

Adsorption du phosphore dans les sols plus exploités dans le territoire de Walungu à l'Est de la République Démocratique du Congo

Alain KANGELA MATAZI*, Wivine ZIRHAHWAKUHINGWA MUNYAHALI,
Landry CIZUNGU NTABOBA et Bienvenu RUKIRANUKA

Université Catholique de Bukavu (UCB), Faculté des Sciences Agronomiques (FAS), Laboratoire d'Analyses des Sols et Plantes, BP 285 Bukavu, RD Congo

(Reçu le 18 Décembre 2020 ; Accepté le 16 Mars 2021)

* Correspondance, courriel : alain.ephremae@gmail.com

Résumé

La fixation du phosphore (P) dans les sols est devenue un problème incontournable dans le secteur agricole qui réduit la production et conduit à d'énormes pertes économiques et environnementales. Cette situation fait baisser sensiblement l'efficacité de fertilisants dans les sols de Walungu et a ainsi motivé cette étude qui détermine la capacité d'adsorption du P de sols plus exploités à Walungu afin de contribuer à l'amélioration de l'efficacité et l'efficacité des apports phosphatés. Un échantillon de 68 ménages agricoles était enquêté pour identifier les sols et collecter leurs échantillons dans les champs de producteurs, ensuite l'analyse de ces échantillons au laboratoire des sols de la Faculté d'Agronomie de l'UCB (FA/UCB) par l'approche modélisation d'isothermes d'adsorption était effectuée. La relation entre les propriétés des sols avec la capacité (K_f) et l'énergie (n) d'adsorption a d'une part été révélée et d'autre part, les besoins des sols en P. Les sols étudiés retiennent par adsorption 79 % de phosphore appliqué indiquant une forte capacité d'adsorption, et leur exigence en P pour maintenir 0,2 mg P. L⁻¹ (concentration requise pour satisfaire les besoins de la plupart des cultures) s'évalue à 681,505 mg.kg⁻¹ de sol. Excepté le pourcentage en argile ; l'acidité (pH < 5), les teneurs faibles en MO et P_{Olsen} et la dégradation des sols ($S_t \leq 9$ %) favorisent la rétention du P par adsorption dans les conditions de Walungu. La mise en évidence de la capacité d'un sol à adsorber le P permettrait la prise en compte de la rétention du P dans la baisse de la fertilité et le développement des stratégies de gestion efficace des facteurs qui l'impliquent tels que l'acidité et la dégradation des sols.

Mots-clés : *rétention du phosphore, fertilité des sols, isothermes d'adsorption, acidité, dégradation, Walungu.*

Abstract

Phosphorus adsorption in the most exploited soils in Walungu territory, Eastern DR Congo

Phosphorus (P) adsorption has become an unavoidable problem in the agricultural sector that decreases agricultural production and leads to enormous economic and environmental losses. This fact reduces significantly the fertilizers efficiency in Walungu soils and motivated this study. The study aims to determine

the capacity of P adsorption of the most exploited soils in Walungu to improve the effectiveness and efficiency of phosphate inputs. Sixty-eight farm households were surveyed for soil identification. Thereafter, soil samples were collected from the farmers' fields and then analyzed in Soil laboratory of the Faculty of Agronomy (FA/UCB) using the adsorption isotherms modeling approach. Correlation between soil properties with adsorption capacity (k_f) and adsorption energy (n) was revealed on the one hand, and on the other hand, evaluation of the soil's Phosphorus need. The soils studied showed a high capacity to adsorb phosphorus (79 %) and their P requirement to maintain 0.2 mg P. L^{-1} (concentration required to meet the needs of most crops) is estimated to $681.505 \text{ mg.kg}^{-1}$. Except clay content; soil acidity ($\text{pH} < 5$), low OM and P_{Olsen} contents and the soils degradation ($S_t \leq 9 \%$) increase the P retention by adsorption which induces P deficiency under Walungu conditions. Demonstrating the capacity of a soil to adsorb P would allow the consideration of P retention in the decrease of soil fertility and the development of strategies for effective management of the factors that trigger it, such as soil acidity and soil degradation.

Keywords : *phosphorus retention, soils fertility, isotherms adsorption, acidity, degradation, Walungu.*

1. Introduction

Le sol étant un substrat pour toutes les plantes, c'est dans lui qu'elles tirent l'essentiel des éléments nutritifs pour une bonne croissance afin d'assurer une meilleure production. Cependant la disponibilité de ces éléments dépend particulièrement du type des sols et de leurs conditions [1 - 3]. Trois éléments majeurs (N, P, K) pour la nutrition des plantes sont suivis scrupuleusement en agriculture, mais leur comportement dans le sol n'est pas le même et influence ainsi leur disponibilité dans la solution du sol où les plantes viennent les prélever. Pour le P, son absorption par les racines se fait sous forme d'ions ortho phosphates (H_2PO_4^- et HPO_4^{2-}) [4] alors qu'il est retenu dans le sol, contrairement à d'autres anions (NO_3^- , SO_4^- , AsO_4^- , Cl^- , F^- , etc.), par des mécanismes plus complexes que la simple attraction électrostatique qui a lieu dans les échanges de cations. Cette particularité de la fixation du P est souvent expliquée par des processus complexes (solubilisation, complexation, adsorption et précipitation) [5] déterminant sa mobilité et qui dépendent des propriétés des sols telles que les oxydes de fer (Fe) et d'aluminium (Al), la quantité et la forme d'argile ou de calcite [5, 6 - 10]. L'impact de ces propriétés sur la rétention du P est dépendant de l'acidité ou l'alcalinité des sols [7] néanmoins, il est le plus souvent rencontré dans les sols ferralitiques tropicaux riches en sesquioxydes [2, 3, 11] où les besoins des plantes pour des apports phosphatés sont limité par la fixation de P [12 - 15]. Etant donné que l'insuffisance d'un élément nutritif nécessaire au développement d'une plante compromet l'absorption des autres dans la solution du sol, l'immobilisation du P sous une forme insoluble par des sesquioxydes fait qu'il soit considéré actuellement comme un des facteurs limitant de la production agricole qui affecte la fertilité des sols [16]. A Walungu, la faible fertilité est l'un des problèmes majeurs qui limitent la production agricole alors que le revenu des ménages de Walungu est tributaire de leurs ressources en terres et de leur potentiel de production [17]. Il s'est avéré que les principales causes de cette situation sont une dégradation des sols associée aux conditions du milieu et leur surexploitation, la carence en P [16] et plusieurs d'autres éléments essentiels ainsi qu'une forte acidité et une saturation en Al élevée, souvent au-delà de 60 % [16, 18 - 20]. Cette situation affecte négativement la dynamique du P dans le sol et rend les producteurs agricoles dépendant des apports phosphatés qui, en réalité constitue un casse-tête au regard de l'utilisation irrationnelle des engrais et du revenu faible des producteurs agricoles de Walungu pour accéder à ces derniers. Plusieurs études ont montré que la dynamique du P dans le sol est un facteur déterminant dans la quantification du P bio disponible et des apports phosphatés [9, 21]. C'est dans ce cadre que la modélisation des isothermes d'adsorption se présente comme un outil important pour d'abord comprendre et

étudier les interactions entre sols - phosphore [21, 22], ensuite estimer la capacité d'un sol à adsorber le P et enfin quantifier les besoins des plantes en P pour un développement optimum. Pour ce faire, cette étude s'est fixée l'objectif de déterminer la capacité des sols de Walungu à adsorber le phosphore et quantifier le P qu'il faut pour maintenir $0,2 \text{ P m.L}^{-1}$ en solution du sol.

2. Matériel et méthodes

2-1. Milieu d'étude

Cette étude était réalisée dans le territoire de Walungu en Province du Sud Kivu située à l'Est de la République Démocratique du Congo (RDC). Walungu est une région de 1863 Km² et subdivisée en deux collectivités à savoir Ngweshe et Kaziba. Les coordonnées géographiques de Walungu sont $2^{\circ}37'42''$ sud et $28^{\circ}39'57''$ est à une altitude de 1777 m. La moyenne pluviométrique annuelle varie entre 1200 et 1800 mm de l'est à l'ouest avec trois mois de saison sèche marquée entre mi-juin et mi-septembre. La température est relativement faible variant entre $14-24^{\circ}\text{C}$ avec une moyenne de 19°C conférant à la région un climat tropical humide de montagne [23]. Les sols sont du type ferralitique très dégradés et dont la structure du sous-sol et particulièrement de l'horizon B structural est beaucoup mieux développé, polyédrique et les éléments sont en grains de revêtement argileux [16]. Deux matériaux parentaux (roche sédimentaire et éruptive principalement basaltique) caractérisent les sols de Walungu et déterminent leur valeur agricole. Les sols sur les roches basaltiques ont une valeur agricole élevée avec un pH relativement élevé dépassant la valeur pH 5 dans les sols moins développés alors que ceux sur les roches sédimentaires ont une fertilité naturellement faible avec des pH plus acides dépassant rarement le pH 4,5 [16, 19]. L'agriculture est l'activité principale du milieu mais elle présente une production très faible. La **Figure 1** illustre les champs observés et les sites d'échantillonnage des sols.

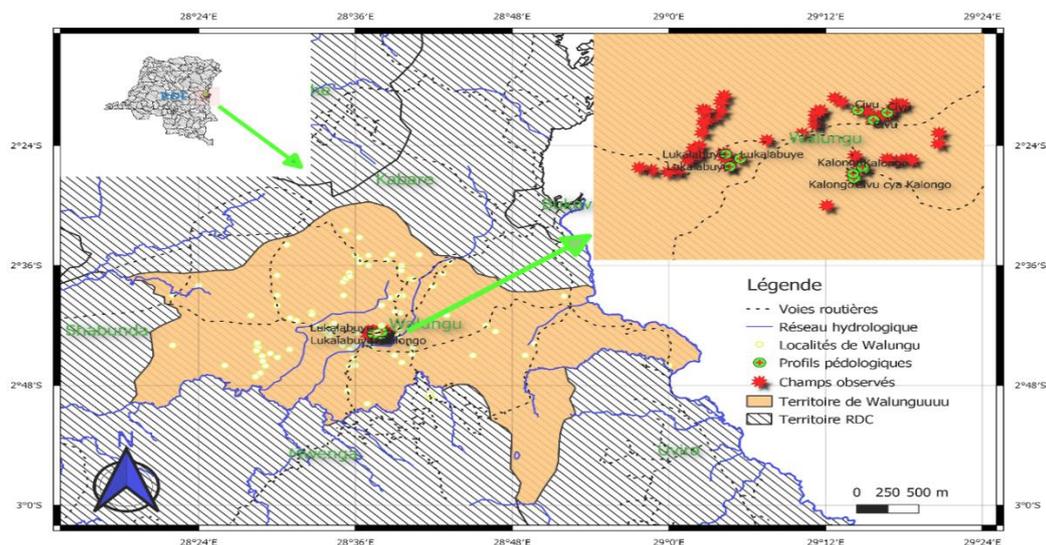


Figure 1 : Carte du territoire de Walungu localisant les sites d'échantillonnage

2-2. Matériel d'étude

Le matériel pédologique était constitué des échantillons de sols prélevés dans les quatre grands ensembles de sols dominant dans le milieu d'étude (*Civu*, *Kalongo*, *Civu cya kalongo* et *Lukalabuye*).

2-3. Méthodes

L'approche méthodologique a adopté la méthode d'enquête couplée aux expériences au laboratoire par modélisation d'isothermes d'adsorption.

2-3-1. Enquête

En décembre 2017, 68 ménages agricoles étaient enquêtés dans six localités du groupement de Burhale (*Mwegerhera, Mubondwe, Cibanda, Mukhaza, Bushadu et Cibinda*) dans le but d'identifier les quatre types des sols tels que décrits par [23] en 2013. Cette identification était réalisée en utilisant les indicateurs locaux de différenciation des sols à savoir les espèces de mauvaises herbes dominantes sur une parcelle, la couleur et la texture du sol, la profondeur de labour, la facilité d'un sol à être labouré et la localisation dans la toposéquence. Le **Tableau 1** présente les caractéristiques des sols étudiés telles qu'identifiées.

Tableau 1 : Caractéristiques distinctives de quatre grands ensembles des sols étudiés

Types de sols	Caractéristiques des sols	Photo
<i>Civu</i>	Sols riches en matière organique avec une bonne rétention en eau, facile à travailler et par conséquent considérés très fertile. Toutes les cultures principales (haricot, manioc, maïs, bananier, cultures maraichères, patate douce, pomme de terre, etc.) exploitées dans le milieu y sont cultivées. La sensibilité à l'érosion, la surexploitation conduisant à un épuisement constituent des contraintes à la gestion de la dégradation de ces sols. Les sols du type <i>Civu</i> sont souvent rencontrés dans les milieux moins accidentés (plaines, plateaux et bas-fond) et rarement sur les flancs de collines. Ils sont généralement de couleur sombre avec une structure agrégative.	
<i>Kalongo</i>	Principalement des sols de couleur rougeâtre ou jaunâtre. Ils sont pauvres en matière organique, exposés à l'érosion, peu profond, tenaces et présentent une structure continue. Les cultures de manioc et de patate douce ainsi que les espèces arbustives (<i>eucalyptus</i>) y sont exploitées. L'absence des mesures pour lutter contre l'érosion, l'exigence en fertilisants et en main d'œuvre constituent des contraintes majeures de gestion de la fertilité. Ces sols sont fréquents sur les flancs de collines.	

<i>Civu cya kalongo</i>	Ces sols constituent une forme intermédiaire entre <i>Civu</i> et <i>Kalongo</i> se rapprochant beaucoup plus de <i>Civu</i> et sa localisation dans la toposéquence est fréquente soit au début soit à la fin d'une pente.	 <p style="text-align: right;"><i>Civu cya kalongo</i></p>
<i>Lukalabuye</i>	Sols riches en éléments grossiers (pierres, cailloux mélangés avec sables...) les rendant parfois difficiles à travailler. Les cultures qui s'adaptent mieux dans ces conditions, en l'occurrence de l'arachide et du manioc, y sont pratiquées fréquemment. L'entretien de ces sols s'avère difficile. Ils sont présents au-dessus des collines et dans les plateaux. Ils ont une coloration rougeâtre, noirâtre ou grisâtre suivant les milieux et présentent une structure élémentaire.	 <p style="text-align: right;"><i>Lukalabuye</i></p>

Il sied de préciser de ce qui précède que l'allocation des cultures principales sur les différents types de sols est une résultante d'une expérience empirique des agriculteurs de Walungu dans le temps.

2-3-2. Analyses au laboratoire

Les échantillons des sols étaient prélevés dans des profils pédologiques dont trois par type des sols excepté pour le type *Civu cya kalongo* pour lequel on n'en avait fait que deux. La réalisation d'un profil consistait à creuser une tranchée verticale dans le sol de 150 cm de longueur, 75 cm de largeur et 100 cm de profondeur. Le prélèvement des échantillons composites se faisait à l'aide d'un couteau dans trois couches du profil (0-30 cm, 30-60 cm et de 60-90 cm) en commençant par la couche de profondeur (60-90) pour éviter la contamination avec les échantillons de surface (0-30 cm). Seuls les échantillons de surface ont été utilisés dans cette étude. Les échantillons non remaniés étaient aussi prélevés par les cylindres de Kopecky pour la détermination de la densité apparente (Da). L'appréciation de la couleur du sol était faite grâce au code de couleur (*Munsell color chart*) en choisissant la couleur étalon la plus semblable au sol observé. Les analyses ont consisté à déterminer la physicochimie des sols en premier et le phénomène d'adsorption en second. Avant toute analyse, les échantillons étaient homogénéisés, séchés à l'air libre pendant 72h, broyés puis tamisés à 2 mm.

2-3-2-1. La physicochimie

La détermination de différentes fractions (argile, limon et sable) était réalisée par la méthode internationale à la pipette Robinson et la classe texturale était déterminée pour chaque type de sol en plotant le pourcentage de chaque fraction sur le triangle textural (classification américaine). L'indice de déstructuration (S_i) était déterminé par la **Formule** suivante :

$$St(\%) = \frac{M.O}{(A + L)} \times 100 \quad [24] \quad (1)$$

Avec : *M.O* est la teneur en matière organique, *A* et *L* sont respectivement les pourcentages en argile et en limon

Le pH était mesuré dans une suspension eau/sol de rapport 1:2.5. La matière organique de chaque sol a été quantifiée par détermination du taux de carbone organique (CO) par la méthode Walkley and Black [25]. Enfin le phosphore (P_2O_5) était déterminé par la méthode Olsen [26] et le potassium (K_2O) était extrait du sol par l'acétate d'ammonium.

2-3-2-2. L'adsorption du phosphore

Pour chaque échantillon, 3 g de sol étaient mélangés avec 30 mL d'une solution de $CaCl_2$ 10^{-2} M dans des tubes de 50 mL contenant des concentrations croissantes initialement connues en phosphore : 0, 100, 200, 500, 800, 1000 et 1500 $mg \cdot kg^{-1}$ de sol sous forme de KH_2PO_4 . Une goutte de HCl 10^{-1} M était ajoutée dans chaque tube de solution pour inhiber l'activité biologique responsable de minéralisation du phosphore organique durant l'équilibre. Les tubes étaient fermés par des couvercles et agités deux fois par jour pendant 30 minutes jusqu'à 6 jours d'équilibre à une température ambiante moyenne d'environ $22^\circ C$. Après équilibre, les suspensions de sols étaient centrifugées pendant 10 minutes à 4000 tours/min, et le surnageant fût filtré et analysé par la méthode de réduction à l'acide ascorbique [27]. La concentration en phosphore était déterminée à l'aide d'un spectrophotomètre UV/Visible et dont la longueur d'onde était configurée à 880 nm. La détermination de la quantité du phosphore adsorbée consistait à faire la différence entre les concentrations initiales et celles présentes dans la solution à l'équilibre. En négligeant le phénomène éventuel de précipitation et d'adsorption sur les parois de tubes, l'hypothèse était que la disparition du phosphore dans

la solution est due à sa rétention [28]. L'expérience était répétée trois fois pour chaque échantillon et la concentration de 0,2 mg.L⁻¹ dans la solution du sol à l'équilibre était considérée pour estimer la quantité de P à apporter dans les sols étudiés [22, 28, 29].

2-3-2-3. Modélisation des isothermes d'adsorption

La modélisation des isothermes d'adsorption a recouru aux modèles de Freundlich, Langmuir et Temkin dont les **Equations (2), (3) et (4)** illustrent la formulation mathématique.

- Modèle de Freundlich

$$P_{ads} = kf \times C^n \quad [30] \quad (2)$$

- Modèle de Langmuir

$$P_{ads} = \frac{KL \times C \times P_{max}}{1 + KL \times C} \quad [31] \quad (3)$$

- Modèle de Temkin

$$P_{ads} = \alpha + \beta \times \ln C \quad [32] \quad (4)$$

P_{ads} étant la quantité de P adsorbée par unité de masse de sol (mg/Kg); C la concentration du P dans la solution du sol à l'équilibre; k_f et n les constantes du modèle de Freundlich relatives associées à la capacité d'adsorption et à l'énergie d'adsorption; K_L (L.mg⁻¹ de P) et P_{max} (mg P.kg⁻¹ de sol) sont successivement la constante d'équilibre résultant de l'adsorption-désorption reliée à l'énergie de liaison et la capacité maximale d'adsorption monocouche de Langmuir. α et β sont les deux constantes du modèle de Temkin associées à la capacité et l'énergie d'adsorption.

L'efficacité d'adsorption (EA) qui est le pourcentage de P adsorbé sur la quantité apportée dans la solution était estimée par la formule de **l'Equation (5)** et la quantité de P à apporter pour maintenir la concentration standard de 0,2 mg.L⁻¹ ($P_{0,2}$) était déterminée à partir du modèle de Freundlich qui a décrit au mieux le processus d'adsorption.

$$EA(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad [22] \quad (5)$$

C_i et C_f étant respectivement des concentrations initiale et finale de P dans la solution

2-4. Analyses statistiques

L'estimation des paramètres des modèles d'adsorption (Freundlich, Langmuir et Temkin) a recouru d'une part à la régression linéaire simple, d'autre part à une régression non linéaire grâce à l'algorithme de Gauss-Newton pour permettre une comparaison des modèles. Par la suite, deux modèles (Freundlich et Langmuir) étaient retenus suivant leurs valeurs du coefficient de détermination (R^2) et leur discrimination était réalisée par le calcul des paramètres statistiques (*root mean square error (RMSE)*, *mean absolute error (MAE)* et *akaike criterion corriged (AICc)*) capables d'estimer l'erreur commise par chaque modèle dans sa prédiction. Le modèle avec R^2 supérieur et $RMSE$, MAE et $AICc$ faibles était considéré comme le meilleur modèle pour décrire le processus d'adsorption dans les sols étudiés. Des corrélations entre les paramètres d'adsorption et les propriétés physico-chimiques étaient testées au seuil de 5 %. Toutes ces analyses ont été faites grâce au logiciel R.3.6.

3. Résultats

3-1. Paramètres physico-chimiques

Tableau 2 : Les paramètres physico-chimiques des sols étudiés

Paramètres	Civu	Kalongo	Civu cya Kalongo	Lukalabuye
pH _{H2O} (1 :2,5)	5,68 ± 1,184	4,26 ± 0,045	4,62 ± 0,593	4,86 ± 0,824
C.O (%)	4,08 ± 0,816	1,18 ± 0,373	2,23 ± 0,505	1,95 ± 0,485
M.O (%)	7,034 ± 1,484	2,034 ± 0,643	3,836 ± 0,902	3,362 ± 0,837
K (méq/100g)	1,154 ± 0,523	0,045 ± 0,007	0,434 ± 0,063	0,336 ± 0,023
P _{Olsen} (ppm)	18,821 ± 6,69	9,985 ± 5,87	15,086 ± 5,46	14,080 ± 0,15
Argile (%)	34,063 ± 16,8	35,714 ± 18,8	47,590 ± 15,9	39,204 ± 11,3
Limon (%)	20,176 ± 9,20	34,261 ± 8,62	11,374 ± 2,07	32,454 ± 14,9
Sable (%)	45,760 ± 18,1	30,024 ± 11	41,035 ± 19,2	28,341 ± 0,58
Texture	Loam argileux	Loam argileux	Loam-argileux	Limono-argileux
Da (g/cm ³)	0,81	1,03 ± 0,034	1,07 ± 0,023	1,04 ± 0,24
S _t (%)	9,111 ± 2,973	3,167 ± 1,232	4,399 ± 1,247	5,247 ± 0,957
Couleur du sol	Brune	Rouge jaunâtre	Brun jaunâtre	Brun jaunâtre

La physico-chimie des sols étudiés est reportée dans le **Tableau 2** qui révèle que trois-quarts des sols étudiés présentent une texture loam argileuse traduisant une fraction minérale équilibrée comportant assez des colloïdes pour la formation des agrégats. Les masses volumiques exprimées par la Da étaient autour de l'unité pour tous les sols excepté le type *Civu* qui a présenté une Da < 1g/cm³ (0,81 g/cm³). Hormis *Civu* (pH 5,68), tous les sols ont présenté des pH < 5. Le carbone organique (CO) variait de 1,18 % (*Kalongo*) à 4,08 % (*Civu*) et les teneurs en phosphore assimilable étaient comprises entre 9,985 ppm (*Kalongo*) et 18,82 ppm (*Civu*), des valeurs relativement faibles. L'indice de déstructuration (S_t) a présenté des valeurs qui indiquent une sensibilité à la déstructuration pour tous les sols (S_t ≤ 9 %). Les teneurs en potassium sont élevés dans les sols du type *Civu* (1,154 méq/100 g) comparativement aux autres sols.

3-2. Processus d'adsorption dans les sols étudiés

3-2-1. Modélisation des isothermes d'adsorption

Les isothermes obtenues (**Figure 2**) révèlent que la rétention du P était élevée à des faibles concentrations dans la solution. Elle est prononcée dans les sols du type *Kalongo* pour lesquels la pente des isothermes, qui traduit la capacité de rétention, est élevée et exprime une adsorption totale de 500 mg de P apportés par kg de sol (site de *Cibanda 2*). On note en outre, la rupture des pentes d'isothermes à des concentrations élevées relativement aux types des sols. Au regard des valeurs de R² (**Tableau 4**), le modèle de Freundlich (R² = 0,863 - 0,999) décrit bien le processus d'adsorption et il est respectivement suivi par les modèles de Langmuir (R² = 0,739 - 0,987) et de Temkin (R² = 0,684 - 0,905). Le paramètre *kf* de Freundlich traduit la capacité de rétention de l'adsorbant et ses valeurs varient de 1327 mg.kg⁻¹ de sol (*Civu*) à 3326,59 mg.kg⁻¹ (*Kalongo*). Quant au paramètre *n* associé à l'énergie d'adsorption, il renseigne sur le degré d'affinité du P pour le complexe adsorbant et montre des valeurs au tour de l'unité (0,959) pour *Civu* et des valeurs largement supérieures à un pour *Kalongo* et *Civu cya kalongo*, soit un pouvoir fort à retenir le P. L'évaluation de la qualité de la prédiction des différents modèles, montre des valeurs élevées de R² et faibles de RMSE, MAE et AICc (**Tableau 3**) pour le modèle de Freundlich.

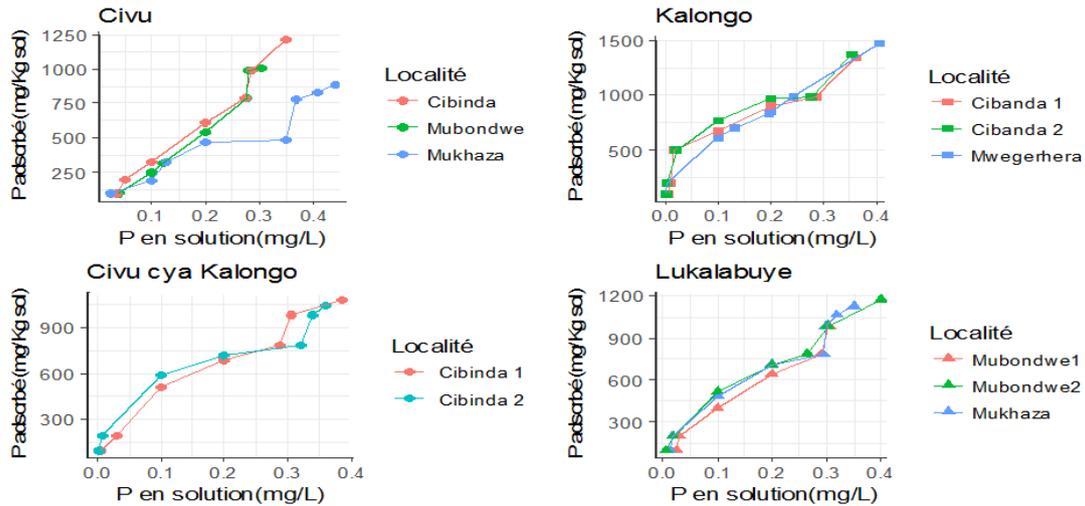


Figure 2 : Les isothermes d'adsorption suivant le formalisme de Freundlich

Tableau 3 : Paramètres R^2 , RMSE, MAE et AICc suivant les deux modèles retenus (Freundlich et Langmuir)

Types de sols	Modèle de Freundlich				Modèle de Langmuir			
	R^2	RMSE	MAE	AICc	R^2	RMSE	MAE	AICc
<i>Civu</i>	0,945	69,017	54,70	93,35	0,906	85,725	66,06	102,32
<i>Kalongo</i>	0,947	94,477	78,82	92,44	0,919	115,423	101,48	96,45
<i>Civu cya kalongo</i>	0,988	58,442	47,87	85,75	0,946	77,801	70,94	89,65
<i>Lukalabuye</i>	0,977	53,661	45,53	84,44	0,958	72,375	61,56	88,16

R^2 : coefficient de détermination, RMSE: root mean square error, MAE: mean absolute error, AICc : akaike criterion corriged

Tableau 4 : Paramètres d'adsorption estimés par la modélisation d'isothermes

Grands ensembles des sols		Modèles									
		Modèle de Freundlich				Modèle de Langmuir			Modèle de Temkin		
	Localités	<i>k_f</i>	<i>1/n</i>	<i>n</i>	<i>R</i> ²	<i>P_{max}</i>	<i>K_L</i>	<i>R</i> ²	<i>α</i>	<i>β</i>	<i>R</i> ²
Kalongo	<i>Cibanda_1</i>	3326,595	0,4115	2,430	0,978	1562,500	1,516	0,934	1059	169,48	0,764
	<i>Cibanda_2</i>	2635,724	0,4906	2,038	0,863	1605,22	1,645	0,987	1284	228,26	0,804
	<i>Mwegerhera</i>	2659,500	0,4394	2,275	0,988	2272,727	2,566	0,965	1388	214,50	0,763
	Moyenne	2873,939	0,4471	2,248	0,943	1813,482	1,909	0,962	1244	204,08	0,777
	Type d'isotherme	<i>H</i>(<i>n</i> >> 1)				-			-		
Civu	<i>Mubondwe</i>	1392,612	1,1449	0,873	0,994	1000	1,204	0,809	1305	411	0,800
	<i>Cibanda</i>	1327,394	0,9014	1,109	0,977	909,237	2,225	0,868	1285	339,67	0,780
	<i>Mukhaza</i>	2006,781	1,2130	0,824	0,908	1298,701	0,440	0,906	1436	611,91	0,905
	Moyenne	1575,595	1,0864	0,9357	0,959	1069,313	1,289	0,861	1342	454,19	0,828
	Type d'isotherme	<i>C</i>(<i>n</i> ≈ 1)				-			-		
Civu cya Kalongo	<i>Cibanda_1</i>	1428,137	0,4955	2,018	0,980	1098,901	1,250	0,965	972	173,82	0,684
	<i>Cibanda_2</i>	1877,587	0,4087	2,446	0,996	1219,512	3,660	0,983	1004	153,17	0,900
	Moyenne	1652,862	0,4521	2,232	0,988	1159,206	2,455	0,974	988	163,50	0,792
	Type d'isotherme	<i>H</i>(<i>n</i> >> 1)				-			-		
Lukalabuye	<i>Mubondwe_1</i>	2221,770	0,7714	1,296	0,960	2040,816	2,420	0,739	1237	306,37	0,815
	<i>Mukhaza</i>	1858,660	0,6243	1,601	0,963	1470,588	0,566	0,851	1229	264,33	0,732
	<i>Mubondwe_2</i>	1656,533	0,5439	1,838	0,999	1123,595	1,112	0,975	1099	208	0,796
	Moyenne	1912,321	0,6465	1,578	0,974	1544,999	1,366	0,855	1188	259,56	0,781
	Type d'isotherme	<i>H</i>(<i>n</i> > 1)				-			-		

n : énergie d'adsorption (Freundlich), *B* : énergie d'adsorption (Temkin), *k_f* : capacité d'adsorption (Freundlich), *K_L* : énergie d'adsorption (Langmuir), *α* : capacité d'adsorption (Temkin), *P_{max}* : capacité maximale d'adsorption du P (Langmuir), *R*² : coefficient de détermination.

3-2-2. Quantité de phosphore adsorbée à un standard de 0,2 mg.L⁻¹ (P_{0,2}) et l'efficacité d'adsorption

Tableau 5 : Quantité de phosphore adsorbée à un standard de 0,2 et l'efficacité d'adsorption

Types de sols	P adsorbé à 0,2 mg/L	Efficienc e d'adsorption
	P _{0,2} [*] (mg/kg)	EA (%)
<i>Civu</i>	532,690	71,977
<i>Kalongo</i>	859,613	84,923
<i>Civu cya kalongo</i>	662,709	80,085
<i>Lukalabuye</i>	671,006	79,163
Moyenne	681,505	79,037

*calculés à partir du modèle de Freundlich

Du **Tableau 5**, remarquons d'un côté que les valeurs de P_{0,2} sont élevées dans tous les sols avec une moyenne de 681,505 mg.kg⁻¹ sol et de l'autre côté, qu'environ 79 % du P apporté dans la solution sont adsorbés, ce qui indique une adsorption efficace ou favorable. Les sols du type *Civu* ont présenté des valeurs faibles (P_{0,2} = 532,690 mg.kg⁻¹ et EA = 71,9 %) comparativement aux reste de sols et ceux du type *Kalongo*, des valeurs élevées (P_{0,2} = 859,613 mg.kg⁻¹ et EA = 84,9%).

3-2-3. Corrélation entre les paramètres d'adsorption (kf, n et EA) et la physicochimie des sols (pH, MO, POlsen, Argile et Sf)

Tableau 6 : Corrélation entre les paramètres d'adsorption (kf, n et EA) et les caractéristiques physico-chimiques

Paramètres physico-chimiques	Paramètres d'adsorption du P		
	<i>kf</i>	<i>n</i>	<i>EA</i>
<i>pH</i>	-0,2169	-0,565*	-0,443
<i>M.O</i>	-0,4330	-0,832***	-0,765***
<i>P Olsen</i>	-0,714***	-0,475*	-0,640**
<i>% Argile</i>	0,1785	0,687***	0,673*
<i>Sf</i>	-0,4876*	-0,652**	-0,772***

***: *p-value* < 0,001 ; **: *p-value* < 0,01; *: *p-value* < 0,05

Des corrélations négatives et statistiquement considérables (*p-value* < 0,001) (**Tableau 6**) ont été observées entre les paramètres d'adsorption et les caractéristiques physico-chimiques à l'exception du pourcentage en argile qui est relativement liée aux trois paramètres de manière positive. Ceci laisse croire que le pouvoir adsorbant des sols de Walungu contraste avec l'amélioration ou l'augmentation du pH, de la M.O, du P assimilable et du maintien d'une structure équilibrée (S_f > 9).

4. Discussion

4-1. Propriétés physico-chimiques des sols

Généralement les sols de Walungu sont acides avec de $\text{pH} \leq 5$ [16, 18, 19]. Selon les résultats obtenus, seuls les sols du type *Civu* présentent un pH s'écartant de cette tendance avec une valeur de $5,68 \pm 1,184$ (**Tableau 3**) traduisant une faible acidité où la préférence de plusieurs cultures s'exprime pour une bonne croissance. Dans la gamme de pH la plus fréquemment rencontrée dans les conditions tropicales, le P se présente généralement sous les formes HPO_4^{2-} et H_2PO_4^- avec une forte affinité pour les surfaces adsorbantes à $\text{pH} < 5$ liée généralement à l'augmentation des charges positives. Ces charges positives étant particulièrement causées par l'accumulation des oxydes de Fe et Al^{3+} [4], facteurs importants de l'adsorption du P, prédisposeraient les sols de Walungu en la carence du P assimilable. En outre, le taux du carbone organique était faible ($\% \text{CO} < 2 \%$) dans les sols du type *Kalongo* et *Lukalabuye* impactant négativement la teneur en MO et rendant les sols sensibles aux risques de déstructuration par l'érosion ($S_t \leq 9$) [24] en dépit de la fraction minérale équilibrée. Il serait pour ce faire, crucial d'envisager une gestion durable de ces sols contre la dégradation.

4-2. Processus d'adsorption dans les sols étudiés

4-2-1. Modélisation des isothermes d'adsorption

Les isothermes exprimant le processus d'adsorption (**Figure 2**) ont présenté des allures différentes entre types des sols selon qu'ils diffèrent considérablement en propriétés physico-chimiques et des allures similaires au sein du même type. Néanmoins, s'agissant des sols de types *Civu* et *Kalongo* respectivement pour les sites de *Mukhaza* et *Mwegerhera* dont les isothermes se sont démarqués des autres, on a paradoxalement remarqué un décalage du processus d'adsorption dans un même type des sols. Cette situation serait expliquée par l'effet dépréciateur de la MO sur l'adsorption du P étant donné la teneur en MO élevée observée spécifiquement dans ces sites ; d'où la compétition entre les anions orthophosphates et les acides organiques [8] sur les sites d'adsorption. Les isothermes semblent évoluer, à l'exception des sols *Civu*, vers un maximum théorique ce qui montre une faible vitesse de rétention de P après une forte adsorption. Ceci prouve que la mise en évidence de la rétention du P dans les sols de Walungu par l'utilisation des concentrations initiales plus faibles, n'est pas régie par un équilibre et cela suppose concrètement une forte capacité de ces sols à adsorber le P. Le phénomène de précipitation du P avec Al^{3+} ou le Fe, contribue au même titre que l'adsorption à la rétention du P dans les sols, et il apparaît dans un processus d'adsorption lorsque la solution est fortement concentrée et les sites d'adsorption saturés. Ceci expliquerait la rupture des pentes des isothermes obtenues à des concentrations élevées de P (**Figure 2**). La couverture pédologique du territoire de Walungu est principalement dominée par des ferralsols [16] qui exigent des apports massifs de phosphore [16, 18, 20] pour combler le déficit. Cela étant, l'adéquation des données au modèle de Freundlich se justifie non seulement par l'utilisation des concentrations élevées du P en solution mais aussi par le fait que ce modèle décrit l'adsorption sur des surfaces hétérogènes et qu'il serait adapté pour caractériser la rétention du P dans les sols tropicaux [21]. Les paramètres estimés à partir de ce modèle (**Tableau 4**) étaient en rapport avec la capacité d'adsorption et l'énergie de rétention. Pour la capacité, il s'est avéré qu'avec une efficacité d'adsorption élevée ($\text{EA} = 79 \%$), les sols étudiés retiennent énormément de P ce qui réduirait la quantité et l'efficacité des apports phosphatés dans les conditions de Walungu. Quant à l'énergie décrit comme intensité d'adsorption (n), elle est très élevée dans les sols *Kalongo* et *Civu cya kalongo* ($n > 2$) et faible dans *Civu* ($n = 0,935$). Ces résultats traduisent deux comportements différents (isothermes du type C et

isothermes du type H) du P dans les sols étudiés. Le premier (type C) exprime une proportionnalité de P entre le complexe adsorbant et la solution, d'où la tendance linéaire et le second (type H) indique une forte énergie de rétention. Parce que la tendance linéaire d'une isotherme s'observe le plus souvent dans les sols riches en matières organiques, le type C caractérise le sol *Civu* ayant présenté des teneurs élevées en MO (**Tableau 3**). S'agissant des isothermes du type H, caractérisées initialement par une forte pente [6, 22], elles traduisent dans le reste des sols (*Kalongo*, *Civu cya kalongo* et *Lukalabuye*) une forte adsorption à des faibles concentrations mais au fur et à mesure que la concentration du P en solution augmente, l'adsorption devient moins aisée par la saturation des sites d'adsorption [22].

4-2-2. Quantité de phosphore adsorbée à un standard de 0,2 mg.L⁻¹ (P_{0,2})

Etant donné qu'une concentration de 0,2 mg P.L⁻¹ à l'équilibre dans la solution du sol convient pour une croissance maximale pour la majorité des plantes [28], la quantité de P déterminée (P_{0,2}) pour maintenir cet équilibre a été estimée à travers le modèle de Freundlich (**Tableau 6**). Elle variait de 532,69 - 859,613 mg.kg⁻¹ avec une moyenne de 681,505 mg.kg⁻¹ pour tous les sols. Comme il a d'ailleurs été observé dans une étude [16] sur les éléments déficients dans les sols de Walungu (*Civu* et *Kalongo*) qu'environ 625 mg.kg⁻¹ conviendraient pour maintenir 0,2 mg.L⁻¹; cette valeur est trop élevée et ce résultat suggère que la compréhension du comportement et de la disponibilité du P dans les sols de Walungu soit un facteur à prendre en compte pour la gestion de la fertilité des sols.

4-2-3. Corrélation entre les paramètres d'adsorption (k_f , n) et les caractéristiques physico-chimiques des sols

Des corrélations négatives ont été observées entre les paramètres physico-chimiques (pH, MO, P_{Olsen} et S_t) avec les paramètres d'adsorption issus du formalisme de Freundlich (k_f et n) à l'exception du pourcentage en argile qui a présenté des corrélations positives. Cette relation considérablement (p -value < 0,001) positive du pourcentage en argile avec l'énergie d'adsorption (n) ($r = 0,687$) montre que la texture d'un sol et particulièrement sa quantité en argile joue un rôle important dans l'adsorption du P [5-10]. La relation significativement négative entre l'indice de déstructuration (S_t) avec la capacité d'adsorption (k_f) ($r = -0,487$, p -value < 0,05) et l'énergie d'adsorption (n) ($r = -0,652$, p -value < 0,01) est due par la présence des conditions propices à l'adsorption occasionnées par l'accentuation de la dégradation. Dans les sols de Walungu et bien d'autres sols tropicaux, la dégradation des sols est accentuée par les conditions climatiques spécifiques qui affectent principalement l'altération des minéraux des sols. Cette altération, affectant négativement les minéraux essentiels du sol, occasionne d'un côté l'élimination des bases et de la silice relativement mobile et de l'autre côté, l'accumulation des oxydes de Fe et Al, responsables de la rétention du P, qui sont très peu mobiles. Des résultats similaires sur l'augmentation de l'adsorption du P par la dégradation des sols (Oxisol) ont été observées par [6, 9, 15]. S'agissant du phosphore assimilable déterminé par la méthode d'Olsen, les résultats ont montré que la quantité faible du P assimilable suppose la présence des sites d'adsorption ($r = -0,714$, p -value < 0,001). Partant de cette constatation, l'apport de P occasionnerait la saturation des sites pour maintenir l'équilibre entre le complexe adsorbant et la quantité de P dans la solution du sol et réduire l'adsorption de P. Cependant, l'apport massive d'intrants phosphatés présente des effets néfastes d'eutrophisation et de l'augmentation des éléments traces toxiques dans le sol si bien que la réduction de l'adsorption devrait être raisonnée en amont sur la gestion efficace des facteurs qui l'impliquent directement.

5. Conclusion

La fixation du phosphore est l'un des facteurs conduisant à la faible fertilité des sols de Walungu. L'amélioration de la gestion de cette fertilité impliquerait des systèmes de recommandation basés sur les méthodologies considérant les interactions entre compartiments du sol et son pouvoir à adsorber le P afin de réduire le déficit du P et augmenter les rendements. Les résultats obtenus dans cette étude montre que tous les sols étudiés (*Civu, Kalongo, Civu cya kalongo* et *Lukalabuye*) retiennent par adsorption 79 % de phosphore appliqué, ce qui traduit une forte capacité d'adsorption et ils exigent une grande quantité de P (681 mg.kg⁻¹ sol) pour maintenir 0,2 mg.L⁻¹ (concentration requise dans la solution du sol) pour un bon développement des cultures. Des stratégies recourant à la gestion efficace de l'acidité et la dégradation des sols de Walungu permettraient d'assurer l'efficience et l'utilisation rationnelle des fertilisants phosphatés.

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude aux agriculteurs du groupement de Burhale qui ont facilité l'identification des sols et la collecte d'échantillons au sein de leurs champs.

Références

- [1] - T. CRAWFORD, U. SINGH, et H. BREMAN, "Réduire les problèmes agricoles relatifs à l'acidité du sol dans la région des grands lacs de l'Afrique centrale", *IFDC CATALIST*(2008) 117 p.
- [2] - C. PLASSARD, A. ROBIN, C. CADRE-BARTHELEMY, C. MARSDEN, J. TRAP, L. HERMANN, K. WAITHAISONG, D. LESUEUR, E. BLANCHART et L. LARDY, *Innovations Agronomiques*, 43 (2015) 115 - 138
- [3] - A. P. TELES, *Soil Use and Management*, 33(1) (2017) 34 - 44
- [4] - P. CAMPOS, F. BORIE, P. COMEJO, J. A. LOPEZ-RAEZ, A. LOPEZ-GARCIA and A. SEGUEL, *Front. Plant. Sci.*, 9 (2018) 752 - 763
- [5] - B. DUME, D. AYELE, A. REGASSA and G. BERECHA, *J. Soil. Sci. Environ. Manage*, 8(4) (2017) 87 - 94
- [6] - J. R. FINK, A. V. INDA, T. TIECHER and V. BARRON, *Acta Scientiarum Agronomy*, 36 (2014) 379 - 387
- [7] - M. SABRY and R. JÖRG, *Phosphate in soil*, (2015) 320 - 326
- [8] - J. R. FINK, A. V. INDA, T. TIECHER and V. BARRON, *Ciência e Agrotechnologia*, 40(4) (2016) 369 - 379
- [9] - J. R. FINK, A. V. INDA, B. JOVANA, V. BARRON, J. TORRENT and C. BAYER, *Soil Tillage Research*, 155 (2016) 62 - 68
- [10] - A. KHAN, G. LU, M. AYAZ, H. ZHANG, R. WANG, L. FENGLIAN, X. YANG, B. SUN and S. ZHANG, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 256 (2018) 1 - 11
- [11] - WRB, "Base de référence mondiale pour les ressources en sols 2014, Mise à jour 2015. Système international de classification des sols pour nommer les sols et élaborer des légendes de cartes pédologiques". *Rapport sur les ressources en sols du monde*, FAO, Rome, N°106 (2015) 203 p.
- [12] - S. YANG, Z. ZHANG, L. CONG, X. WANG and S. SHI, *Journal of soil Science and plant Nutrition*, 13(3) (2013) 526 - 533
- [13] - W. YU, X. DING, S. XUE, X. LI and S. SHI, *Journal of Soil science and plant Nutrition*, 13(3) (2013) 109-124
- [14] - E. C. BORTOLUZZI, C. A. S. PEREZ, J. D. TIECHER and L. CANER, *Applied clay science*, 104 (2015) 196 - 204
- [15] - G. NZIGUHEBA, S. ZINGORE, J. KIHARA, R. MERCKX, S. NJOROGI, A. ATINGA, E. VANDAMME and B. VANLAUWE, *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 104 (2016) 321-340

- [16] - E. VANDAMME, "Nutrient deficiencies in soils of Walungu, South-Kivu, Democratic Republic of Congo", Thesis memory, Katholieke Universiteit Leuven, Belgique (2008) 119 p.
- [17] - A. B. HERI-KAZI et C. L. BIELDERS, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 24(2) (2020) 99 - 116
- [18] - L. D. LUNZE, *Cahier de CERPRU*, 14 (200) 28 - 31
- [19] - M. E. BAGULA, P. PYPERS, N. G. MUSHAGALUSA et J. B. MUHIGWA, in "Challenges and Opportunities for Agricultural Intensification of the Humid Highland Systems of Sub-Saharan", *Africa Springer*, 11 (2014) 187 - 199
- [20] - J. MULUMUNA, J. BASHAGALUKE, R. DRIES, J. WALANGULULU, R. MERCKX, B. VANLAUWE and P. BOECKX, *Poster young soil scientist conference Belgium*, (2015)
- [21] - F. O. UMOH, V. E. OSEDEKE, I. D. EDEM and G. S. EFFIONG, *Open Access Library Journal*, 1 (2014) e989
- [22] - N. HAFIZ, S. M. ADITY, D. F. MITU and A. RAHMAN, *Cogent Food and Agriculture*, 2 (2016) 1 - 13
- [23] - A. B. HERI-KAZI et G. COLINET, *Cahier du CERUKI, Nouvelle série*, 44 (2014) 127 - 147
- [24] - D. SORO, S. BAKAYOKO, D. DAO, T. BITRA, P. ANGUI et O. GIRANDI, *Agronomie Africaine*, 23 (2011) 205-215
- [25] - A. WALKLEY and I. A. BLACK, *Soil science*, 37 (1934) 29 - 38
- [26] - S. R. OLSEN, C. V. COLE, F. S. WATANABE and L. A. DEAN, *Agriculture Circular*, N°939 (1954)
- [27] - J. MURPHY and J. A. RILEY, *Analytica Chimica Acta*, 27 (1962) 31 - 36
- [28] - N. V. HUE and R. L. FOX, *Communications in soil science and plant analysis*, 41 (2010) 133 - 143
- [29] - R. S. BECKWITH, *J. Exp. Agri. Anim. Husb.*, 5 (1965) 52 - 58
- [30] - H. FREUNDLICH, "*Colloid and capillary chemistry*", Methuen, London (1926) 114 - 122
- [31] - L. LANGMUIR, *Journal of the American Chemical Society*, 40 (1918) 1361 - 1403
- [32] - M. L. TEMKIN and V. PYZHEV, *Acta Phys. Chim. USSR*, 12 (1940) 327 - 356