambe S, et al. Understanding variability in crop response to fertilizer and amendments in Sub-Saharan Africa. *Agric Ecosyst Environ*. 2016;229:1-12.
12. Munene P, Chabala L, Mweetwa M. Land suitability assessment for soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) production in Kabwe District, Central Zambia. *J Agric Sci*. 2017;9(3):1-16.
13. Van V D, Franke A, Giller K. Participatory research to close the soybean yield gap on smallholder farms in Malawi. *Exp Agric*. 2017;53(3):396-415.
14. APME 2A. Étude sur la filière soja au Burkina Faso. Rapport final. Ouagadougou: APME 2A; 2009.
15. Vandenput R. Les principales cultures en Afrique centrale. Tournai: Publications DGA, Éditions Lesaffre; 1981. p. 228-259.
16. Kufinu dia Matondo A, Vuni Simbu A, Lutete Landu E, Ausse Baraka J, Bifubiambote Salambiaku G, Holenu Mangenda H, et al. Impacts de la dynamique foncière dans l'espace urbano-rural de Mbanza Ngungu (Province du Kongo Central/RDC). *J Afr Sci*. 2026;3(1):110-118.
17. World Reference Base for Soil Resources (WRB). World reference base for soil resources 2006. First update 2007. Rome: FAO; 2007.
18. Moreira A, Moraes L, Schroth G, Becker F, Mandarino J. Soybean yield and nutritional status response to nitrogen sources and rates of foliar fertilization. *Soil Sci Soc Am J*. 2017;109(2):2-7.
19. Mrkovacki N, Marinkovic J, Acimovic R. Effect of N fertilizer application on growth and yield of inoculated soybean. *Not Bot Horti Agrobot Cluj Napoca*. 2008;36(1):48-51.
20. Pamba M, Muwo JC, Ikonso M. Etude des possibilités de production de maïs (*Zea mays* L.) et de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) sur couverture de *Mucuna pruriens* (L.) DC dans les conditions écologiques de Kikwit (RDC). *Rev Afr Environ Agric*. 2018;1(1):30-35.

21. Hartman GL, West ED, Herman TK. Crops that feed the world 2. Soybean—worldwide production, use, and constraints caused by pathogens and pests. Food Secur. 2011;3(1):5-17. doi:10.1007/s12571-010-0108-x.
22. Minengu JDD. Etude des possibilités de culture de *Jatropha curcas* L. dans la région de Kinshasa (RDC) [thèse de doctorat]. Liège: Université de Liège-Gembloux Agro-Bio Tech; 2014.
23. Kitete EM, Kilembe JT, Neema-Ufoy MY, Matondo A; Ngholua KTN et al. Molecular docking, DFT and dynamics simulations of *Jatropha curcas*-derived compounds targeting PR and hER α for breast cancer treatment. Next Research. 2025;2(2):100249. <https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100249>
24. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (ANSES). Avis relatif à l'évaluation des apports en vitamines et minéraux dans la population française. Saisine 2012-SA-0142. Maisons-Alfort: ANSES; 2015.
25. Agence française de sécurité sanitaire des aliments (AFSSA). Avis relatif à la modification du critère de distinction entre les huiles végétales pour assaisonnement et pour friture et assaisonnement. Maisons-Alfort: AFSSA; 2005.