

Appliqués seuls, les engrais minéraux azotés et phosphatés accélèrent la dégradation de la matière organique d'un sol acide d'altitude du Mugamba sud (Burundi)

Salvator Kaboneka*¹, Syldie Bizimana², Séverin Nijimbere¹ & Frédéric Nahayo¹

¹Université du Burundi. Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). B.P. 2940. [Bujumbura](#)

²Fertilisants Organo-Minéraux Industries (FOMI). B.P. 1114. Bujumbura, Burundi.

* Auteur de correspondance: Email / salvator.kaboneka@gmail.com

Reçu: le 8 Octobre 2021

Accepté pour publication: le 10 Novembre 2021

Publié en ligne pour la première fois: le 30 Novembre 2021

Résumé

Deux études ont été parallèlement menées, l'une au laboratoire pendant 56 jours (8 semaines) à température ambiante ($25\pm 1^\circ\text{C}$) et l'autre en pots pendant 60 jours. L'étude de laboratoire avait pour objectif de suivre la dynamique du CO_2 du sol, consécutivement à l'application des engrais N (NH_4NO_3) et P (K_2HPO_4), tandis que celle menée en pots visait l'évaluation de l'effet résiduel de ces mêmes engrais. L'objectif global de l'étude visait la vérification de l'hypothèse que les engrais N et P, quand ils sont appliqués seuls, diminuent le contenu de la matière organique. Les engrais N et P étaient appliqués à 3 doses croissantes (0, 40 et 80 kg N ou P_2O_5 par hectare), dans un dispositif expérimental en randomisation totale avec 3 répétitions. Les résultats obtenus indiquent que le classement des productions de biomasse sèche aérienne de la culture-test d'amarante suit l'ordre décroissant suivant : $\text{N}_{80}\text{P}_{80} \geq \text{N}_0\text{P}_{80} = \text{N}_{40}\text{P}_{80} > \text{N}_{80}\text{P}_{40} = \text{N}_{40}\text{P}_{40} = \text{N}_0\text{P}_{40} > \text{N}_{80}\text{P}_0 = \text{N}_{40}\text{P}_0 = \text{N}_0\text{P}_0$, indiquant un effet fortement marqué de P ($p < 0,0001$) par rapport à celui de N ($p < 0,007$). Cette observation confirme le fait que le P constitue le principal élément limitant la productivité des sols du Burundi. Dans la même ligne, l'application des doses les plus élevées de P (N_0P_{80} , $\text{N}_{80}\text{P}_{80}$) donne lieu aux décompositions (appauvrissements) les plus élevées de la matière organique du sol ($k = 0,000149 \pm (0,000012) \text{ an}^{-1}$ et $0,000146 \pm (0,000009) \text{ an}^{-1}$), avec des demi-vies (temps correspondants à 50 % de décomposition) plus courts et oscillant autour de 13 ans. Enfin de compte, la présente étude confirme les risques associés à une sur-fertilisation minérale sur la dynamique de la matière organique du sol. Elle démontre encore une fois la rationalité de l'approche de fertilisation organo-minérale des sols du Burundi, combinant les engrais chimiques, la chaux et la matière organique, une gestion intégrée de la fertilité des sols en somme.

Mots Clés: Engrais N et P, effet résiduel, sur-minéralisation, matière organique du sol, modèle exponentiel, demi-vie.

Abstract

Two concomitant studies were conducted, one under laboratory conditions during 56 days (8 weeks) at ambient temperature ($25\pm 1^\circ\text{C}$), and a pot study conducted during 60 days with an amaranth crop test. The laboratory investigation aimed at evaluating the soil CO_2 evolution following N and P mineral fertilizers, whereas the pot study measured the residual effect of the same fertilizers on amaranth aerial dry biomass. The global objective of the experiments was to verify the hypothesis stating that N and P mineral fertilizers, when solely applied decrease the soil organic matter content (priming effect). Nitrogen and Phosphorus mineral fertilizers used in the studies were NH_4NO_3 and K_2HPO_4 . They were applied at equivalent rates of 0, 40 and 80 kg N or P_2O_5 per ha, in a completely randomized design with 3 replicates. Obtained results indicate an increasing amaranth aboveground dry biomass in the following order: $\text{N}_{80}\text{P}_{80} \geq \text{N}_0\text{P}_{80} = \text{N}_{40}\text{P}_{80} > \text{N}_{80}\text{P}_{40} = \text{N}_{40}\text{P}_{40} = \text{N}_0\text{P}_{40} > \text{N}_{80}\text{P}_0 = \text{N}_{40}\text{P}_0 = \text{N}_0\text{P}_0$. This is a clear indication of highly marked effects of P ($p < 0.0001$), in comparison with N ($p < 0.007$). Such observation confirms the fact that P constitutes the most limiting nutritive element of soil productivity in Burundi. Similarly, application of higher P rates (N_0P_{80} , $\text{N}_{80}\text{P}_{80}$) is characterized by higher soil organic matter decomposition ($k = 0.000149 \pm (0.000012) \text{ year}^{-1}$ and $0.000146 \pm (0.000009) \text{ year}^{-1}$), with shorter half-live values oscillating around 13 years. The present investigation fully highlights risks associated with over-fertilization with mineral fertilizers on the sustainability of soil organic matter. It demonstrates once again the rationality associated with the organo-mineral fertilization approach of Burundi soils, combining mineral fertilizers, lime and organic matter, in what is considered an integrated soil fertility management approach.

Keywords: N and P fertilizers, residual effect, priming effect, soil organic matter, exponential model, half-life

1. Introduction

Les manuels classiques des sciences du sol associent à la matière organique du sol de nombreuses propriétés physiques, chimiques, biologiques et environnementales (M. Alexander, 1977 ; N. C. Brady, 1993). Dans les lignes qui suivent, nous passons en revue les plus pertinentes.

Les particules de la matière organique s'associent aux argiles pour former les complexes argilo-humiques, qui confèrent au sol des bonnes qualités agronomiques : un sol léger avec une bonne perméabilité à l'eau et à l'air et un retrait modéré à la dessiccation. Dotée de pouvoir tampon qui confère au sol l'habilité à résister à tout changement brusque de pH en milieu acide ou basique, la matière organique du sol constitue aussi un réservoir d'éléments nutritifs (en particulier N et S) et du C. La Capacité d'Echange Cationique (CEC) des sols tropicaux fortement lessivés comme ceux du Burundi est essentiellement contrôlée par la matière du sol.

La matière organique du sol absorbe et améliore l'efficacité des pesticides et d'autres produits chimiques utilisés en agriculture, comme les herbicides et les engrais minéraux. Elle améliore la disponibilité du P, particulièrement dans les sols acides à toxicité aluminique (R.J. Buresh & al. ; 1997), et stabilise et régule la température du sol. Une augmentation de 1 % de M.O correspond à une rétention en eau de 180 000 à 225 000 L par ha, ce qui confère à la matière organique du sol un rôle crucial dans les sols secs des zones à tendance aride et dans les sols à texture sableuse. La matière organique est un facteur de bio-remédiation et de décontamination du sol par formation de complexes métallo-organiques, avec les métaux comme le Pb, Hg, Arsenic, Al.

En fin de compte, la gestion rationnelle de la fertilité du sol sous toutes ses dimensions revient à la gestion de la matière organique, c'est le socle de l'agriculture organique, une importante composante de l'agriculture biologique, de l'agriculture écologique et de l'agriculture de conservation (K.M. Hati & al., 2010 ; K.M. Hati & al., 2006, R.J. Haynes & al., 1991). Tous ces concepts liés aux pratiques agricoles reposent sur la matière organique endogène ou exogène du sol (P. Schjonning & al., 1994 ; R.R. Weil & W. Kroontje, 1979). En d'autres termes, tout processus qui augmente la matière organique du sol améliore la fertilité globale du sol. Au contraire, toute opération agronomique qui diminue la matière organique du sol en diminue la fertilité et la productivité (R.J. Haynes & R. Naidu, 1998).

Parmi les pratiques agronomiques qui altèrent le contenu en matière organique du sol figure la fertilisation minérale (O. Bogdan-Mihai & al., 2017). Il est avéré que l'application intensive et répétée des engrais minéraux seuls réduisent progressivement la matière organique et altèrent toutes les propriétés physiques, chimiques, biologiques et environnementales associées (S. Marinari & al., 2000 ; R.J. Haynes & R. Naidu, 1998). Un des effets des engrais minéraux sur la dynamique de la matière organique du sol est connu sous l'appellation d'effet « prime », un concept plus connu en anglais comme « priming effect » ou « priming action ». L'effet 'prime' peut être défini comme l'accélération de la décomposition ou la sur-minéralisation de la matière organique du sol, consécutivement à l'addition des résidus organiques facilement décomposables (C labile) ou

des engrais minéraux (F.E. Broadbent & W.W. Bartholomew, 1948 ; F. Azam & al., 1994b). Le processus d'effet 'prime' a généralement lieu durant les tout premiers jours de la décomposition des matières organiques appliquées au sol (S. Arjad & J. Giddens, 1966). Ces investigateurs ont observé une augmentation de la décomposition de la matière organique du sol par suite de l'addition de feuilles et tiges de soja (*Glycine max* L.) durant les premiers 10-12 jours. De là, ils ont suggéré que l'augmentation de l'activité microbienne résultant de l'addition des matières organiques fraîches au sol ne constitue pas le seul facteur responsable de l'effet 'prime'. Ils ont alors avancé la théorie d'un possible échange entre la matière organique du sol adsorbée par les minéraux argileux, comme par ailleurs suggéré par M. Alexander (1977), et la portion soluble ajoutée au sol à travers les matières organiques apportées au sol, une hypothèse que la matière organique libérée à partir des minéraux argileux est plus facilement décomposable par les microorganismes du sol (Y. Kuzyakov & al., 2000).

Toutefois, ce qui est appelé effet « prime » est une vieille notion introduite en 1926 par Löhnis pour décrire l'intense évolution du CO₂ à partir de la matière organique du sol, consécutivement à l'addition de formes labiles du C et des engrais minéraux N (D.S. Jenkinson & al., 1985 ; S. Fontaine & al., 2004). Le C labile (facilement minéralisable) et l'azote minéral (engrais) ne sont pas les seules forces motrices de l'effet « prime ». Tout autre facteur limitant quand il est corrigé, comme le P (facteur le plus limitant dans les sols tropicaux) peut déclencher des pertes de C sous forme de CO₂ à partir de la matière organique du sol, contribuant ainsi à l'augmentation des gaz à effet de serre responsables du réchauffement et des changements climatiques (F. Azam & al., 1994b ; V. Heynak & al., 1996).

Les autres forces motrices de l'effet « prime » regroupent les alternances de gel/dégel, les alternances pluies/sécheresse et le labour (D.S. Jenkinson & al., 1985). Le pH, la température et l'humidité du sol sont parmi les principaux processus qui contrôlent l'effet 'prime' (O. Bogdan-Mihai & al., 2017). D'autre part, l'addition au sol des fertilisants organiques et minéraux change la structure, la diversité, la taille, l'activité, la composition et le fonctionnement de la communauté microbienne du sol (O. Bogdan-Mihai et al., 2017). Ces processus et opérations débouchent sur une augmentation de la « nécro-masse » microbienne, une importante source de C labile dans le sol.

Au regard des caractéristiques de la microflore du sol, il existerait deux types de respiration (synonyme de minéralisation de la matière organique du sol) : la respiration autotrophique, œuvre de la microflore bactérienne (C/N=4) et la respiration hétérotrophique assurée par les champignons (C/N=10). La respiration autotrophique (bactérienne) contribue beaucoup plus à l'effet « prime », par rapport à la respiration hétérotrophique, qui est l'œuvre des champignons (M. Alexander, 1977 ; D.S. Jenkinson & al., 1985 ; F.A. Dijkstra et al., 2013).

Le concept d'effet « prime » a été véritablement introduit dans le monde scientifique par C.W. Bingemann & al. (1953). Les études concernant ce concept ont été beaucoup plus concentrées sur le C et N, peu l'ont été sur le P (A.D. Fokin & P.A. Radzhabova, 1996). Le processus est intensifié par de

grandes quantités d'additifs minéraux ou organiques comme cela a été avancé par un certain nombre d'auteurs (F.E. Broadbent & W.W. Bartholomew, 1948 ; D.S. Jenkinson & al., 1985 ; V. Hejnak & al., 1996 ; H. Sembiring & al., 1998). L'objectif de la présente étude était de suivre la dynamique du CO₂ du sol consécutivement à l'application des engrais N et P, et, en même temps, évaluer l'effet résiduel de ces mêmes engrais à travers un essai en pots. Enfin de compte, l'étude visait la vérification de l'hypothèse que les engrais N et P, quand ils sont appliqués seuls, diminuent le contenu de la matière organique. Subsidiatement, se basant sur le fait que le P constitue l'élément nutritif le plus limitant dans les sols du Burundi et dans les sols tropicaux en général (O. Nduwimana & al., 2013 ; R.J. Buresh & al., 1997), il s'agissait aussi de vérifier si, comparé à N, le P accélère comparativement la minéralisation de la matière organique du sol.

2. Matériels et méthodes

2.1. Le sol utilisé

Le sol utilisé autant dans l'étude en pots que dans celle menée au laboratoire a été prélevé dans une parcelle ayant précédemment porté une culture de pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) au Centre Semencier de Ruzibazi situé à 2200 m d'altitude en commune Mukike dans la province de Bujumbura à 55 km de la Capitale Bujumbura. Ses coordonnées géographiques sont : 3°61'33'' de Latitude Sud et 29°50'22'' de Longitude Est. Le sol collecté a été ensuite séché à l'air libre, puis broyé et tamisé à travers un tamis de 2 mm de maille. Des échantillons ont été soumis à des analyses granulométriques et chimiques au Laboratoire d'analyses chimiques de l'ISABU. Les procédures utilisées ont été récemment décrites dans une étude récemment publiée dans la Revue de l'Université du Burundi, Série Sciences Exactes et Naturelles (S. Kaboneka & al., 2021).

2.2. Etude menée sous serre

Les pots utilisés dans l'étude en serre étaient de dimensions 12 cm x 8 cm x 9,2 cm avec 3 trous dans leurs fonds pour permettre le drainage du sol. Chaque pot était rempli de 250 g de sol sur base de matière sèche. Cinq graines ont été semées dans chaque avec un démarrage effectué quand les plants avaient 3 feuilles en ne laissant que deux plants vigoureux dans chaque pot. Deux arrosages par jour à l'eau de robinet ont été effectués chaque matin jusqu'à la veille de la récolte qui a eu lieu après 30 jours du semis. Deux semis et deux récoltes ont été effectués. Les plants récoltés ont été étuvés à 105° C pendant 48 heures pour en estimer la production de biomasse sèche (g).

Aussi bien dans l'étude menée au laboratoire que celle menée en serre, les engrais utilisés étaient NH₄NO₃ comme source de N et K₂HPO₄ comme source de P (mais aussi de K). Les quantités équivalentes par hectare de sol ont été appliqués à 3 niveaux : 0, 40 et 80 kg de N ou P₂O₅. La plante test utilisée était une Amaranthacée dont la dénomination scientifique était *Amaranthus cruentus* var Fotété, une variété

verte à feuilles ovales et pointues pourvue du système photosynthétique de type C₄.

2.3. Etude d'incubation au laboratoire

L'étude d'incubation au laboratoire a été conduite dans des pots en verre de 250 mL. Un total de 30 pots a été utilisé et rangés sur la paillasse du Laboratoire d'Agrochimie de la Faculté d'Agronomie de l'Université du Burundi dans un dispositif en randomisation totale avec 3 répétitions. Chaque pot a reçu 50 g de sol sur base de matière sèche.

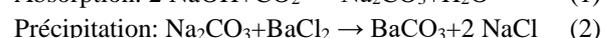
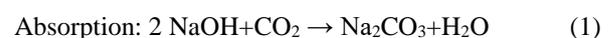
Les traitements comprenaient des pots vides (blanco) pour récupérer le CO₂ se trouvant dans le milieu ambiant, un traitement témoin qui contient le sol seul et 8 traitements contenant les différentes combinaisons d'engrais N et P (voir 2.4). L'étude menée au laboratoire comprenait 30 unités expérimentales. L'incubation a duré 56 jours à une température moyenne ambiante (25±1°C), avec des échantillonnages non destructifs de CO₂ établis comme suit : 3, 7, 14, 21, 28, 42 et 56 jours. Le protocole expérimental utilisant une solution de NaOH pour absorber le CO₂ dégagé au cours de l'incubation au laboratoire a été extensivement décrit ailleurs (S. Kaboneka & al., 1997 ; S. Kaboneka & al., 2019 ; S. Kaboneka & al., 2021).

2.4. Dispositif expérimental, Paramètres mesurés et analyses statistiques

Le dispositif expérimental utilisé était en randomisation totale avec 3 répétitions aussi bien pour l'étude en pot que l'incubation au laboratoire. Les traitements testés, auxquels il faut ajouter le blanco pour l'étude de laboratoire, étaient les suivants :

T ₀ (N ₀ P ₀)	: Sol seul (témoin)
T ₁ (N ₄₀ P ₀)	: Sol + 40 kg N + 0 kg P ₂ O ₅
T ₂ (N ₈₀ P ₀)	: Sol + 80 kg N + 0 kg P ₂ O ₅
T ₃ (N ₀ P ₄₀)	: Sol + 0 kg N + 40 kg P ₂ O ₅
T ₄ (N ₄₀ P ₄₀)	: Sol + 40 kg N + 40 kg P ₂ O ₅
T ₅ (N ₈₀ P ₄₀)	: Sol + 80 kg N + 40 kg P ₂ O ₅
T ₆ (N ₀ P ₈₀)	: Sol + 0 kg N + 80 kg P ₂ O ₅
T ₇ (N ₄₀ P ₈₀)	: Sol + 40 kg N + 80 kg P ₂ O ₅
T ₈ (N ₈₀ P ₈₀)	: Sol + 80 kg N + 80 kg P ₂ O ₅

Le paramètre de base pour suivre la santé et l'activité du sol en conditions aérobiques est la mesure de l'évolution du CO₂ qui constitue la forme de C prépondérante dans de telles conditions (Bogdan-Mihai et al., 2017). A chaque prélèvement non destructif, le CO₂ dégagé et absorbé par la solution de NaOH a été titré avec une solution standardisée de HCl précédée par une addition de BaCl₂ selon les réactions successives suivantes (F.J. Stevenson, 1985) :



Cette approche analytique a été utilisée et détaillée précédemment (S. Kaboneka & al., 2021). Le calcul de CO₂ a été fait en faisant recours à la formule de G. Stotzky (1965)

largement référenciée par plusieurs études de décomposition des matières organiques dans le sol (J.T. Gilmour & al., 1996 ; S. Kaboneka & al., 1997 ; S. Kaboneka & al., 2004 ; S. Kaboneka & al., 2019).

$$\text{mg CO}_2\text{-C} = (\text{B-V}) \times \text{N} \times \text{E} \quad (4)$$

où

B : mL de HCl utilisés pour la titration du blanco ;

V : mL de HCl pour les autres traitements ;

N : Normalité de l'acide HCl ;

E : Equivalent en poids du carbone (=6).

A la fin de la période d'incubation de 56 jours, le pourcentage (%) de décomposition du C dans les différents traitements a été déterminé de la manière suivante :

$$\% \text{ C décomposé} = [((\text{X}-\text{Y})/\text{Z})]/100 \quad [5]$$

où

X = mg de C dégagé sous forme de CO₂ dans le sol fertilisé ;

Y = mg de C dégagé sous forme de CO₂ dans le sol seul non fertilisé ;

Z = mg de C contenu dans le sol.

Par la suite, le modèle descriptif de décomposition qui a été utilisé est le modèle exponentiel simple décrit par l'équation suivante :

$$C_t = C_o e^{-kt} \quad [6]$$

où

C_o : Quantité de C initiale (t=0) ;

C_t : Quantité de C au temps t ;

k : constante de décomposition (t⁻¹) ;

t : temps (heure, jour, année).

La période de demi-vie a été estimée par la relation ci-après, en fonction de l'inverse de la constante de décomposition k :

$$t_{1/2} = 0,693/k \quad [7]$$

Le modèle exponentiel simple a été utilisé pour estimer les constantes de vitesse de décomposition (k) associées aux traitements. Cette détermination consistait en une régression linéaire exprimant le logarithme népérien du % du C restant (ln % C restant) en fonction du temps d'incubation (jours) avec la version 3.2 de SAS JMP (Tableau 4). Une analyse de la variance (ANOVA) sur un seul critère a été effectuée sur la variable taux de décomposition du C. Un test de Newman-Keuls s'en est suivi pour statistiquement comparer les effets des différents traitements d'engrais N et P quant à leur taux de décomposition au bout des 56 jours d'incubation (P. Dagnélie, 1987).

Les paramètres mesurés pour l'étude en pot sous serre étaient la production de biomasse sèche aérienne sur deux coupes. A chaque coupe, une analyse de la variance à un seul critère a aussi été effectuée suivie d'un test de Newman-Keuls (P. Dagnélie, 1987). Autant pour la variable % de

décomposition de C dans l'étude de laboratoire que pour la variable production de biomasse sèche de la plante-test d'amaranthe (M), les effets relatifs des traitements N et P par rapport aux traitements sans engrais ont été estimés à l'aide de la formule suivante :

$$\% \text{ de Variation} = [((\text{M}_F - \text{M}_o)/\text{M}_o)]/100 \quad [8]$$

où

M_F = valeur du paramètre M dans le sol fertilisé ;

M_o = valeur du paramètre M dans le sol non fertilisé.

3. Présentation et discussion des résultats

3.1 Caractéristiques physico-chimiques du sol

Les caractéristiques physico-chimiques du sol ayant fait l'objet de l'étude sont détaillées dans le tableau 1 ci-dessous. Le sol utilisé dans l'étude était de texture argileuse, riche en matière organique avec un pH acide (pH < 5,5), des risques de toxicité aluminique et une déficience en P (E. Tessens & J. Gourdin, 1993 ; Nduwimana et al., 2013). Le même sol a été utilisé dans une étude sur l'effet du mode d'application de la paille de blé sur la cinétique de décomposition du C organique (S. Kaboneka & al., 2021).

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol.

Paramètre	Valeur
pH _{eau}	4,7
% C	5,60
% N	0,61
C/N	9,18
CEC (cmol _c /kg)	16,3
Al ³⁺ échangeable (cmol _c /kg)	4,91
% Al échangeable	30
H ⁺ échangeable (cmole _c /kg)	0,55
P-Olsen (mg kg ⁻¹ sol)	4,71
Argile (%)	64,87
Limon (%)	13,18
Sable (%)	21,95

3.2 Etude en pot

Les résultats de l'analyse de la variance effectuée sur les rendements des coupes 1 et 2 de la culture test d'amaranthe et leur combinaison sont illustrés dans le tableau 2 ci-après.

L'on note l'absence d'effet significatif (p > 0.05) des traitements testés sur le rendement de la culture test d'amaranthe en deuxième coupe et des effets significatifs (p < 0,05) pour la première coupe et leur combinaison. Les productions d'amaranthe en deuxième coupe sont très faibles. Une analyse comparative de la première à la deuxième coupe pour les traitements fertilisés avec le P, indique que cette dernière contribue seulement à hauteur de 2 à 10 % des biomasses aériennes d'amaranthe combinées. Ceci est une indication de l'absence d'un effet résiduel pour les traitements fertilisés avec N et particulièrement avec P.

L'effet des combinaisons N et P sur la production de biomasses aériennes catégorise les traitements dans l'ordre décroissant suivant : N₈₀P₈₀ ≥ N₄₀P₈₀ = N₀P₈₀ > N₈₀P₄₀ = N₄₀P₄₀

= N₀P₄₀ > N₈₀P₀ = N₄₀P₀ = N₀P₀. Les rendements les plus élevés en biomasse sèche de la culture test d'amaranthe sont obtenus avec la plus grande dose de P (80 kg P₂O₅).

Tableau 2. Effet des engrais N et P sur la production de biomasse de l'amaranthe.

Traitement	Coupe 1	Coupe 2	Totale
	----- g/pot -----		
N ₀ P ₀	0,060±0,050c	0,036±0,025a	0,096±0,076c
N ₄₀ P ₀	0,107±0,074c	0,019±0,005a	0,126±0,069c
N ₈₀ P ₀	0,122±0,042c	0,062±0,056a	0,184±0,100c
N ₀ P ₄₀	0,467±0,166b	0,049±0,010a	0,483±0,145b
N ₄₀ P ₄₀	0,409±0,119b	0,029±0,022a	0,439±0,115b
N ₈₀ P ₄₀	0,540±0,117b	0,022±0,011a	0,562±0,110b
N ₀ P ₈₀	0,716±0,016ab	0,016±0,007a	0,732±0,019a
N ₄₀ P ₈₀	0,652±0,029ab	0,025±0,008a	0,677±0,033b
N ₈₀ P ₈₀	0,728±0,068a	0,027±0,013a	0,812±0,090a
Moyenne générale	0,430	0,032	0,457
Probabilité	0,0199*	0,405NS	0,045*
C.V(%)	18,4	89,3	25,7

Les moyennes (avec écart-types) suivies des lettres différentes dans une même colonne sont significativement différentes au seuil de 5 %.

En effet, lorsque les rendements d'amaranthe sont analysés sur base des effets des doses croissantes de N et de P, l'on se rend compte que cet effet est fortement marqué pour le P. L'interaction N et P est significative (p < 0,05) pour la première coupe et pour la combinaison des deux coupes. Les résultats de la première coupe et de sa combinaison avec la deuxième coupe, indiquent un effet plus marqué de P (p < 0,0001) par rapport à celui de N (p < 0,007) sur les rendements en biomasse aérienne d'amaranthe. Cette observation confirme les analyses de sols (Nduwimana et al., 2013) et les résultats de recherche antérieurs (Kaboneka et al., 2004), indiquant que le P est le principal élément limitant la productivité des sols du Burundi et la décomposabilité des matières organiques y appliquées (Tableau 3). Cette hypothèse est également confirmée par d'autres investigateurs ayant travaillé sur les sols tropicaux africains (R.J Buresh & al., 1997).

Tableau 3. Cinétique de décomposition de la paille de blé au laboratoire : Effet de l'addition d'engrais N et P (Kaboneka et al., 2004).

Traitement	jour ⁻¹	Demi-vie (an)
Paille de blé + 0 kg N	0,003497	0,54
Paille de blé + 40 kg N	0,006944	0,27
Paille de blé + 80 kg N	0,009955	0,19
Paille de blé + 120 kg N	0,010637	0,17
Paille de blé + 0 kg P	0,004290	0,44
Paille de blé + 17,6 kg P	0,009040	0,21
Paille de blé + 35,2 kg P	0,012942	0,15
Paille de blé + 52,8 kg P	0,016430	0,12

3.3 Cinétique de minéralisation du C

La décomposition de la matière organique du sol consécutivement à l'application de différentes doses d'engrais N (0, 40, 80 kg/ha) et P₂O₅ (0, 40, 80 kg/ha) a suivi des modèles exponentiels de décomposition (Tableau 4). Ces modèles sont significatifs (p < 0,0001) avec des coefficients de détermination (R²) variant de 0,82 à 0,93. Les temps de demi-vie (50 %) de la matière organique du sol par suite de l'effet des engrais N et P sont donnés dans la dernière colonne du tableau 4.

Tableau 4. Cinétique de décomposition de la matière organique du sol consécutivement à l'application des engrais N et P.

Traitement	Modèle exponentiel simple linéarisé	R ²	Demi-vie (an)
Sol + N ₀ P ₀	Y = 4,60430±0,00023 - (0,000104±0,000008) t	0,88	18,3
Sol + N ₄₀ P ₀	Y = 4,60411±0,00024 - (0,000140±0,000009) t	0,82	13,6
Sol + N ₈₀ P ₀	Y = 4,60352±0,00036 - (0,000147±0,000013) t	0,86	12,9
Sol + N ₀ P ₄₀	Y = 4,60352±0,00036 - (0,000122±0,000008) t	0,91	15,6
Sol + N ₄₀ P ₄₀	Y = 4,60384±0,00028 - (0,000133±0,000010) t	0,89	14,3
Sol + N ₈₀ P ₄₀	Y = 4,60411±0,00025 - (0,000136±0,000009) t	0,92	13,9
Sol + N ₀ P ₈₀	Y = 4,60364±0,00034 - (0,000149±0,000012) t	0,87	12,7
Sol + N ₄₀ P ₈₀	Y = 4,60380±0,00030 - (0,000133±0,000011) t	0,87	14,3
Sol + N ₈₀ P ₈₀	Y = 4,60396±0,00025 - (0,000146±0,000009) t	0,93	13,0

A l'analyse des tableaux 4 et 5, les traitements N₈₀P₀ et N₀P₈₀ donnent lieu aux % de décomposition les plus élevés de la matière organique du sol. Leurs demi-vies sont autour de 13 ans. Ce qui signifie que 50 % de la matière organique du sol disparaîtrait par suite de l'application des engrais N et P, lorsque celle-ci n'est pas accompagnée de matière organique. Pour les autres traitements, les valeurs des demi-vies varient de près de 14 ans à un peu plus de 18 ans (témoin sans engrais). Une analyse de la variance appliquée à la variable % de décomposition de la matière organique du sol (Tableau 5) permet de relever deux groupes de moyennes distincts (p < 0,05). D'un côté tous les traitements ayant reçu l'un ou deux engrais (N, P), et de l'autre le traitement témoin (N₀P₀) qui est significatif inférieur aux 8 autres traitements. Ces derniers ne sont pas significativement différents entre eux.

Tableau 5. Effet des engrais N et P sur le % de décomposition de la matière organique du sol.

Traitement	% de décomposition	% variation
Sol + N ₀ P ₀	0,613±0,029b	-
Sol + N ₄₀ P ₀	0,899±0,007a	+ 46,7
Sol + N ₈₀ P ₀	0,903±0,081a	+ 47,3
Sol + N ₀ P ₄₀	0,765±0,032a	+ 24,8
Sol + N ₄₀ P ₄₀	0,789±0,006a	+ 28,7
Sol + N ₈₀ P ₄₀	0,798±0,016a	+ 30,2
Sol + N ₀ P ₈₀	0,903±0,084a	+ 47,3
Sol + N ₄₀ P ₈₀	0,817±0,043a	+ 33,3
Sol + N ₈₀ P ₈₀	0,887±0,028a	+ 44,7
Moyenne générale	0,82	
Probabilité	0,0042**	
C.V(%)	7,7	

Les moyennes (avec écart-types) suivies des lettres différentes dans une même colonne sont significativement différentes au seuil de 5 %.

En tout état de cause, l'ajout des engrais N et P au sol a causé une libération élevée du C sous forme de CO₂. Cette sur-minéralisation du C organique du sol par suite de l'application des engrais N et P constitue une illustration du

processus dénommé effet « prime ». Ce processus est observé consécutivement à l'addition d'un facteur limitant au sol, généralement l'N ou le P, comme il vient d'être démontré dans la présente étude. Ses résultats sont en harmonie avec les observations rapportées par d'autres chercheurs pour le C et N (K.M. Hati & al., 1998 ; R.J. Haynes & R. Naidu, 1998 ; P. Schjonning & al., 1994 ; F. Azam & al., 1994b ; S. Marinari & al., 2000 ; S. Fontaine & al., 2004), mais aussi pour le P (A.D. Fokin & P.A. Radzhabova, 1996).

4. Conclusion

L'objectif de la présente étude était d'évaluer l'effet simple ou interactif des engrais N et P sur la décomposition de la matière organique du sol, tel qu'estimés par le % et la cinétique de décomposition du C organique en conditions de laboratoire. Subsidièrement, l'effet résiduel de ces engrais sur une culture-test d'amaranthe a été évalué. Les résultats obtenus indiquent que le classement des productions de biomasse sèche aérienne de la culture-test d'amaranthe suit l'ordre décroissant suivant : $N_{80}P_{80} \geq N_0P_{80} = N_{40}P_{80} > N_{80}P_{40} = N_{40}P_{40} = N_0P_{40} > N_{80}P_0 = N_{40}P_0 = N_0P_0$, indiquant un effet fortement marqué du P ($p < 0,0001$) par rapport à celui de N ($p < 0,007$). Cette observation confirme les analyses de sols (Nduwimana et al., 2013) et les résultats de recherche antérieurs (Kaboneka et al., 2004) : le P constitue le principal élément limitant la productivité des sols du Burundi. Dans la même ligne, l'application des doses les plus élevées de P (N_0P_{80} , $N_{80}P_{80}$) donne lieu aux décompositions (appauvrissements) les plus élevées de la matière organique du sol, avec des demi-vies (temps correspondants à 50 % de décomposition) plus courts et oscillant autour de 13 ans. Enfin de compte, la présente étude vient démontrer la rationalité de l'approche de fertilisation organo-minérale des sols du Burundi, aujourd'hui promue par la FOMI (Fertilisants Organo-Minéraux Industries). La pertinence de cette approche de fertilisation des sols du Burundi, combinant les engrais chimiques, la chaux et la matière organique a été judicieusement relevée dans nos travaux antérieurs (S. Kaboneka et al., 2020).

Bibliographie

- [1] Alexander, M. 1977. Introduction to Soil Microbiology. 2nd ed. Wiley, New York.
- [2] Arsjad, S. and J. Giddens. 1966. Effect of added plant tissue on decomposition of soil organic matter under different wetting and drying cycles. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 30 : 457-459
- [3] Azam, F., F.W. Simmons and R.I. Mulvaney. 1994b. The effect of inorganic nitrogen on the added nitrogen interaction of soil in incubation experiments. Biology and Fertility of Soils. 18 : 99-102.
- [4] Bingemann, C.W., J.E. Warner and W.P. Martin. 1956. The effet of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. Soil Science Society of America Proceedings 17 : 34-38
- [5] Bogdan-Mihai Onica, Roxana Vidican, Valentina Sandor, Traian Brad and Mignon Sandor. 2017. Priming effect induced by the use of different fertilizers in soil functional diversity. Bulletin USAMV Series Agriculture 7(2) : Doi 10.15835/buasmca-ag : 0017.
- [6] Broadbent, F.E., W.W. Bartholomew. 1948. The effect of quantity of plant material added to soil on its rate of decomposition. Soil Science Society of America Proceedings 13 : 271-274
- [7] Buresh, R.J., P.C. Smithson, and D.T. Hellums. 1997. Building soil phosphorus capital in Africa. P.111-149. In R.J. Buresh et al. (eds.). Replenishing soil fertility in Africa. SSSA Speci. Publ. 51. SSSA, Madison, WI.
- [8] Dagnélie, P., 1987. Théorie et méthodes statistiques, application agronomique. Volume 2. Presses agronomiques de Gembloux, Belgique. 463 p.
- [9] Fokin, A.D., P.A. Radzhabova. 1996. Availability of phosphates in soils as a function of the state and transformation of organic matter. Eurasian Soil Science 29 : 1216-1221
- [10] Fontaine, S., G. Boreux, L. Abbadie and A. Marotti. 2004. Carbon input to soil decreases soil carbon content. Ecol. Lett. 7 : 314-320.
- [11] Gilmour, J.T., M.D. Clark & S.M. Daniel. 1996. Predicting long-term decomposition of biosolids with a seven-day test. J. Environ. Qual. 35 : 766-770.
- [12] Hati, K.M., A. Swarup, B. Mishra, M.C. Manna, R.H. Wanjari, K.G. Mandal and A.K. Misra. 2006. Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon of an Alfisol. Geoderma 148: 173-179.
- [13] Hati, K.M., K.G. Mandal, A. K. Misra, P.K. Ghosh and K.K. Bandyopadhyay. 2006. Effect of inorganic fertilizer and farmyard manure on soil physical properties, root distribution, water-use efficiency and seed yield of soybean in vertisols of central India. Bioresource Technology 97: 2182-2188.
- [14] Haynes, R.J. and R. Naidu. 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. Nutrient Cycling in Agroecosystems 51: 123-137.
- [15] Haynes, R.J., Swift R.S. and Stephen.R.C. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity of soils. Soil and Tillage Research 19: 77-87.
- [16] Hejnak, V., Jefimov V.N. and Osipov A. I.. 1996. The use of fertilizer and soil nitrogen by spring barley. Rostlina Kyroba 42: 67-72
- [17] Jenkinson, D.S., R.H. Fox ns J.H. Rayner. 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen – the so-called 'priming effect'. Journal of Soil Science 36: 425-444
- [18] Kaboneka, S.; Iro Ong'or B.T., Kwizera C., Nkurunziza M. & Kwizera. E. 2019. Carbon mineralization kinetics from legume residues applied to a high altitude acidic soil. International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE). Volume 5 (4): 42-48.

- [19] Kaboneka, S. W.E. Sabbe & Mauromoustakos. 1997. Carbon decomposition kinetics and nitrogen mineralization from corn, soybean and wheat residues. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 28: 1359-1373. <https://doi.org/10.1080/00103629709369880>
- [20] Kaboneka, S., A. Niyongabo et S. Nijimbere. 2020. Effet de la combinaison DAP, chaux dolomitique et fientes de poule sur la réduction de la toxicité aluminique d'un sol acide d'altitude du Burundi. *Revue de l'Université du Burundi. Série-Sciences Exactes et Naturelles.* Volume 28 : 9-15.
- [21] Kaboneka, S., C. Kwizera, S. Bizimana et D. Biceriza. 2021. Cinétique de décomposition de la paille de blé dans un sol acide d'altitude du Mugamba (Burundi) : effet du mode d'application. *Revue de l'Université du Burundi. Série-Sciences Exactes et Naturelles.* Volume 30 : 9-19. Site : <http://revue.ub.edu.bi/JUB>.
- [22] Kaboneka, S., J.C. Nivyiza and L. Sibomana. 2004. Effects of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer addition on wheat straw Carbon Decomposition in a Burundi acidic soil. p. 151-161. IN A. Bationo. *Managing Nutrient Cycles to sustain Soil fertility in Sub-Saharan Africa.* AfNetCAT. 608 p. Triscope Consulting Publishers. Nairobi.
- [23] Khaleel, R. K.R. Reddy and M.R. Overcash. 1981. Changes in soil properties due to organic waste application: a review. *Journal of Environmental Quality* 10: 133-141.
- [24] Kuzyakov, Y., J.K. Fuedel and K. Stahr. 2000. Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology and Biochemistry* 32 : 1485-1459.
- [25] Marinari, S., G. Masciandaro, B. Ceccanti and S. Grego. 2000. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology* 72 : 9-17.
- [26] Metzger, L. and B. Yaron. 1987. Influence of sludge organic matter on soil physical properties. *Advances in Soil Science* 7: 141-163.
- [27] Schjonning, P. B.T. Christensen and B. Carstensen. 1994. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years. *European Journal of Soil Science* 45: 257-268.
- [28] Sembiring, H., W.R. Raun and G.V. Johnson. 1998. Nitrogen accumulation efficiency: relationship between excess fertilizer and soil-plant biological activity in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition* 21: 1235-1252.
- [29] Stevenson, F.J. 1986. *Cycles of Soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients.* John Wiley and Sons. New York. 390 p.
- [30] Stotzky, G. 1965. Microbial respiration, pp. 1550-1569. In: C.A. Black, D.D. Evans, J.L. White, I.E. Ensminger & F.E. Clark (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy 9.* American Society of Agronomy, Madison, WI.
- [31] Weil, R.R. and Kroontje. W. 1979. Physical condition of a Davidson clay loam after five years of heavy poultry manure applications. *Journal of Environmental Quality* 8: 387-392.