



Evaluation des propriétés physicochimiques liées à la disponibilité du phosphore des différents types de sols du Burundi

Christophe Niyungeko^{1*}, Léonard Ndikuriyo¹, Marie-Chantal Niyuhire², Anicet Sindayihebura¹, Manassé Nihorimbere¹, Jean Claude Nkengurutse¹, Pierre Ntakiyiruta¹, Séverin Nijimbere³, Salvator Kaboneka³

¹Université du Burundi, Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement

²Institut des Sciences Agronomiques du Burundi

³Université du Burundi, Centre de Recherche en Sciences des Productions Animales, Végétales et Environnementales

*Auteur de correspondance / Email: christophe.niyungeko@ub.edu.bi

Reçu: le 30 août 2022

Accepté pour publication: le 19 novembre 2022

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

Abstract

In order to evaluate the physicochemical properties related to the availability of phosphorus of the major soil groups of Burundi, twenty-two composite samples of soils taken were analyzed. Granulometry, organic carbon, pH, available phosphorus, total phosphorus, exchangeable cations and exchangeable aluminum are the parameters analyzed. The results obtained show that more than 68% of the soils studied have a pH lower than 5.5. For grain size, more than 59.1% of soil have a clay texture. The organic carbon contents obtained vary from 0.60 to 5.33 % and more than 40.9% of cases have levels reaching the critical threshold (1.2 to 2.5%). The cation exchange capacity varies from 4.62 to 50.93 meq /100g and more than 63% of cases have a low cation exchange capacity. The aluminum ion is present in more than 17% of the soils studied. The exchangeable calcium contents vary from 0.285 to 32.27 meq /100g and 22.73% of the soils have contents reaching the critical threshold (2.3 to 3.5 meq /100g). The levels of exchangeable magnesium vary from 0.03 to 7.04 meq /100g with 18.18% of cases having levels reaching the critical threshold (1 to 1.5 meq /100g). The exchangeable potassium contents are between 0.13 and 0.64 meq /100g with 45.45% of cases being within normal values (0.2 to 0.4 meq /100g). The available phosphorus contents vary from 0.98 to 39.57 ppm with more than 90.9% of the cases being low in available phosphorus. The low levels of available phosphorus observed would be related to the texture, the pH, the low levels of exchangeable bases, the exchangeable acidity and the low levels of organic matter. Depending on the problem encountered, the addition of calcium or magnesium amendment, organic matter and phosphate fertilizers could help improve the physicochemical properties and mobilize phosphorus in these soils.

Keywords: Physicochemical properties, available phosphorus, soils, Burundi.

Résumé

En vue d'évaluer les propriétés physicochimiques liées à la disponibilité du phosphore des grands groupes de sols du Burundi, vingt-deux échantillons composites de sols prélevés ont été analysés. La granulométrie, le carbone organique, le pH, le phosphore assimilable, le phosphore total, les cations échangeables et l'aluminium échangeable sont les paramètres analysés. Les résultats obtenus montrent que plus de 68% de sols étudiés ont un pH inférieur à 5,5. Pour la granulométrie, plus de 59,1% des échantillons de sols ont une texture argileuse. Les teneurs en carbone organique obtenues varient de 0,60 à 5,33% et plus de 40,9% des cas ont des teneurs atteignant le seuil critique (1,2 à 2,5%). La capacité d'échange cationique varie de 4,62 à 50,93 meq/100g et plus de 63% des cas ont la capacité d'échange cationique qui est faible. L'ion aluminium est présent dans plus de 17% des sols étudiés. Les teneurs en calcium échangeable varient de 0,285 à 32,27 meq/100g et 22,73% des sols ont des teneurs atteignant le seuil critique (2,3 à 3,5 meq/100g). Les teneurs en magnésium échangeable varient de 0,03 à 7,04 meq/100g avec 18,18% des cas qui ont des teneurs atteignant le seuil critique (1 à 1,5 meq/100g). Les teneurs en potassium échangeable sont comprises entre 0,13 et 0,64 meq/100g avec 45,45% des cas qui sont situés dans les valeurs normales (0,2 à 0,4 meq/100g). Les teneurs en phosphore assimilable varient de 0,98 à 39,57 ppm avec plus de 90,9% des cas qui sont pauvres en phosphore disponible. Les teneurs faibles en phosphore disponible observées seraient liées à la texture, au pH, aux faibles teneurs en bases échangeables, à l'acidité échangeable et aux faibles taux de la matière organique. Selon le problème rencontré, l'apport d'amendement calcique ou magnésique, de la matière organique et des fertilisants phosphatés pourraient contribuer à améliorer les propriétés physicochimiques et à mobiliser le phosphore dans ces sols.

Mots clés: Propriétés physicochimiques, phosphore disponible, sols, Burundi.

1. Introduction

Le phosphore (P) compte parmi les macronutriments les plus importants pour tous les organismes vivants. Il est le deuxième élément nutritif essentiel pour la plante après l'azote pour la productivité des cultures du fait de son implication dans de nombreux processus métaboliques essentiels (Kuhad et al., 2011). Sa carence peut limiter considérablement la croissance et la productivité des plantes (Fernández et al., 2007). Bien que le phosphore soit souvent présent dans le sol en quantités importantes, sa disponibilité reste toujours très limitée en raison de sa faible solubilité dans le sol et de sa grande capacité de fixation. Dans les agrosystèmes cultivés, les exportations répétées de P par les récoltes conduisent à une baisse de sa disponibilité dans les sols (Boullain, 2006). Les rendements des cultures sur 30 à 40% des terres arables du monde entier sont limités par la disponibilité de P. Même avec une fertilisation adéquate en P, seulement 20% ou moins de la dose appliquée est utilisée lors de la croissance de la première année (Vance et al., 2003).

Ainsi, 5,7 mille milliards d'hectares à travers le monde contiennent une quantité trop faible de P disponible ce qui limite une production végétale durable (Batjes, 1997, Hinsinger, 2001).

Les sols tropicaux sont acides et sont caractérisés par une forte adsorption du phosphore sur les minéraux du sol (Van Ranst, 1994). Le maintien de la fertilité des sols pour une production durable des cultures nécessite une bonne connaissance de la disponibilité en éléments nutritifs et des caractéristiques physicochimiques des sols. A mesure que le sol devient de plus en plus acide, particulièrement lorsque le pH descend en-dessous de 4,5, il est de plus en plus difficile de produire des cultures vivrières (Robert Harter et Emérite, 2007). Lorsque le pH descend, la disponibilité de la plupart des nutriments des végétaux diminue alors que l'aluminium et le manganèse deviennent solubles et toxiques pour les plantes (Boyer, 1976). Ces problèmes sont particulièrement aigus dans les régions tropicales humides dont les sols sont fortement altérés. Selon Sanchez et Logan (1992), un tiers des sols tropicaux, soit 1,7 milliards d'hectares de terres, sont suffisamment acides pour que l'aluminium soluble soit toxique pour la plupart des plantes vivrières. Dans ces conditions, le phosphore se fixe fortement sur les particules du sol et par conséquent sa disponibilité à la plante diminue.

Le Burundi est l'un des pays densément peuplé de l'Afrique de l'Est et sa densité était de 421,2 habitants par km² dans les années de 2014 (Belghith et al. 2016). Au Burundi, plus de 90% de la population vivent de l'agriculture et utilisent parfois des engrais chimiques pour fertiliser les terres cultivables mais malheureusement le rendement n'est pas toujours bon. Ainsi, pour nourrir sa population qui ne cesse pas d'accroître, il est nécessaire d'augmenter la production agricole. Mais par contre, les sols Burundais sont acides et sont dégradés par l'érosion hydrique comme les sols des régions intertropicales humides

(Nijimbere et al., 2020). Les principaux sols du Burundi sont les acrisols, les ferralsols et les nitols (Jones et al., 2013). Ces groupes de sols ont une dominance en argiles et en oxyhydroxydes de fer et d'aluminium (Nijimbere et al., 2020). Les sols du Burundi sont considérés comme ayant d'une fertilité relativement faible. Sous culture, leur évolution peut être particulièrement favorable si des corrections sont apportées avec des amendements organiques et calcaires. Le relief du Burundi est dans l'ensemble accidenté, caractérisé par des collines au profil souvent convexe et dont les pentes fragilisent les sols vis-à-vis des risques d'érosion. Les pertes de terre par l'érosion peuvent être évaluées à quelques 4 t/ha/an à l'Est et 18 t/ha/an au Centre-Ouest : du pays et à plus de 100 t/ha/an sur le Mimirwa, pentu, arrosé et très peuplé (Hervé, 2017). Les risques sont également élevés sur les sols argileux et lourds des collines basaltiques du sud-est (Buragane, Kumoso sud). Par ailleurs, il est reconnu que des apports importants de matière organique, et en particulier de fumier, sont efficaces pour améliorer la productivité des sols acides du Burundi.

La fixation du phosphore dans les sols est devenue un problème incontournable dans le secteur agricole ce qui réduit la production et conduit à d'énormes pertes économiques et environnementales. En raison de ses fortes interactions avec les constituants du sol et de la faible solubilité des minéraux phosphatés, le P devient fréquemment le nutriment le moins disponible dans le sol. Dans cette logique, nous avons formulé une hypothèse que les grands groupes des sols du Burundi ont des teneurs faibles en phosphore disponible et ont un niveau bas de fertilité. L'objectif de la présente étude est d'évaluer les paramètres de fertilité liée à la disponibilité du phosphore des grands groupes de sols du Burundi.

2. Matériel et Méthodes

Description des sites caractérisés

Les points d'échantillonnage ont été choisis en nous référant aux anciens points d'échantillonnage d'une étude qui a été réalisée en 1988 en vue de l'élaboration de la carte des grands groupes des sols du Burundi à l'échelle de 1/250000 (ISABU, 1988). Nous avons retrouvé ces anciens points d'échantillonnage en utilisant leurs coordonnées géographiques à l'aide du GPS et de la boussole.

Vingt-deux échantillons de sols ont été ainsi collectés dans les parcelles des grands groupes de sols du Burundi pendant la saison pluvieuse depuis le mois de janvier jusqu'au mois de mars 2021. Ces échantillons ont été collectés dans dix-sept communes du Burundi qui sont Mugina, Rugombo, Busiga, Musinga, Buhinyuza, Rugazi, Gihanga, Bukeye, Cankuzo, Mutimbuzi, Muramvya, Bugendana, Gisozi, Mugamba, Giharo, Makamba et Rumonge. Le tableau 1 donne les groupes de sols géoréférencés selon l'INEAC, soil taxonomy et de FAO avec leurs coordonnées géographiques.

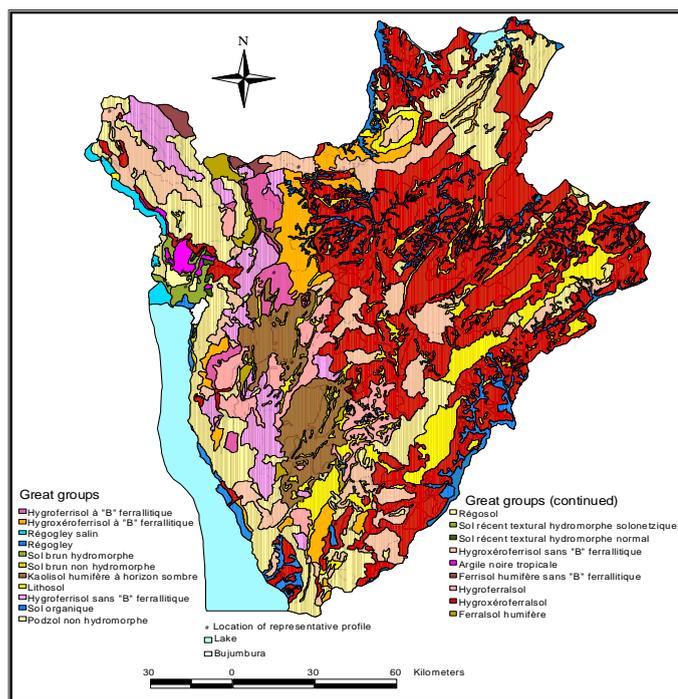


Figure 1 Localisation des différents types de sols du Burundi.

Echantillonnage de sols et prétraitement des échantillons

Sur chaque parcelle, 5 prélèvements dont l'un au Centre, d'autres à 1m au Nord, Sud, Est et Ouest de celui qui est au Centre, sont effectués à 20 cm de profondeur à partir de la surface du sol. Les 5 prélèvements élémentaires sur la même parcelle, ont été mélangés pour constituer un échantillon composite. Ces échantillons sont empaquetés dans des sachets portant l'étiquette d'un profil du sol échantillonné et sont expédiés au Laboratoire de Chimie, Sciences de la Terre et Génie de l'Environnement (LACHIST) de la Faculté des sciences de l'Université du Burundi et sont séchés à l'air libre pendant deux semaines, avant d'être broyés et tamisés à l'aide d'un tamis de 2mm. Le tamisât a été analysé au LACHIST et au Laboratoire d'Analyse des Sols et des Produits Agro-Alimentaires (LASPA) de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi Analyse des échantillons de sols au laboratoire.

Les analyses de sols réalisées ont concerné les paramètres suivants : La granulométrie, le carbone organique, le pH-eau et pH-KCl, le phosphore assimilable, le phosphore total, la capacité d'échange cationique (CEC), les cations échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ et Na⁺) et l'acidité échangeable. Le pH (pH-H₂O et pH-KCl) a été déterminé au LACHIST tandis que les autres paramètres ont été analysés au LASPA.

Le pH-H₂O a été mesuré dans les suspensions sol-eau et le pH-KCl a été mesuré dans les suspensions sol-solution de KCl au rapport tous de 1/5 avec le pH-mètre après un temps d'équilibrage d'une heure pendant lequel les suspensions étaient agitées toutes les 20 minutes. L'interprétation des valeurs de pH obtenues s'est basée sur les normes présentées au tableau 2. La granulométrie a été effectuée après attaque de la matière organique, des oxydes et des carbonates respectivement par le peroxyde d'hydrogène et l'acide chlorhydrique. La

centrifugation a été effectuée pour éliminer l'argile. Après la séparation des sables et limons, les sables séchés à l'étuve réglé à 65°C sont portés quantitativement dans une batterie de tamis (2000 microns à 50 microns) qui est placée sur un agitateur vertical pendant 30minutes à la vitesse moyenne.

Après avoir enlevé les tamis sur l'agitateur, le poids de chaque fraction de sable a été pesé et noté. La teneur en carbone organique a été déterminée par la méthode de (Walkley & Black, 1934). Le phosphore assimilable a été dosé par la méthode colorimétrique après extraction au bicarbonate de sodium. Le phosphore total a été déterminé par colorimétrie, après digestion par les acides concentrés (acide perchlorique et sulfurique). Les bases et l'aluminium échangeables sont dosés par spectroscopie d'absorption atomique à flamme après percolation à l'acétate

Tableau 1: Types de sols avec leurs coordonnées géographiques (ISABU, 1988).

| Communes | Lat | Long | Alt | Groupe de sols selon l'INEAC | Groupe de sols selon Soil Taxinomy | Groupe de sols selon FAO | Occupation du sol lors de l'étude |
|-----------|-------|--------|------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| MUGINA | 2°39′ | 29°05′ | 1680 | Hygroxéoferralsol | Paleudult | Nitosol dystrique | Mise en jachère |
| MUGINA | 2°41′ | 29°05′ | 1300 | Argile noir tropicale | Pellustert | Vertisol pellique | Manioc |
| RUGOMBO | 2°49′ | 29°04′ | 840 | Brun non hydromorphe | Haplustalf | Nitosol eutrique | On y a récolté du riz |
| BUSIGA | 2°51′ | 29°42′ | 1600 | Régosol | Humitropept | Cambisol dystrique | Maïs |
| MUYINGA | 2°53′ | 30°25′ | 1400 | Hydrokaolisol | Tropaquept | Cambisol gleyique | Riz, maïs, patate douce |
| BUHINYUZA | 2°58′ | 30°20′ | 1560 | Hygroxéoferralsol | Haplohumox | Ferralsol humique | Manioc, maïs |
| RUGAZI | 3°10′ | 29°30′ | 1750 | Hygroferralsol sans B | Paleudult | Nitosol dystrique | Eucalyptus |
| GIHANGA | 3°11′ | 29°21′ | 850 | Hydromorphe normal | Plinthaqualf | Acrisol plinthique | Mais, Haricots, Pois cajan |
| GIHANGA | 3°13′ | 29°19′ | 850 | Argile noir tropicale | Pellustert | Vertisol pellique | Champs des Haricots |
| GIHANGA | 3°14′ | 29°20′ | 850 | Hydromorphe solonetzique | Natraqualt | Planosol solodique | On y a récolté du Riz |
| BUKEYE | 3°15′ | 30°30′ | 2000 | Hygroferralsol | Agrudalf | Luvisol chromique | Patate douce, manioc, banane |
| CANKUZO | 3°17′ | 29°20′ | 1680 | Lithosol | Ustorthent | Régosol dystrique | Sol labouré |
| MUTIMBUZI | 3°18′ | 29°34′ | 800 | Brun hydromorphe | Tropaqualf | Nitosol eutrique | Mis en jachère |
| MURAMVYA | 3°17′ | 29°59′ | 2000 | Sol organique | Tropohemist | Histosol dystrique | Patate douce, maïs |
| BUGENDANA | 3°33′ | 29°41′ | 1700 | Hygroxéoferralsol | Haplustox | Ferralsol humique | Arachide, haricots, maïs |
| GISOZI | 3°41′ | 29°31′ | 2050 | Kaolisol humifère | Sombrihumox | Ferralsol humique | On y a récolté des haricots |
| MUGAMBA | 3°45′ | 30°14′ | 2100 | Ferralsol humifère | Haplohumox | Ferralsol humique | Labouré, occupé par des colocases |
| GIHARO | 4°08′ | 29°49′ | 1150 | Régogley | Fluvaquent | Fluvisol eutrique | On y a récolté du riz |
| MAKAMBA | 4°09′ | 29°52′ | 1460 | Hygroxéoferralsol | Haplustox | Ferralsol rhodique | On y a récolté du maïs |
| MAKAMBA | 4°09′ | 29°48′ | 1700 | Hygroxéoferralsol | Rhodustalf | Nitosol humique | Labouré après récolte du maïs, |
| MAKAMBA | 3°15′ | 30°30′ | 1400 | Régogley | Tropaquept | Cambisol gleyique | On y a récolté du riz |
| RUMONGE | 4°09′ | 29°32′ | 816 | Régosol | Humitropept | Fluvisol | Champs de manioc, haricots, maïs |

Tableau 2: Appréciation de l'acidité ou de l'alcalinité du sol selon le pH (Bocoum, 2004).

| Gammes de pH | Sol |
|--------------|--------------------|
| < 4,5 | Extrêmement acide |
| 4,6 - 5,2 | Très acide |
| 5,3 - 5,5 | Acide |
| 5,6 – 6,0 | Modérément acide |
| 6,1 – 6,6 | Légèrement acide |
| 6,7 – 7,2 | Neutre |
| 7,3 – 7,9 | Légèrement alcalin |
| 8,0 – 8,5 | Alcalin |
| > 8,6 | Très alcalin |

Tableau 3: Normes utilisés pour l'interprétation des résultats.

| Paramètres | Normes | Sources |
|------------------|------------------|-----------------------|
| O | 1,2-2,5 % | Doucet, 2006 |
| CEC | 5-15 meq/100g | London, 1991 |
| Mg ²⁺ | 1-1,5 meq/100g | Amonmide et al., 2019 |
| Ca ²⁺ | 2,3-3,5 meq/100g | Amonmide et al., 2019 |
| K ⁺ | 0,2-0,4 meq/100g | Amonmide et al., 2019 |
| Na ⁺ | 0,3-0,7 meq/100g | Amonmide et al., 2019 |
| Pass | > 20 ppm | London, 1991 |
| P total | 200-230 mg/kg | Doucet, 2006 |

Traitement statistique des données

Le logiciel SPSS a été utilisé pour calculer les moyennes, leurs écarts types ainsi que les corrélations entre les paramètres physicochimiques des sols analysés.

3. Résultats et discussion

3.1. Granulométrie

Selon la classification granulométrique du Département de l'Agriculture des Etats-Unis (USDA), la texture argileuse représente 59,1% des sols, les sols à texture limono-sableuse représentent 18,2% avec 13,63% des sols limono-argilo-sableux. L'Hygrokaolisol, l'Hydromorphe normal, le Lithosol, le Sol brun hydromorphe, l'Hygroxéoferralsol, le Régogley et l'Hygroferralsol ont des teneurs en sable qui varient entre 55,75 et 79,35% et plus de la moitié des sols analysés ont une texture argileuse (Tableau 4). Les proportions d'argile et de sable dominant celle des limons. L'argile est l'élément qui conditionne la fixation des éléments minéraux sur le complexe adsorbant (Koulibaly *et al.*, 2015).

3.2. pH et acidité échangeable

Les résultats du pH des échantillons de sols étudiés sont présentés dans le (Tableau 4). Les valeurs de pH- eau obtenues dans l'ensemble sont comprises entre 3,73 et 7,29 et le pH est extrêmement acide à neutre (Tableau 2).

En se référant aux normes de pH de (Bocoum, 2004), 4,54% des cas sont légèrement acides (6,1 – 6,6), 4,54% des cas sont neutres (6,7 – 7,2), 18,18% des cas sont modérément acides (5,6 – 6,0), 13,63% des cas sont acides (5,3 - 5,5), 31,82% des cas sont très acides (4,6 - 5,2) et 27,27% des cas sont extrêmement acides (< 4,5). Dans tous les cas, le pH-eau est supérieur au pH-KCl (Tableau 3). La comparaison des valeurs des deux types de pH permet de se prononcer sur l'importance des minéraux à charges variables présents dans le sol (Uehara et al., 1981). Des valeurs de variation de pH (pH-H₂O – pH-KCl), généralement < 1, indiquent une acidité liée aux protons H⁺. Lorsque le ΔpH > 1, l'acidité

des sols serait liée aux ions acidifiants Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , susceptibles de provoquer des phénomènes de toxicités. Les sols acides dont la variation du pH est proche de zéro peuvent être suspectés contenir une faible teneur en Al^{3+} échangeable (Olayossimi *et al.*, 2018). L'analyse de l'aluminium sous la forme Al^{3+} a témoigné l'inexistence de cet élément dans l'Argile noir tropicale, le sol brun non

hydromorphe, le Régosol, l'Hygrokaolisol, l'Hydromorphe normal, l'Hydromorphe solonetzique, l'Hygroferrisol, le sol brun hydromorphe, l'Hygroxéoferralsol, le Régogley et l'Hygroxéoferrisol (Tableau 5). Pour les sols à pH inférieur à 5,5, l'aluminium devient soluble et toxique pour les plantes et va inhiber la présence d'autres nutriments (Rahman *et al.*, 2018).

Tableau 4: pH -H₂O, pH-KCl et la granulométrie des sols.

| Communes | TYPE DE SOLS | pH- eau | pH- KCl | ΔpH | Sable (%) | Limon (%) | Argile (%) | Texture |
|-----------|--------------------------|-----------|------------|------|-----------|-----------|------------|------------------------|
| MUGINA1 | Hygroxéoferrisol | 4,58±0,04 | 3,94±0,006 | 0,64 | 8,095 | 33,3 | 58,6 | Argileuse |
| MUGINA2 | Argile noir tropicale | 6,53±0,08 | 5,40±0,023 | 1,13 | 12,202 | 24,32 | 62,45 | Argileuse |
| RUGOMBO | Brun non hydromorphe | 5,48±0,04 | 4,83±0,006 | 0,65 | 30,414 | 26,23 | 43,3 | Argileuse |
| BUSIGA | Régosol | 4,93±0,05 | 4,38±0,02 | 0,55 | 36,961 | 15,28 | 47,75 | Argileuse |
| MUYINGA | Hydrokaolisol | 5,24±0,10 | 4,37±0,03 | 0,87 | 66,695 | 9,91 | 23,45 | Limono-argilo-Sableuse |
| BUHINYUZA | Hygroxéoferralsol | 4,58±0,01 | 4,12±0,01 | 0,46 | 18,13 | 19,815 | 62,05 | Argileuse |
| RUGAZI | Hygroferrisol sans B | 4,17±0,10 | 3,95±0,00 | 0,22 | 55,75 | 12,56 | 48,5 | Argileuse |
| GIHANGA1 | Hydromorphe normal | 5,97±0,02 | 5,16±0,01 | 0,81 | 64,64 | 16 | 19,35 | Limono-sableuse |
| GIHANGA2 | Argile noir tropicale | 7,29±0,11 | 6,35±0,023 | 0,94 | 27,2 | 23,53 | 49,3 | Argileuse |
| GIHANGA3 | Hydromorphe solonetzique | 5,89±0,01 | 5,04±0,006 | 0,85 | 51,6 | 15,61 | 32,8 | Limono-argilo-sableuse |
| BUKEYE | Hygroferrisol | 5,07±0,04 | 4,58±0,026 | 0,49 | 21,92 | 19,02 | 59,05 | Argileuse |
| CANKUZO | Lithosol | 4,61±0,02 | 4,12±0,00 | 0,49 | 68,73 | 12 | 19,32 | limono-sableuse |
| MUTIMBUZI | Brun hydromorphe | 5,52±0,11 | 4,28±0,011 | 1,24 | 65,45 | 12,41 | 22,12 | limono-argilo-sableuse |
| MURAMVYA | Sol organique | 3,73±0,01 | 3,69±0,00 | 0,04 | 31,75 | 13,69 | 54,55 | Argileuse |
| BUGENDANA | Hygroxéoferralsol | 5,43±0,02 | 4,68±0,00 | 0,75 | 70,95 | 14,09 | 14,98 | limono-sableuse |
| GISOZI | Kaolisol humifère | 4,57±0,03 | 4,11±0,006 | 0,46 | 28,1 | 10,77 | 61,21 | Argileuse |
| MUGAMBA | Ferrisol humifère | 4,04±0,02 | 3,91±0,006 | 0,13 | 9,26 | 14,57 | 76,1 | Argileuse |
| GIHARO | Régogley | 5,19±0,03 | 4,41±0,00 | 0,78 | 79,35 | 10,01 | 10,63 | limono-sableuse |
| MAKAMBA | Hygroxéoferralsol | 5,23±0,16 | 4,27±0,16 | 0,96 | 57,71 | 6,71 | 35,57 | argilo-sableuse |
| MAKAMBA | Hygroxéoferralsol | 5,64±0,04 | 4,56±0,00 | 1,08 | 10,2 | 6,49 | 83,28 | Argileuse |
| MAKAMBA | Régogley | 5,29±0,02 | 4,20±0,011 | 1,09 | 13,523 | 35,85 | 50,62 | Argileuse |
| RUMONGE | Régosol | 5,67±0,02 | 5,05±0,006 | 0,62 | 9,333 | 60,81 | 29,86 | Limono-argileuse fine |

3.3. Bases échangeables

Les teneurs en Ca échangeable des échantillons de sols varient de 0,285 à 32,27 meq/100g (Tableau 5). L'optimum pour cet élément se situe entre 2,3 à 3,5 meq/100g (Tableau 3). Nous remarquons que 36,36% des cas analysés ont des teneurs en calcium qui sont en dessous des valeurs limites. Les teneurs en Mg échangeable varient de 0,03 à 7,04 meq/100g et 72,73% des échantillons de sols ont des teneurs en dessous des valeurs normales (1 à 1,5 meq/100g). Les teneurs en K échangeable sont comprises entre 0,13 et 0,64 meq/100g

et 22,73% des échantillons de sols ont des valeurs qui sont en dessous des valeurs limites (0,2 à 0,4 meq/100g).

La teneur en Na échangeable varie de 0,1 à 0,86 meq/100g et 86,36% des cas ont des teneurs qui sont en dessous des valeurs limites (0,3 à 0,7 meq/100g).

L'analyse globale de ces résultats des bases échangeables montre qu'il y a une carence marquée en calcium, en magnésium et en sodium. Par contre, 45,45 % des échantillons de sols analysés présentent des teneurs acceptables en potassium échangeable (valeurs comprises entre 0,2 et 0,4 meq/100g). Ces résultats montrent que ces sols accusent un degré d'altération avancée et une lixiviation accrue des éléments basiques

Tableau 5: Résultats pour l'acidité échangeable et les bases échangeables (meq /100g).

| Site | Type de sols | Al ³⁺ | H ⁺ | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ |
|-----------|--------------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|
| MUGINA1 | Hygroxéroferrisol | 2,97±0,19 | 2,12±0,03 | 0,09±0,01 | 0,17±0,04 | 0,29±0,04 | 0,11±0,002 |
| MUGINA2 | Argile noir tropicale | - | 0,05±00 | 7,04±0,24 | 32,27±0,81 | 0,21±0,02 | 0,21±0,01 |
| RUGOMBO | Brun non hydromorphe | - | 0,05±00 | 1,34±0,12 | 6,33±004 | 0,15±0,003 | 0,22±0,005 |
| BUSIGA | Régosol | - | 0,28±00 | 0,89±0,05 | 2,48±00 | 0,26±0,03 | 0,14±0,001 |
| MUYINGA | Hydrokaolisol | - | 0,16±0,02 | 0,37±0,03 | 1,19±0,06 | 0,49±0,01 | 0,15±0,01 |
| BUHINYUZA | Hygroxéroferralsol | 1,16±0,00 | 0,58±0,17 | 0,31±0,03 | 0,65±0,04 | 0,43±0,005 | 0,08±0,005 |
| RUGAZI | Hygroferrisol sans B | - | 1,35±0,42 | 0,12±0,001 | 0,285±0,1 | 0,17±000 | 0,087±0,06 |
| GIHANGA1 | Hydromorphe normal | - | 0,05±00 | 1,11±0,02 | 4,64±004 | 0,44±0,03 | 0,392±00 |
| GIHANGA2 | Argile noir tropicale | - | 0,02±0,03 | 1,48±0,05 | 22,73±1,1 | 1,51±0,24 | 0,86±0,04 |
| GIHANGA3 | Hydromorphe solonetzique | - | 0,01±0,02 | 2,18±0,1 | 9,04±0,1 | 0,35±0,05 | 0,53±0,004 |
| BUKEYE | Hygroferrisol | - | 0,08±0,03 | 0,894±0,01 | 5,81±0,13 | 0,31±0,03 | 0,07±0,013 |
| CANKUZO | Lithosol | 0,3±0,00 | 0,25±00 | 0,545±0,003 | 2,83±0,03 | 0,24±0,03 | 0,09±0,014 |
| MUTIMBUZI | Brun hydromorphe | - | 0,12±0,02 | 0,5277±002 | 2,31±0,20 | 0,26±0,03 | 0,25±0,01 |
| MURAMVYA | Sol organique | 3,51±0,17 | 3,69±0,22 | 0,1383±0,02 | 0,91±0,046 | 0,16±0,005 | 0,11±0,016 |
| BUGENDANA | Hygroxéroferralsol | - | 0,07±0,03 | 0,343±0,06 | 2,79±0,104 | 0,26±0,062 | 0,10±0,008 |
| GISOZI | Kaolisol humifère | 1,11±0,00 | 1,35±0,16 | 0,0443±0,03 | 1,45±0,046 | 0,46±0,02 | 0,03±0,01 |
| MUGAMBA | Ferrisol humifère | 1,96±0,07 | 2,62±0,2 | 0,03±0,00 | 1,06±0,141 | 0,16±0002 | 0,01±0,00 |
| GIHARO | Régogley | - | 0,19±0,011 | 0,08±0,004 | 2,52±0,28 | 0,13±0,016 | 0,035±0,003 |
| MAKAMBA | Hygroxéroferralsol | 0,4±0,00 | 0,17±0,06 | 0,11±0,015 | 1,59±0,13 | 0,24±0,04 | 0,033±0,004 |
| MAKAMBA | Hygroxéroferralsol | - | 0,20±0,00 | 0,44±0,01 | 4,76±0,03 | 0,64±0,04 | 0,086±0,00 |
| MAKAMBA | Régogley | 0,28±0,01 | 0,24±0,011 | 0,81±0,04 | 6,92±0,12 | 0,36±0,001 | 0,041±0,01 |
| RUMONGE | Régosol | - | 0,06±0,02 | 1,02±0,006 | 4,21±0,2 | 0,48±0,01 | 0,01±0,002 |

3.4. Carbone organique

Le taux de carbone organique (CO) varie de 0,60-5,33%

(Tableau 6) contre la norme de 1,2 à 2,5% donnée par Doucet (2016) et 40,9% des cas ont des teneurs acceptables en carbone organique, 31,82% ont des teneurs

en CO qui sont en dessous des valeurs normales. Les taux de CO les plus élevés ont été observés dans l'Hygroferrisol sans B, l'Argile noir tropicale, le sol brun non hydromorphe, le sol organique, le Kaolisol humifère et le Ferrisol humifère. Les teneurs élevées en CO de ces sols pourraient être expliquées par l'apport d'amendements et leurs mis en jachères. Cette pauvreté en matières organiques pourrait s'expliquer par le déséquilibre entre les apports organiques. La baisse des teneurs en carbone, serait liée d'après Ouattara *et al.* (2006) à la baisse du taux de matière organique du sol et son intensité culturale. Les faibles stocks de matière organique dans les sols, les prédisposeraient à une acidification et à une dégradation rapide (Brady *et al.*, 2008). La diminution drastique du taux de matière organique engendre donc la dégradation des sols et surtout la baisse des rendements des cultures (Pouya *et al.*, 2013)

Les valeurs de la capacité d'échange cationique (CEC) varient de 4,62 à 50,93 meq/100g (Tableau 6). La CEC apparait comme sans limitation dans l'argile noire

3.5. Phosphore assimilable et phosphore total

Les teneurs en P total des sols analysés varient de 173,67 à 1502,33 mg/Kg (Tableau 6), les extrêmes étant celles des échantillons issus du sol brun hydromorphe et le Kaolisol humifère respectivement. Le sol brun hydromorphe a une teneur en phosphore total qui est en dessous de la normale, si on considère les valeurs guides de (Doucet, 2006) selon lesquelles le contenu en P total dans les sols, varie de 200 à 230 mg P kg⁻¹. Le Kaolisol humifère a été prélevé dans un champ d'essai de l'ISABU bien aménagé raison pour laquelle sa teneur en phosphore total est très grande comparativement aux autres sols. L'utilisation d'engrais, notamment le NPK, la nature de la roche mère et l'altitude peuvent expliquer les réserves en P total observés dans d'autres sols analysés. Les teneurs très élevées en P observées sont dues au fait que le P peut être apporté par migration en provenance d'autres sols par ruissellement ou lixiviation (Morel *et al.*, 2004). Les teneurs faibles en P observées s'expliquent par le manque d'apports ainsi que la perte de ce nutriment par l'érosion. Cette grande variabilité peut être due à différentes raisons comme la diversité des sites de prélèvements, la diversité des toposéquences, les effets d'anciens modes d'usage des sols.

Les teneurs en P assimilable des sols analysés varient de 0,98 à 39,57mg/kg. Les extrêmes étant l'Argile noir tropicale et l'Hydromorphe normal respectivement

tropicale car elle est supérieure à 25 meq/100g (Amonmide *et al.*, 2019). Les limitations faibles ont été observées dans l'Hygroxéoferrisol, l'Hydromorphe solonetzique, le sol organique, le Kaolisol humifère, le Ferrisol humifère et l'Hygrokaolisol car leurs teneurs sont comprises entre 25 et 15 meq/100g. Le sol brun non hydromorphe, l'Hygroxéoferralsol, l'Hygroferrisol, l'Hygroxéoferrisol et le Régosol ont une limitation moyenne (15-10 meq/100g). Le Régosol, l'Hygrokaolisol, l'Hydromorphe normal, le Lithosol, le Régogley et l'hygroxéoferralsol ont une limitation sévère (10-5 meq/100g) et le sol brun hydromorphe a une limitation très sévère (< 5 meq/100g). Plus de 63% des échantillons de sols traités ont des faibles capacités d'échange cationique quand on se réfère aux normes de (Landon, 1991) selon lesquelles les valeurs de la CEC comprises entre 5 et 15 meq/100g sont faibles. Les faibles CEC observées seraient liées à une pauvreté en matière organique et/ou en argile et à la nature des argiles en place (Culot *et al.*, 2009), au lessivage ou à l'acidité (Osujieke *et al.*, 2018)

(Tableau 6). Le P assimilable est apparu comme sans limitation dans l'Hydromorphe normal et l'Hydromorphe solonetzique (> 20 meq/100g). Le Kaolisol humifère présente une limitation faible en phosphore (20-15 meq/100g), l'Hygroxéoferralsol a une limitation moyenne en P (15-10 meq/100g), l'Hygroxéoferrisol et le Régosol ont des limitations sévères en P (10-5 meq/100g) alors que l'Argile noir tropicale, le sol brun hydromorphe, l'Hygrokaolisol, l'Hygroxéoferralsol, l'Hygroferrisol, le Lithosol, le sol organique, le Ferrisol humifère, le Régogley, l'Hygroxéoferralsol et l'Hygrokaolisol ont des limitations très sévères en P (< 5 meq/100g). Dans l'ensemble, les sols analysés sont pauvres en P assimilable à plus de 90,9% des cas. Les teneurs faibles en P s'expliqueraient par sa fixation aux charges positives des oxyhydroxydes de fer et l'aluminium et à la grande teneur en sable observée où le P se perd par lixiviation (Bockman *et al.*, 1990). La teneur faible en P serait aussi liée à la pauvreté en matière organique des sols. La matière organique étant étant importante pour prédire la disponibilité du P assimilable (Turner, 2008). La matière organique constitue une source importante de phosphore sous forme organique et contribue au stockage des éléments nutritifs par l'intermédiaire de la minéralisation/immobilisation par les microorganismes (Bertrand et Gigou, 2000). La décomposition de la matière organique libère certains acides organiques minéraux

Tableau 6 : Résultats pour le carbone organique (en%), P total et phosphore assimilable en mg/kg, CEC en meq/100g.

| Site | Type de sols | CO | CEC | P total | Pass | %Pass |
|-----------|--------------------------|-----------|------------|---------------|-----------|-------|
| MUGINA1 | Hygroxéoferrisol | 5,33±0,20 | 24,36±0,28 | 684±11 | 4,68±0,37 | 0,68 |
| MUGINA2 | Argile noir tropicale | 2,78±0,25 | 50,93±0,92 | 746,67±42,72 | 0,98±0,1 | 0,13 |
| RUGOMBO | Brun non hydromorphe | 2,67±0,34 | 13,55±0,17 | 892,67±165,12 | 2,07±0,13 | 0,23 |
| BUSIGA | Régosol | 0,93±0,01 | 8,49±0,11 | 476±10,4 | 1,54±0,3 | 0,32 |
| MUYINGA | Hydrokaolisol | 0,81±0,02 | 5,17±0,05 | 475,33±58,31 | 2,42±0,11 | 0,5 |
| BUHINYUZA | Hygroxéoferralsol | 1,62±0,04 | 10,53±0,23 | 596,33±4,04 | 3,41±0,07 | 0,57 |
| RUGAZI | Hygroferrisol sansB | 1,37±0,15 | 11,03±0,46 | 460±6,92 | 1,72±0,17 | 0,37 |
| GIHANGA1 | Hydromorphe normal | 1,34±0,15 | 8,83±0,52 | 395±22,5 | 39,57±0,3 | 10,01 |
| GIHANGA2 | Argile noir tropicale | 1,64±0,15 | 33,2±0,00 | 532±13,85 | 8,92±0,32 | 1,68 |
| GIHANGA3 | Hydromorphe solonetzique | 1,25±0,12 | 15,50±0,21 | 363,67±4,6 | 28,67±1,1 | 7,9 |
| BUKEYE | Hygroferrisol | 1,73±0,03 | 13,40±0,17 | 833,33±27,13 | 4,99±0,23 | 0,6 |
| CANKUZO | Lithosol | 1,49±0,20 | 8,10±0,41 | 263±6,92 | 2,83±0,25 | 1,07 |
| MUTIMBUZI | Brun hydromorphe | 0,60±0,05 | 4,62±0,06 | 173,67±6,35 | 2,08±0,00 | 1,2 |
| MURAMVYA | Sol organique | 3,79±0,00 | 21,30±0,23 | 837,67±31,75 | 3,94±1,26 | 0,47 |
| BUGENDANA | Hygroxéoferralsol | 1,03±0,13 | 5,23±0,17 | 559,67±27,13 | 10,7±0,52 | 1,91 |
| GISOZI | Kaolisol humifère | 3,65±0,09 | 17,53±0,05 | 1502,33±8,1 | 19,32±0,6 | 1,28 |
| MUGAMBA | Ferrisol humifère | 2,74±0,19 | 15,53±0,05 | 821±10,4 | 4,12±0,24 | 0,5 |
| GIHARO | Régogley | 0,86±0,10 | 5,85±0,00 | 268±17,32 | 4,18±0,8 | 1,56 |
| MAKAMBA | Hygroxéoferralsol | 1,10±0,00 | 5,47±0,05 | 367,333±2,31 | 3,65±0,13 | 0,99 |
| MAKAMBA | Hygroxéoferrilsol | 1,70±0,11 | 13,66±0,11 | 895,333±14,43 | 5,87±0,34 | 0,65 |
| MAKAMBA | Régogley | 1,51±0,05 | 15,03±0,11 | 527±27,27 | 2,9±0,052 | 0,55 |
| RUMONGE | Régosol | 1,73±0,12 | 11,83±0,05 | 713±24,25 | 9,63±0,41 | 1,35 |

(Lopez-Hernandez et Burnham, 1974) qui complexent le fer ou l'aluminium à la surface des particules d'argile, ce qui libère les ions étant importante pour prédire la disponibilité du P assimilable (Turner, 2008). La matière organique constitue une source importante de phosphore sous forme organique et contribue au stockage des éléments nutritifs par l'intermédiaire de la minéralisation/immobilisation par les microorganismes (Bertrand et Gigou, 2000). La décomposition de la matière organique libère certains acides organiques minéraux (Lopez-Hernandez et Burnham, 1974) qui complexent le fer ou l'aluminium à la surface des particules d'argile, ce qui libère les ions phosphates dans la solution du sol. De ce fait, un enrichissement du sol en matière organique augmente la contribution du P organique à la dynamique du P (Parent et Khiari, 2003).

3.6. Relation entre certains paramètres physicochimiques des sols analysés

La teneur en P assimilable est insuffisante pour plus de 90% des exploitations. Les facteurs ayant influencé la disponibilité du P dans le sol sont entre autre le pH, l'acidité échangeable, la texture, le carbone organique et les bases échangeables. Dans les sols acides, le phosphate se combine au fer, à l'aluminium et aux minéraux argileux avec formation des composés très peu solubles qui sont peu disponibles pour les plantes (Troeh et Thompson, 2005). La corrélation négative non significative s'observe entre le phosphore assimilable et la matière organique ($r = -0,043$). En effet, le phosphore présent dans les résidus organiques peut être associé aux constituants solides du résidu (Houot *et al.*, 2014). La corrélation négative existe

aussi entre le phosphore assimilable et la teneur en argile ($r = -0,24$), puisque le P se fixe énergiquement sur les minéraux argileux, ce qui limite sa disponibilité (Guppy *et al.*, 2005). Les minéraux argileux (oxyhydroxyde de fer et d'aluminium) interagissent étroitement avec l'ion phosphate par adsorption et/ou fixation les rendant non disponibles pour la plante. Les sesquioxydes métalliques complexés autour des feuillets d'argile sont chargés positivement et les ions phosphates chargés négativement vont être fixés autour des pôles d'aluminium et de fer

(Hinsinger, 2001). L'apport d'amendements organiques, tels que les fumiers ou les résidus de plantes, les différents types de compost pourraient contribuer à augmenter le P dans ces sols puisqu'ils produisent des anions organiques (carboxylates et les acides carboxyliques), à faible poids moléculaire qui sont d'une importance majeure pour la mobilisation de P du sol. Comme proposé par (Jones, 1998), les carboxylates sont capables de favoriser la libération du phosphore inorganique par échange de ligands sur les sites d'adsorption du phosphore.

Tableau 7: Matrice de corrélation entre les paramètres physicochimiques des sols analysés

| | pH eau | CO | Mg ²⁺ | Ca ²⁺ | K ⁺ | Na ⁺ | CEC | PA | AH | Al ³⁺ | Sables | Limons | Argiles |
|------------------|----------|---------|------------------|------------------|----------------|-----------------|-------|-------|---------|------------------|---------|--------|---------|
| pH eau | 1 | | | | | | | | | | | | |
| CO | -0,333 | 1 | | | | | | | | | | | |
| Mg ²⁺ | 0,577** | 0,058 | 1 | | | | | | | | | | |
| Ca ²⁺ | 0,753** | 0,029 | 0,890** | 1 | | | | | | | | | |
| K ⁺ | 0,622** | -0,094 | 0,035 | 0,415 | 1 | | | | | | | | |
| Na ⁺ | 0,705** | -0,145 | 0,315 | 0,560** | 0,698** | 1 | | | | | | | |
| CEC | 0,373 | 0,540** | 0,761** | 0,832** | 0,291 | 0,356 | 1 | | | | | | |
| Pass | 0,285 | -0,043 | 0,029 | 0,012 | 0,198 | 0,42 | -0,07 | 1 | | | | | |
| AH | -0,727** | 0,692** | -0,31 | -0,34 | -0,26 | -0,28 | 0,167 | -0,15 | 1 | | | | |
| Al ³⁺ | -0,629** | 0,791** | -0,28 | -0,31 | -0,2 | -0,24 | 0,212 | -0,12 | 0,917** | 1 | | | |
| Sables | 0,21 | -0,521* | 0,028 | -0,03 | -0,17 | 0,155 | -0,37 | 0,221 | -0,39 | 0,356 | 1 | | |
| Limons | 0,083 | 0,192 | -0,01 | 0,012 | 0,128 | -0,04 | 0,098 | -0,03 | -0,02 | 0,026 | -0,535* | 1 | |
| Argiles | -0,299 | 0,502* | -0,03 | 0,029 | 0,128 | -0,16 | 0,378 | -0,24 | 0,477* | 0,406 | 0,862** | 0,033 | 1 |

**Corrélation significative au seuil de 99%, * Corrélation significative au seuil de 95%

4. conclusion

Les résultats de cette étude ont révélé que l'Hygroferrisol sans B, l'Hygroxéoferralsol, l'Hygroferrisol, le sol organique, le Kaolisol humifère et le Ferrisol humifère sont extrêmement acides (Tableau 2). Cette acidité extrême est liée à la présence dans ces sols de l'ion aluminium et sa présence fait que les ions phosphates se fixent à l'aluminium avec formation des complexes peu solubles. Les teneurs en argile varient de 10,63 à 83,28% et 59,1% des sols ont une texture argileuse, pour les sols qui ont des teneurs élevées en sable, les phosphates ne sont pas toujours bien retenus par le sol et en cas de fortes pluies, ces phosphates sont perdus par lixiviation ou par ruissellement. Plus de 40,9% des échantillons de sols ont des teneurs en carbone organique situées dans les valeurs normales. Le bilan des éléments nutritifs révèle des carences en éléments minéraux dont les plus marquées concernent le phosphore, le calcium, le sodium et le magnésium échangeables. L'examen des valeurs de la capacité d'échange cationique montre que plus de 63% des échantillons ont un faible pouvoir de rétention de

nutriments. Le pourcentage du P assimilable par rapport aux teneurs en P total varie de 0,13 à 10,01% et plus de 90,9% des échantillons de sols ont des teneurs qui sont faibles en P assimilable ce qui constituent des contraintes majeures pour la production des cultures. Les échantillons de sols analysés présentent des paramètres de fertilité qui sont largement bas et sont pauvres en phosphore disponible. Cette pauvreté en phosphore disponible serait liée à l'acidité, à la texture du sol, à la présence de l'aluminium échangeable ainsi qu'aux faibles taux de la matière organique.

Il conviendrait pour ces sols d'envisager des corrections par l'application d'amendements calciques ou magnésiques, de matière organique, d'une fertilisation d'entretien adéquate en phosphore, mais en tenant compte des problèmes rencontrés à chaque sol. En outre, l'incorporation des résidus de culture constitueraient des solutions envisageables pour augmenter le P dans ces sols et améliorer leurs propriétés physicochimiques.

Remerciement

Nous remercions le centre de recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement (CRSNE) de la Faculté des Sciences de l'Université du Burundi pour le soutien financier et matériel ainsi que l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU) pour l'analyse de certains paramètres.

Bibliographie

- Amonmide, I., Dagbenonbakin, G., Akponikpe, P., Agbangba, C. (2019). Contribution à l'évaluation du niveau de fertilité des sols dans les systèmes de culture à base du coton au Bénin, 13(3), 1846-1860.
- Batjes, N. H. (1997). A world dataset of derived soil properties by FAO-UNESCO soil unit for global modelling. *Soil Use and Management*, 13(1), 9-16.
- Belghith, N. B. H., Tom, B., Beko, A., & Tsimpo, C. (2016). Burundi Poverty Assessment. *World Bank Consultations*.
- Bertrand, R., & Gigou, J. (2000). *La fertilité des sols tropicaux*. Maisonneuve et Larose.
- Bockman, O. C., Kaarstad, O., Lie, O. H., & Richards, I. (1990). Agriculture et fertilisation. *Oslo. Ed. Norsh Hydro*.
- Bocoum, M. (2004). Méthodes d'analyses des sols. *Document de Travail. Institut National de Pédologie, Dakar-Sénégal*. 55p.
- Boulaine, J. (2006). Histoire de la fertilisation phosphatée. *Etude Gestion Sols*, 13, 129-137.
- Boyer, J. (1976). L'aluminium échangeable : incidences agronomiques, évaluation et correction de sa toxicité dans les sols tropicaux. *Cahiers ORSTOM Série Pédologie*, 14(4), 259-269.
- Brady, N. C., Weil, R. R., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (Vol. 13). Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.
- Culot, M., Mbonigaba Muhinda, J.-J., Nzeyimana, I., & Bucagu, C. (2009). Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leur productivité. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 13(4), 545-558.
- Doucet, R. (2006). *Le climat et les sols agricoles*.
- Duchaufour, H. (2017). La jachère bananière en milieu agrotrestier montagnard tropical densément peuplé du Burundi (Mumirwa central). *Restauration de La Productivité Des Sols Tropicaux et Méditerranéens Contribution à l'agroécologie*, 81.
- Fernández, L. A., Zalba, P., Gómez, M. A., & Sagardoy, M. A. (2007). Phosphate-solubilization activity of bacterial strains in soil and their effect on soybean growth under greenhouse conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 43(6), 805-809.
- Guppy, C. N., Menzies, N. W., Moody, P. W., & Blamey, F. P. C. (2005). Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Soil Research*, 43(2), 189-202.
- Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: A review. *Plant and Soil*, 237(2), 173-195.
<https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>
- Houot, S., Pons, M.-N., Pradel, M., Tibi, A., Aubry, C., Augusto, L., Barbier, R., Benoit, P., Brugère, H., Caillaud, M. A., & others. (2014). *Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier*. Ministère de l'Agriculture.
- Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., Gallali, T., Hallett, S., Jones, R., Kilasara, M., & others. (2013). *Soil atlas of Africa*.
- ISABU (1988). Carte des sols du Burundi
- Jones, D. L. (1998). Organic acids in the rhizosphere--a critical review. *Plant and Soil*, 205(1), 25-44.
- Koulibaly, B., Traore, O., Dakuo, D., Lalsaga, R., Lompo, F., & Zombre, P. (2015). Acidification des sols ferrugineux et ferrallitiques dans les systèmes de production cotonnière au Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(6), 2879.
<https://doi.org/10.4314/ijbcs.v8i6.44>
- Kuhad, R. C., Singh, S., Singh, A., & others. (2011). Phosphate-solubilizing microorganisms. In *Bioaugmentation, biostimulation and biocontrol* (pp. 65-84). Springer.
- Landon, J. R. (1991). *Booker tropical soil manuala handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics*.
- Lopez-Hernandez, D., & Burnham, C. P. (1974). The covariance of phosphate sorption with other soil properties in some British and tropical soils. *Journal of Soil Science*, 25(2), 196-206.
- Morel, C., Cachot, C., Martinez, J., Peu, P., Elsass, F., Robert, M., & Fardeau, J.-C. (2004). Evolution sur 12 ans de la solubilité, mobilité et lixiviation du phosphate dans un sol ayant massivement reçu du lisier. *Etude et Gestion Des Sols*, 44(4), 403-418.
- Nijimbere, S., Kaboneka, S., Ndiokubwayo, S., Irakoze, W., & Ndikumana, J. (2020). Caractérisation physico-chimique des sols d'une exploitation agricole du Mumirwa en commune Rumonge (Burundi). *Journal of Sciences and Technologies of University of Burundi*, 29(1), 34-44.
- Olayossimi, A., Amidou, O., Sylvestre, A., Estelle, N., Albert, Y. (2018). Caractérisation chimique et

- physico-chimique des sols de Mamlanso à Aboisso Comoé au Sud-Est de la Cote d'Ivoire. 15ps
- Osujieke, D. N., Obasi, N. S., Imadojemu, P. E., Ekawa, M., Angyu, M. D., & others. (2018). Characterization and classification of soils of Jalingo metropolis, North-East, Nigeria. *Nigerian Journal of Soil Science*, 28, 72-80.
- Ouattara, B., Ouattara, K., Serpantié, G., Mando, A., Sédogo, M. P., & Bationo, A. (2006). Intensity cultivation induced effects on soil organic carbon dynamic in the western cotton area of Burkina Faso. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76(2), 331-339.
- Parent, L. É., & Khiari, L. (2003). *Nitrogen and phosphorus indicators of organic soil quality. Chap. 5 dans: PARENT LÉ and P. ILNICKI (Éditeurs). Organic soils and peat materials for sustainable agriculture.* CRC Press, Boca Raton, FL.
- Pouya, M. B., Bonzi, M., Gnankambary, Z., Koulinaly, B., Ouedraogo, I., Ouedraogo, J. S., & Sedogo, P. M. (2013). Perception paysanne et impact agro-pédologique du niveau de mécanisation agricole dans les zones cotonnières Centre et Ouest du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(2), 489-506.
- Rahman, M., Lee, S.-H., Ji, H. C., Kabir, A. H., Jones, C. S., Lee, K.-W., & others. (2018). Importance of mineral nutrition for mitigating aluminum toxicity in plants on acidic soils: current status and opportunities. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(10), 3073.
- Robert Harter, P. D., & émérite, P. (2007). *Les sols acides des tropiques.*
- Sanchez, P. A., & Logan, T. J. (1992). Myths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. *Myths and Science of Soils of the Tropics*, 29, 35-46.
- Sawadogo, H., Bock, L., Lacroix, D., & Zombré, N. P. (2008). Restauration des potentialités de sols dégradés à l'aide du zeamaïs et du compost dans le Yatenga (Burkina Faso). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 12(3), 279–290.
- Troeh, F. R., & Thompson, L. M. (2005). *Soils and soil fertility* (Vol. 489). Blackwell New York, USA.
- Turner, B. L. (2008). Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. *Journal of Ecology*, 96(4), 698–702.
- Uehara, G., Gillman, G., & others. (1981). *The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays.* Westview Press, Inc.
- Van Ranst, E. (1994). Rational soil management in the humid tropics. *Bulletin Des Seances Academie Royale Des Sciences d'Outre Mer.*
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423-447.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.