



Variabilité des paramètres chimiques du sol dans les exploitations agricoles familiales du Burundi: étude de cas des communes Mabanda et Vugizo, province Makamba

Salvator Kaboneka*¹, Soter Ndiokubwayo¹, Anaclet Nibasumba², Elysée Ntiranyibagira¹, Innocent Harumukiza¹, Dionésie Kabura¹, Prosper Manirambona¹ et Tite Ndamuhwaneyo¹.

¹Département Sciences et Technologies de l'Environnement (STE). Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). B.P. 2940. Bujumbura. Burundi.

²Institut Supérieur de Formation Agricole (ISFA). B.P. 241. Gitega. Burundi.

* Auteur de correspondance / Email: salvator.kaboneka@ub.edu.bi

Reçu : le 08 Août 2022

Accepté pour publication : le 19 novembre 2022

Publié en ligne pour la première fois : le 30 novembre 2022

Résumé

Cette étude avait pour visée l'analyse de la variabilité des paramètres chimiques dans les communes de Mabanda et Vugizo, en province Makamba, afin de proposer des formules de fertilisation adaptées aux différents types de sols. Les paramètres chimiques étudiés étaient : pH, CEC, % C organique, % N total et K échangeable. Les données ont été soumises à une analyse de la variance, suivie de l'application du test de Student-Newman-Keuls pour classer les moyennes en groupes homogènes. La principale leçon à tirer de l'étude est la forte variabilité des paramètres chimiques étudiés. Ainsi, en moyenne, les résultats obtenus à Mabanda sont : pH=5,42±0,62 (CV=11,4 %) ; CEC=8,35±3,30 (CV=39,5 %) ; % C organique=1,27±0,40 (CV=31,5) ; % N total=0,17±0,07 (CV=41,2 %) ; P assimilable=18,80±9,85 (52,4 %) et K échangeable=0,50±0,33 (66 %). De l'autre côté, ceux obtenus en commune Vugizo sont : pH=5,23±0,64 (12,2 %) ; CEC=8,64±2,26 (26,2 %) ; % C organique=1,59±0,46 (28,9 %) ; % N total=0,19±0,06 (31,6 %) ; P assimilable = 27,31±11,04 (40,4 %) et K échangeable=0,47±0,27 (57,4 %). Tout compte fait, seul le pH est caractérisé par une plus faible variabilité (< 15 %) dans les deux communes. De ce fait, nous nous permettons de conclure qu'il garantirait une plus grande fiabilité dans la gestion de la fertilité des sols au Burundi.

Mots clés: Paramètres chimiques, sol, Mabanda, Vugizo, déficience en P, fertilisation adaptée.

Abstract

Cette étude avait pour visée l'analyse de la variabilité des paramètres chimiques dans les communes de Mabanda et Vugizo, en province Makamba, afin de proposer des formules de fertilisation adaptées aux différents types de sols. Les paramètres chimiques étudiés étaient : pH, CEC, % C organique, % N total et K échangeable. Les données ont été soumises à une analyse de la variance, suivie de l'application du test de Student-Newman-Keuls pour classer les moyennes en groupes homogènes. La principale leçon à tirer de l'étude est la forte variabilité des paramètres chimiques étudiés. Ainsi, en moyenne, les résultats obtenus à Mabanda sont : pH=5,42±0,62 (CV=11,4 %) ; CEC=8,35±3,30 (CV=39,5 %) ; % C organique=1,27±0,40 (CV=31,5) ; % N total=0,17±0,07 (CV=41,2 %) ; P assimilable=18,80±9,85 (52,4 %) et K échangeable=0,50±0,33 (66 %). De l'autre côté, ceux obtenus en commune Vugizo sont : pH=5,23±0,64 (12,2 %) ; CEC=8,64±2,26 (26,2 %) ; % C organique=1,59±0,46 (28,9 %) ; % N total=0,19±0,06 (31,6 %) ; P assimilable = 27,31±11,04 (40,4 %) et K échangeable=0,47±0,27 (57,4 %). Tout compte fait, seul le pH est caractérisé par une plus faible variabilité (< 15 %) dans les deux communes.

Keywords: Chemical parameters, soil, Mabanda, Vugizo, P deficiency, precision fertilization.

1. Introduction

La problématique foncière liée à l'exiguïté des terres cultivées constitue le défi majeur de l'agriculture burundaise. Les questions liées à la gestion des terres en général et de la fertilité du sol en particulier sont inévitablement sensibles et centrales pour une augmentation de la production agricole. Face à de telles problématiques centrées sur la terre, le gouvernement du Burundi en collaboration avec les partenaires techniques et financiers ont entrepris des initiatives visant à trouver des solutions appropriées. C'est dans cette optique que l'ONG ZOA a travaillé à la fois avec les agriculteurs résidents et rapatriés dans les communes de Mabanda et Vugizo dans la province de Makamba. Elle y a fourni une aide pratique au moyen d'une gamme variée de projets d'assistance technique. Le projet « **Investir sur une terre fertile** », adaptation française du titre original « Building on Fertile Grounds - BFG » s'inscrivait dans ce cadre. L'un des objectifs prioritaires du projet BFG consistait à encourager le développement et l'agriculture durables, stratégie à long terme d'accroître la productivité agricole et de la sécurité alimentaire via une gestion judicieuse de la fertilité du sol.

Les sites d'actions de ce projet se trouvaient en communes Mabanda et Vugizo, deux communes choisies comme pilotes par le projet BFG et les projets antérieurs mis en œuvre par ZOA Burundi, en raison, entre autres, de leur spécificité en rapport avec le retour des réfugiés. Il est évident que la réussite des actions en vue du développement d'une région dépend de la façon dont la population cible réagit face aux nouveautés. Elle dépend aussi de l'adéquation des pratiques nouvellement introduites avec les réalités du milieu, les complexités de l'environnement physique, social et économique (G. Havyarimana, 1992).

Le travail qui fait l'objet de la présente étude s'inscrit dans le cadre d'un partenariat de recherche entre la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université du Burundi et l'Organisation Non Gouvernementale Internationale ZOA. Cette fructueuse collaboration s'est matérialisée par la production de 4 mémoires de fin d'études d'Ingénieur Agronome et d'une publication scientifique dans la revue de l'Université du Burundi, Sciences Exactes et Naturelles (S. Kaboneka & al., 2020). Le présent travail, qui fait corps et suite aux réalisations scientifiques citées ci-avant, se propose d'évaluer la variabilité des principaux paramètres chimiques du sol en communes de Mabanda et de Vugizo dans le but, à terme, d'adapter les formules de fertilisation aux types de sols et à leurs niveaux de fertilité.

De fait, depuis les années 1980, à travers de nombreuses études en fertilisation, des formules de fertilisation ont été vulgarisées auprès des agriculteurs (F. Ntiburumusi & al., 2002 ; O. Nduwimana & al., 2013). Toutefois, ces formules ne tiennent pas compte de la variabilité des caractéristiques spécifiques des sols, ni des besoins réels des plantes, des

réalités économiques et des possibilités techniques de l'agriculteur. L'analyse de la variabilité des paramètres chimiques permet de rendre disponible les informations nécessaires pour mieux orienter les futurs programmes de fertilisation et ainsi proposer des formules de fertilisation adaptées aux sols, pour le cas d'espèce, ceux des communes de Mabanda et de Vugizo, et, *in extenso*, aux localités de mêmes caractéristiques pédo-climatiques du Burundi.

Notre hypothèse de travail est la suivante : il existe une variabilité des paramètres chimiques du sol dans les exploitations agricoles paysannes des communes de Makamba et de Vugizo dont il faut tenir compte pour adapter les formules de fertilisation des sols, dans la ligne d'une agriculture de précision et en quête de la protection de l'environnement (A. Srinivan, 2006 ; P. Goovaerts & al., 1989 ; F. Rosemary & al., 2017 ; F. Guan & al., 2017 ; S.M. Ichami & al., 2020 ; G.A. Tiruneh & al., 2021 ; J. Jin & C. Jiang, 2002 ; C.E.P. Cerri & al., 2004).

2. Matériels et Méthodes

2.1. Brève description de la zone d'étude

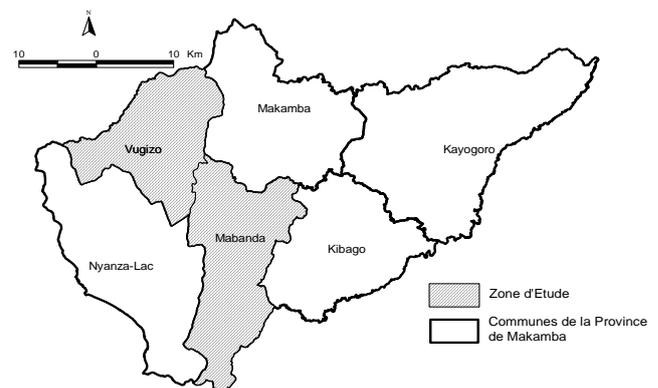


Figure 1. Localisation géographique des communes Mabanda et Vugizo de la province Makamba.

2.1.1. Commune Mabanda

La commune Mabanda est l'une des communes que compte la province de Makamba. Elle est limitée au Nord par la commune de Makamba, au Sud par la République Unie de Tanzanie, à l'Est par la commune de Kibago, à l'Ouest par la commune de Nyanza-Lac, et au Nord-Ouest par la commune de Vugizo (Figure 1). Sa superficie est de 294,94 km². La commune de Mabanda est constituée par de bas plateaux et des plaines qui se prolongent jusqu'au Nord-Ouest de la Tanzanie. Son altitude est comprise entre 780 et 2500 m.

Le climat de la commune Mabanda est doux et est caractéristique de la région naturelle du Buragane. Celle-ci est caractérisée par un climat de type tropical, une végétation constituée par une galerie et de forêt claire, et une température moyenne annuelle de 18°C. Les températures les plus élevées sont enregistrées aux mois d'août, septembre et octobre avec

une faible variation des températures moyennes mensuelles et de forts écarts diurnes (17 et 23°C) (S. Kaboneka & al., 2020). Selon C. Bigura (1988), la région naturelle de Buragane dont fait partie la commune Mabanda est caractérisée par les principaux sols suivants : Régogley (G) avec dans beaucoup de cas, un horizon foncé, épais et riche en matière organique qui coiffe les Régogleys (Régogleys humiques) ; Hygroxéroferralsol ; Hygroxéroferralsol sans horizon B ferrallitique ; Lithosol. Ces mêmes sols ont aussi fait l'objet d'études pédo-agronomiques (S. Kaburungu, 1981 ; G. Sottiaux & al., 1985).

La végétation naturelle de la commune Mabanda est formée d'une savane arborée dressée et une forêt naturelle en disparition. La flore de ce paysage est en grande partie celle des forêts claires avec dominance des espèces végétales comme *Brachystegia sp* et *Uapaca sp*. A côté de ces forêts claires, des galeries s'étendent sur les pentes inaccessibles de Rukonwe, constituées de diverses essences dont *Newtonia buchananii (Baker f.) G.C.C Gilbert & Boutique*, avec des savanes essentiellement herbacées qui tapissent les crêtes et les pentes rocheuses ou rocailleuses.

Tableau 1. Répartition des collines de la commune Mabanda par zone administrative.

Zone administrative	Colline
Gitara	Ruvuga
	Budaketwa
	Musenyi
	Bikobe
	Nyamugari
Kayogoro	Bukunda
	Burima
	Nyabitabo
	Mubondo
	Mivo
	Kigamba
	Karinzi
Mabanda	Samvura
	Mutwazi
	Mabanda
	Gikombe
	Kibimba
	Mara
	Gikurazo

Sur le plan administratif, la commune Mabanda compte trois zones subdivisées en 19 collines de recensement (MPDRN, 2006). Elles sont listées dans le tableau 1 et dans la figure 2 ci-

après. La zone de Gitara compte 5 collines : Ruvuga, Budaketwa, Musenyi, Bikobe et Nyamugari. Celle de Kayogoro est composée des collines Bukunda, Burima, Nyabitabo, Mubondo, Mivo, Kigamba et Karinzi. Les collines de Samvura, Mutwazi, Mabanda, Gikombe, Kibimba, mara et Gikurazo font partie de la zone Mabanda.

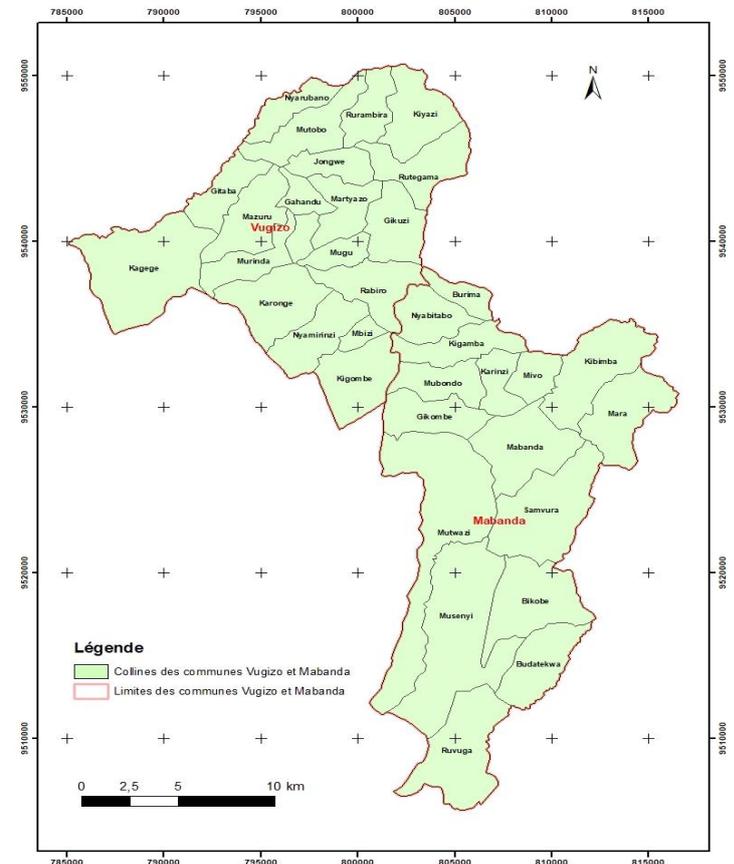


Figure 2. Localisation des collines dans les communes Mabanda et Vugizo de la province Makamba.

2.1.2 Commune Vugizo

La commune Vugizo s'étend sur deux régions naturelles à savoir, le Mumirwa et le Bututsi. Ces régions naturelles sont caractérisées par : (i) une altitude moyenne variant entre 1500 et 2500 m ; (ii) une végétation constituée d'une savane arborée et une forêt naturelle en disparition ; (iii) un réseau hydrographique important avec rivières et ruisseaux ; (iv) des pentes relativement fortes. Elle est limitée au Nord-Ouest par les communes Bururi et Vyanda ; au Sud-Est par la commune Mabanda ; à l'Est par la commune Makamba ; au Sud-Ouest par la commune Nyanza-Lac (Figure 2). Le chef-lieu de la commune et en même temps de la zone est situé à 41 km du chef-lieu de la province Makamba. Sa superficie est de 230,86 km² (MPDRN, 2006).

La commune de Vugizo est administrativement subdivisée en 3 zones comprenant 20 collines (Figure 2). La zone de Gihisha comprend 7 collines : Kiyazi, Martyazo, Jongwe, Mutobo,

Nyarubano, Rurambira et Rutegama. Celle de Mpinga englobe les collines de Gahandu, Gitaba, Mazuru, Murinda, Kagege et Ndobu. La troisième zone est celle de Vugizo qui a donné le nom à la commune. Elle est composée des collines de Gikuzi, Kigombe, Karongwe, Mbizi, Mugu, Nyamirinsi et Rabiro.

Le relief de la commune Vugizo est très escarpé et dominé par la chaîne de montagnes Inanzerwe – Kibimbi avec des plateaux au Sud. L'altitude de la commune Vugizo est comprise entre 1500 et 2500 m. La végétation est formée d'une savane arborée et une forêt naturelle en disparition dans le Mumirwa (MPDRN, 2006). Le climat est déterminé par les 2 régions naturelles du Mumirwa et du Bututsi. Il est rude dans les 2 régions naturelles. Les pluies sont généralement abondantes pendant la saison humide qui s'étale entre octobre et avril. La saison sèche dure 3 à 4 mois en général. La zone de la crête et des plateaux a une température moyenne variant entre 17 et 23°C. Les températures les plus élevées sont enregistrées en août, septembre et octobre avec une faible variation des températures moyennes mensuelles et de forts écarts diurnes (MPDRN, 2006).

Tableau 2. Répartition des collines de la commune Vugizo par région naturelle et par zone administrative.

Région naturelle	Zone administrative	Colline	
Mumirwa	Vugizo	Karongwe	
		Nyamirizi	
		Mbizi	
		Mugu	
		Gikuzi	
		Rabiro	
		Kigombe	
		Mpinga	Mazuru
		Ndobu	
		Gitaba	
Bututsi	Gishiha	Murinda	
		Kagege	
		Gahandu	
		Rutegama	
		Kiyazi	
		Jongwe	
		Rurambira	
		Martyazo	
Mutobo			
		Nyarubano	

Les sols de la commune Vugizo sont sableux et argileux, améliorés par les labours répétés et les apports d'amendements organiques. Ces sols ont une productivité bonne et un potentiel de fertilité élevé (MPDRN, 2006). La flore de la commune est composée par une formation forestière à *Brachystegia* sp dont la plus importante se trouve à Rukambasi à 1610 m d'altitude. (MPDRN, 2006).

En raison de difficulté d'accessibilité, seulement 14 des 20 collines de la commune Vugizo ont fait l'objet de la présente étude. Les 6 collines n'ayant pas fait partie de la présente sont indiquées en caractère gras dans le tableau 2.

2.2 Prélèvement des échantillons

Les prélèvements d'échantillons de sols ont été effectués dans les exploitations des 50 agriculteurs interviewés, aussi bien dans la commune Mabanda que dans celle de Vugizo. Le nombre d'échantillons de sols collectés dans chaque colline, dans une zone donnée d'une commune donnée est indiqué en parenthèses dans les différents tableaux analytiques. La collecte de ces échantillons de sol a été faite à l'aide d'une tarière pour le prélèvement et des sachets en polyéthylène pour le transport vers le laboratoire d'analyses. La méthode de prélèvement suivie était la méthode en zigzag dans le but de couvrir toute la zone à échantillonner (S. Kaboneka & al., 2020). Trois à quatre prélèvements ont été effectués suivant la taille de la parcelle et un échantillon composite était constitué et numéroté sur base de l'exploitation enquêtée et du niveau de fertilité de la parcelle échantillonnée (S. Kaboneka & al., 2020).

2.3 Analyses chimiques

Les analyses chimiques des sols ont concerné les % en C organique et en N total, le pH (eau), le P assimilable, la capacité d'échange cationique (CEC) et le K échangeable. Les autres cations échangeables (Ca, Mg) n'ont pas pu être analysés, par suite d'une limitation budgétaire. Le pH a été mesuré dans une suspension sol/eau dans un rapport 1:5. L'azote a été dosé par la méthode de Kjeldahl (J.M. Bremner & C.S. Mulvaney, 1982) et le C organique par la méthode de Walkley-Black (Nelson, D.W. & L.E. Sommers, 1982). La CEC et le K échangeable ont été dosés par la méthode utilisant l'acétate d'ammonium 1N tamponnée au pH=7,0. Le K échangeable a été dosé par spectrophotométrie d'absorption atomique (B.A. Zarcinas & al., 1987). L'ion ammonium adsorbé a été désorbé par percolation d'une solution de KCl 10 %, pH=3,0 et dosé par distillation et titrage pour déterminer la CEC du sol. Tous les détails des protocoles analytiques sont décrits par C. Kibiriti & al. (1986a&b).

2.4 Traitement et analyse des données

La saisie des données de terrain et de laboratoire a été effectuée à l'aide du logiciel SPSS (Statistical Package for Social Sciences) version 20.0. Elle était suivie de l'analyse descriptive des paramètres chimiques considérés et l'analyse de la variance à un facteur de classification (ANOVA I).

L'application du test de Student-Newman-Keuls a permis de comparer les moyennes afin de classer les paramètres par groupes homogènes au seuil de 5 %. L'interprétation des résultats a été faite en référence à l'ouvrage de P. Dagnélie (1987).

3. Présentation et discussion des Résultats

3.1 Variabilité des paramètres chimiques dans les collines de la commune Mabanda

Les résultats analytiques sur les paramètres pH, CEC, % C organique, % Azote total, P assimilable et K échangeable sont indiqués dans les tableaux 3 à 8.

3.1.1 Variabilité du pH

Les valeurs moyennes accompagnées des écart-types, des coefficients de variation (C.V %), des valeurs minimales (Min.) et maximales (Max.) associées aux valeurs de pH enregistrées dans les collines étudiées de la commune Mabanda sont consignées dans le tableau 3 ci-après. Dans ce dernier tableau et tous les autres qui suivent, les valeurs des moyennes avec les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 % (P. Dagnélie, 1987).

Tableau 3. Variabilité du pH dans les collines de la commune Mabanda.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Kibimba (3)	6,10±0,38a	6,17	5,67	6,38
Nyabitabo (5)	6,01±0,44ab	7,28	5,24	6,33
Bikobe (2)	5,94±0,11ab	1,79	5,86	6,01
Kigamba (5)	5,93±0,52ab	8,85	5,41	6,70
Mara (4)	5,79±0,41ab	7,09	5,18	6,06
Gikurazo (6)	5,78±0,51ab	8,89	5,29	6,64
Bukunda (6)	5,59±0,40ab	6,79	5,13	6,08
Mabanda (3)	5,48±0,46ab	8,38	4,97	5,86
Burima (4)	5,43±0,37ab	6,75	5,11	5,90
Karinzi (7)	5,41±0,55ab	10,18	4,55	6,35
Mivo (3)	5,40±1,02ab	18,86	4,44	6,47
Gikombe (5)	5,39±0,62ab	11,55	4,66	5,96
Mubondo (5)	5,36±0,42ab	7,76	4,88	5,98
Samvura (4)	5,15±0,48ab	9,36	4,64	5,71
Budaketwa (5)	4,97±0,63ab	12,61	4,30	5,94
Mutwazi (5)	4,88±0,58ab	11,88	4,18	5,72
Ruvuga (6)	4,83±0,66ab	13,69	4,03	5,76
Musenyi (5)	4,75±0,34ab	7,23	4,34	5,20
Commune (83)	5,42±0,62	11,45	4,03	6,70

L'analyse de la variance à un seul critère indique un effet significatif ($pH < 0,05$) du facteur « colline » sur le pH. Le test de Newman-Keuls y appliqué répartit les collines de la commune Mabanda en deux groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent (Tableau 3). En tête se retrouve la colline de Kibimba avec une valeur moyenne de $pH=6,10$, une valeur

minimale de 5,67 et une valeur maximale de 6,38. A l'opposé, la colline de Musenyi est caractérisée par la plus faible valeur moyenne de $pH=4,75$. Son pH minimal observé est de 4,34 et sa valeur maximale est de 5,20. Toutes les autres collines présentent des valeurs de pH situées entre celles associées aux deux collines. Au niveau de toute la commune de Mabanda, le pH moyen est de 5,42 avec des extrêmes variant d'un pH fortement acide (4,03) à un pH proche de la neutralité (6,7). Les coefficients de variations (C.V) caractéristiques des valeurs de pH observées dans les collines enquêtées de la commune Mabanda sont largement acceptables : 11 % en moyenne, une valeur minimale de 2 % (Bikobe) et une valeur maximale de 19 % (Mivo).

3.1.2 Variabilité de la CEC

Les valeurs moyennes accompagnées des écart-types, des coefficients de variation (%), des valeurs minimales (Min.) et maximales (Max.) associées aux valeurs de CEC (méq/100 g de sol) enregistrées dans les collines étudiées de la commune Mabanda sont consignées dans le tableau 4 ci-devant.

Tableau 4. Variabilité de la CEC dans les collines de la commune Mabanda.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Ruvuga (6)	12,97±0,69a	5,33	12,10	14,00
Nyabitabo (5)	10,86±3,79ab	34,58	7,15	15,25
Gikombe (5)	10,69±2,34ab	21,90	7,25	12,85
Bukunda (6)	10,55±3,75abc	35,55	5,45	15,35
Budaketwa (5)	10,17±2,77abcd	27,23	7,55	14,55
Kigamba (5)	9,47±0,73abcd	7,74	8,75	10,35
Mubondo (5)	9,35±3,51abcd	37,52	5,85	14,45
Mabanda (3)	8,42±3,85abcd	45,77	4,65	12,35
Samvura (4)	8,08±1,89abcd	23,46	6,65	10,65
Burima (4)	8,05±0,92abcd	11,43	7,15	9,15
Karinzi (7)	7,85±2,59abcd	33,01	5,15	12,35
Mutwazi (5)	6,87±2,53abcd	36,82	3,65	9,95
Bikobe (2)	6,55±2,55bcd	38,86	4,75	8,35
Gikurazo (6)	5,910,76bcd	12,85	4,65	6,65
Mivo (3)	5,85±4,04bcd	68,87	1,25	8,75
Kibimba (3)	4,75±0,82cd	17,23	3,85	5,45
Musenyi (5)	4,51±0,93d	20,65	2,85	5,05
Mara (4)	4,28±1,37d	31,98	3,05	5,65
Commune (83)	8,35±3,30	39,49	1,25	15,35

L'analyse de la variance à un seul critère indique un effet significatif ($pH < 0,05$) du facteur « colline » sur la Capacité d'Echange Cationique (CEC). Le test de Newman-Keuls appliqué aux valeurs de CEC correspondantes aux collines de Mabanda classe les valeurs de CEC en 5 groupes de moyennes chevauchants (Tableau 4). La colline de Mara avec une moyenne de $CEC=4,28$ méq/100 de sol, une CEC minimale de 3,05 méq/100 g de sol et une CEC maximale de 5,65 méq/100 g de sol se situe en bas du classement. Celui-ci est dominé par

la colline de Ruvuga avec une CEC moyenne de 12,97 méq/100 g de sol et des valeur minimale et minimale de 12,10 et 14,00 méq/100 g de sol, respectivement.

Paradoxalement, la colline de Kibimba qui était caractérisée par le meilleur pH se classe très bas au niveau de la CEC, juste au-dessus de la colline Mara avec la plus faible valeur de la CEC. Les valeurs de CEC caractéristiques de toutes les autres collines sont situées entre la colline de Mara en bas du classement et celle de Ruvuga en tête du classement.

Au niveau de toute la commune de Mabanda, la CEC est en moyenne de 8,35 méq/100 g de sol avec des valeurs minimale et maximale de 1,25 méq/100 de sol et 15,35 méq/100 g de sol, respectivement. Le coefficient de variation y associé est assez élevé (39,5 %), indiquant l'hétérogénéité des collines de Mabanda vis à vis de la CEC. La plus grande hétérogénéité étant enregistrée au niveau de la colline Mivo (C.V=69 %).

3.1.3 Variabilité du % C organique

Les valeurs moyennes accompagnées des écart-types, des coefficients de variation (C.V. %), des valeurs minimales (Min.) et maximales (Max.) associées aux valeurs de % C organique enregistrées dans les collines étudiées de la commune Mabanda sont consignées dans le tableau 5 ci-après.

Tableau 5. Variabilité du % C dans les collines de la commune Mabanda.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Ruvuga (6)	1,82±0,30a	16,23	1,31	2,09
Budaketwa (5)	1,68±0,71ab	42,44	1,07	2,67
Samvura (4)	1,66±0,48ab	28,96	1,11	2,21
Kigamba (5)	1,51±0,36abc	23,49	1,29	2,14
Bikobe (2)	1,46±0,11abc	7,24	1,39	1,54
Gikombe (5)	1,44±0,27abc	18,20	1,06	1,68
Mutwazi (5)	1,39±0,24abc	17,45	1,16	1,77
Mabanda (3)	1,31±0,24abc	18,21	1,05	1,52
Gikurazo (6)	1,26±0,28abc	22,11	1,03	1,74
Burima (4)	1,22±0,08abc	6,19	1,15	1,30
Mivo (3)	1,12±0,50abc	45,06	0,55	1,51
Nyabitabo (5)	1,08±0,26bc	23,69	0,68	1,37
Bukunda (6)	1,02±0,25bc	24,47	0,61	1,27
Musenyi (5)	1,02±0,19bc	19,18	0,80	1,23
Mubondo (5)	1,02±0,10bc	9,75	0,90	1,13
Karinzi (7)	1,02±0,21bc	20,88	0,77	1,38
Kibimba (3)	0,98±0,02bc	2,34	0,97	1,01
Mara (4)	0,78±0,22c	27,95	0,56	1,03
Commune (83)	1,27±0,40	31,63	0,55	2,67

Le % C organique soumis à l'analyse de la variance montre un effet significatif ($pH < 0,05$) du facteur « colline ». Le test de Newman-Keuls indique un classement de moyennes en trois groupes chevauchants (Tableau 5), avec en tête la colline de

Ruvuga ((% C=1,82, minimum=1,31, maximum=2,09) et en bas du classement celle de Mara (% C=0,78, minimum=0,56, maximum=1,03). Toutes les autres collines se situent entre les deux extrêmes quant aux valeurs du % organique. Plus proches de la colline Ruvuga sont les collines de Budaketwa et de Samvura, alors que les collines de Kibimba, Mubondo, Karinzi et Musenyi ne se détachent pas significativement de la colline de Mara qui est la plus pauvre en % C organique, comme pour le pH et la CEC. Au niveau de toute la commune de Mabanda, le % en C organique varie de 0,55 (Mivo) à 2,67 (Budaketwa), avec une moyenne de 1,27 % C organique.

Les coefficients de variation des valeurs de % C organique (avec une moyenne de 32 %), sont plus élevés sur les collines Mivo (45 %) et de Budaketwa (42 %). Par contre, les collines de Kibimba (2,34 %), Burima (6,19 %), Bikobe (7,24 %) et Mubondo (9,75 %) sont caractérisées par de plus faibles coefficients de variation associés au % C organique, synonymes d'homogénéité.

3.1.4 Variabilité de l'Azote total

Les valeurs moyennes accompagnées des écart-types, des coefficients de variation (C.V. %), des valeurs minimales (Min.) et maximales (Max.) associées aux valeurs de % d'azote total enregistrées dans les collines étudiées de la commune Mabanda sont consignées dans le tableau 6.

Tableau 6. Variabilité du % en N total dans les collines de la commune Mabanda.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Mubondo (5)	0,24±0,02a	8,29	0,10	0,60
Ruvuga (6)	0,24±0,02a	9,22	0,20	0,26
Budaketwa (5)	0,22±0,05ab	22,33	0,17	0,28
Kigamba (5)	0,20±0,03ab	14,60	0,17	0,25
Samvura (4)	0,19±0,05ab	25,54	0,15	0,25
Mabanda (3)	0,19±0,03ab	13,92	0,17	0,22
Burima (4)	0,18±0,02ab	12,14	0,16	0,21
Gikombe (5)	0,18±0,02ab	8,78	0,16	0,20
Bukunda (6)	0,17±0,03ab	17,46	0,13	0,20
Mutwazi (5)	0,17±0,02ab	9,61	0,15	0,19
Nyabitabo (5)	0,16±0,04ab	23,80	0,12	0,22
Karinzi (7)	0,16±0,01ab	8,97	0,14	0,17
Mivo (3)	0,16±0,06ab	33,72	0,10	0,20
Bikobe (2)	0,15±0,04ab	24,38	0,12	0,17
Kibimba (3)	0,12±0,02ab	16,88	0,10	0,14
Musenyi (5)	0,12±0,01ab	9,19	0,11	0,14
Gikurazo (6)	0,10±0,02ab	23,44	0,07	0,14
Mara (4)	0,10±0,01b	13,59	0,08	0,11
Commune (83)	0,17±0,07	38,55	0,07	0,60

Appliquée aux données de % d'azote total associées aux collines de la commune Mabanda, l'analyse de la variance indique un effet significatif ($pH < 0,05$) du facteur colline.

Conséquemment, le test de Newman-Keuls regroupe les collines de Mabanda en deux groupes de moyennes homogènes (Tableau 6) dominés par les collines de Mubondo et de Ruvuga (0,24 %), suivies par la colline Budaketwa (0,22 %). A l'opposé, les collines de Mara et de Gikurazo ont de très faibles contenus en azote total (0,10 %). La position de toutes les autres collines est intermédiaire entre les deux extrêmes.

Au niveau de toute la commune de Mabanda, le % azote total varie de 0,07 à 0,60, avec une moyenne de 0,17 %. Le coefficient de variation moyen estimé sur toutes les collines enquêtées est de 39 %, indiquant une hétérogénéité assez élevée entre les collines de la commune Mabanda, quant à au contenu en azote total. A noter que les données de % en azote total sont très homogènes (C.V. \approx 10 %) pour les collines de Mubondo, Ruvuga, Mutwazi, Gikombe, Karinzi et Musenyi.

3.1.5 Variabilité du P assimilable (ppm)

Les valeurs moyennes accompagnées des écart-types, des coefficients de variation (C.V. %), des valeurs minimales (Min.) et maximales (Max.) associées aux valeurs du P assimilable (ppm) enregistrées dans les collines étudiées de la commune Mabanda sont consignées dans le tableau 7.

Tableau 7. Variabilité du P assimilable dans les collines de la commune Mabanda.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Kigamba (5)	29,20 \pm 11,19a	38,31	16,00	47,00
Mivo (3)	27,67 \pm 2,08ab	7,52	26,00	30,00
Ruvuga (6)	27,17 \pm 3,31ab	12,18	21,00	31,00
Bikobe (2)	27,00 \pm 4,24ab	15,71	24,00	30,00
Mubondo (5)	26,60 \pm 3,05ab	11,46	23,00	30,00
Musenyi (5)	25,00 \pm 9,08ab	36,33	9,00	31,00
Burima (4)	24,75 \pm 11,19ab	6,90	23,00	27,00
Budaketwa (5)	24,40 \pm 8,11ab	33,24	17,00	38,00
Bukunda (6)	21,83 \pm 4,62abc	21,17	17,00	29,00
Karinzi (7)	17,29 \pm 5,62abcd	32,50	12,00	27,00
Nyabitabo (5)	16,20 \pm 10,06abcde	62,09	5,00	27,00
Gikombe (5)	15,40 \pm 5,03abcde	32,66	9,00	23,00
Samvura (4)	15,00 \pm 8,83abcde	58,89	3,00	24,00
Mutwazi (5)	13,60 \pm 5,77abcde	42,43	8,00	23,00
Mabanda (3)	12,33 \pm 8,33abcde	67,50	1,00	6,00
Kibimba (3)	8,83 \pm 7,22abcde	81,70	0,50	13,00
Gikurazo (6)	4,05 \pm 2,82de	69,55	0,30	9,00
Mara (4)	2,50 \pm 2,38e	92,21	1,00	6,00
Commune (83)	18,80\pm9,85	52,41	0,30	47,00

Le P assimilable soumis à l'analyse de la variance montre un effet significatif ($p < 0,05$) du facteur « colline ». Le test de Newman-Keuls liste les différentes collines de la commune Mabanda en cinq groupes de moyennes homogènes chevauchants (Tableau 7). En tête du classement des

moyennes de P assimilable se retrouve la colline de Kigamba (P assimilable = 29,2 ppm), suivie de loin par les collines de Mivo (P=27,67 ppm), Bikobe (P assimilable=27 ppm) et de Mubondo (P assimilable=26,6 ppm). A l'opposé, en bas du classement viennent encore une fois les collines de Mara (P assimilable=2,5 ppm) et de Gikurazo (P assimilable=4,05 ppm). Toutes les autres collines de la commune Mabanda se retrouvent entre Mara (la plus pauvre en P assimilable) et Kigamba (la plus riche en P assimilable).

De manière générale, au niveau de la commune de Mabanda, les teneurs en P assimilable varient d'un minimum de 0,30 ppp (Gikurazo) à 47 ppm (Kigamba), avec une moyenne de 18,8 ppm, associée à un coefficient de variation de plus de 50 %. Les plus faibles coefficients de variation (< 20 %), indicateurs de meilleure homogénéité des valeurs de P assimilable se retrouvent sur les collines de Burima (6,90 %), Mivo (7,52 %), Mubondo (11,46 %), Ruvuga (12,18 %) et Bikobe (15,71 %). De l'autre côté, les hétérogénéités les plus élevées en valeurs de P assimilable, telles qu'exprimées par les coefficients de variation sont observées avec les collines de Mara (95,2 %), Kibimba (81,7 %), Gikurazo (69,6 %), Mabanda (67,5 %), Nyabitabo (62,1 %) et Samvura (58,9 %).

3.1.6 Variabilité du K échangeable

Les valeurs de K échangeable sont quasi équivalentes et n'ont pas pu être statistiquement désagrégées par l'analyse de la variance ($p > 0,05$). C'est ainsi que le test de Newman-Keuls classe toutes les collines de la commune Mabanda dans un seul et même groupe homogène quant au K échangeable (Tableau 8).

Tableau 8. Variabilité du K échangeable dans les collines de la commune Mabanda.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V	Min.	Max.
Budaketwa (5)	0,84 \pm 0,23a	27,62	0,66	1,14
Nyabitobo (5)	0,72 \pm 0,40a	55,83	0,33	1,40
Bukunda (6)	0,62 \pm 0,42a	68,88	0,11	1,23
Kigamba (5)	0,59 \pm 0,06a	9,69	0,52	0,64
Karinzi (7)	0,58 \pm 0,61a	104,66	0,17	1,80
Ruvuga (6)	0,57 \pm 0,31a	54,65	0,08	1,05
Gikurazo (6)	0,50 \pm 0,30a	59,12	0,27	1,08
Mivo (3)	0,48 \pm 0,49a	105,16	0,04	1,01
Mubondo (5)	0,48 \pm 0,38a	78,92	0,08	1,04
Gikombe (5)	0,47 \pm 0,16a	34,60	0,21	0,62
Mara (4)	0,46 \pm 0,15a	33,44	0,27	0,59
Burima (4)	0,45 \pm 0,29a	64,98	0,08	0,77
Bikobe (2)	0,43 \pm 0,12a	28,28	0,34	0,51
Mutwazi (5)	0,41 \pm 0,33a	79,19	0,12	0,96
Mabanda (3)	0,37 \pm 0,06a	17,32	0,33	0,44
Kibimba (3)	0,34 \pm 0,16a	45,34	0,18	0,49
Samvura (4)	0,22 \pm 0,09a	66,68	0,02	1,84
Musenyi (5)	0,16 \pm 0,12a	74,51	0,02	0,29
Commune (83)	0,50\pm0,33	66,68	0,02	1,84

Malgré cette absence de différence statistique, les collines de Budaketwa (0,84 méq/100 g de sol) suivie de celle de Nyabitabo (0,72 méq/100 g de sol) et à distance de celles de Bukunda (0,62 méq/100 g de sol), Kigamba (0,59 méq/100 g de sol), Karinzi (0,58 méq/100 g de sol), Ruvuga (0,57 méq/100 g de sol) sont caractérisées par des valeurs de K échangeable plus élevées. Par contre, la colline de Samvura se trouve de très loin en bas du classement des moyennes homogènes avec un très faible contenu (0,22 méq/100 g de sol) en K échangeable.

Nous noterons au passage les bons contenus en K échangeable des collines Mara (0,46 méq/100 g de sol) et Gikurazo (0,50 méq/100 g de sol) qui ont montré de faibles contenus pour les 4 autres paramètres chimiques étudiés (pH, CEC, % C, % N et P assimilable).

Au niveau des collines enquêtées dans la commune de Mabanda, les teneurs en K échangeable varient de 0,02 méq/100 g de sol (Musenyi) à 1,84 méq/100 g de sol (Karinzi). La moyenne étant de 0,50 méq/100 g de sol avec une valeur minimale de 0,02 méq/100 g de sol (Samvura) et une valeur maximale de 1,84 méq/100 g de sol (Karinzi). Les analyses des coefficients de variation (C.V) relèvent de fortes hétérogénéités entre les collines de la commune Mabanda (C.V=66,7 % en moyenne). Ceux-ci varient de la valeur la plus faible (C.V=9,7 %) enregistrée sur la colline de Kigamba à des valeurs très élevées (>60 %), particulièrement observées sur les collines de Karinzi et Mivo (105 %), de même que celles de Mubondo (79 %), Musenyi (75 %), Bukunda (69 %) et Burima (65 %).

3.2. Classification des valeurs des paramètres suivant les normes en vigueur au Burundi

Sur base des normes en vigueur au Burundi (E. Tessens & J. Gourdin, 1993), les 18 collines de la commune Mabanda peuvent être groupées de manière suivante :

pH eau

Classe I (pH < 5,2). Cette classe concerne les collines de Musenyi, Ruvuga, Mutwazi, Budaketwa, Samvura. Le groupe des 5 collines est caractérisé par des problèmes de désaturation en bases avec des risques de toxicité aluminomanganique.

Classe II (5,2 < pH < 5,6). Il s'agit des collines de Mubondo, Gikombe, Mivo, Karinzi, Burima, Mabanda, Bukunda qui sont caractérisés par des problèmes légers de désaturation en bases et avec des risques légers de toxicité aluminique.

Classe III (pH > 5,6) englobant les collines de Gikurazo, Mara, Kigamba, Bikobe, Nyabitabo et Kibimba dont les sols sont considérés comme de bonne fertilité, sans risques de désaturation en bases et de toxicité aluminique.

Capacité d'Echange Cationique (CEC)

Les normes proposées par E. Tessens & J. et J. Gourdin (1993) en vigueur au Burundi permettent de grouper les 18 collines de la commune Mabanda en trois classes sur base des valeurs de la CEC.

Classe I (CEC < 5 méq/100 g de sol) : Mara, Musenyi et Kibimba dont les valeurs de la CEC sont faibles à très faibles.

Classe II (5 < CEC < 10). Appartiennent à cette classe les collines de Karinzi, Burima, Samvura, Mabanda, Mubondo, Kigamba, Mivo, Gikurazo, Bikobe, Mutwazi. Cette gamme de CEC est considérée comme moyenne, selon les normes de E. Tessens & Gourdin (1993).

Classe III avec des valeurs de CEC comprises entre 10 et 25 méq/100 g de sol. Les collines de Budaketwa, Bukunda, Gikombe, Nyabitabo et Ruvuga font partie de cette classe qui correspond à des CEC considérées comme élevées et aux sols de bonne fertilité, sur base ce critère.

% C organique

Sur base de l'échantillon utilisé, les normes de l'ISABU (E. Tessens & J. Gourdin, 1993) répartissent les collines de la commune Mabanda en seulement 2 classes.

Classe I avec des % C < 1. Deux collines seulement (Mara, Kibimba) font partie de cette classe dont les % C sont considérés comme faibles à très faibles.

Classe II avec 1 < % C < 3,5: Font partie de ce groupe les collines de Musenyi, Bukunda, Mubondo, Karinzi, Nyabitabo, Mivo, Burima, Gikurazo, Mabanda, Mutwazi, Gikombe, Bikobe, Kigamba, Samvura, Budaketwa, Ruvuga. Toutes ces collines sont caractérisées par des teneurs de % C moyennes.

Aucune colline n'est caractérisée par une teneur élevée de % C (> 3,5 %), indicatrices de sols riches en matière organique, selon les critères avancés par E. Tessens et J. Gourdin (1993).

% Azote total

L'ISABU ne propose pas de normes pour le paramètre % N. Par contre, les normes proposées par Dufey et Hennebert (1993) répartissent les collines de la commune Mabanda en trois classes de teneur en azote total qui sont les suivantes :

Classe I (% N < 0,1). Seule la colline de Mara dont la teneur en % N est très faible appartient à cette classe.

Classe II (0,1 < % N < 0,2) : Appartiennent à cette classe les collines de Gikurazo, Kibimba, Musenyi, Bikobe, Karinzi, Nyabitabo, Mivo, Bukunda, Mutwazi, Gikombe, Burima, Samvura, Mabanda avec des teneurs en % N total considérées comme faibles.

Classe III (0,2 < % N < 0,5): Kigamba, Budaketwa, Ruvuga, Mubondo appartiennent à cette classe dont les teneurs en % N sont considérées comme moyennes.

P assimilable

Les normes établies par l'ISABU (E. Tessens et J. Gourdin, 1993) classent les collines de la commune Mabanda en deux séries sur base des teneurs en P assimilable.

Classe I ($P < 20$ ppm) qui regroupe les collines de Mara, Gikurazo, Kibimba, Mabanda, Mutwazi, Samvura, Gikombe, Nyabitaho, Karinzi qui sont déficientes en P assimilable par les plantes.

Classe II ($20 \text{ ppm} < P < 50 \text{ ppm}$) à laquelle appartiennent les collines de Bukunda, Budaketwa, Burima, Musenyi, Mubondo, Bikobe, Ruvuga, Mivo, Kigamba avec une disponibilité médiocre en P assimilable.

3.3 Variabilité des paramètres chimiques dans les zones de la commune Mabanda

L'analyse de la variance appliquée au facteur « zone » a montré un effet significatif ($p < 0,05$) pour le pH, % C et P assimilable et un effet non significatif ($p > 0,05$) pour la CEC, % N et K échangeable.

Le tableau 9 donne le groupement des moyennes homogènes sur base du test de Newman-Keuls accompagné des valeurs minimales et maximales. Y sont également indiqués les coefficients de variation qui caractérisent le niveau d'hétérogénéité des données. Le test de Newman-Keuls place les trois zones de la commune Mabanda dans un même groupe de moyennes homogènes, sans différence significative pour la CEC, % N total et K échangeable.

Tableau 9. Variabilité des paramètres chimiques du sol par zone de la commune Mabanda.

Paramètre	Zone (n)	Moy.+ e.t	C.V	Min.	Max.
pH	Kayogoro (35)	5,59±0,53a	9,56	4,44	6,70
	Mabanda (30)	5,48±0,60a	10,96	4,18	6,64
	Gitara (18)	4,97±0,62b	12,40	4,03	6,01
CEC	Gitara (18)	9,13±3,89a	42,58	2,85	14,55
	Kayogoro (35)	9,04±3,11a	34,43	1,25	15,35
	Mabanda (30)	7,07±2,81a	39,69	3,05	12,85
% C	Gitara (18)	1,52±0,52a	34,22	0,80	2,67
	Mabanda (30)	1,28±0,37b	28,66	0,56	2,21
	Kayogoro (35)	1,13±0,29b	25,85	0,55	2,14
% N	Gitara (18)	0,19±0,06a	30,16	0,11	0,28
	Kayogoro (35)	0,18±0,08a	44,16	0,10	0,60
	Mabanda (30)	0,15±0,05a	30,37	0,07	0,60
P	Gitara (18)	25,78±6,39a	24,77	9,00	38,00
	Kayogoro (35)	22,69±7,78b	34,27	5,00	47,00
	Mabanda (30)	10,09±7,28b	72,11	0,30	24,00
K	Kayogoro (35)	0,57±0,40a	69,77	0,04	1,84
	Gitara (18)	0,52±0,34a	65,71	0,02	1,14
	Mabanda (30)	0,41±0,22a	53,21	0,08	1,08

Par contre, pour le % C et le P assimilable, la zone Gitara est significativement plus riche que les deux autres zones de Kayogoro et Mabanda. Au niveau du paramètre pH, la zone de Gitara est caractérisée par une valeur de pH plus acide ($pH < 5$) que les zones de Kayogoro et Mabanda. Autant que pour le pH, le % C organique et le P assimilable, les zones Kayogoro

et Mabanda appartiennent au même groupe de moyennes homogènes sans différences significatives entre elles.

La zone de Gitara présente plus de risques de désaturation en bases et de toxicité aluminique par rapport aux zones de Mabanda et Kayogoro. Elle est également légèrement plus riche en % N total en comparaison avec les deux autres zones. Les deux zones Kayogoro et Gitara sont caractérisées par des valeurs en P assimilables doubles ou même triples de la valeur observée dans la zone Mabanda. Cette dernière est partant plus encline à une déficience en P.

3.4 Variabilité des paramètres chimiques dans les collines de la commune Vugizo

Les résultats analytiques sur les paramètres pH, CEC, % C organique, % N total, P assimilable et K échangeable dans les collines de Vugizo sont indiqués dans les tableaux 10 à 15. L'analyse de la variance appliquée au facteur « colline » a montré un effet significatif ($p < 0,05$) pour le pH, la CEC, % N total et P assimilable et un effet non significatif ($p > 0,05$) pour le % C organique et le K échangeable.

3.4.1 Variabilité du pH

Tableau 10. Variabilité du pH dans les collines de la commune Vugizo.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Mazuru (10)	6,03±0,40a	6,70	5,38	6,71
Karonge (6)	5,77±0,60ab	10,40	5,02	6,61
Gahandu (5)	5,73±0,59ab	10,38	5,10	6,63
Ndoba (7)	5,54±0,51ab	9,18	5,08	6,30
Mbizi (4)	5,43±0,35ab	6,54	5,05	5,88
Mugu (6)	5,42±0,59ab	10,95	4,42	6,17
Rurambira (8)	5,37±0,60ab	11,21	4,69	6,36
Rutegama (5)	5,31±0,48abc	9,05	4,77	5,99
Rabiro (9)	5,14±0,38abc	7,38	4,73	5,91
Nyarunazi (5)	5,05±0,59bc	11,74	4,33	5,66
Kiyazi (7)	5,03±0,66bc	13,17	4,18	5,92
Jongwe (6)	4,85±0,31bc	6,51	4,48	5,28
Martyazo (20)	4,83±0,54bc	11,10	4,20	6,26
Gikuzi (8)	4,48±0,330c	7,45	4,13	5,23
Commune (106)	5,23±0,64	12,29	4,13	6,71

Le tableau 10 classe les moyennes de pH en trois groupes homogènes qui se chevauchent. La colline de Mazuru en tête du classement est caractérisée par la valeur moyenne du pH la plus élevée (6,03), sans toutefois être significativement différente des valeurs de pH observées sur les collines de Gahandu, Karonge, Ndoba, Mbizi, Mugu, Rurambira, Rutegama et Rabiro. La valeur moyenne la plus basse de pH (4,48) et significativement inférieure aux pH des collines précitées est observée sur la colline Gikuzi. Les collines de Rabiro, Kiyazi, Jongwe, Kiyazi, Martyazo Nyamirizi ont des

pH numériquement supérieurs au pH observé sur la colline Gikuzi, sans en être significativement différents puisqu'elles appartiennent au même groupe homogène. La moyenne globale de pH pour les 14 collines étudiées est de 5,23 et varie d'un minimum de 4,13 (observé sur la colline Gikuzi) à un maximum de 6,71 (observé sur la colline Mazuru).

Les analyses des coefficients de variation (C.V) relèvent une faible variabilité (homogénéité) entre les collines de la commune Vugizo (C.V=12,3 % en moyenne) quant au paramètre pH. Ceux-ci varient de la valeur la plus faible (C.V=6,51 %) enregistrée sur la colline de Jongwe à une valeur de 13,7 % observée sur la colline de Kiyazi.

3.4.2 Variabilité de la CEC

Le test de Newman-Keuls appliqué aux valeurs de CEC permet de classer les 14 collines enquêtées en trois groupes de moyennes homogènes qui se chevauchent (Tableau 11). Le groupe de tête est constitué par la colline Karonge. Celle-ci n'est pas significativement supérieure aux collines de Mazuru, Mugu, Kiyazi, Mbizi, Gahandu, Rutegama, Ndobu, Nyamirinzi et Martyazo. De même, les 8 dernières collines ne sont pas significativement supérieures aux collines de Gikuzi, Rurambira, Rabiro et Jongwe qui sont en bas du classement des moyennes de CEC établies sur base du test de Newman-Keuls.

Tableau 11. Variabilité de la CEC dans les collines de la commune Vugizo.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Karonge (6)	11,29±2,22a	19,68	8,74	14,80
Mazuru (10)	11,00±2,63ab	23,94	8,00	16,00
Mugu (6)	9,73±0,73abc	7,50	8,43	10,38
Kiyazi (7)	9,37±1,67abc	17,84	7,60	12,00
Mbizi (4)	9,17±1,99abc	21,67	6,78	11,61
Gahandu (5)	9,06±1,38abc	15,25	7,80	11,20
Rutegama (5)	9,02±1,77abc	19,63	6,50	10,90
Ndobu (7)	8,76±1,65abc	18,87	7,00	12,00
Nyamirinzi (5)	8,69±1,43abc	16,42	6,27	10,07
Martyazo (20)	7,89±1,84abc	23,31	2,10	10,90
Gikuzi (8)	7,71±2,59bc	33,63	2,36	11,20
Rurambira (8)	7,34±1,79c	24,46	5,50	9,80
Rabiro (9)	6,95±0,98c	14,09	4,80	8,10
Jongwe (6)	6,87±2,93c	42,71	1,03	9,00
Commune (106)	8,64±2,26	26,14	1,03	16,00

Les deux valeurs de CEC les plus élevées sont observées sur les collines Karonge et Mazuru avec des valeurs de CEC = 11,29 et 11 méq/100 g de sol, respectivement. Les plus faibles valeurs de CEC se retrouvent sur les collines Rurambira (CEC = 7,34 méq/100 g de sol), Rabiro (CEC = 6,95 méq/100 g de sol) et Jongwe (CEC = 6,87 méq/100 g de sol). Les autres collines occupent des positions intermédiaires quant à leurs valeurs de CEC. Au niveau des 14 collines étudiées, la

moyenne de CEC est de 8,64 méq/100 g de sol avec une valeur minimale de 1,03 méq/100 g de sol (colline Jongwe) et une valeur maximale de 16 méq/100 g de sol (colline de Mazuru). Le coefficient de variation global est estimé à 26,14 %. La plus faible variabilité de la CEC est observée sur la colline de Mugu (C.V=7,5 %), alors que les coefficients de variation les plus élevés (hétérogénéité élevée) pour le paramètre CEC se retrouvent sur les collines de Jongwe (42,71 %) et Gikuzi (33,63 %).

3.4.3 Variabilité du % C organique

L'effet du facteur « colline » n'a pas montré d'effet significatif ($p > 0,05$) pour le % C organique. De ce fait, les valeurs de % C organique sont quasi équivalentes et n'ont pas pu être statistiquement différenciées par l'analyse de la variance, donnant lieu à un même et seul groupe homogène par le test de Newman-Keuls (Tableau 12).

Néanmoins, au-delà des statistiques, la plus grande valeur de % C est enregistrée avec la colline de Karonge (2,07 % C), au moment où la valeur la plus faible de % C est observée sur la colline de Nyamirinzi (1,27 % C). Les autres collines sont caractérisées par des valeurs de % C organique intermédiaires entre les deux valeurs citées ci-avant. Sur les 14 collines de la commune Vugizo étudiées, le % C moyen est de 1,59 % avec une valeur minimale de 0,10 % C (Nyamirinzi) et une valeur maximale de 3,10 % C (Karonge).

Tableau 12. Variabilité du % C organique dans les collines de la commune Vugizo.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Karonge (6)	2,07±0,65a	31,21	1,49	3,10
Rutegama (5)	1,95±0,46a	23,53	1,32	2,52
Kiyazi (7)	1,87±0,52a	27,91	1,24	2,64
Jongwe (6)	1,78±0,31a	17,55	1,46	2,27
Gahandu (5)	1,76±0,42a	23,66	1,26	2,41
Mugu (6)	1,60±0,27a	16,96	1,20	1,97
Gikuzi (8)	1,56±0,64a	41,20	0,17	2,25
Martyazo (20)	1,54±0,35a	22,51	0,77	2,17
Ndobu (7)	1,53±0,25a	16,35	1,24	1,99
Mazuru (10)	1,50±0,42a	28,06	0,85	2,08
Rabiro (9)	1,43±0,39a	27,29	0,67	2,09
Rurambira (8)	1,38±0,50a	9,00	0,69	2,06
Mbizi (4)	1,36±0,12a	54,91	1,21	1,46
Nyamirinzi (5)	1,27±0,70a	36,37	0,10	1,93
Commune (106)	1,59±0,46	29,12	0,10	3,10

Au niveau des collines enquêtées mises ensemble, le % en C organique varie de 0,10 (Nyamirinzi) à 3,10 (Karonge), avec une moyenne de 1,59 % C. Les coefficients de variation (C.V) associés au % C organique varient de 9 % (Mbizi) à 55 % (Nyamirinzi), avec une moyenne générale de 29 %.

3.4.4 Variabilité du % N total

L'analyse de la variance appliquée au facteur « colline » a montré un effet significatif de ce facteur sur le paramètre % N total ($p < 0,05$). Ainsi, le test de Newman-Keuls au seuil de 5% permet de classer les 14 collines étudiées en deux groupes de moyennes homogènes chevauchants. Le groupe de tête est dominé par la colline Jongwe (0,28 %) suivie des collines Karonge, Rutegama, Kiyazi, Gikuzi, Mugu, Gahandu, Nyamirinzi, Martyazo, Mazuru, Mbizi, Rabiro et Ndobha. Toutes ces collines ne sont pas statistiquement différentes. Le plus faible % N total est observé sur la colline Rurambira (0,15 %).

Au niveau global, le contenu moyen en N total est de 0,19 % avec une valeur minimale de 0,05 % enregistrée sur la colline Rurambira et une valeur maximale de 0,53 % observée à Jongwe. A cette valeur moyenne du % N total est associé un coefficient de variation de 32,2 %. Pour toutes les collines analysées, ce coefficient de variation est situé entre une valeur basse de 7,81 % (Gikuzi) et une valeur haute de 61,44 % enregistrée sur la colline Karonge.

Tableau 13. Variabilité du % N total dans les collines de la commune Vugizo.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Jongwe (6)	0,28±0,14a	50,27	0,17	0,53
Karonge (6)	0,26±0,16ab	61,44	0,06	0,51
Rutegama (5)	0,22±0,03ab	15,01	0,20	0,28
Kiyazi (7)	0,21±0,02ab	12,06	0,16	0,24
Mugu (6)	0,20±0,06ab	28,78	0,13	0,28
Gikuzi (8)	0,20±0,01ab	7,81	0,17	0,22
Gahandu (5)	0,20±0,02ab	9,27	0,17	0,22
Nyamirinzi (5)	0,19±0,03ab	15,49	0,16	0,23
Mbizi (4)	0,18±0,01ab	8,22	0,17	0,20
Rabiro (9)	0,18±0,03ab	15,08	0,14	0,22
Mazuru (10)	0,18±0,04ab	22,31	0,11	0,23
Matyazo (20)	0,18±0,02ab	14,01	0,14	0,25
Ndobha (7)	0,17±0,03ab	20,61	0,12	0,22
Rurambira (8)	0,15±0,05b	34,73	0,05	0,20
Commune (106)	0,19±0,06	32,20	0,05	0,53

3.4.5 Variabilité du P assimilable

L'application du test de Newman-Keuls au seuil de 5% aux valeurs du P assimilable au niveau des 14 collines de Vugizo étudiées donne lieu à cinq groupes de moyennes homogènes qui chevauchent entre eux.

En tête du classement se retrouvent les collines de Rabiro (P assimilable=43,33 ppm) et de Gikuzi (P assimilable=41,37 ppm). En bas du classement apparaissent les collines de Rutegama (15,20 ppm), Kiyazi (17,57 ppm), Rurambira (18,25 ppm) et Jongwe (18,33 ppm). Toutes les autres collines occupent une position intermédiaire entre les deux extrêmes. La valeur moyenne globale du P assimilable est de 27,31 ppm

avec une valeur minimale de 6 ppm observée sur la colline Rurambira et une valeur extrême maximale de 65 ppm enregistrée sur la colline de Gikuzi.

Tableau 14. Variabilité du P assimilable dans les collines de la commune Vugizo.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Rabiro (9)	43,33±5,02a	11,60	36,00	52,00
Gikuzi (8)	41,37±12,07a	29,17	24,00	65,00
Mugu (6)	37,83±10,53ab	27,84	31,00	59,00
Mbizi (4)	37,75±2,87ab	7,61	34,00	40,00
Karonge (6)	33,67±5,01abc	14,87	27,00	40,00
Nyamirinzi (5)	30,40±2,07bcd	6,82	27,00	32,00
Mazuru (10)	25,40±5,81cde	22,90	18,00	36,00
Martyazo (20)	25,00±8,37cde	33,47	11,00	21,00
Ndobha (7)	22,57±3,31de	14,66	19,00	27,00
Gahandu (5)	21,40±3,97de	18,57	16,00	27,00
Jongwe (6)	18,33±6,68e	36,45	12,00	29,00
Rurambira (8)	18,25±7,00e	38,38	6,00	25,00
Kiyazi (7)	17,57±4,16e	23,66	9,00	21,00
Rutegama (5)	15,20±5,67e	37,33	7,00	21,00
Commune (106)	27,31±11,04	39,97	6,00	65,00

Les teneurs en P assimilable varient d'un minimum de 6 à un maximum de 65 ppm, avec une moyenne de 27,31 ppm et un coefficient de variation moyen estimé à 40 %. Celui-ci varie d'un minimum de 6,82 % (Nyamirinzi) à un maximum de 38,38 % (Rurambira).

3.4.6 Variabilité du K échangeable

Les valeurs de K échangeable sont quasi équivalentes et n'ont pas pu être statistiquement différenciées par l'analyse de la variance ($p > 0,05$). De ce fait, le test de Newman-Keuls ne fait ressortir qu'un seul et unique groupe de moyennes homogènes dont les valeurs tournent autour d'une moyenne globale de 0,47 méq/100 g de K échangeable. La valeur minimale enregistrée est de 0 méq de K échangeable /100 g de sol (Gikuzi), tandis que la valeur extrême maximale est de 1,53 méq de K échangeable/100 g de sol obtenue sur la colline Mugu.

Cependant, les valeurs de K échangeable relevées sur les collines de Vugizo enquêtées sont entachées de fortes variabilités, telles qu'exprimées par les valeurs des coefficients de variation observées. Le coefficient de variation global moyen observé est de 58 %, avec une valeur minimale de 19 % (Gahandu) et une valeur maximale au-delà de 100 % (Gikuzi).

Tableau 15. Variabilité du K échangeable dans les collines de la commune Vugizo.

Colline (n)	Moy. + e.t	C.V.	Min.	Max.
Mugu (6)	0,64±0,48a	75,09	0,30	1,53
Martyazo (20)	0,57±0,27a	47,64	0,16	1,11
Mbizi (4)	0,53±0,31a	59,71	0,16	0,91
Mazuru (10)	0,52±0,31a	59,05	0,12	0,97
Nyamirinzi (5)	0,51±0,25a	48,99	0,20	0,84
Gahandu (5)	0,49±0,09a	18,64	0,37	0,61
Ndoba (7)	0,48±0,35a	72,41	0,14	1,13
Karonge (6)	0,46±0,24a	51,62	0,11	0,73
Rutegama (5)	0,44±0,14a	32,30	0,25	0,63
Kiyazi (7)	0,42±0,13a	32,09	0,16	0,55
Rurambira (8)	0,42±0,21a	51,01	0,11	0,67
Rabiro (9)	0,35±0,21a	60,78	0,11	0,68
Jongwe (6)	0,35±0,17a	49,01	0,09	0,53
Gikuzi (8)	0,23±0,24a	104,60	0,00	0,67
Commune (106)	0,47±0,27	57,70	0,00	1,53

3.5. Classification des valeurs des paramètres suivant les normes en vigueur au Burundi

Lorsque les données relatives aux paramètres chimiques évalués sont confrontées aux normes d'interprétation des résultats d'analyses de sols proposées par l'ISABU (E. Tessens et J. Gourdin, 1993), les classifications suivantes peuvent être effectuées :

pH

Classe I (pH < 5,2) : Appartiennent à cette classe les collines **Gikuzi, Martyazo, Jongwe, Kiyazi, Nyamirinzi et Rabiro** caractérisées par des risques graves de désaturation en bases (Ca, Mg, K) et de toxicité alumino-manganique.

Classe II (5,2 < pH < 5,6) : Collines **Rutegama, Rurambira, Mugu, Mbizi et Ndoba** caractérisées par des risques légers de désaturation en bases (Ca, Mg, K) et de toxicité aluminique.

Classe II (pH > 5,6) : Collines **Gahandu, Karonge et Mazuru** caractérisées par de bons sols au niveau de pH, sans risques de toxicité aluminique qui disparaît généralement aux valeurs de pH > 5,5.

Capacité d'Echange Cationique (CEC)

Classe I (5 < CEC < 10) : Collines **Jongwe, Rabiro, Rurambira, Gikuzi, Martyazo, Nyamirinzi, Ndoba, Rutegama, Gahandu, Mbizi, Kiyazi** et **Mugu** dont les valeurs de la CEC sont considérées comme moyennes.

Classe II (10 < CEC < 25) : Collines **Mazuru** et **Karonge** dont les valeurs de la CEC peuvent être classées dans la catégorie des CEC élevées, bien que, en réalité, elles se situent sur la limite inférieure (CEC = 11 méq/100 g de sol). De ce fait, les deux collines peuvent raisonnablement être classées dans la catégorie inférieure, pour dire que toutes les collines de la commune Vugizo appartiennent à la catégorie des sols à CEC moyenne.

% C organique

L'analyse de la variance appliquée sur les valeurs du % C n'a pas montré d'effet, ni du facteur « niveau de fertilité », ni du facteur « colline » ou de celui du facteur « zone » pour la commune Vugizo. Toutefois, l'observation des valeurs du % C associées aux différentes collines de cette commune indique que la valeur moyenne la plus élevée a été observée sur la colline Karonge (2 %), tandis que les valeurs les plus faibles l'ont été sur les collines Nyamirinzi et Mbizi ($\leq 1,4$ % C).

% Azote total

Comme pour le % C, l'analyse de la variance pour le % N n'a pas pu faire apparaître l'effet de la « zone ». Par contre, au niveau des collines enquêtées, sur base des normes précitées, le classement suivant pourrait être effectué en deux catégories de la manière suivante :

Classe I (0,1 < % N < 0,2) : Collines Rurambira (avec la valeur de % N = 0,15, la plus basse), Ndoba, Rabiro, Mbizi, Mazuru, Martyazo et Nyamirinzi : Teneur faible en % N du sol.

Classe II (0,2 < % N < 0,5) : Collines Gahandu, Mugu, Gikuzi, Kiyazi, Rutegama, Karonge et Jongwe (avec la valeur de % N = 0,28, la plus élevée) : Teneur considérée comme moyenne de % N du sol.

Phosphore assimilable

Les normes proposées par l'ISABU (E. Tessens et J. Gourdin, 1993) établissent les collines de la commune Vugizo en deux classes sur base des teneurs en P assimilable (ppm).

Classe I (P < 20 ppm) : Collines Rutegama, Kiyazi, Rurambira et Jongwe (**Carence en P**).

Classe II (20 ppm < P < 50 ppm) : Collines Gahandu, Ndoba, Martyazo, Mazuru, Nyamirinzi, Karonge, Mbizi, Mugu, Gikuzi et Rabiro (**Disponibilité médiocre en P**).

La disponibilité médiocre en P assimilable est associée aux faibles pH, indicateurs de l'acidité des sols et souvent accompagnée de toxicité aluminique et manganique. A ce titre, il est utile de faire remarquer que les collines avec les plus faibles valeurs de pH sont aussi caractérisées par de très faibles valeurs de P assimilable. Il s'agit particulièrement des collines Rutegama, Kiyazi, Rurambira, Jongwe, mais aussi Martyazo.

K échangeable

Toutes les analyses de la variance effectuées sur les facteurs « colline » et « zone » n'ont pas montré d'effet statistiquement significatif pour le K échangeable ($p > 0,05$). Au niveau des zones, ces contenus en K du sol varient entre 0,43 à 0,49 méq/100 g de sol et sont considérés comme moyens tendant vers très bons, sur base des normes établies par l'ISABU (E. Tessens et J. Gourdin, 1993).

Malgré l'absence de signification statistique de l'effet « colline » sur les valeurs de K observées, les valeurs les plus faibles se retrouvent particulièrement sur la colline Gikuzi (0,23 méq/100 g de sol) et, dans une moindre mesure sur celles

de Jongwe et Rabiwo (0,35 méq/100 g de sol). Par contre, les collines Martyazo (0,57 méq/100 g de sol) et Mugu (0,64 méq/100 g de sol) sont caractérisées par des valeurs de K échangeable indicatrices de très bons sols. En fin de compte, à quelques exceptions près, sur base de la présente étude, les collines (enquêtées) de la commune Vugizo ne présentent pas de risques de déficience en K.

3.6 Variabilité des paramètres chimiques dans les zones de Vugizo

Le test de Newman-Keuls appliqué au paramètre pH (Tableau 16) montre que la zone de Mpinga est caractérisée par un pH (=5,82) significativement supérieur aux valeurs de pH observés en zones Vugizo (pH=5,16) et Gishiha (pH=5,02). La même tendance s'observe pour la CEC où la zone Mpinga (CEC=9,83 méq/100 g de sol) se démarque significativement des zones Vugizo (CEC=8,70 méq/100 g de sol) et Gishiha (CEC=8,06 méq/100 g de sol).

Tableau 16. Variabilité des principaux paramètres chimiques du sol par zone de la commune Vugizo.

Paramètre	Zone (n)	Moy. + e.t	C.V	Min.	Max.
pH	Mpinga (21)	5,82±0,51a	8,80	5,08	6,71
	Vugizo (38)	5,16±0,62b	11,94	4,13	6,61
	Gishiha (47)	5,02±0,56b	11,18	4,18	6,36
CEC	Mpinga (21)	9,83±2,36a	23,97	7,00	16,00
	Vugizo (38)	8,70±2,23b	25,69	2,36	14,80
	Gishiha (47)	8,06±2,05b	25,47	1,03	12,00
% C	Gishiha (47)	1,63±0,44a	27,09	0,69	2,64
	Mpinga (21)	1,59±0,37a	23,25	0,85	2,41
	Vugizo (38)	1,56±0,54a	34,79	0,10	3,10
% N	Vugizo (38)	0,20±0,07a	35,45	0,06	0,51
	Gishiha (47)	0,20±0,07a	33,61	0,05	0,53
	Mpinga (21)	0,18±0,03a	19,04	0,11	0,23
P	Vugizo (38)	38,24±8,53a	22,30	24,00	65,00
	Mpinga (21)	23,38±4,88b	20,89	16,00	36,00
	Gishiha (47)	20,91±7,87b	37,64	6,00	44,00
K	Gishiha (47)	0,49±0,23a	47,92	0,09	1,11
	Mpinga (21)	0,49±0,27a	56,61	0,12	1,13
	Vugizo (38)	0,43±0,31a	71,62	0,00	1,53

S'agissant du P assimilable, les moyennes associées aux trois zones de la commune Vugizo suivent l'ordre décroissant ci-après : Vugizo (P=38,24 ppm) > Mpinga (P=23,38 ppm) = Gihisha (P=20,91 ppm). Ces valeurs de P assimilable sont indicatrices de risques de disponibilité médiocre de P assimilable selon les normes de l'ISABU (E. Tessens et J. Jourdin, 1993).

Aucune différence significative n'a été observée pour les paramètres % C organique, % N total et K échangeable par rapport aux trois zones de la commune Vugizo (Tableau 16).

En dehors de la présente étude, l'analyse de la fertilité des sols réalisée en 2013 (O. Nduwimana & al., 2013) avance que 25 % des sol cultivés au Burundi ont un pH inférieur à 5 et que la grande majorité des sols sont déficients en P (85 %), B (90 %), S (71 %), Ca (68 %) et Zn (62 %). Dans cette même étude de 2013, les sols carencés en K représentaient 30 % et les sols carencés en Cu représentaient 13 %.

Cette dernière étude datant de 2013 place les sols des communes de Vugizo et de Mabanda dans un intervalle de pH entre 5 et 5,5 avec des valeurs de P disponible de moins 5 à 10 ppm. D'autre part, étudiant les variabilités associées aux paramètres chimiques des sols des régions naturelles de l'Imbo, du Mumirwa, du Moso et du Kirimiro, A. Ngandakumana (2003) a rapporté des coefficients de variation (C.V) très élevés pour le K échangeable (80-100 %) et la CEC (50-90 %), élevés pour le % C organique (50-60 %) et % azote total (50 %). Par contre, les coefficients de variation associés au pH_{eau} sont, dans toutes les régions naturelles étudiées, inférieurs à 15 %. Ce qui dénote une bonne homogénéité des échantillons des sols étudiés.

Les résultats dégagés par notre étude localisée dans les communes Mabanda et Vugizo concordent avec ceux obtenus par d'autres investigateurs. A titre d'exemple, J.D. Sanchez & al. (2011) s'est intéressé sur la variabilité des paramètres chimiques et son effet sur une culture de maïs (*Zea mays* L.) sur le Plateau de Bogota en Colombie. Cette équipe de chercheurs a évalué la variabilité du pH, % N total, % C organique, K, Mg, Al, H, P, Cu, Fe, Mn et B, en quête d'une agriculture de précision. Dans la foulée, ces auteurs ont relevé que la variabilité des propriétés physiques, biologiques et chimiques des sols se répercute sur les variabilités quantitatives et qualitatives des récoltes. Les mêmes auteurs ont remarqué une faible variabilité (synonyme d'homogénéité) du pH et une hétérogénéité élevée (C.V > 30 %) pour les paramètres suivants : CE, K, Na, Al, H, P, Cu, Mn, Zn, plus particulièrement pour % N, % C, Mg, K et B.

Dans une quête de plus en plus croissante de protection de l'environnement et de promotion de l'agroécologie, l'agriculture de précision intéresse aujourd'hui. Elle intéresse autant les scientifiques, les agriculteurs et les consommateurs eux-mêmes. Pour cela, beaucoup de travaux ont été effectués sur la pratique d'agriculture de précision (S.R. Vieira & al., 2003 ; A. Srinivan, 2006 ; J. Jin & C. Jiang, 2002 ; C.E. P Cerri & al., 2004 ; J.S. Bailey & al., 2001 ; G.A Tiruneh & al., 2021 ; S.M. Ichami & al., 2020 ; F. Guan & al., 2017 ; F. Rosemary & al., 2017 ; P. Goovaerts & al., 1989).

Travaillant en Fagne de Chimay en Belgique, ce dernier groupe d'investigateurs ont rapporté une forte variabilité de la conductivité électrique (CE) et des cations échangeables. Ils

ont aussi avancé que le type d'affectation des sols contrôle le pH, tant il existe une bonne relation entre les deux paramètres. D'autre part, J. Yana & al. (2000) ont affirmé que la gestion des spécificités édaphiques est la base de l'utilisation efficiente des éléments nutritifs des plantes. Des paramètres étudiés dans leur recherche sur les sols de riziculture, ces chercheurs ont remarqué une faible hétérogénéité telle qu'exprimée par le coefficient de variation ($C.V \leq 10 \%$) le K, Mg Na et particulièrement le pH du sol ($C.V.=2 \%$). A l'opposé des $C.V > 10 \%$ ont été observés pour la CE, % C, % N, Na et P assimilable.

Tout compte fait, l'analyse de cet échantillon d'investigations sur la variabilité des paramètres chimiques concourt à avancer que le pH est le paramètre le moins variable. Notre étude a abouti à la même conclusion.

4. Conclusion

Nous sommes d'avis que les renseignements tirés de cette étude seront utiles aux planificateurs et aux autres agents de développement dans le cadre de futurs programmes de gestion intégrée de la fertilité des sols au Burundi. L'approche couverte par cette investigation qui consiste à caractériser les exploitations agricoles paysannes des communes Mabanda et Vugizo a abouti aux principales conclusions qui sont passées en revue, commune par commune, dans les paragraphes ci-après.

Mabanda

Les résultats d'analyse des échantillons de sols révèlent que les sols de la commune Mabanda présentent un problème léger de désaturation en bases et de toxicité aluminique. Aussi, ils sont caractérisés par de faibles CEC et de faibles teneurs en % N total. De plus, ils sont carencés en P avec des % en C organiques et des valeurs de K moyens.

Vugizo

De l'autre côté, les collines de Vugizo étudiées sont caractérisées par des teneurs carentielles et médiocres en P assimilable, des risques localisés de désaturation en bases et de toxicité aluminico-manganique, des valeurs de la CEC moyennes, des contenus en % C (matière organique) moyens et des % N total faibles dans la majorité des collines. Par contre, les sols de la commune Vugizo, comme ceux de la commune de Mabanda, ne présentent pas de problèmes particuliers pour le K échangeable.

A la fin, la principale leçon à tirer de la présente étude est la forte variabilité des paramètres chimiques étudiés dans les sols agricoles des deux communes Mabanda et Vugizo, autant au niveau des entités collinaires que zonales. Fait exception à cette règle le pH. Un trait qui pourrait être retrouvé dans les autres communes du pays si pareilles études y étaient menées. De ce fait, nous nous permettons d'avancer que le pH est le paramètre qui garantit une plus grande fiabilité dans la gestion

de la fertilité des sols au Burundi comme ailleurs. Tant est si bien que la maîtrise de la variabilité des propriétés du sol constitue la base de la gestion dualiste de l'agriculture et de l'environnement. Elle permet une utilisation optimale des engrais, tout en augmentant la productivité des cultures et la protection de l'environnement, à travers la réduction des risques écologiques (G.A. Tiruneh & al., 2021).

Cet état de fait interpelle les professionnels de l'agriculture à mettre au point les formules de fertilisation des cultures tenant compte de cette diversité chimique des sols agricoles du Burundi. C'est justement cette approche spécifique de fertilisation qui a été préconisée par l'ONG ZOA dans le cadre du projet « Investir sur une terre fertile » auquel a été associée la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) de l'Université du Burundi, dans le cadre de mémoires de fin d'étude. L'approche du projet suscité qui prône la fertilisation d'un sol en fonction de ses limites et potentialités, telles qu'exprimées par des analyses de sols, est à encourager. Que l'on se le dise, il ne peut pas exister de formules de fertilisation d'application « universelle », dans l'espace et dans le temps, comme c'est aujourd'hui le cas au Burundi.

Références

1. Bailey, J.S., J.K.W. Crawford & A. Higgins. 2001. Use of precision agriculture technology to investigate spatial variability in nitrogen yields in cut grassland. *Chemosphere* 42 : 131-140.
2. Bigura C., 1988. Etude pédologique de la région naturelle du Buragane. ISABU, 187 p.
3. Bremner, J.M. & C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-Total. pp. 595-624. In A.L. Page et al. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agronomy 9. ASA, Madison, WI.*
4. Cerri, C.E.P., M. Bernoux, V. Chaplot, B. Volkoff, R.L. Victoria, J.M. Melillo, K. Paistian & C.C. Cerri. 2004. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma* 123 : 51-68.
5. Dagnélie, P., 1987. Méthodes de l'inférence statistique. Vol II. Presse Agronomique de Gembloux, 461 p.
6. Guan, F., M. Xia, X. Tiang & S. Fan. 2017. Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and K contents in Moso bamboo forests in Yong'an City, China. *Catena* 150 : 161-72.10.1016/j.Catena.201.11.017.
7. Goovaerts, P., G. Gérard & R. Frankart. 1989. Etude de la variabilité spatiale de quelques

- propriétés chimiques du sol en Fagne de Chimay, Belgique. *Pédologie* xxxix-2 : 191-207.
8. Havyarimana G., 1992. Contribution à l'étude du zonage fonctionnel des exploitations agricoles dans les communes Kayogoro et Vugizo. Bujumbura, UB, FACAGRO, 61 p.
 9. Ichami, S.M., K.D. Shepherd, E. Hoffland, G.N. Karuku, J.J. Stoorvogel. 2020. Soil spatial variation to guide the development of fertilizer use recommendations for smallholder farms in Western Kenya. *Geoderma Reg.* p.e.00300.10.10.16/j.geodrs.2020. e00300.
 10. Jin, J. & C. Jiang. 2002. Spatial variability of soil nutrients and site specific management in the P.R. China. *Comput. Electron. Agr.* 36 : 165-172.
 11. Kaboneka, S., J. Ndayishimiye, S. Hakizimana, E. Ndagijimana, I. Harumukiza, D. Kabura, P. Manirambona & T. Ndamuhawenayo. 2020. Analyse des phyto-indicateurs de la fertilité des sols en communes Makamba et Vugizo. *Revue de l'Université du Burundi. Série-Sciences Exactes et Naturelles.* Volume 29 : 1-12.
Site : <http://revue.ub.edu.bi/JUB>
 12. Kaburungu, S. 1981. Contribution à l'étude pédologique de la région des communes Makamba & Mabanda. Mémoire UB. FACAGRO. 80 p.
 13. Kibiriti, C., S. Ndayiragije, J. Gourdin & P. Hollebodch. 1986a. Analyse des bases échangeables, de la CEC et de l'acidité échangeable. ISABU. 33 p.
 14. Kibiriti, C., S. Ndayiragije, J. Gourdin & P. Hollebosch. 1986b. Détermination du pH, la conductivité et l'analyse de la matière organique. ISABU. 35 p.
 15. MPDRN, 2006. Monographie de la commune Vugizo, 83 p.
 16. Nduwimana, O., Z. Nzohabonayo, C. Hicintuka & M. Nibasumba. 2013. Cartographie de la fertilité des sols et des besoins des principales cultures vivrières en éléments nutritifs. PAN PNSEB. 110 p.
 17. Nelson, D.W. & L.E. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In A.L. Page et al. 2nd ed. *Agronomy* 9. ASA, Madison, WI.
 18. Ngendakumana, A. 2003. Etude des relations corrélatives entre les paramètres physico-chimiques des sols du Burundi. Mémoire d'études de fin d'études d'Ingénieur Agronome. FACAGRO, Université du Burundi. 200 pages + annexes.
 19. Ntiburumusi, F., S. Ntibashirwa et Z. Nzohabonayo. 2002. Synthèse référentielle des travaux de recherche sur la fertilisation des cultures au Burundi. ISABU. Programme Fertilité des Sols. 92 p.
 20. Rosemary, F., U.W.A. Vitharana, S.P. Indraratne, R. Weevasooriya & U. Mishra. 2017. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. *Catena* 150 : 53-61. 10.1016/j.catna.2016.10.017.
 21. Sanchez, J.D., G.A. Ligarrelo & F.R. Leira. 2011. Spatial variability of soil chemical properties and its effect on crop yields : a case study in maize (*Zea mays* L.) on the Bogota Plateau. *Soils, Plant Nutrition and Water Management.* Agron. Colomb. Vol. 29(2). June-August 2011. ISSN 0120-9965. *Agronomia Colombiana*.
 22. Sottiaux, G., L. Opdecamp, C. Bigura & R.P. Frankart. 1985. Cartes des sols du Burundi (1/250.000 e). Notice explicative et annexes analytiques. Publ. Serv. Agricole N° 9. AGCD, Bruxelles.
 23. Sottiaux, G., L. Opdecamp, C. Bigura & R.P. Frankart. 1988. Cartes des sols du Burundi. ISABU. Public. N° 9. 138 p.
 24. Srinivan, A. 2006. Precision Agriculture : an overview. Pp. 3-15. In (ed.). *Handbook of precision agriculture principles and applications.* Food Products Press. The Harworth Press. New York, NY.
 25. Tessens, E. & J. Gourdin. 1993. Critères d'interprétation des analyses pédologiques. Fiche Labo N° 19. ISABU. 36 p.
 26. Tessens, E. 1993. Etude pédologique de la région naturelle de l'Imbo. ISABU. Public. N° 169. 53 p.
 27. Tiruneh, G.A., T.Y. Alemayehu, D.T. Meshesha, E.S Vogelmann, J.M. Rechert & N. Haregeweyn. 2021. Spatial variability of soil chemical properties under different landuses in Northwest Ethiopia. *Plosine* 16(6). Eo253156.

- Doi : 10.1371/Journal.pone.0253156.
28. Vieira, S.R. & A.R. González. 2003. Analysis of spatial variability of crop yield and soil properties in small agricultural plots. *Bragantia* 62 (1) : 127-138.
 29. Yana, J., C.K. Lee, M. Umeda & T. Kosaki. 2000. Spatial variability of soil chemical properties in a paddy field. *Soil Science and Plant Nutrition* 46(2) ; 473-482.
Doi : 10 :1080/0380768.2000.1048800.
 30. Zarcinas, B.A., B. Cartwright & L.R. Spouncer. 1987. Nitric acid digestion and multi-element analysis of plant material by inductively coupled plasma spectrometry. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 180 :131-146.
<https://doi.org/10.1080/00103628709367806>.