

## **Caractérisation de la cinétique des échanges isotopiques du phosphore et potentialités des roches naturelles phosphatées de la République Démocratique du Congo dans la fertilisation phosphorique des sols ferrallitiques**

**Raymond Lumbuenamo Sinsi<sup>1\*</sup>, Elie Nsimba Ngembo<sup>1\*</sup>, Eric Lutete Landu<sup>1</sup>, Joël Tungi Tungi<sup>1</sup> et Blandine Nsombo Mosombo<sup>1</sup>**

<sup>(1)</sup>Université de Kinshasa. Faculté des Sciences Agronomiques. Département de Gestion des Ressources Naturelles. BP 117 Kinshasa XI (RDC). E-mail : [raysinsilumbuenamo@gmail.com](mailto:raysinsilumbuenamo@gmail.com) ; [nzimbagul@yahoo.fr](mailto:nzimbagul@yahoo.fr) ; [elie.ngembo@unikin.ac.cd](mailto:elie.ngembo@unikin.ac.cd)

Reçu le 03 août 2023, **accepté** le 21 octobre 2023, **publié en ligne** le 30 décembre 2023

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v6i4.4>

---

### **RESUME**

**Description du sujet.** Les sols tropicaux, dont les sols congolais, comportent un profond complexe d'altération suite aux fortes températures et au lessivage intense auxquels ils sont soumis. Ils sont en général fortement désaturés, en plus d'être extrêmement pauvres en phosphore (P). Leurs caractéristiques physico-chimiques ainsi que la rapide perte de leur fertilité après une mise en culture constituent de sérieuses difficultés pour une production agricole soutenue. Des apports conséquents d'engrais minéraux sont nécessaires pour remédier à cet état des choses.

**Objectif.** La présente étude tente d'apporter une alternative aux engrais phosphatés, en évaluant l'aptitude de trois roches phosphatées, deux en RD Congo (Kongo-central) à savoir celles de Kanzi et Fundu et la troisième en Tunisie, la roche de GAFSA, à corriger les carences en P.

**Méthode.** L'approche isotopique, précisément celle de la dilution isotopique est celle qui a été utilisée dans cette étude. L'étude a analysé les échantillons des sols de l'hinterland de Kinshasa (Ndjili) et Mvuazi ainsi que ceux des roches phosphatées de Kanzi et Fundu. Les deux roches phosphatées ont été analysées avec une comparaison faite aux roches de GAFSA et triple superphosphate (TSP).

**Résultats.** La méthode de dilution isotopique choisie à cet effet a montré que le phosphate naturel de Kanzi dans le Kongo-central contient plus d'ions P directement assimilables dans la solution du sol ( $E_{pie1} \text{ mg P kg}^{-1} = 2270$ ) que le phosphate de GAFSA ( $E_{pie1} \text{ mg P kg}^{-1} = 976$ ) et a une cinétique isotopique égalisant le TSP.

**Conclusion.** Les roches phosphatées de Kanzi pourraient servir d'engrais phosphatés naturels.

**Mots-clés :** Phosphore, fertilisation phosphorique, dilution isotopique, roches phosphatées

### **ABSTRACT**

**Characterization of the kinetics of phosphorus isotopic exchanges and potential of natural phosphate rocks from the Democratic Republic of Congo in the phosphoric fertilization of ferrallitic soils**

**Description of the subject.** Tropical soils, including Congolese soils, have a deep alteration complex, particularly due to high temperatures and intense leaching to which they are exposed. They are generally highly desaturated, in addition of having a very low phosphorus (P) content. Their physico-chemical characteristics as well as the rapid loss of their fertility after one cultivation are serious issues for sustained agricultural production. Substantial inputs of mineral fertilizers are necessary to remedy this situation.

**Objective.** This study aims to provide an alternative to phosphate fertilizers, by evaluating the ability of tree phosphate rocks, two from Kanzi and Fundu in DR Congo and the other from GAFSA in Tunisia, to correct deficiencies in this element.

**Methods.** The isotopic approach, precisely that of isotopic dilution, is the one used in this study. The study analyzed soil samples from the hinterland of Kinshasa (Ndjili) and Mvuazi as well as those from the phosphate rocks of Kanzi and Fundu. The two phosphate rocks were analyzed with a comparison made to the rocks of GAFSA and triple superphosphate (TSP).

**Results.** The isotopic dilution method chosen for this purpose showed that natural phosphate from Kanzi in Kongo Central contains more P ions directly assimilable in the soil solution (Epie1mg Pkg-1 = 2270) than GAFSA (Epie1 mgPkg<sup>-1</sup> = 976) and has isotopic kinetics equalizing TSP.

**Conclusion:** Kanzi phosphate rocks can be used as a natural phosphate fertilizer instead of TSP.

**Keywords:** phosphorus, phosphorous fertilization, isotope dilution, phosphate rocks

## 1. INTRODUCTION

A l'heure de la transition écologique où la sécurité alimentaire doit passer par une agriculture respectueuse de l'environnement, la gestion de la fertilité des sols est un enjeu incontournable. Cela est d'autant vrai pour les sols tropicaux caractérisés par une fertilité hétérogène et peu permanente. En effet, à cause de leur intense lessivage et leur extrême oxydation, les sols tropicaux sont naturellement acides. De façon générale, dans leur variabilité et leur diversité, ces sols présentent deux principaux pôles avec de nombreux intergrades à savoir : les sols naturellement acides et les sols qui s'acidifient après une mise en culture (Turenne, 1975 ; Bazoumana, 2021).

En Afrique centrale et en République Démocratique du Congo (RDC) en particulier, ces sols sont essentiellement des sols ferrallitiques fortement déssaturés (oxisols et ultisols). Ce sont des sols à complexe d'altération profond, dont la minéralogie comporte des silicates du groupe des kaolinites, d'oxydes de fer, d'aluminium et d'autres minéraux hérités des roches mères (Brady et Weil, 2008; Van et Nachtergaele, 2003; Kasongo et al., 2021) pouvant présenter des différenciations latérales progressives ou rapides, ordonnées selon le relief (Boulet et al., 1982; Fritsch, 1984).

Ces caractéristiques physico-chimiques des sols congolais ainsi que leur perte rapide de fertilité après une seule mise en culture, constituent des séries de difficultés pour une production agricole soutenue. Cela, d'autant plus qu'à leur acidité et leur grande capacité de fixation des éléments fertilisants, s'ajoute une déficience extrême en phosphore (P) assimilable (Van, 1974 ; Batjes, 1996; Shepherd et al., 1997 ; Sanchez et al., 1997 ; Wolf, 2000 ; Chaoui et al., 2003). Pour remédier à cette situation, les agriculteurs recourent à des apports en engrais phosphatés. En effet, selon l'International Fertilizer Association (IFA, 2020), en dépit de l'augmentation de la consommation des fertilisants, en Afrique subsaharienne, 70 % entre 2009 et 2019, (une progression de 130 %) tirée notamment par l'Éthiopie et le Nigeria, ce n'est pas la consommation d'engrais phosphatés (+ 21 %) qui a le plus augmentée, mais plutôt celle d'engrais azotés (+ 27 %) et potassiques (+ 41 %). L'Afrique sub-

saharienne utilise 1,6 kg de P/ha contre 14,9 pour l'Amérique (IFA, 2020).

Les sols acides des tropiques présentent plusieurs problèmes à la production agricole dont la carence en P est l'un des plus importants (Brossard et Chapuis-Lardy, 2000 ; Compaoré et al., 2001 ; Hinsinger et al., 2020, Chevallier et al., 2020). La teneur moyenne d'un sol tropical en P est de 1 g/Kg (Collier, 1945 ; Taylor 1964) et celle de la solution du sol de +/- 0,1 mg P/Kg (Sutton et Larsen, 1964). Dans ces régions, un sol de densité 1,4 dont la teneur en P total est de 1‰ renferme 7 tonnes de phosphore par hectare dans les 50 premiers centimètres qui correspondent sensiblement à la zone procurant à la végétation herbacée 80 à 100 % de son P. Ainsi, selon Hinsinger (2001), les sols tropicaux font partie de ces 5,7 milliards d'hectares des sols à faible nutrition phosphatée. Il apparaît donc clair que cette carence en phosphore reste encore une contrainte majeure pour une production agricole adéquate, d'où la nécessité de recourir à des sources de phosphore disponibles et peu onéreuses dont les roches contenant des phosphates naturelles (PN).

Selon certains chercheurs, notamment, Fox et Kamprath (1970), et Barber (1995), une concentration de P minimum de l'ordre de 0,2 ppm dans la solution du sol était nécessaire pour une croissance optimale et généralement adéquate des plantes. Cependant, pour produire de bons rendements, la concentration de P de la solution du sol en contact avec les racines nécessite un renouvellement continu pendant le cycle de croissance (Compaoré et al., 2001) ; d'où le besoin de supplémentation en fertilisants phosphatés (Chapuis, 1997 ; White, 2001 ; Hinsinger et al., 2020).

Face à ce constat, des études sont encore menées dans des sols acides tropicaux un peu partout dans le monde pour résoudre ce problème. Des amendements, des techniques de culture, des variétés acido-résistantes, des fertilisants ont été testés à cet effet (Boyer, 1982). Cependant, le problème reste d'actualité dans plusieurs zones tropicales du monde notamment en Afrique centrale et en RDC car, à ce jour, les solutions proposées n'ont pas encore satisfait les attentes.

En outre, la RDC possède des gisements de PN dans le Kongo-Central (KC) : Fundu et Kanzi ; et le Kivu (Lueshe et Bingo) pouvant être utilisés dans les systèmes de production agricole pour améliorer la

productivité (Van-Straaten, 2007). Les minéraux phosphatés contenus dans le gisement Bingo comprennent l'apatite et la crandallite (Wambeke, 1971; Williams *et al.*, 1997). Les roches phosphatées naturelles (RPN) du KC quant à elles, appartiendraient aux apatites. L'utilisation de ces dernières, surtout celles contenant des carbonates libres (Sikora, 2002), peut significativement diminuer l'acidité du sol, minimiser la toxicité aluminique et ipso facto améliorer leur fertilité (Chien, 1977; 1978; 1987; 1997; Chien et Friesen, 2000; Kasongo *et al.*, 2010; 2021).

Ainsi, du fait de la sévérité de la déficience en P des sols, l'estimation des besoins en P des principales cultures et l'évaluation de la capacité de différents types d'engrais phosphatés dont les roches phosphatées (RP) à couvrir les besoins culturaux en cet élément, constituent une importante question de recherche. C'est dans ce cadre que cette étude se propose d'évaluer l'aptitude de trois RPN à fournir l'élément P aux cultures. Deux de ces roches sont congolaises (Kanzi et Fundu) et une est tunisienne (GAFSA), toutes évaluées, avec comparaison au triple superphosphate (TSP).

Notre étude se propose d'aborder la question sous l'angle de l'aptitude des sols et l'efficacité des sources de phosphore moins onéreuses et plus accessibles aux agriculteurs telles que les agro-minéraux, matériaux géologiques naturels contenant un ou plusieurs éléments nutritifs pour les plantes telles que les RP (Appleton, 1990; Leonardos *et al.*, 2000; Hinsinger *et al.*, 2015) pouvant, selon leur composition et dans

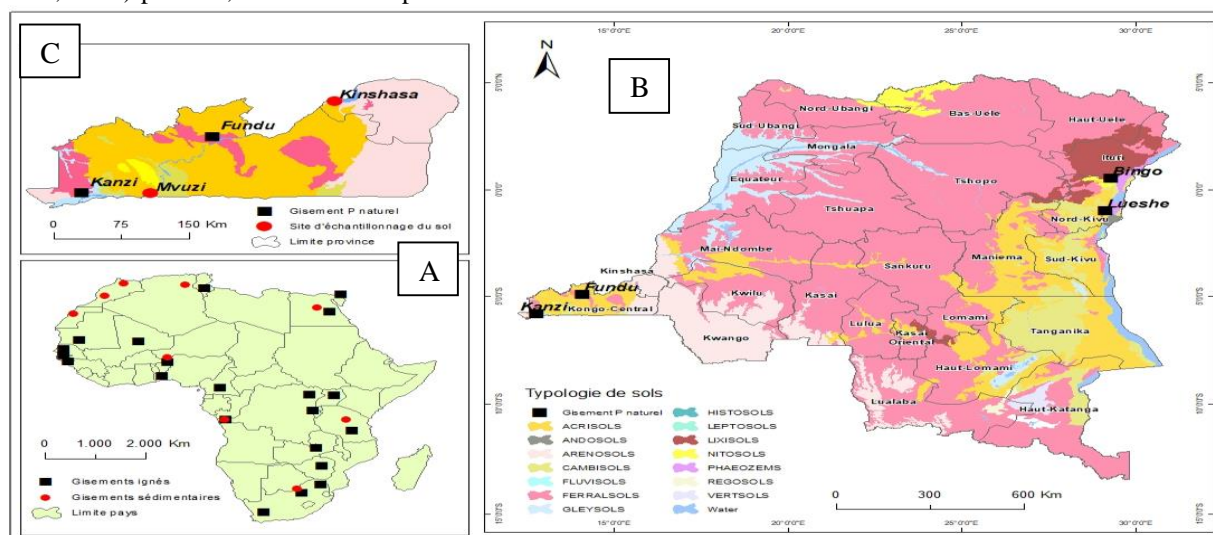
certains environnements, apporter en plus du P, des nutriments secondaires (Ca, Mg), et éventuellement certains oligoéléments (Zn, Mo) (Sinclair *et al.*, 1990; Hu *et al.*, 2004; Van-Straaten, 2007; Derungs, 2018; Mwalongo *et al.*, 2022).

L'objectif final est de caractériser RP de Kanzi et Fundu mais aussi des échantillons de sols de Mvuazi et de Kinshasa (N'djili) par la quantification du P biodisponible qu'elles contiennent. Les paramètres décrivant l'état et la mobilité des ions phosphates dans un système de solution de sol à l'état d'équilibre sont mesurés par la méthode de dilution isotopique. Cette dernière a été recommandée par la FAO (2004), Mollier *et al.*, (2019) et Liu *et al.* (2021) comme une méthode chimique et nucléaire efficace pour caractériser les éléments minéraux dans le sol (Compaoré *et al.*, 2001).

## 2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

### 2.1. Milieu d'étude

L'étude concerne les roches phosphatées de la partie Ouest de la RDC, précisément dans les sites de Kanzi et Fundu, tous deux dans la province du KC (Figure 1). Le site de Kanzi est situé dans le territoire de Moanda à 45 Km de la ville de Boma sur la route Boma-Moanda et à 70 Km de la côte atlantique (Kasongo *et al.*, 2012), et celui de Fundu est situé dans le territoire de Luozi sur la rive droite du fleuve Congo.



**Figure 1.** Localisation des gisements des phosphates (A) en Afrique, (B) en RD Congo et (C) des sites étudiés.

## Collecte des données

Les échantillons des sols ont été collectés dans les sols ferrallitiques de l'ouest de la RDC (Kinshasa et Mvuazi). Dans la ville de Kinshasa, ils ont été collectés précisément dans la commune de Ndjili (5°24'18" S and 15°22' 25" Est). Dans le KC (Territoire de Mbanza-ngungu), à 150,7 Km de Kinshasa, précisément dans la cité de Mvuazi (15° 27'50" S et 15°54'14" Est). Les échantillons de deux RPN ont été collectés dans la localité de Fundu (4° 54' 45,8" S et 14° 05' 6,1" E) et KANZI (5° 48' 49,4" S et 12° 45' 35,2" E). Le bassin (RPN) de GAFSA et le Triple Super Phosphate (TSP), réputés riches en P ont été utilisés pour des raisons de comparaison dans cette étude.

## 2.2. Mesure de la cinétique d'échanges isotopiques.

Comme mentionné plus haut, la technique d'échanges isotopiques permet la quantification des ions phosphates de chaque compartiment du sol sans avoir à les extraire (Morel *et al.*, 1991 ; Fardeau, 1993 ; Morel 2000 ; Messiga, 2010 ; Nobile, 2017). Elle permet de mesurer divers paramètres décrivant l'état et la mobilité des ions phosphates dans un système de solution de sol à l'état d'équilibre, une condition essentielle pour une interprétation correcte des données expérimentales. La Concentration du P ( $C_p$ ) mesurée par colorimétrie est invariante quel que soit le système de solution au sol. Après une injection de P radioactif sous forme de  $^{32}P$ , La relation entre la radioactivité résiduelle ( $r_t$ ) et la radioactivité initiale ( $R$ ) est une fonction de temps,  $(r_t/R) = (ft)$ , représentatif du transfert des ions phosphate depuis la solution vers la phase solide du sol. Ainsi, la mesure de la radioactivité résiduelle ( $r_t$ ) obtenue après des périodes données est définie par (Fardeau *et al.*, 1985 ; 1991 ; Wiklander, 1950 ; Morel, 2007) :

$$r_t/R = (r_1/R)[t+(r_1/R)^{1/n}]^{-n} + r_{eq}/R \quad (1) \quad \text{avec}$$

$r_t$  : Radioactivité restant dans la solution au temps  $t$  min ;

$r_1$  : Radioactivité restant dans la solution après une minute ;

$r_{eq}$  : Radioactivité à l'équilibre ;

$R$  : Radioactivité injectée (initiale) ;

$E_{pie1}$  : Quantité de P isotopiquement échangeable en 1 min ;

$E_{pie}$  : Quantité de phosphore isotopiquement échangeable en  $t$  minutes

A l'équilibre, le rapport de la quantité de traceur à celle de l'élément tracé, c'est-à-dire la radioactivité spécifique (RAS) est le même en tout point du système. Ainsi, la RAS des ions phosphates présents dans la solution de sol ( $P_s$ ) est égale à  $r_t/P_s$ . Dans un mélange sol-solution de rapport 1/10,  $P_s = 10 C_p$  et  $r_{eq}/R = 10 C_p/PMT$  (Phosphore Minérale Total). Il convient de noter le fait que pour les terres à pouvoir fixateur très élevé comme les sols ferrallitiques du Congo, les termes correctifs  $(r_1/R)^{1/n}$  et  $r_{eq}/R$  n'influencent sérieusement la valeur de  $(r_t/R)$  que dans l'espace de temps situé entre 1 min et 1 an (Fardeau *et al.*, 1985). De ce fait, pour la majorité des échantillons de sols cultivés (Wiklander, 1950; Fardeau *et al.*, 1991 ; Nishanth & Biswas, 2008; Zarrabi *et al.*, 2014 ; Chen *et al.*, 2016), la formule précédente (1) peut être remplacée par la formule simplifiée (2) :

$$r_t / R = (r_1/R)^{t-n} \quad (2)$$

Ainsi, le P échangeable ( $E_t$ ) à l'instant ( $t$ ) dans l'échantillon peut être calculé selon la relation ci-après :

$$E_t = (10C_p) R/r_t \quad (3)$$

$C_p$ ,  $r_1$ ,  $n$  et  $P_s$  étant des paramètres spécifiques à chaque sol.

Les paramètres de la cinétique des échanges isotopiques ont été comparés d'abord entre deux échantillons de sols ferrallitiques de la RDC (M'vuazi et N'djili) puis entre deux échantillons des RPN comparés à leur tour aux deux autres RP, à savoir le TSP et le GAFSA.

## 3. RÉSULTATS

Le tableau 1 ci-dessous compare les résultats de la dilution isotopique du P (ions phosphates) effectuée sur les échantillons des sols (N'djili et Mvuazi). Les résultats assignés dans ce tableau montrent que la série de Mvuazi a le meilleur facteur d'intensité, concentration d'ions phosphates dans la solution du sol :  $C_p = 0,015$  mg/l pour Mvuazi contre à 0,008 mg/l pour N'djili, soit environs deux fois plus de P dans la solution du sol comparée à la série N'djili. Toutefois, les deux sols semblent avoir la même capacité de fixation ( $r_1/R$ ) : 0,17 mg/kg pour Mvuazi et 0,18 pour Ndjili.

**Tableau 1.** Comparaison des paramètres caractéristiques de la cinétique d'échanges isotopiques du P dans les échantillons des sols de Mvuazi et N'djili

Echantillons des sols	$C_p$ (mg l <sup>-1</sup> )	$r_1/R$	$E_{pie1}$ (mg P kg <sup>-1</sup> )	$E_{pie1}/C_p$
Kinshasa	0,008	0,18	0,44	55

Mvuazi	0,015	0,17	0,86	57
--------	-------	------	------	----

Dans le tableau 2 ci-dessous sont comparées les caractéristiques de la cinétique d'échanges isotopiques du P des RPN de la RDC (Kanzi et Fundu) avec celles des TSP et GAFSA.

**Tableau 2.** Paramètres caractéristiques de la cinétique d'échanges isotopiques du P des échantillons des RPN de la RDC (Kanzi et Fundu) comparés à celles de GAFSA et TSP

Echantillons des roches	C <sub>p</sub> mg l <sup>-1</sup>	r <sub>1</sub> /R	E <sub>pie1</sub> mg P kg <sup>-1</sup>	E <sub>pie1</sub> /C <sub>p</sub>
PN Kanzi	7934	0,035	2270	0,28
PN Fundu	5343	0,032	1670	0,31
GAFSA	1855	0,019	976	0,53
TSP	8963	0,040	2241	0,25

Il ressort de ce tableau que les roches de Kanzi et Fundu affichent les bonnes caractéristiques des échanges isotopiques du P souvent supérieures à GAFSA (reconnue pour sa grande solubilité) ou parfois mieux qu'au TSP. Il apparaît en effet que des trois roches (Kanzi, Fundu, GAFSA), Kanzi présente le meilleur facteur d'intensité ( $C_p = 7934 \text{ mg/l}$ ) face au  $5343 \text{ mg/l}$  pour Fundu et  $1855 \text{ mg/l}$  pour GAFSA. La plus grande valeur  $8963$  est trouvée pour le TSP. Seul le TSP présente une plus grande valeur de  $C_p$  par rapport à Kanzi. De plus, la même roche Kanzi contient la quantité la plus élevée d'ions P directement assimilables dans la solution du sol ( $E_{pie1} \text{ mg P kg}^{-1} = 2270$ ) que toutes les autres roches y compris le TSP :  $2241$  pour TSP,  $1670$  pour Fundu et  $976$  pour GAFSA. Les deux RPN de la RDC présentent une grande valeur de P assimilable que la roche Tunisienne de GAFSA. Le ratio  $r_1/R$  est élevé pour le TSP ( $0,040$ ), suivi de Kanzi ( $0,035$ ), Fundu ( $0,032$ ) et enfin de GAFSA ( $0,019$ ). La part de la quantité de P isotopiquement échangeable ( $E_{pie1}/C_p$ ) est élevée pour GAFSA ( $0,53$ ) suivi de Fundu ( $0,31$ ), Kanzi ( $0,28$ ) et enfin TSP ( $0,25$ ). La valeur la plus élevée de GAFSA est expliquée par le fait que même si ce dernier a un échange isotopique faible (par rapport aux autres), mais son échange isotopique correspond à la moitié de son facteur d'intensité (concentration du P, également faible par rapport aux autres). On peut en déduire qu'avec GAFSA, l'échange isotopique sera rapide, mais le stock du P est faible. On peut enfin dire que les RPN de la RDC présentent un très bon profil sur la disponibilité du P devant le GAFSA et quelques fois devant le TSP ; et constitue de ce fait, une bonne alternative pour la fertilisation phosphorée face au GAFSA premièrement, et deuxièmement, face au TSP.

## 4. DISCUSSION

### 4.1. De la particularité de notre étude et comparaison de nos résultats

Les résultats sur la cinétique des échanges isotopiques du P dans les deux sols ferrallitiques de la RDC, s'accordent bien aux résultats obtenus dans les études précédentes. En effet, Brossard et Chappuis-lardy (2000) ont présenté une valeur moyenne de  $E_{pie1}(\text{mg/kg})$  de P de  $0,64$  pour les sols ferrallitiques tropicaux alors que nous avons des valeurs variant entre  $0,44$  (Kinshasa) et  $0,88$  (Mvuazi). Les valeurs similaires ont été aussi trouvées par Compaoré *et al.*, (2001) dans les sols ferrallitiques de Burkina-Faso.

Les roches de Kanzi ont déjà fait l'objet d'une étude sur leurs capacités à la fertilisation phosphorique par Kasongo *et al.*, (2010). Ces derniers ont procédé par diverses analyses des propriétés physico-chimiques pour évaluer les capacités fertilisantes de ces roches. A la différence, l'apport de notre étude est que nous procédons par une approche isotopique pour réaffirmer cette capacité fertilisante des roches de Kanzi mais aussi de Fundu. Le traçage isotopique constitue une approche radio-isotopique efficace pour évaluer la phytodisponibilité du P (FAO, 2004). En outre, Compaoré *et al.*, (2001) ont mis en évidence que la part du P isotopiquement échangeable est facilement assimilable par les plantes cultivées.

Les valeurs de la  $r_1/R$  trouvées pour les roches Fundu ( $0,32$ ) et Kanzi ( $0,35$ ) sont bien supérieures aux valeurs trouvées dans le sol des maraichages fertilisés en P naturel en Martinique (Brossard *et al.*, 1988) qui avait une valeur supérieure autour de  $0,16$ . La quantité élevée de P isotopiquement échangeable dans les roches de Kanzi et Fundu permettent de garantir une fertilisation dans le sol car selon Compaoré *et al.*, (2001) une quantité minimale de  $5 \text{ mgP/kg}$  est suffisante pour que le P ne soit plus un facteur limitant pour les plantes.

De ce fait, les roches des Kanzi et Fundu sont bien placées pour couvrir ce gap en P pour les roches de Kinshasa (0,44 mgP/kg) et Mvuazi (0,88 mg/Kg) avec des valeurs inférieures à cette référence. Ainsi, les roches de Kanzi et Fundu peuvent bien être utilisées dans la fertilisation des sols ferrallitiques de l'Afrique de l'Ouest où une étude de Compaoré *et al.* (2001) sur 28 échantillons au Burkina-Faso a donné une valeur moyenne de  $E_{pie1}$  de 1,16 mgP/kg avec un maximal de 16,10 sur un écart-type de 3,20. Dans ce sol, seul le TSP a été utilisé, considéré comme un fertilisant efficace en P (Compaoré, 1997 ; 2001). Cependant, nos résultats montrent des bons indicateurs pour les roches de Fundu et Kanzi, faisant de ces deux roches des alternatives à exploiter comme fertilisants naturels phosphatés. Les résultats trouvés présentent les bonnes caractéristiques des échanges isotopiques des roches de Kanzi et Fundu face aux roches naturelles de Kodjari présentées par Compaoré *et al.*, (1997) comme alternatives au TSP. Etudiant, l'effet des résidus des légumineuses et fumier sur la phytodisponibilité du P, Randriamanantsoa *et al.* (2013) ont trouvé des valeurs bien inférieures de  $E_{pie1}$  et de  $r1/R$  que celles trouvées dans cette étude. Toutes ces comparaisons viennent mettre en lumière les potentialités de la roche de Kanzi et Fundu comme fertilisants phosphoriques.

Ces résultats rejoignent ceux de Kasongo *et al.* (2010, 2012) qui avait montré que la RP de Kanzi (2270 mgP/kg) peut servir de fertilisant naturel en utilisation directe pour des sols acides sous climats tropicaux alors que cette perspective est plutôt réduite pour la roche Fundu avec 1670 mgP/kg. Il est à noter aussi qu'il existe peu d'études disponibles sur les traçages isotopiques du P dans les sols agricoles du bassin du Congo.

#### 4.2. Facteurs influençant la cinétique des échanges isotopiques du système sol-solution

L'échange isotopique dans le système sol-solution est dynamique et il est fonction de la globalité des paramètres qui influencent la chimie et la biologie du système sol-solution (Achat, 2009). Cette étude n'a pas abordé ces paramètres pour des raisons logistiques et matérielles. Brossard *et al.* (1988) ont étudié l'effet de la granulométrie (fractionnement organique) et de la teneur en matière organique (effet du processus de minéralisation) du sol sur la cinétique des échanges isotopiques du P avec différents types des sols. Morel et Denoroy (2020) ont démontré que la même quantité de P appliquée sur différents types de sol a produit différents taux de transfert. Parmi tant d'autres facteurs, Compaoré *al.* (2001) ainsi que Morel et Denoroy (2020), ont présenté précisément le pH et les propriétés acido-basiques comme des aspects phares à considérer. Différents traitements (compostage, la

labour, ...) appliqués au sol peuvent impacter les échanges isotopiques du système-sol-solution (Compaoré *et al.*, 2001 ; Renesson, 2021). Dans cet ensemble, la teneur en d'autres nutriments comme le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le potassium (K) est aussi à prendre en compte (Morel, 2011 ; Bel, 2021).

#### 4.3. De la biodisponibilité du P

Le P biodisponible du sol n'est pas un ensemble homogène, mais plutôt pluri-compartmental dans lequel il existe des compartiments de mobilité et donc de biodisponibilité très diverse (Fardeau, 1993 ; Hisinger *et al.*, 2015). C'est un ensemble hétérogène d'ions liés à la matrice du sol, pouvant gagner la solution du sol en des temps variables allant de quelques secondes à plusieurs années selon les conditions du milieu biophysique (El Mazlouzi *et al.*, 2022). En moyenne, la solution du sol contient entre 0,1 et 3,7 kg  $P_2O_5$ /ha. Les plantes absorbent principalement les ions phosphates sous la forme de  $H_2PO_4^-$  et  $HPO_4^{2-}$  (Messiga *et al.*, 2010). Le P dans le sol est en forte interaction avec la phase solide et forme divers composés des minéraux secondaires avec Ca, Fe (Fer), Mn (Manganèse), Al (Aluminium). La quantité de P biodisponible est caractérisée (Grant *et al.*, 2005), à la fois, par la concentration induite en solution, l'intensité de la variation de cette concentration en fonction des facteurs pédoclimatiques, ainsi que les variations de ces facteurs imposées par les organismes vivants, notamment, la plante (Schneider et Morel, 2000). L'absorption des ions phosphates par les racines des plantes crée un gradient de concentration entre la solution et la matrice du sol. Un mouvement de transfert d'ions se produit vers les zones de faible concentration notamment autour de la surface racinaire, pendant qu'un mouvement d'ions « phosphate » lié à la désorption du P au niveau de la phase solide du sol approvisionne la solution du sol par diffusion (Lajtha and Harrison, 1995 ; Morel, 2007 ; White & Hammond, 2008 ; Hallama *et al.*, 2019). Cette étude n'a pas abordé la question de la biodisponibilité et de l'utilisation de phosphore par les cultures agricoles tropicales. Ces derniers restent encore une voie des recherches à exploiter, car le P constitue un des principaux facteurs limitants dans les agrosystèmes aux sols ferrallitiques.

La contrainte édaphique de la faible disponibilité du P entraîne directement des répercussions sur des rendements des cultures. Le caractère non renouvelable et fini des gisements de phosphates naturels utilisés pour fabriquer les engrais phosphatés incitent à l'augmentation des prix des fertilisants minéraux (Brunelle *et al.*, 2015). Les paysans n'ont pas

assez de moyens à consacrer à l'achat d'engrais. Cependant, les engrais sont indispensables pour enrichir les sols ferrallitiques de la RDC, pauvres en phosphate. Le P favorise l'enracinement précoce, la santé des végétaux et l'abondance des récoltes. Sans le P, les récoltes sont chiches, les plants s'étiolent et les feuilles des cultures prennent une coloration anormale. Par ailleurs, la fertilisation par l'apport de la roche phosphorée disponible localement se montre un moyen écologiquement durable et très efficace. Ainsi, nous pensons que l'usage de la RP améliorerait la qualité nutritionnelle des sols ferrallitiques de la RDC et cela aurait des effets positifs sur les rendements agricoles des paysans.

#### **4.4. Apport de l'analyse isotopique sur l'évaluation de la demande et de l'utilisation de P**

Le traçage isotopique est à ce jour l'une des méthodes les plus efficaces d'analyse chimiques dans les écosystèmes (Gibon *et al.*, 2015 ; Liu *et al.*, 2021 ; Wang *et al.*, 2022) et les organismes vivants. Il est utile dans la compréhension de la chimie du sol, précisément dans la compréhension des échanges sol-solution-plante (Ganry, 1990 ; Morel 2000 ; Messiga, 2010 ; Morel, 2015). Mollier *et al.* (2019) ont mis en évidence l'apport de la dilution isotopique dans l'analyse de la variation de la teneur en P dans les sols tropicaux. L'approche isotopique (Ishida *et al.*, 2022) permet de comprendre la spéciation chimique du P et la phytodisponibilité de ce dernier dans les échanges (Messiga, 2010). Le rapport isotopique du P dans les différentes parties des plantes (feuilles, racines, etc.) pourrait mieux informer sur son utilisation et son origine.

Dans plusieurs études, la méthode des cinétiques d'échanges isotopiques donne des résultats relativement fiables sur la concentration en P de la solution du sol, l'aptitude du sol à tamponner les variations de teneur en P dans la solution du sol et la quantité de P pouvant arriver dans la solution à moins de trois mois (Fardeau, 1993 ; Gerster, 1971 ; Compaoré *et al.*, 2001, Frossard *et al.*, 2010). La méthode isotopique, utilisée depuis les années 1940 (Wiklander, 1950), fait appel aux isotopes radioactifs du P ; elle rend possible le suivi du déplacement du P dans les systèmes sol-eau ou sol-eau-plante. La méthode isotopique permet le suivi des échanges de P entre le sol et la solution en perturbant le moins possible le système étudié (Frossard *et al.*, 2004).

#### **4.5. De la fertilisation phosphorique face à la sécurité alimentaire**

Le P est un élément clé pour la sécurité alimentaire mondiale, car il conditionne la qualité et la quantité de

la production agricole (FAO, 2015 ; Wang *et al.*, 2023). Face à une population mondiale galopante, les besoins des terres arables et la nécessité de la sécurité alimentaire, la résilience agricole et nutritionnelle va s'imposer de plus en plus. En plus, face aux besoins en fertilisants grandissants, il importe de réfléchir sur les moyens de rassurer la disponibilité des éléments minéraux rares dans les sols comme le P. La croissante demande des céréales à l'échelle mondiale est étroitement liée à l'augmentation de la demande des trois produits minéraux principaux (azote (N), P, et K). Le P joue un grand rôle nutritionnel pour les plantes car son utilisation efficace influence l'utilisation d'autres intrants dans le long terme, notamment N (Mollier *et al.*, 2019). Cependant, il faudrait encore renforcer la compréhension de la teneur en P dans le rendement spécifique de certaines cultures et espèces végétales. Car toute chose restant égale par ailleurs, l'historique du sol (Mollier *et al.*, 2019), mieux l'historique de la fertilisation du sol (Nobile *et al.*, 2018) est un facteur indéniable dans la qualité et la quantité de la production agricole.

### **5. CONCLUSION**

Dans un contexte de garantir une production agricole durable, cette étude a visé à révéler les potentialités des RPN de la RDC dans la fertilisation phosphorique des sols ferrallitiques. La technique de dilution isotopique utilisée a permis d'apprécier la disponibilité du P dans deux échantillons des sols de l'hinterland de Kinshasa ainsi que des RP du KC.

Ce modèle d'analyse compartimentale nous a montré que la Roche Kanzi avec ses 2270 milligrammes d'ions P directement assimilables dans la solution du sol, se prête bien à une utilisation directe en culture. Quant aux échantillons des sols, la forte capacité de fixation du sol de Mvuazi peut être attribuable à sa richesse en sesquioxyde de Fe et d'Al alors que la texture plutôt sablonneuse de sol de N'djili pourrait se justifier par une forte présence d'ions d'Al ou de Fe amorphe.

Cette étude ouvre une brèche d'approfondissement des recherches sur la chimie des sols tropicaux et son incidence dans les échanges sol-atmosphère-plante en utilisant des traceurs isotopiques. Nous ouvrons en même temps une brèche sur les études de faisabilité de l'exploitation industrielle des roches de Kanzi et Fundu pour la production des engrais.

De tout ce qui précède, les prochaines recherches peuvent s'orienter sur : (i) L'efficacité de l'utilisation de P par les cultures vivrières des sols tropicaux précisément dans la zone d'étude Mvuazi ou N'djili avec une fertilisation par les RP de Kanzi et Fundu.

Les recherches peuvent bien s'étendre dans les autres sols de la RDC ; (ii) la répétition des analyses faites dans cette étude avec plusieurs essais et gradients (climatiques, topographiques...) afin de ressortir d'autres sources des variabilités ; (iii) l'analyse de la dilution et de la diffusibilité des ions phosphates dans les sols de Mvuazi et N'djili ; et enfin, (iv) l'analyse de la disponibilité rhyzosphérique du P.

## Références

Achat D., 2009. Biodisponibilité du phosphore dans les sols landais pour les peuplements forestiers de pin maritime. Thèse Présentée à l'Université De Bordeaux, 291 p.

Appleton J.D., 1990. Rock and mineral fertilizers. *Appropriate Techn.*, 17, 25-27.

Armstrong R.D., Helyar K.R. & Prangnell R., 1993. *Plant and Soil*, 15, 279-287.

Barber S.A., 1995. *Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach*. 2nd Ed. John Wiley, New York, 432 p.

Batjes N.H., 1996. A characterization of ferralsols using the wise database in *Kauffman J.H. ed. National Soil Reference Collections and Databases (NASREC)*, 2, 56-74.

Bazoumana K., 2021. *Caractérisation de l'acidification des sols et gestion de la fertilité des agrosystèmes cotomiers au Burkina*. Thèse de doctorat : Université de Ouagadougou, 183 p.

Bel J., 2021. *Biodisponibilité du calcium, magnésium et potassium dans les sols forestiers : Quantification, traçage et caractérisation des sources biodisponibles par dilution isotopique stable ( $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  et  $K^+$ )*. Thèse de doctorat : Université de Lorraine. France, 296 p.

Boulet R., Humbel F-X & Lucas Y., 1982. Analyse structurale et cartographie en pédologie II - Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelle des couvertures pédologiques. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Pédol.*, XIX(4), 333-339.

Boyer J.S., 1982. Plant Productivity and Environment. *Science*. *Revue* ??????????, 218(4571), 443-448. doi:10.1126/science.218.4571.443

Brady N.C. & Weil R.R., 2008. *The Nature and Properties of Soils*. 14<sup>e</sup> ed. Upper Saddle River, N.J. Pearson-Prentice Hall, 965 p.

Brossard M., Fardeau J.C, Monteau J.P. & Laurent J.Y., 1988. Matière organique et mobilité du phosphore dans quelques types de sols. *ORSTOM*, 28 p.

Brossard M. & Chapuis-Lardy L. 2000. Quelques aspects récents de la fertilité du phosphore des sols tropicaux. *Enregistrement scientifique n° : 569. Symposium n° : 13 B. présentation : oral - invit.* 8 p. <https://horizon.documentation.ird.fr/exl->

[doc/pleins\\_textes/pleins\\_textes\\_6/divers1/010025602-078.pdf](doc/pleins_textes/pleins_textes_6/divers1/010025602-078.pdf) consulté le 06.08.2023.

Brunelle T., Dumas P., Souty F. & Dorin B., 2015. Evaluating the impact of rising fertilizer prices on crop yields. *Agric. Economics*, 46, 653-666.

Chapuis Lardy L., 1997. Réserves et formes du phosphore de sols ferrallitiques sous végétation naturelle de Cerrados et sous pâturage (Brésil). Stabilité du phosphore organique. Thèse de doctorat : Université de Paris VI, 247 p.

Chapuis-Lardy L., R. Ramiandrisoa R.S., Randriamanantsoa L., Morel C., Rabeharisoa L. & Blanchar E., 2009. Modification of P availability by endogenic earthworms (Glossoscolecidae) in Ferralsols of the Malagasy Highlands L. *Biol Fertil Soils*, 2009, 45, 415-422.

Chaoui H.I., Zibilske L.M. & Ohno T., 2003. Effects of earthworm casts and compost on soil microbial activity and plant nutrient availability. *Soil Biol. Biochem.*, 35, 295-302. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00279-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00279-1)

Chen M., Ding S., Liu L., Xu D., Gong M., Tang H. & Zhang C., 2016. Kinetics of phosphorus release from sediments and its relationship with iron speciation influenced by the mussel (*Corbicula fluminea*) bioturbation. *Science of the Total Environment*, 542, 833-840.

Chevallier T., Razafimbelo T. M., Chapuis-Lardy L. & Brossard M., 2020. *Carbone des sols en Afrique. Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles*. Rome/Marseille, FAO/IRD, 268 p. <https://doi.org/10.4060/cb0403fr>

Chien S.H. & Hammond L.L., 1978. A comparison of various laboratory direct application. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42, 1758-1760.

Chien S.H. & Friesen D.K., 2000. Phosphate fertilizers and management for sustainable crop production in tropical acid soils. In *IAEA, ed. Management and conservation of tropical acid soils for sustainable crop production*. IAEA-TECDOC-1159. Vienna, pp. 73-89.

Chien S.H., 1977. Dissolution of phosphate rocks in a flooded acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41, 1106-1109.

Chien S.H., Hammond L. & Leon L.A., 1987. Long term reactions of phosphate rocks with an oxisol. in *Colombia. Soil Sci.*, 144, 257-265.

Collier J., 1945. United states indian administration as a laboratory of ethnic relations." *Social Research*, vol. 12(, no. 3), 1945, 265-303. *JSTOR*, <http://www.jstor.org/stable/40982119>. Accessed 5 June 2023.

Compaoré, E., Fardeau, J.-C., Morel, J.-L. & Sedogo, M. P., 2001. Le phosphore biodisponible des sols : une des clés de l'agriculture durable en Afrique de l'Ouest. *Cahiers Agricultures*, 10(2), 81-85. Consulté à l'adresse <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/30283>, le 07 août 2023 à 07:23



- Compaoré, E., Grimal, J.-Y., Morel, J.-L. & Fardeau J.-C. 1997. Efficacité du phosphate naturel de Kodjari (Burkina Faso). *Cahiers Agricultures*, 6(4), 251–255 (1). Consulté à l'adresse <https://revues.cirad.fr/index.php/cahiers-agricultures/article/view/30015>, le 07 août 2023 à 07:25
- Derungs N., 2018. La gestion durable des sols agricoles : sécuriser les démarches ou légitimer les controverses ? L'exemple des politiques agroenvironnementales autour de l'érosion hydrique des sols arables en Suisse. Thèse de doctorat : Université de Neuchâtel, 388 p.
- El Mazlouzi M. Morel C., Robert T., Chesseron C., Salon C., Cornu J.-Y. & Mollier A., 2022. The dynamics of phosphorus uptake and remobilization during the grain development period in durum wheat plants. *Plants* 2022, 11, 1006. <https://doi.org/10.3390/plants11081006>
- FAO, 2004. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. Rome, Italie. Une publication conjointe de la division de la mise en valeur des terres et des eaux de la FAO et de l'Agence internationale de l'énergie atomique, 173 p.
- FAO, 2015. Statistical pocketbook world food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2015.236p.
- Fardeau J. C., 1993. Available soil phosphate. Its representation by a functional multiple compartmental model. *Agronomie*, 13, 317-331.
- Fardeau J. C., Morel C. & Boniface R., 1988. Phosphore assimilable des sols. Quelle méthode choisir en analyse de routine. *Agronomie*, 8, 577-584.
- Fardeau J. C., Morel C. & Jappe J., 1985. Cinétique d'échange des ions phosphate dans les systèmes sol-solution. Vérification expérimentale de l'équation théorique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t 300. Série III 8, 371-376.
- Fardeau, J. C., Morel C. & Boniface R., 1991. Cinétiques de transfert des ions phosphates du sol vers la solution : paramètres caractéristiques. *Agronomie*, 11, 787-797.
- Fox R.L. & Kamprath, E.J., 1970. Phosphate Sorption Isotherms for Evaluating the Phosphorus Requirement of Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 34, 902-907. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400060025x>
- Fritsch E., 1984. Les transformations d'une couverture ferrallitique en Guyane Française. Thèse de Doctorat : Université de Paris VII, ORSTOM-Paris, 196 p.
- Frossard E., Achat D. L., Bernasconi S. M., Bünemann E. K., Fardeau J.-C., Jansa J., Morel C., Rabeharisoa L., Randriamanantsoa L., Sinaj S., Tamburini F. & Oberson A., 2010. The Use of Tracers to Investigate Phosphate Cycling in Soil/Plant Systems. In *Phosphorus in Action – Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling*. Bünemann EK., Oberson A, Frossard E (Eds.). Springer Soil Biology series, pp. 59-91.
- Frossard E., Julien P., Neyroud J-A & Sinaj S., 2004. Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. *Cahier de l'environnement* n° 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 p.
- Ganry F., 1990. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Sciences de la Terre. Thèse de doctorat : Université Henri Poincaré - Nancy 1. 366 p.
- Gerster R., 1971. Essai d'interprétation des cinétiques d'échange isotopique entre C<sup>18</sup>O<sub>2</sub> et eau d'une feuille: Expériences à l'obscurité. In *Planta*, ed. Springer, 97(2), 155-172.
- Gibon A., Ladet S. & Balent G., 2015. L'analyse intégrée de la gestion des agroécosystèmes dans les territoires en référence aux services écosystémiques attendus des paysages. *Fourrages*, 222, 93-102.
- Grant C., Bittman, S., Montreal M., Plenchette C. & Morel C., 2005. Soil and fertilizer phosphorus: Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Can. J. Plant Sci.*, 85, 3–14.
- Hallama M., Pekrun C., Lambers H. & Kandeler E., 2019. Hidden miners: the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant and Soil*. 434, 7-45. 10.1007/s11104-018-3810-7.
- Hinsinger P. Ndour P., Becquer T, Chapuis-Lardy & Masse P., 2020. Les enjeux liés au phosphore dans les sols tropicaux. In *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens*, pp. 329-341. <https://books.openedition.org/irdeditions/24333?lang=fr>
- Hinsinger P., 2001 – Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. *Plant Soil*, 237, 173-195.
- Hinsinger P., Herrmann L., Lesueur D., Robin A., Trap J., Waithaisong K. & Plassard C., 2015. Impact of roots, microorganisms, and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere. *Ann. Plant Rev.*, 48, 377-408.
- Hu Z., Richter H., Sparovek G. & Schnug E., 2004. Physiological and Biochemical. *Effects of Rare Earth Elements on Plants and Their Agricultural Significance : A Review*, Journal of Plant Nutrition Volume 27, 2004 - Issue 1, 183-200. <https://doi.org/10.1081/PLN-120027555>
- IFA (International Fertilizer Association) , 2020. *Annual report 2019. International Fertilizer Association*. Paris, . 16 p. [https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2020\\_IFA\\_-Annual\\_Report\\_2019\\_Public.pdf](https://www.fertilizer.org/wp-content/uploads/2023/01/2020_IFA_-Annual_Report_2019_Public.pdf) consulté le 02 juillet 2023.
- Ishida T., Kamiya H., Uehara Y., Kato T., Sugahara S., Onodera SI, Ban S., Paytan A., Tayasu I. & Okuda N., 2022. A new method for phosphate purification for oxygen isotope ratio analysis in freshwater and soil extracts using solid-phase extraction with zirconium-loaded resin. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 30, 36(22), doi:

- 10.1002/rcm.9384.  
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36029176/>
- Kasongo K. R., E. Van Ranst, A. Verdoodt, P. Kanyankogote & G. Baert., 2010. Roche phosphatée de Kanzi comme engrais à propriété amendante pour des sols sableux de l'Hinterland de Kinshasa (RD Congo). *Etude et Gestion des Sols*, 17(1), 47-58.
- Kasongo K. R., Kanyankogote M.P., Disa D.P., Baert G. & Van R.E., 2021. Amélioration des Propriétés de charge de surface des sols fortement altérés de l'Hinterland de Kinshasa par application de la dolomie rose de Kimpese et de la Parche de Café. *Congo Sciences*, 2410-4299, 17-32. <http://www.congosciences.cd>
- Kasongo R. K., Van Ranst, E., Kanyankogote, P., Verdoodt, A. & Baert, G., 2012. Réponse du soja (Glycine max) à l'application de phosphate de Kanzi et de dolomie rose de Kimpese sur sol sableux en RD Congo. *Canadian journal of soil science*, 92(6), 905-916.
- Lajtha K. & Harrison A. F., 1995. Strategies of phosphorus acquisition and conservation by plant species and communities. In H Tiessen, ed, *Phosphorus in the Global Environment*. John Wiley and Sons, Chichester, UK, pp. 140-147.
- Leonardos O.H., Theodora S.H. & Assad M.L., 2000. Remineralization for sustainable agriculture: A tropical perspective from a Brazilian viewpoint. *Nutr. Cycling Agroecosys.*, 56, 3-9.
- Liu Y., Wang J., Chen J., Jin Z, Ding S. & Yang X., 2021. Method for phosphate oxygen isotopes analysis in water based on in situ enrichment, elution, and purification. *Journal of Environmental Management*, 279 (2021) 111618. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111618>
- McGill W.B. & Cole C.V., 1981. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 26, 267-286.
- Meals DW., Cassell E.A., Hughell D., Wood L., Jokela W.E. & Parsons R., 2008. Dynamic spatially explicit mass-balance modeling for targeted watershed phosphorus management I. Model development. *Agr. Ecosys. Environ.*, 127, 189-200.
- Mehlich A., 1984. A modification of Mehlich 2 extradant. *Comm. Soil Sci. Plan.* 15, 1409-1416.
- Messiga A.J., 2010. Transferts du phosphore dans les sols de grandes cultures. Thèse de doctorat : Université Laval, .240 p.
- Messiga A.J., Ziadi, N., Morel C. & Parent L-E., 2010. Soil phosphorus availability in no-till versus conventional tillage following freezing and thawing cycles. *Can. J. Soil Sci.*, 90, 419-428.
- Mollier A., Denoroy P. & More C., 2019. Évaluation de la disponibilité et gestion du phosphore dans les agrosystèmes : avancées scientifiques et techniques. *La revue de l'association française d'agronomie*, volume 9, 87-97.
- Morel C. & Fardeau, J.C., 1991. Phosphorus bioavailability of fertilizers: a predictive laboratory method for its evaluation. *Fertilizer Research*, 28, 1-9.
- Morel C., 2002. Caractérisation de la phytodisponibilité du P du sol par la modélisation du transfert des ions phosphates entre le sol et la solution. Habilitation à diriger des Recherches : INPL-ENSA-IA Nancy 80 p.
- Morel C. & Denoroy P., 2020. Disponibilité du phosphore du sol pour les plantes cultivées et statut acido-basique. *Journée technique " pH et fertilité des sols ", Comifer 28 octobre 2020 visioconférence, Oct 2020, distanciel, France.* 23 p.
- Morel C., 2007. Mobilité et biodisponibilité du phosphore dans les sols cultivés : mécanismes, modélisation et diagnostic. *Océanis*, 33, Vr. 51-74.
- Morel C., 2015. L'apport du traçage isotopique dans l'étude et l'analyse du transfert du phosphore dans les systèmes sol-solution-plante. *Séminaire de l'UMR Eco&Sols « Traceurs isotopiques pour l'étude des transferts de nutriments dans les agroécosystèmes »*, Jan 2015, France.(hal-02796631)
- Morel C. & Plenchette C., 1994. Is the isotopically exchangeable phosphate of a loamy soil the plant available P? *Plant Soil*, 158, 287-297.
- Morel C., Butler F., Castillon P., Champolivier L., Denoroy P., Duval R., Hanocq D., Kouassi A.S., Kvarnström E., Messiga A., Metraillie M., Rabeharisoa L., Rabourdin N., Raynal C., Savoie T., Sinaj S., & Ziadi N., 2011. Gestion à long terme de la dynamique du phosphore dans les sols cultivés. 10èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, COMIFER-GEMAS, Reims, 23-24 novembre 2011.
- Morel C., Fardeau J-C. & Boniface R., 1991. Cinétique de transfert des ions phosphates du sol vers la solution du sol : paramètres caractéristiques. *Agronomie*, 11(9), 787-797.
- Morel C., Tunney H., Plénet D. & Pellerin S., 2000 - Transfer of phosphate ions between soil and solution. Perspectives in soil testing. *J. Env. Qual.*, 29, 50-59.
- Mwalongo, D.A., Haneklaus, N.H., Lisuma, J.B. et al., 2022. Uranium in phosphate rocks and mineral fertilizers applied to agricultural soils in East Africa. *Environ Sci Pollut Res* 30,33898–33906. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24574-5>
- Newman, E. I., 1995. Phosphorus inputs to terrestrial ecosystems. *Journal of Ecology*, 83,713-726.
- Nishanth D. & Biswas D.R., 2008. Kinetics of phosphorus and potassium release from rock phosphate and waste mica enriched compost and their effect on yield and nutrient uptake by wheat (*Triticum aestivum*). *Bioresource technology*, 99(9), 3342-3353.
- Nobile C., 2017. Phytodisponibilité du phosphore dans les sols agricoles de la Réunion fertilisés sur le long-terme avec des résidus organiques : la dose d'apport est-elle le seul

- déterminant à prendre en compte? Thèse de doctorat en sciences agricoles : Université de la Réunion, 183 p.
- Nobile C.M., Bravin M.N., Tillard E.T., Becquer T. & Paillat J.-M., 2018. Phosphorus sorption capacity and availability along a topo sequence of agricultural soils: distinct effects of soil type and decadal fertilization practices. *Soil use and management*. Volume 34, Issue 4, 461-471. <https://doi.org/10.1111/sum.12457>
- Randriamanantsoa, L., Morel, C., Rabeharisoa, L., Douzet J.M., Jansa, J. & Frossard E. 2013. Can the isotopic exchange kinetic method be used in soils with a very low water extractable phosphate content and a high sorbing capacity for phosphate ions? *Geoderma* 200–201 (2013) , 120–129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.01.019>
- Rensson M., 2021. Effet des caractéristiques pédologiques et des pratiques agricoles sur la disponibilité du phosphore dans les sols de wallonie. Thèse de doctorat : Université de Liège, 224 p.
- Sanchez P.A., Palm C.A. & Buol S.W., 1997. Fertility capability soil classification: a tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*. Vol. 114, Issues 3–4, 157-185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00040-5)
- Shepherd K.D., Soule M.J., Place F.M., Buresh R.J. & Izac A.-M.N., 1997. Soil fertility replenishment in Africa: An investment in natural resource capital. In: Buresh R. J., Sanchez P. A. & Calhoun F. (eds.). *Replenishing soil fertility in Africa*. SSSA special publication, 51. pp. 1 – 46.
- Schneider A. & Morel C., 2000. Relationship between the iso-topically exchangeable and resin-extractable phosphate of deficient to heavily fertilized soil. *Eur. J. Soil Sci.*, 51, 709–715.
- Sikora F., 2002. Evaluating and quantifying the liming potential of phosphate rocks. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 63, 59–67. <https://doi.org/10.1023/A:1020513722249>
- Sinclair T.R., 1990. Nitrogen influence on the physiology of crop yield. In R. Rabbinge J., Goudriaan H., Van K., Penning F.W.T., De V. and Van L. H.H., 1990. *Theoretical Production Ecology reflections and prospects*. Pudoc Wageningen. pp. 40-68 <https://edepot.wur.nl/168823#page=54>
- Spark D. L., 2003. *Soil environmental chemistry*. Academic press. 367 p.
- Sutton C. & Larsen S., 1964. Pyrophosphate as a source of phosphorus for plants. *Soil Sci.*, 97, 196-202.
- Taylor S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust; a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28(8), 1273-1285. doi: [10.1016/0016-7037\(64\)90129-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90129-2).
- Turenne J.F., 1975. Mode d'humidification et différenciation podzolique dans deux toposéquences guyanaises. *Thèse de Doctorat. Sci. Nancy. Mpm. ORSTOMn* 84, Paris, 173 p.
- Van L. G.W. & Duffy S.J., 2017. *Environmental Chemistry: A Global Perspective*. Oxford University Press, 585 p.
- Van W. A. & Nachtergaele F., 2003. *Properties of soils of the tropics.*, CD Rom FAO, *Land and Water Digital Media Series*, 24 p.
- Van W. A., 1974. Management properties of ferralsols;; *FAO, Soils Bulletin*, n° 23. 129 p.
- Van-Straaten P., 2007. *Agrogeology: The Use of Rocks for Crops*. Department of Land Resource Science, University of Guelph, Guelph, 440 p.
- Wang Z., Guo Q. & Tian L., 2022. Tracing phosphorus cycle in global watershed using phosphate oxygen isotopes. *Science of the Total Environment*, 829 (2022) 154611, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154611>
- Wang, Y., Zhang, W., Müller, T., Lakshmanan P., Liu Y., Liang T., Wang L., Yang H. & Chen X., 2023. Soil phosphorus availability and fractionation in response to different phosphorus sources in alkaline and acid soils: a short-term incubation study. *Sci. Rep.*, 13, 56-77. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31908-x>
- White P.J. & Hammond J.P., 2008. Phosphorus nutrition of terrestrial plants (ch. 4), "In" White P.J. & Hammond J.P. (eds.) *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions*. Springer Science + Business Media B.V., pp. 51 – 91.
- Wiklander L. 1950. Kinetics of phosphorus exchange in soils: *Ann. R. Agric. College Sweden*, 17, 407-424.
- Williams M.R., Fisher T.R. & Melack, J.M., 1997. Solute dynamics in soil water and groundwater in a central Amazon catchment undergoing deforestation. *Biogeochemistry*, 38, 303–335. <https://doi.org/10.1023/A:1005801303639>
- Wolf B., 2000. *The fertile triangle: The Interrelationship of Air, water, and nutrients in Maximizing Soil Productivity*. Food products press, 463 p.
- Zarrabi M., Soori M.M., Sepehr M.N., Amrane A., Borji S., & Ghaffari H.R., 2014. Removal of phosphorus by ion-exchange resins: equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, 13(4), 891-903.