

Étude des propriétés physico-chimiques et microbiologiques d'un biofertilisant élaboré à partir d'un mélange de résidus de récolte, d'un consortium bactérien et de roche phosphatée

*Boueunan Wongbe Beralex
Bongoua-Devisme Affi Jeanne*

Laboratoire de Pédologie et Agriculture Durable,
UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

Bahan Lemonou Franck Michaël

Centre National de Recherche Agronomique-CNRA,
station de recherche de Man, Côte d'Ivoire

[Doi:10.19044/esj.2024.v20n18p148](https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n18p148)

Submitted: 17 April 2024

Accepted: 12 June 2024

Published: 30 June 2024

Copyright 2024 Author(s)

Under Creative Commons CC-BY 4.0

OPEN ACCESS

Cite As:

Wongbe Beralex, B., Affi Jeanne, B.-D., & Lemonou Franck Michaël, B. (2024). *Étude des propriétés physico-chimiques et microbiologiques d'un biofertilisant élaboré à partir d'un mélange de résidus de récolte, d'un consortium bactérien et de roche phosphatée*. European Scientific Journal, ESJ, 20 (18), 148. <https://doi.org/10.19044/esj.2024.v20n18p148>

Résumé

En Afrique subsaharienne, la croissance démographique rapide et la dégradation des sols ont entraîné une forte utilisation d'engrais chimiques pour soutenir l'agriculture. Cependant, cette dépendance aggrave la dégradation des sols et génère des problèmes environnementaux. Pour contrer cela, l'utilisation de biofertilisants émerge comme une solution durable pour maintenir la fertilité des sols tout en réduisant l'impact environnemental. Ainsi, différentes formulations de bio-phospho-composts ont été développées, combinant du phosphate naturel du Maroc (RPM), des résidus de récolte de riz et de maïs, et des bactéries solubilisatrices de phosphate (BSP). L'objectif était d'évaluer leurs propriétés pour estimer leur valeur fertilisante.

L'analyse des bio-phospho-composts finaux produits (C1, C2, C3) a montré qu'ils avaient un pH légèrement alcalin, des rapports C/N entre 10,20 et 11,81, et étaient riches en éléments fertilisants tels que le phosphore, l'azote, le potassium et le carbone. Cependant, aucune différence significative n'a été observée entre les paramètres chimiques des différents composts, suggérant

que la dose de RPM n'a pas eu d'effet discernable. De plus, nos résultats ont révélé que les composts ont atteint un état de maturité avec plus de 80% de taux de décomposition en seulement cinq semaines de compostage, indépendamment de la dose de RPM, probablement en raison de la présence d'un consortium bactérien.

Cette étude montre que l'ajout de bactéries solubilisatrices de phosphate a considérablement réduit la durée de compostage à 5 à 6 semaines, au lieu de 4 à 7 mois. Les bio-phospho-composts obtenus présentent des propriétés amendantes et fertilisantes, qui doivent être vérifiées par des cultures en conditions de champ.

Mots-clés: Roche phosphatée naturelle, Bactéries solubilisatrices, Résidus organiques, Bio-phospho-compost

Study of the physicochemical and microbiological properties of a biofertilizer developed from a mixture of crop residues, bacterial Consortium, and phosphate Rock

Boueunan Wongbe Beralex

Bongoua-Devisme Affi Jeanne

Laboratoire de Pédologie et Agriculture Durable,
UFR Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Université Felix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire

Bahan Lemonou Franck Michaël

Centre National de Recherche Agronomique-CNRA,
station de recherche de Man, Côte d'Ivoire

Abstract

In sub-Saharan Africa, rapid population growth and soil degradation have led to heavy use of chemical fertilizers to support agriculture. However, this dependency exacerbates soil degradation and generates environmental problems. To counter this, the use of biofertilizers is emerging as a sustainable solution to maintain soil fertility while reducing environmental impact. Thus, various formulations of bio-phospho-composts have been developed, combining natural phosphate from Morocco (RPM), rice and maize crop residues, and phosphate-solubilizing bacteria (BSP). The objective was to evaluate their properties to assess their fertilizing value.

The analysis of the final bio-phospho-composts produced (C1, C2, C3) showed that they had a slightly alkaline pH, C/N ratios between 10.20 and 11.81, and was rich in fertilizing elements such as phosphorus, nitrogen,

potassium, and carbon. However, no significant difference was observed in the chemical parameters of the different composts, suggesting that the RPM dose had no discernible effect. Furthermore, our results revealed that the composts reached a mature state with an over 80% decomposition rate in just five weeks, regardless of the RPM dose, likely due to the presence of a bacterial consortium. This study shows that the addition of phosphate-solubilizing bacteria significantly reduced the composting duration to 5 to 6 weeks, instead of 4 to 7 months. The resulting bio-phospho-composts exhibit amending and fertilizing properties, which need to be verified through field crop trials.

Keywords: Natural phosphate rock, Solubilizing bacteria, Organic residues, Bio-phospho-compost

Introduction

En Afrique subsaharienne, la rapide croissance démographique associée à la dégradation progressive de la fertilité des sols a contraint à une utilisation intensive des engrais chimiques dans l'agriculture pour stimuler une production agricole suffisante (Sawadogo et *al.*, 2021). Cependant, diverses recherches ont mis en évidence que cette dépendance exclusive à ces engrais ne garantit pas une agriculture durable (Mahmood et *al.*, 2016 ; Atieno et *al.*, 2020). En effet, l'utilisation excessive d'engrais minéraux, combinée à la surexploitation des terres agricoles au détriment des jachères, entraîne une dégradation accélérée de la fertilité des sols (Biaou et *al.*, 2017 ; Gnahoua et *al.*, 2023 ; Agegnehu et *al.*, 2021). De plus, cet excès d'engrais minéraux peut avoir des répercussions environnementales néfastes et affaiblir la résistance des plantes face aux attaques d'insectes et de champignons (Sawadogo et *al.*, 2022).

Face à ces défis, une réorientation vers des méthodes alternatives de gestion de la fertilité des sols est devenue impérative. Dans cette optique, l'utilisation de biofertilisants émerge comme une solution prometteuse, permettant de maintenir la fertilité des sols tout en réduisant l'impact environnemental associé aux engrais chimiques (Biaou et *al.*, 2017 ; Gnahoua et *al.*, 2023; Agegnehu et *al.*, 2021).

La recherche de stratégies innovantes pour améliorer la fertilité des sols est donc devenue une priorité. Cela comprend l'utilisation d'amendements réfléchis tels que la roche phosphatée naturelle (Saleem et *al.*, 2013 ; Mashori et *al.*, 2013 ; Abbasi et *al.*, 2015), le recours aux microorganismes du sol en tant qu'agents biofertilisants (Asuming-Brempong et Anipa, 2014; Cherif, 2014; Taktek, 2015), ainsi que la valorisation des résidus de récolte et des déchets organiques qui peut être une solution à leur élimination (Dagbenonbakin et *al.*, 2012).

Des études ont montré les avantages de l'utilisation de fumiers et de composts pour améliorer la structure du sol et augmenter son activité biologique (Weill and Duval, 2009 ; Jobin and Petit, 2004). De plus, l'association de matière organique et de roche phosphatée a été mise en avant pour améliorer la qualité des composts et les rendements des cultures céréalières (Bekayo, 2003 ; Saleem et al., 2013 ; Essui, 2020 ; Konaté et al., 2022). Par ailleurs, l'utilisation de bactéries solubilisatrices de phosphate pour améliorer l'efficacité des roches phosphatées est une alternative envisageable (Vessey, 2003 ; Giles et al., 2012 ; Asuming-Brempong et Anipa, 2014 ; Taktek, 2015). Aussi, bien des travaux ont montré une amélioration de la valeur fertilisante du compost produit lorsque les résidus sont compostés avec de la fiente durant 14 jours (Essui, 2020 ; Konaté et al., 2022). Cependant d'après Larbi (2006), Kitabala et al., (2016) et Konaté et al., (2022), l'effet du compost sur le rendement des cultures peut être influencé par sa qualité mais aussi par la dose appliquée. C'est donc dans cette veine que différentes formulations de bio-phospho-composts, à base de roche phosphatée à différentes doses, de résidus de pailles de riz, de bactéries solubilisatrices de phosphates et de fientes de volaille, ont été élaborés, afin de répondre à ces enjeux. La présente étude vise à analyser les propriétés physico-chimiques et microbiologiques de ces bio-phospho-composts élaborés afin d'apprécier leur valeur fertilisante.

Matériel et méthodes

Description du site d'étude

Cette étude a été menée à Dompleu, situé dans la région de Man en Côte d'Ivoire (Figure 1), avec des coordonnées géographiques de 07°20'19'' de latitude Nord et 07°31'11'' de longitude Ouest. Dompleu bénéficie d'un climat tropical monomodal, caractérisé par une saison sèche de novembre à février et une saison des pluies de mars à octobre. La pluviométrie annuelle dans la région varie entre 1300 et 2400 mm. Les sols de Man sont typiquement peu gravillonnaires (< 30 %), de couleur rouge (2,5YR à 5YR), profonds (> 1 m), et fortement désaturés, caractérisés par leur acidité et une faible disponibilité en phosphore soluble (Koné et al., 2010 ; Kpan et al., 2023).

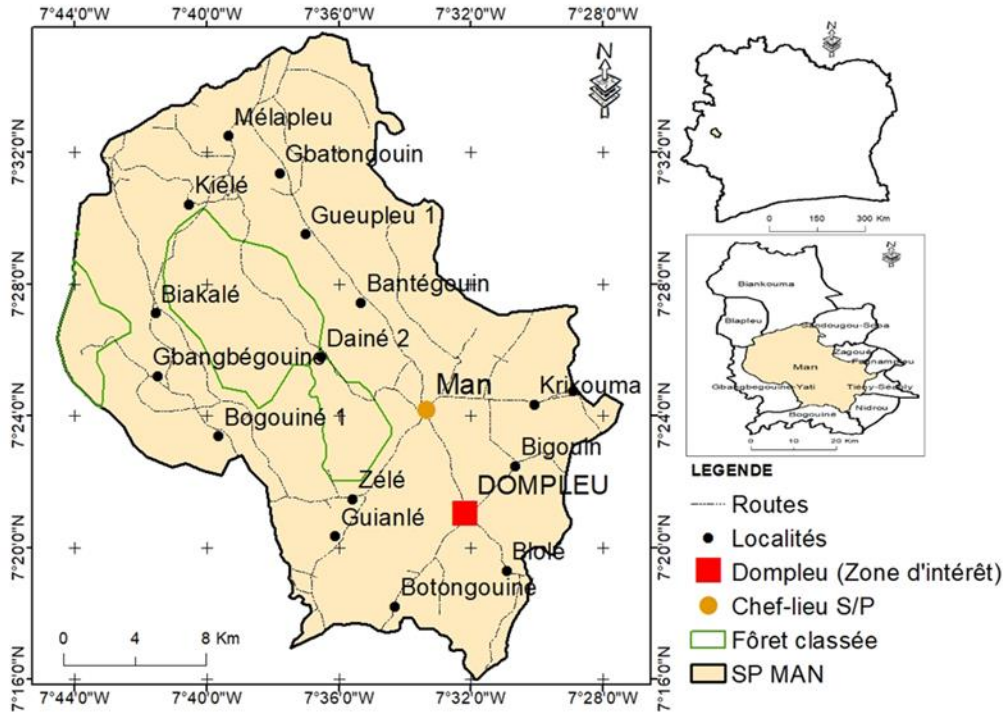


Figure 1. Localisation du site d'étude

Matériel

Matériel végétal

Le matériel végétal est constitué de résidus de récolte (paille de riz et de maïs) utilisés pour le compostage. La mélasse de canne à sucre constitue le sucre pour le développement des microorganismes.

Fertilisant

La roche phosphatée du Maroc (RPM) dont la composition est présentée dans le tableau (I) a été fournie par l'office chérifien du phosphate (OCP), et constitue la principale source de phosphore utilisée pour la fabrication du phospho-compost.

Tableau I : Composition chimique de la roche phosphatée du Maroc (RPM)

Eléments chimique	P ₂ O ₅	CO ₂	SO ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	F ₂ O	H ₂ O
Teneur (%)	30	6,44	1,29	6,64	49,54	1,16	0,2	0,41	2,21	2,13

Matériel biologique

Un consortium bactérien solubilisateur de phosphate isolé des parcelles rizicoles de Dompleu sur le milieu Pikovskay's (PVK) solide a constitué le matériel biologique.

Fiente de volaille

La fiente de volailles est composée des déjections de poules de chair et de pondeuses a été utilisée dans le compostage

Méthodes

Echantillonnage

Une parcelle rizicole de bas-fonds d'une superficie de 701 m² a été sélectionnée à Dompleu (7°20'43''N / 7°31'51''W). Des échantillons de sol ont été prélevés de manière aléatoire à une profondeur de 0-20 cm à l'aide d'une tarière, puis mélangés pour obtenir un échantillon composite représentatif de la parcelle d'étude. Cet échantillon composite a ensuite été divisé en deux parties : l'une destinée à l'analyse microbiologique et l'autre à la caractérisation physico-chimique.

Caractérisation physico chimique des sols de la parcelle expérimentale

Avant la mise en place de l'essai, des échantillons de sols (0-20 cm) ont été collectés dans la parcelle, mélangés pour former un échantillon composite. La caractérisation physico-chimique des sols de la zone d'étude a concerné les paramètres physiques (granulométrie) et chimiques (pH, C, N, P, K, Ca, Mg, CEC). Elle a été réalisée au laboratoire des sols et des végétaux de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro.

- **Caractérisation physique**

L'analyse granulométrique a été réalisée par la méthode à la pipette de Robinson-Köln qui consiste tout d'abord à détruire la matière organique à l'aide de l'eau oxygénée (H₂O₂) et à disperser l'argile par l'hexamétaphosphate de sodium. Ainsi, les fractions fines de 0 à 0,002 mm (argile) et de 0,002 à 0,02 mm (limon fin) sont déterminées à partir de prélèvements effectués à l'aide de la pipette de Robinson, après un temps de sédimentation, suivant la loi de Stokes. Les fractions grossières de 0,02 à 0,05 mm (limon grossier) et les sables sont déterminés par tamisage à sec, après siphonage.

- **Caractérisation chimique**

L'analyse chimique a concerné divers paramètres, tels que la matière organique (MO), l'azote total (N), le pH, le phosphore assimilable (P assimilable), les bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺), et la capacité d'échange cationique (CEC). Les méthodes d'analyse utilisées incluent la méthode Walkley et Black pour la MO, la méthode Kjeldahl pour l'azote, la méthode électrométrique pour le pH, la méthode Bray I pour le P assimilable, la spectrométrie en absorption atomique pour Ca²⁺ et Mg²⁺, la méthode à émission de flamme pour Na⁺ et K⁺, et l'extraction avec une solution d'argent thiourée pour la CEC.

Caractéristique microbiologique

- Dénombrement de la microflore bactérienne

A partir de la suspension initiale du sol, dans un rapport sol/solution (1/10 g/ml), des dilutions successives de sol de 10^{-1} à 10^{-6} sont réalisées pour ensemercer soit les microplaques, ou soit les boîtes de pétri. Chaque boîte de pétri ou microplaques contient le milieu Nutrient Broth (NB) constitué de 8 g Nutrient Broth (NB) Difco TM et de 1000 ml d'eau ultra pure, additionné de nystatine, est utilisé pour le dénombrement de la microflore totale aérobie.

Elle reçoit 100 μ l de la suspension-dilution de sol avec 3 répétitions par dilution, et un témoin non inoculé pour chaque ensemencement, puis est mise en incubation à une température de 30°C. Après incubation, le nombre de puits positifs correspondant à l'apparition d'un trouble bactérien est déterminé à la densité optique 620 nm. Les résultats obtenus sont traités par un programme statistique déterminant le Nombre le Plus Probable (NPP) de bactéries présente dans l'échantillon qui est exprimé en nombre de bactéries par g de sol sec.

- Recherche, isolement et sélection des Bactéries solubilisatrices de phosphates (BSP)

La recherche des bactéries solubilisatrices de phosphates (BSP) a été réalisée dans des boîtes de Pétri contenant le milieu de Pikovskay's (PVK) stérilisé à 115 °C pendant 30 minutes. Ce milieu est composé de glucose (10 g), de sulfate d'ammonium hydraté (0,01 g), de chlorure de potassium (0,2 g), de chlorure de sodium (0,2 g), de sulfate de magnésium heptahydraté (0,1 g), de sulfate de manganèse monohydraté (0,002 g), de sulfate de fer heptahydraté (0,002 g), d'extrait de levure (0,5 g), de tricalcium phosphate (5 g), d'agar (15 g), de bleu de bromophénol (0,025 g) et de nystatine (2 gouttes).

Après 7 jours d'incubation, les souches ont été sélectionnées et isolées en fonction de leur diversité morphologique. La distinction morphologique des colonies a été réalisée en se basant sur des critères macroscopiques décrits par Sharma et al. (2011), comprenant la forme, la couleur, l'aspect et le diamètre des colonies ainsi que des halos de solubilisation. L'apparition d'un halo transparent autour des colonies en croissance indique la solubilisation du phosphate, due à la présence d'acides produits par les BSP (Figure 2).

Le processus d'isolement s'est déroulé en trois étapes : une pré-culture, une sélection et une purification des souches bactériennes sur le milieu PVK, selon la méthode décrite par Guety et al. (2024). Les souches ont été sélectionnées et isolées en fonction de leur distinction morphologique basée sur des critères similaires, puis le diamètre des colonies et celui des halos de solubilisation des phosphates ont été mesurés, et l'indice de solubilisation (IS) a été calculé selon la formule suivante.

$$IS (\%) = \frac{\text{Diamètre de la colonie} + \text{Diamètre de la zone claire}}{\text{Diamètre de la colonie}}$$

Les souches isolées et purifiées, présentant un indice de solubilisation le plus élevé ($IS > 2$), ont été choisies puis cultivées dans un milieu liquide PVK afin de les multiplier, dans le but d'obtenir une quantité significative d'inoculum bactérien pour la production d'une solution de microflore accélératrice (ME). Ces différentes souches bactériennes, une fois réunies, formeront notre inoculum bactérien, désigné comme consortium bactérien dans le cadre de cette étude (Figure 3).

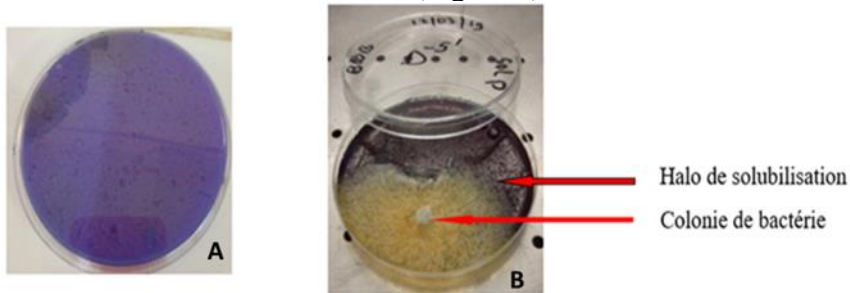


Figure 2 : Milieu témoin non inoculé (A), Microplaque contenant le milieu Pikovskay's solide inoculé présentant un halo de solubilisation autour d'une colonie bactérienne (B)

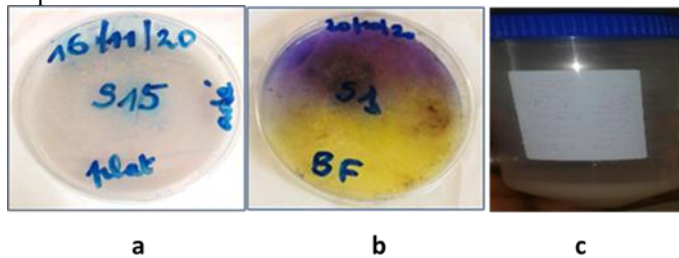


Figure 3: a) Isolât S15 ; b) Isolât S1 et c) consortium bactérien (S15 +S1)

- Préparation de la solution de microorganismes efficaces (ME)

Pour la préparation du phospho-compost, la solution ME s'est faite en mélangeant 8 ml du consortium bactérien isolé à 32 ml de mélasse et 760 ml d'eau stérile. La solution de 800ml obtenue a été incubé pendant 7 jours à 30 °C. Ensuite, la solution initiale fabriquée (800ml) a été ajoutée dans un seau contenant 0,8 litre de mélasse et 78,4 litres d'eau stérile afin d'obtenir 80 litres d'une solution de microorganismes efficaces (ME) prête à l'emploi. Cette quantité a suffi pour préparer tous les traitements de compost (Figure 4).



Solution initiale

Solution finale 80L

Figure 4: Solution de la microflore accélératrice efficace (ME) initiale et finale

- Quantification et analyse de la diversité microbienne isolée des sols
L'analyse des communautés bactériennes présentes dans le consortium isolé s'est effectuée grâce à la biologie moléculaire basée sur l'extraction de l'ADN total des isolats bactériens au laboratoire d'écologie microbienne de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) au Québec, Canada (Québec, QC Canada).

L'analyse des séquences ainsi que leur regroupement en unités taxonomiques des séquences a été effectué sur la plateforme bio-informatique du LEM de l'IRDA et ont été regroupées en OTUs sur la base de 97 % de similarité entre les séquences. La diversité bactérienne a été évaluée à travers l'indice de diversité de Shannon (Sh), l'indice Evenness (E) et l'indice Chao1(C).

Fabrication du bio-phospho-compost

- Collecte des résidus organiques de récolte

Les résidus organiques (RO) constitués de paille de riz et de maïs sont collectés auprès des paysans puis découpés finement à la machette afin de faciliter la décomposition de ceux-ci lors du compostage. La caractérisation chimique de ces résidus RO a été faite. La dose de 750 kg/ha a été utilisée dans cette étude comme suggéré dans les travaux de Kouamé *et al.*, (2017).

- Préparation du bio-phospho-compost

Trois composts (C1, C2 et C3) ont été élaborés en utilisant trois doses différentes de roches phosphatées du Maroc (RPM) : respectivement 150 kg/ha, 300 kg/ha et 450 kg/ha. Les roches phosphatées ont été combinées avec des résidus de récolte (RO) à la dose de 750 kg/ha, du fumier de volaille à raison d'un tiers du poids des RO utilisé, et une solution de microorganismes

efficaces (ME) apportée à raison de 8,8 litres par couche. Cette combinaison visait à accélérer la décomposition aérobie des matériaux organiques.

Le compostage a été réalisé en suivant la méthode décrite par la FAO (2002). Les résidus de récolte (RO) collectés ont été préalablement arrosés d'eau et laissés au repos pendant 7 jours. Pour le compostage, une première couche a été constituée en empilant une couche de paille, suivie d'une couche de fumier, puis d'une couche de roche phosphatée du Maroc (RPM), et enfin de 8,8 litres de la solution de microorganismes accélératrice efficaces (ME) préparée précédemment, afin d'accélérer la décomposition aérobie des résidus. Cette opération a été répétée trois fois jusqu'à ce que le tas atteigne une hauteur, une largeur et une longueur d'un mètre, puis il a été recouvert d'une bâche en plastique (Figure 5).

Après deux semaines, la masse s'est réduite et l'andain s'est aplati. La bâche a été retirée et la masse entière a été retournée pour favoriser la décomposition aérobie. De plus, des trous d'environ 15 cm ont été réalisés dans le composteur pour permettre l'évacuation de l'eau et maintenir une humidité adéquate. En règle générale, le compost est considéré comme prêt lorsque le tas s'est refroidi et que sa hauteur est réduite à 70 cm.



Figure 5 : Dispositif de compostage : Couche 1 avec paille et fumier (a) ; apport de microflores accélératrice efficace (ME) par couche (b) ; apport de la roche phosphatée (RP) par couche (c) ; Superposition de différentes couches de résidus organiques (d) ; compost final recouvert pour décomposition (e)

- Collecte des données et caractérisation chimique des composts fabriqués

Au cours du compostage, des retournements hebdomadaires ont été réalisés sans apport d'eau jusqu'à la maturation des composts. A l'intérieur de chaque tas, les mesures hebdomadaires ont été prises à partir du 10^e jour du

compostage avant et après chaque retournement et ont concerné la température, l'humidité et la faune. Des échantillons du compost ont été prélevés chaque dix (10) jours sur les différents composts jusqu'à leur maturation pour la détermination des paramètres suivants : le niveau de décomposition, le pH, le taux de décomposition (Td), les faunes, le nombre de BSP, le carbone organique, l'azote et la teneur en phosphore (P_2O_5).

Les bio-phospho-compost mures ont été ensuite caractérisés pour déterminer leur valeur fertilisante.

Pendant le processus de compostage, des retournements hebdomadaires ont été effectués sans ajout d'eau jusqu'à la maturation des composts. À l'intérieur de chaque tas, des mesures hebdomadaires ont été prises à partir du 10^e jour du compostage, avant et après chaque retournement, portant sur la température, l'humidité et la présence de la faune. Des échantillons de compost ont été prélevés tous les dix jours sur les différents composts jusqu'à leur maturation, afin de déterminer les paramètres suivants : le niveau de décomposition, le pH, le taux de décomposition (Td), la faune, le nombre de BSP, le carbone organique, l'azote et la teneur en phosphore (P_2O_5). Les bio-phospho-compost mures obtenus ont ensuite été caractérisés pour évaluer leur valeur fertilisante.

√ Humidité

L'humidité des composts a été vérifiée pendant les retournements puis le taux d'humidité a été déterminé après séchage de l'échantillon à 105°C pendant une nuit selon la formule suivante :

$H (\%) = ((P1 (g) - P2(g)) / P2 (g)) * 100$ ou H est le taux d'humidité du compost ; P1 (g) représente la masse humide de l'échantillon de compost et P2 (g) : la masse sèche de l'échantillon de compost.

√ Température

La température du tas a été notée à l'aide d'un thermomètre enfoui au centre de chaque compost durant 7-10 minutes, régulièrement, chaque cinq (05) jours, (le matin). Cette mesure a été effectuée pour tous les traitements.

√ pH

La détermination des différents pH a été réalisée sur des prises différentes, dans un rapport échantillon/solution 1/2,5 puis agité pendant 5 minutes. Après avoir laissé reposer pendant 2h, la mesure des pH est effectuée dans le surnageant

√ Teneur en phosphore (P_2O_5), azote, carbone, matière organique et bases échangeables

Les teneurs en phosphore assimilable a été déterminée par colorimétrie après extraction avec la méthode Mehlich (1984), et en phosphore total selon la méthode d'Olsen modifié par Dabin (Olsen et Sommers, 1982), les bases échangeables K, Ca, Mg, Mn selon Helmke et Sparks, 1996).

Le carbone organique total (C) et l'azote total Kjeldahl (N) ont été mesurés, respectivement par la méthode Walkley-Black et la méthode Kjeldahl. Le rapport C/N est alors calculé en fonction de la concentration en C et N. La matière organique est déterminée en multipliant par 2.

√ Taux de décomposition

Un échantillon d'environ 50 g de matières en décomposition a été prélevé chaque dix (10) jours dans chaque traitement. Le prélèvement s'est fait après un mélange homogène du tas. À l'aide d'un tamis de 2 mm de diamètre, la fraction fine (Mf), inférieure à 2 mm de diamètre, et celle grossière (Mg), supérieure à 2 mm de diamètre, ont été recueillies puis ont été pesée à l'aide d'une balance électronique pour déterminer les masses respectives.

$Td (\%) = (Mf \times 50g) / 100$ où Td = taux de décomposition, la masse fine (Mf) = (50g - masse grossière (Mg) et 50g la masse de la matière en décomposition prélevée.

√ Comptage de la population macrofaune

Les tas ont été fouillés pour identifier d'éventuelle macrofaune. Il s'agit de noter et compter la présence de : vers de terre épigés, mille-pattes (diplopodes), vers blanc (larve des hannetons), grillons (orthoptères), crustacés (cloportes), asticots (diptères).

√ Dénombrement des microorganismes présent dans le compost

Le dénombrement de la microflore a été déterminé sur le milieu NB (Nutrient Broth) et celle solubilisant le phosphate sur le milieu Pikovskay's (PVK) liquide. Après, 3 jours (NB) et 7 jours (PVK) d'incubation, le nombre de bactéries totales et solubilisatrices de phosphate a été déterminé grâce au lecteur de microplaque.

Traitements statistiques des données collectées

L'analyse statistique a été effectuée à l'aide du logiciel statistical analysis system (SAS) version 9.0, au seuil de significativité de 5% selon le test de Student and Newman-Keuls (SNK) pour comparer les moyennes observées sous les différents composts.

Résultats

Caractérisations physico-chimiques et microbiologique des sols de la zone d'étude

Granulométrie et caractéristiques chimiques

La caractérisation des sols de Dimpleu révèle une texture sablo-limoneuse, composée de 61,1 % de limon et 30,9 % de sable (Tableau I). Dans l'ensemble, le sol est acide, avec un pHeau de 5,2 et un pHkcl de 4,1 (Tableau I). La différence de pH ($\Delta pH = pHeau - pHkcl$) est supérieure à 1, ce qui indique un potentiel d'acidification fort du sol. En effet, une différence de pH significative entre les deux mesures suggère une grande réserve d'acidité. Les

teneurs en azote (0,06 %), phosphore (0,91 %), potassium (0,09 %), carbone (0,64 %) et matière organique (1,1 %) sont faibles. Une décomposition normale de la matière organique est observée, avec un rapport C/N de 10,7 (Tableau I). La capacité d'échange cationique (CEC) est faible (15,1 cmol+.kg-1) et le taux de saturation est moyen (inférieur à 60 %) (Tableau I).

Caractéristique microbiologique du sol

- Enumération bactérienne

Le nombre de bactéries totales aérobies (BT) cultivables, dénombrées sur le milieu NB est de 50.10^3 bactéries /g de sol sec et est très hautement significativement à $P < 0.0001$ plus importante que celle solubilisatrices du phosphore (BSP) avec $2,1. 10^3$ bactéries /g de sol sec (Tableau II).

Tableau I : Caractéristiques physico-chimiques des sols avant expérimentation

Paramètres	Valeurs
Argile (%)	8
Limon (%)	61,1
Sable (%)	30,9
pHeau	5,2
pH _{KCl}	4,1
P total (g.kg ⁻¹ sol sec)	9,125
P assi (g.kg ⁻¹ sol sec)	4,3
C organique (g.kg ⁻¹ sol sec)	6,4
N total (g.kg ⁻¹ sol sec)	0,6
MO (g.kg ⁻¹ sol sec)	11,01
C/N	10,7
K (g.kg ⁻¹ sol sec)	0,9
Na ⁺ (mmol+.kg ⁻¹)	0,45
Ca ⁺⁺ (mmol+.kg ⁻¹)	2,967
Mg ⁺⁺ (mmol+.kg ⁻¹)	0,53
Al ⁺⁺⁺ (mmol+.kg ⁻¹)	0,106
CEC (mmol+.kg ⁻¹)	15,11
S/T %	59,9

Tableau II : Nombre de Bactéries totales (BT) x 103/g sol sec et de bactéries solubilisatrices des phosphates (BSP) x 103/g sol sec présentes sur les sols de la parcelle étudiée

Site	BT	BSP	Pr
Dompleu	50± 7 ^a	2,1 ± 0,5 ^b	Pr* <0,0001

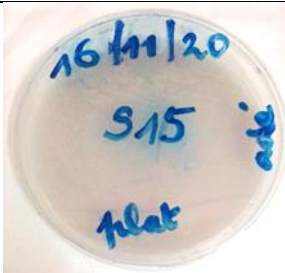
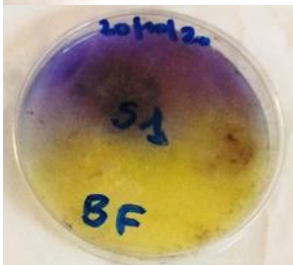
* Très hautement Significatif à $P < 0,001$. Les données sur une même ligne suivie de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-keuls $p < 0,05$

Caractéristiques macroscopiques des isolats bactériens solubilisateurs de phosphates

L'étude macroscopique les isolats S15 et S1 indique que l'isolat S15 est de couleur blanche crémeux, d'aspect gluant et de forme arrondie alors que

S1 a un aspect cotonneux, de couleur jaune vert et une forme arrondie (Tableau III). S15 et S1 ont respectivement 7,6 cm et 5,8 cm comme des diamètres de la zone halo et ont obtenus au bout de 07 jours, des indices de solubilisation (IS) respectivement de 4,8 et 3,2 (Tableau III).

Tableau III : Caractéristiques macroscopiques des isolats bactériennes solubilisatrices de Phosphate. *Indice de solubilisation= IS*

Isolats	Caractères morphologiques	Photo	Diamètre Halo (cm)	IS
S15	Aspect gluant, de couleur blanc crémeux et de forme arrondie		7,6±1,3	4,8±0,9
S1	Aspect coton, de couleur jaune vert et une forme arrondie		5,8±0,4	3,6±0,6

Quantification et Richesse microbienne du consortium bactérien

Après la quantification par qPCR, le nombre total de bactéries présent dans le consortium est de $3,9.10^{+8}$ UA/g sol sec) (Tableau IV). Les indices de la diversité microbienne indiquent que l'indice de Chaos est de 257,3 alors que celui de Shannon est supérieur à 4 et que l'indice de Evenness tend vers 1 (Tableau IV), témoignant une diversité élevée avec une répartition équilibrée des espèces au sein de la population.

Composition de la diversité microbienne du consortium bactérien

L'abondance relative des principaux groupes de bactéries et des différents genres détectés dans le consortium est présentée sur les figures 6 et 7. On note cinq (05) phyla présents. Il s'agit du phylum des Firmicutes (77%), le plus dominant avec 15 genres, suivi des phyla des Actinobacteria (8%) et des Proteobactéria (8%) avec 01genre chacun, enfin le phylum des Halobacterota (5 %) avec 01genre et des Chloroflexi 2% avec 01 genre par phylum (Figure 6 et 7). Dans le consortium, les genres les plus représentatifs dans le phylum des Firmicutes sont les Clostridium sp. (22,5%) et les Bacillus sp. (14,5%) (Figure 6).

Tableau IV : Nombre de bactéries totales en Unité d’amplification (UA/ g sol sec), Nombre d’Unité Taxonomique Opérationnelles (OTU) observées et les indices de richesse microbienne (Shannon, Chao1, Evenness)

Ecologie	Quantification et Richesse microbienne				OTU Observées
	Nombre de Bactéries	Shannon	Chao1	Evenness	
Consortium	$3,9 \cdot 10^{+08}$	4,4	257,3	0,8	253

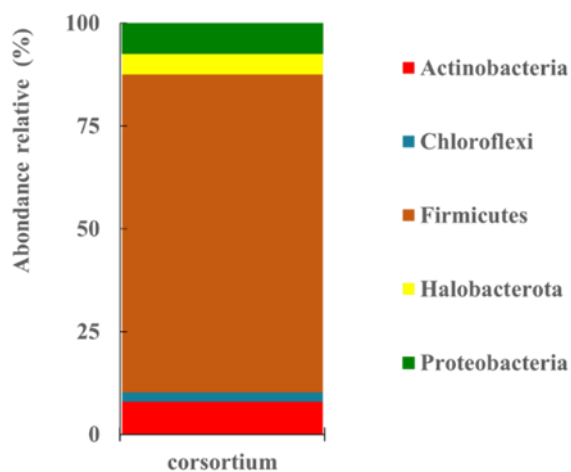


Figure 6 : Proportions relatives des principaux groupes procaryotiques détectés dans le consortium (groupes supérieurs à 1%)

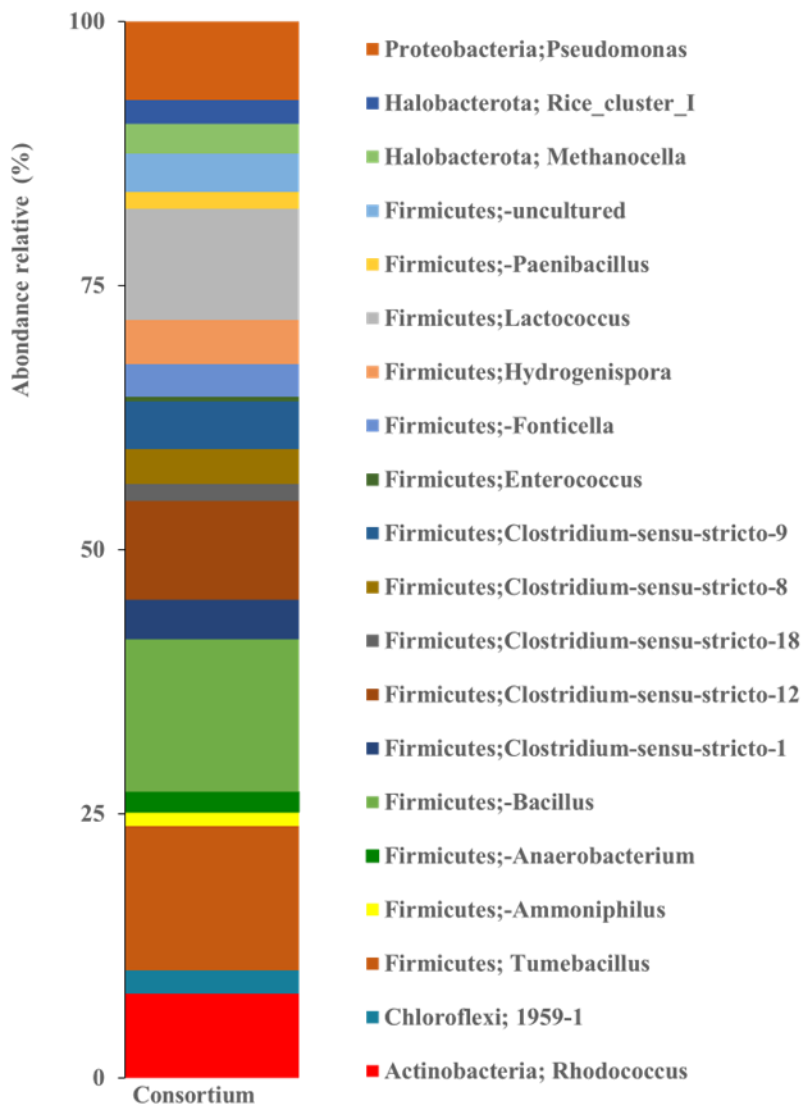


Figure 7: Proportions relatives des principaux genres procaryotiques détectés dans le consortium

Caractérisation chimique des résidus de récolte (RO) et de la fiente de volaille

L'analyse chimique des résidus organiques de récoltes (RO) montre qu'ils sont composés majoritairement du carbone (49,3 %), du potassium (25,0 g.kg⁻¹), suivi de l'azote (19,6 g.kg⁻¹) et du phosphore (1,03 g.kg⁻¹) et contiennent aussi des oligo-éléments comme Ca (2,9 g.kg⁻¹), Fe (4,66 g.kg⁻¹), Zn (5,7 g.kg⁻¹) et le Mg (1,93 g.kg⁻¹) (Tableau V).

La composition chimique de la fiente de volaille utilisée dans cette étude est caractérisée par une richesse en matière organique (N = 3,1 % ; C =

42,1 %) avec un rapport C/N = 13,37, traduisant une bonne décomposition. La fiente de volailles est moyennement riche en P (1,14 %), en K (2,8 %), en Ca (4,09 %) et en Mg (1,36 %) mais pauvre en oligo-éléments (Fe (1,06 g.kg⁻¹), Zn (0,03 g.kg⁻¹)) (Tableau V).

Tableau V : Caractéristiques chimiques et microbiologiques des matériaux utilisés dans le compostage (résidus de récolte organique (RO) et Fiente de volaille. BT (bactéries aérobies totales), BSP (bactéries solubilisateurs des phosphates), nd (non déterminé))

Nutriments	Valeurs (g.kg ⁻¹)	
	RO	Fiente
N (g/kg)	19,60	30,94
P (g/kg)	1,03	11,48
K (g/kg)	25,00	28,84
Ca (g/kg)	2,9	40,96
Mg (g/kg)	1,93	13,63
Fe	4,66	1,06
Zn	5,7	0,03
C (g/kg)	493,3	420,90
C/N	25,16	13,37
MO (g/kg)	986,6	841,8
BT (bactéries /g MS)	nd	1,3. 10 ⁷
BSP (bactéries /g MS)	nd	2. 10 ⁵

Caractérisation des composts produits

Evolution de la température lors du compostage

Sur la figure 8, on assiste à une élévation de la température dès le début du compostage jusqu' au 14^{ième} jour (la phase thermophile) puis à une chute de la température du 14^{ième} au 28^{ième} jours de compostage (phase de refroidissement) et enfin une phase de maturation qui dure 7 jours (du 28^{ième} au 35^{ième} jours du compostage). La température s'élève à 64,3 °C pour C1 (150kg RPM/ha), 65,9 °C pour le compost C2 (300kg RPM/ha) et à 67,5 °C pour le C3 (450kg RPM/ha) puis elle chute progressivement à partir du 14^{ième} jour et atteint entre 21 à 23 °C à la fin du compostage (35^{ième} jour).

Le processus de compostage se caractérise par un pH initial qui varie de 7,3 à 7,8 en fonction de la dose en roche phosphatée naturelle du Maroc (RPM). L'évolution du pH en fonction du temps montre trois phases différentes (figure 8). Le compostage passe par une phase acidogène de 14 jours, où le pH passe de 7,3 à 5,2 pour le compost 1 (C1), de 7,5 à 5,4 pour le compost 2 (C2) et de 7,8 à 5,7 pour le compost 3 (C3). Vers le 28e jour, il y a un passage rapide par une phase de neutralité quel que soit le type de compost. Au 35e jour, il y a passage par une phase d'alcalinisation où le pH atteint 7,8 pour le compost 1 (C1), 8,1 pour le compost 2 (C2) et 8,4 pour le compost 3 (C3). Le pH final légèrement alcalin (7,8 à 8,1), fait des composts un produit sans risques pour le sol et pour les plantes.

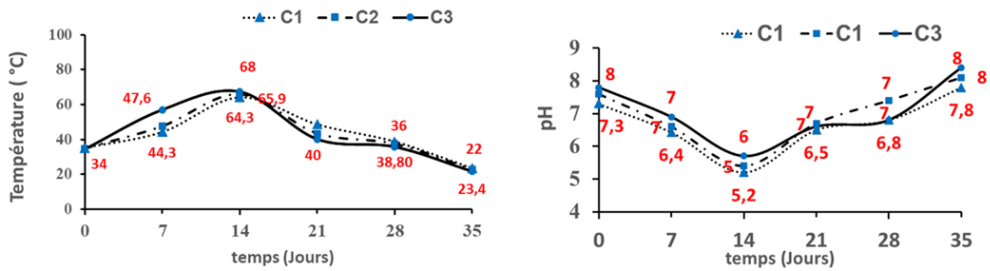


Figure 8 : Evolution de la température et du pH lors du compostage

Evolution de l'humidité du compostage

Lors du compostage, le taux d'humidité diminue significativement au cours du temps, environ 60% dans le compost jeune, il n'est plus que de 20% dans C1 mûr, 23,5 % dans C2 mûr et 24,4% dans C3 mûr dans le compost (Figure 9).

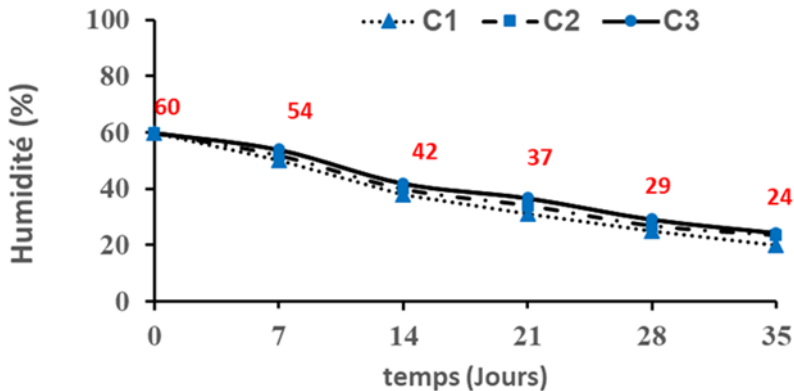


Figure 9 : Evolution du taux d'humidité lors du compostage

Evolution du taux de décomposition de la matière organique lors du compostage

Sur la figure 10, le taux de décomposition (Td) de la matière organique au 28^{ème} jour est de 50,3 % pour le compost C1 (150kg RPM/ha), 86,1% pour le compost C2 (300kg RPM/ha) et de 92,5 % pour le compost C3 (450kg RPM/ha). Au 35^{ème} jour, il est de 78 % pour le compost C1 (150kg RPM/ha), 93,5% pour le compost C2 (300kg RPM/ha) et de 98,5 % pour le compost C3 (450kg RPM/ha). L'état final des composts est présenté sur la figure 10.

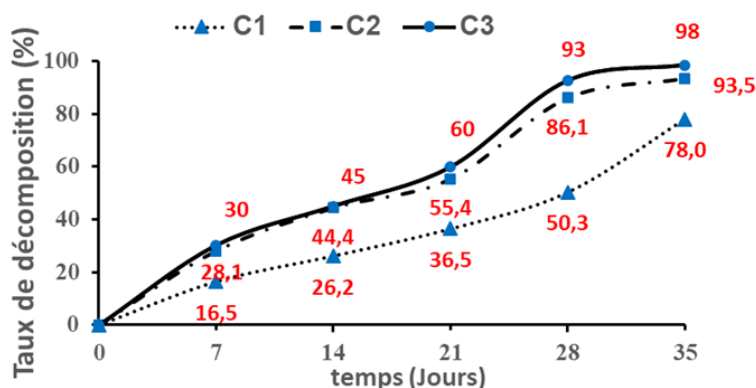


Figure 10 : Evolution du taux de décomposition des matières lors du compostage

Evolution de la matière organique (MO), azote, rapport C/N lors du compostage

Selon la figure 11, quel que soit la dose de roche phosphatée (RPM) dans le compost, la teneur en matière organique (MO) et le rapport C/N au cours du compostage baisse progressivement passant de 61 % MO initiale à environ 34,7 à 37,9 % MO et d'un rapport C/N de 28 à 29 initial à un C/N de 11 à 10 à la maturation du compost. Par contre, on assiste à un enrichissement des différents composts en azote passant initialement de 1 % N à 1,7 % N à leur maturité. D'ensemble, on constate une plus rapide minéralisation de la matière organique lorsque le compost contient la dose de 450 kg RPM/ha, comparativement aux composts C1 et C2 avec une diminution du taux de matière organique qui passe d'environ 60 % à environ 38 % après 35 jours de compostage (Figure 11).

Evolution de la microflore bactérienne aérobie totale et solubilisatrice des phosphates lors du compostage

La figure 12 indique une première phase caractérisée par la diminution du nombre de bactéries aérobie totale (BT) et des bactéries solubilisatrices de phosphates (BSP) quel que soit la dose de roche phosphatée dans le compost. Au 14^{ième} jour, les BT passent initialement de 10^8 BT/ g de matière sèche à $2,7 \cdot 10^5$ BT/ g MS pour le compost 1 (C1), à $4,3 \cdot 10^5$ BT/ g MS pour le compost 2 (C2) et à $6,5 \cdot 10^5$ BT/ g MS pour le compost 3 (C3). De même, les BSP passent initialement de 10^8 BT/ g de matière sèche à $1,3 \cdot 10^3$ BSP/ g MS pour le compost 1 (C1), à $2,5 \cdot 10^3$ BSP/ g MS pour le compost 2 (C2) et à $6,5 \cdot 10^3$ BSP/ g MS pour le compost 3 (C3). A delà des 14^{ième} jours, on note la seconde phase qui est caractérisée par l'augmentation du nombre des BT et BSP passant à environ $26 \cdot 10^8$ BT/ g MS et à $5,2 \cdot 10^5$ BSP/ g MS au 35^{ième} jour du compostage (Figure 12).

Evolution de la teneur en phosphore (P) lors du compostage

Au cours du compostage, le phosphore est conservé au sein des tas par la faible baisse en P constatée dans l'ensemble des tas. La teneur initiale en P des tas passant de 0,56 % à 0,54 % pour le compost C1, de 0,76 % à 0,74 % pour le compost C2 et de 0,96 % à 0,92 % pour le compost C3 (Figure 13). On note une perte maximale de - 4% par rapport à la teneur initiale en P des tas quel que soit la dose en roche phosphatée (RPM) appliquée.

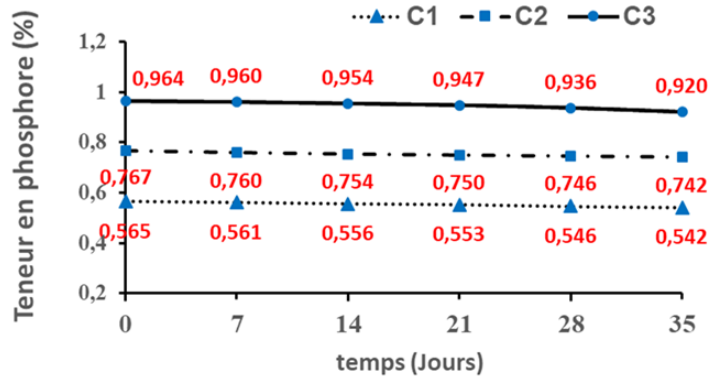


Figure 13 : Evolution de la teneur en phosphore (P) lors du compostage

Composition chimique des composts produits

Les différentes caractéristiques des composts préparés sont présentées dans le tableau VI. Le compost C1 présente des valeurs de MO totale (378 g/kg MS), de carbone (18,4 %) et de C/N (11,8) plus élevées que celles des composts C2 et C3 (Tableau VI). Elles sont respectivement de 35,5 % MO ; 17,75% C et un rapport C/N de 10,8 pour la C2 contre 34,7 % MO ; 17,35% C et un C/N de 10,2 pour la C3. En dehors de ces trois éléments (MO, C, C/N) dont les teneurs dans le C1 sont supérieures à celle des C2 et C3, tous les autres éléments nutritifs ont des teneurs plus élevées dans le compost C3 suivi du compost C2. En comparant, les paramètres des différents bio-phospho-composts avec la norme NFU 44-051, on constate que qu'ils répondent tous aux exigences des valeurs seuils définies par la norme NFU 44-051 (Tableau VI).

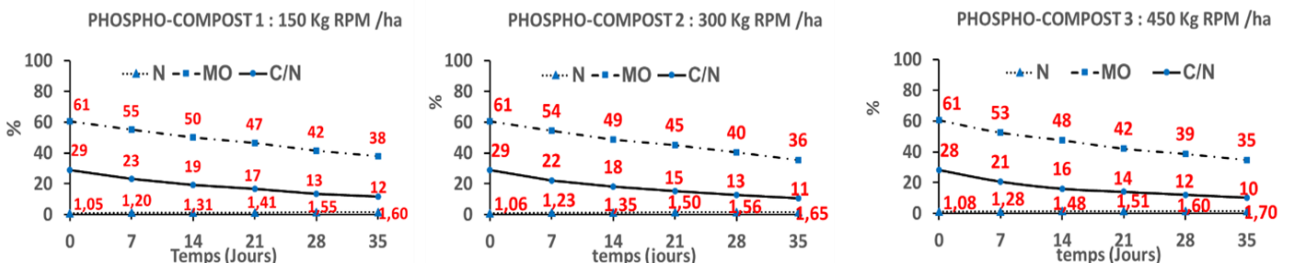


Figure 11 : Evolution de la teneur en matière organique (MO), azote, rapport C/N lors du compostage

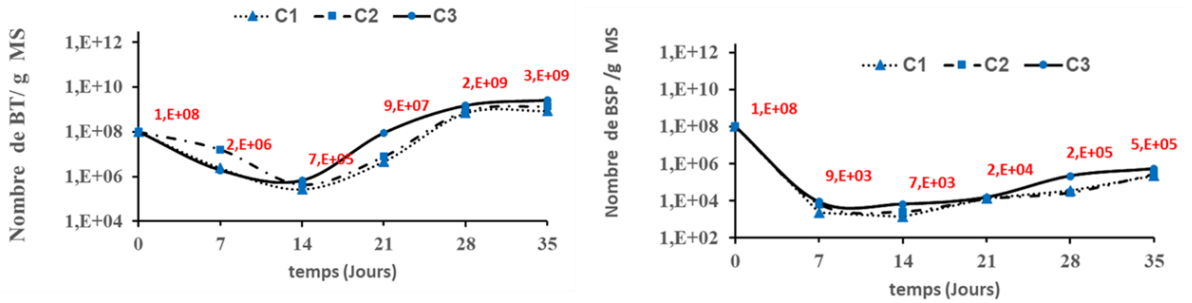


Figure 12: Evolution des bactéries aérobies totales (BT) et solubilisatrices des phosphates (BSP) lors du compostage par g de matière sèche

Tableau VI: Caractéristiques chimiques des composts finaux C1 (150 kg RPM/ha), C2 (300 kg RPM/ha) et C3 (450 kg RPM/ha). Source AFNOR, (2006)

Paramètres	C1	C2	C3	Norme NFU 44- 051
pHeau	7,8a	8,1a	8,4a	
P ₂ O ₅ total (% MS)	0,64c	1,25b	1,92a	< 3 %
C organique (% MS)	18,9a	17,5ab	17,35ab	< 3 %
N total (% MS)	1,6a	1,65a	1,7a	< 3 %
MO (g.kg ⁻¹ sol sec)	37,8 a	35,5 ab	34,7 ab	> 25 %
C/N	11,81a	10,75a	10,20a	> 8
K ₂ O (% MS)	1,22b	2,05b	2, 53a	< 3 %
Na (% MS)	0,68b	0,74b	0,93a	
Ca (% MS)	24,17a	25,43a	26,2a	
Mg (% MS)	1,13a	1,77a	1,85a	
Mn (mg/ kg MS)	444b	489b	599a	
Fe (mg/ kg MS)	2513c	3248b	4427a	
Zn (mg/ kg MS)	135c	167b	189a	< 600 mg/kg MS
Taux de décomposition (%)	78	93,5	98,5	

(Les données sur la même ligne suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Newman-keuls p<0,05)

Discussion

Etat de fertilité des sols de Dompleu

La caractérisation granulométrique des parcelles rizicoles de Dompleu (Man, Côte d'Ivoire) indique que les sols sont riches en limons avec plus de 60% et en sable (30%) mais ils sont pauvres en argile (moins de 10%). Cette faible teneur en argile rend ces sols moins fertiles puisque l'argile est la fraction granulométrique la plus active à cause de ces multiples fonctions en outre son association avec la matière organique formant le complexe argilo-humique qui est le site d'échange des cations, et anions (Kouadio et al., 2018). De plus, les faibles valeurs de pH eau (5,2) et de pHKCl (4,1) indique que les

sols sont moyennement acides avec une variation de pH supérieur à 1 ($\Delta\text{pH} > 1$), traduisant un fort potentiel d'acidification du sol. Cette acidité potentielle forte des sols favorisera la diminution de la nitrification, la déficience en phosphore, la toxicité aluminique et manganique, l'indisponibilité de certains éléments nutritifs et par conséquent limitera la croissance végétale. Ce qui justifierait les faibles teneurs en azote, en P, en K observées dans les sols de parcelles étudiées. Par ailleurs, le rapport C/N des sols de la parcelle qui est de 10,7 traduit une minéralisation normale de la matière organique. Toutefois, les valeurs en carbone et en matières organiques des sols de la parcelle étudiée sont faibles, cela pourrait provenir des pratiques culturales réalisées par les agriculteurs, qui est la surexploitation des sols des parcelles rizicoles, et constituer un obstacle à la bonne productivité du riz sur cette parcelle rizicole (Biaou et al., 2017; Gnahoua et al., 2023 ; Agegnehu et al., 2021). La valeur de la capacité d'échange cationique (CEC) obtenue des sols de la parcelle rizicole de Dompleu est faible ($15 \text{ mmol}^+ \cdot \text{Kg}^{-1}$) et est inférieure à la valeur seuil qui est de l'ordre de $15 \text{ Cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ proposée dans la littérature (Kouadio et al., 2018). Cette faible CEC de ces sols stipule qu'ils ont une faible capacité de rétention des bases et des cations en cas d'apport d'engrais minéral. Le taux de saturation en bases est moyen avec $V < 60$, indiquant que le sol n'est pas complètement saturé en éléments nutritifs essentiels, ce qui peut limiter la disponibilité des nutriments pour les plantes et nécessiter des apports réguliers en fertilisants pour maintenir la fertilité du sol

La caractérisation microbiologique a révélé un nombre important de bactéries aérobies totales et de bactéries solubilisatrices de phosphates de l'ordre de $5 \cdot 10^4$ bactéries par /sol sec. Toutefois, ce nombre de BT ou de BSP est 800 fois plus faible que celui dénombré sur la parcelle rizicole de la station de recherche de Man ($4290 \cdot 10^4$ bactéries par /sol sec) lors des études menées par Boueunan, (2019). Cette différence pourrait provenir du fort taux en limon et également de la faible teneur en matière organique constaté sur les sols de la parcelle rizicole de Dompleu. Cela pourra favoriser une structure massive des sols en réduisant l'aération et par conséquent inhiber la prolifération de la microflore (Annabi, 2005). Il ressort de cette caractérisation physico-chimique et microbiologique que l'utilisation donc dans le cas de cette étude d'amendements organiques comme le compost, qui constitue une source importante de matière organique et d'éléments nutritifs pour le sol (Saleem et al., 2013), pourra servir à la restauration du sol et remédier à cette baisse de la fertilité constatée.

Caractéristiques chimiques des bio phospho-composts

Caractéristiques du compostage

Quelle que soit la dose de roche phosphatée du Maroc (RPM) ajoutée au compost, nos résultats mettent en évidence une hausse de la température de

20 °C à 70 °C dès le deuxième jour et jusqu'au quatorzième jour du processus de compostage, témoignant d'une production de chaleur significative. Cette élévation initiale de la température est attribuable à la présence abondante de microorganismes thermophiles responsables de la décomposition de la matière organique des substrats (Chennaoui et *al.*, 2016), ainsi qu'à la richesse en matières organiques facilement biodégradables. Au cours du compostage, ces composés organiques sont dégradés par des microorganismes via le processus de fermentation aérobie, entraînant une production importante de chaleur et de dioxyde de carbone. Selon Attrassi et *al.*, (2005), cette montée rapide de la température en début de compostage est également influencée par la nature et la composition des mélanges initiaux utilisés, ainsi que par l'activité précoce des microorganismes. L'analyse moléculaire de la diversité bactérienne du consortium ajouté aux résidus organiques initiaux révèle la prédominance d'espèces telles que *Clostridium* spp. (22%), *Bacillus* spp. (14%), et *Pseudomonas* spp. (7,5 %), réputées pour leur capacité à solubiliser les phosphates et à produire des acides (Kutu et *al.*, 2019). Ces espèces, durant le processus de compostage, produisent des enzymes qui favorisent et accélèrent la dégradation de la matière organique. Par ailleurs, indépendamment de la dose de RPM, une acidification du milieu est observée lors de la décomposition des résidus organiques par les microorganismes thermophiles. Cette acidification est due à la libération d'acides humiques de la matière organique, favorisant ainsi la solubilisation du phosphate naturel (Ablede et *al.*, 2020). Cette acidification pourrait résulter de la production d'acides organiques issus de la décomposition des composés organiques, affectant ainsi le pH du milieu (Taktek, 2015; Yu et *al.*, 2011). Le maintien de conditions thermophiles et acidophiles pendant environ deux semaines dans les tas de compost témoigne du bon déroulement du processus de compostage, éliminant ainsi les microorganismes pathogènes et une grande partie des substances phytotoxiques (Biekre et *al.*, 2018).

Le rapport C/N initial, de l'ordre de 29, diminue progressivement au cours des cinq semaines de compostage pour atteindre une valeur comprise entre 10,20 et 11,8, indépendamment de la dose de RPM. Cette diminution est attribuable à la consommation prédominante de carbone par rapport à l'azote lors de la minéralisation de la matière organique par les microorganismes. Un rapport C/N compris entre 10,20 et 11,8 au 35^e jour atteste de la maturité des bio-phospho-composts. Selon Sow (2018), un compost mûr présente un rapport C/N inférieur ou égal à 20 et est considéré comme de qualité pour une utilisation en agriculture.

Nos résultats révèlent une phase de maturation d'environ deux semaines, caractérisée par une diminution progressive de la température et une alcalinisation progressive du milieu jusqu'au 35^e jour, date à laquelle le taux de décomposition des différents composts est de 78% pour le C1, 93,5% pour

le C2 et 98,5% pour le C3. Cette remontée du pH est causée par la consommation des acides et la production d'ammonium, signes de maturation du compost. Ainsi, l'obtention d'un compost mûr avec un taux de décomposition supérieur à 80% en seulement cinq semaines de compostage, quel que soit la dose de RPM, peut être attribuée à la composition du consortium bactérien ajouté au compost ainsi qu'à l'ajout de matériaux riches en sucre tels que la mélasse de canne à sucre, source directe de carbone pour les microorganismes, favorisant ainsi leur activité spécifique et accélérant la décomposition des matériaux organiques.

Ces résultats diffèrent de ceux obtenus par Ablet et *al.* (2019), qui ont constaté un compost phosphaté mature à base de roche phosphatée du Togo et du Maroc, sans inoculation bactérienne, après 14 semaines de compostage. Ils diffèrent également de ceux de Lompo et *al.* (2009) et d'Ousmane et *al.* (2020), dont les composts phosphatés ont nécessité entre 4 et 7 mois de compostage. L'ajout de BSP a considérablement réduit la durée de compostage à 5 semaines. De plus, cette étude a révélé une accélération du taux de décomposition du tas de compost avec une dose élevée de roche phosphatée du Maroc (300 à 450 kg/ha), atteignant un taux de décomposition de plus de 92%.

Caractéristiques des composts produits

La caractérisation des bio-phospho-composts finaux produits (C1, C2, C3) a révélé qu'ils présentent un pH légèrement alcalin et des rapports C/N compris entre 10,20 et 11,81, traduisant ainsi une décomposition normale de la matière organique et une forte minéralisation de celle-ci. Les concentrations élevées en éléments fertilisants tels que le phosphore (P), l'azote (N), le potassium (K), le carbone (C), le calcium (Ca), le magnésium (Mg), ainsi que les concentrations relativement moyennes en oligoéléments tels que le fer (Fe), le manganèse (Mn) et le zinc (Zn), indiquent que ces bio-phospho-composts possèdent des propriétés amendantes et fertilisantes. Conformément aux normes définies par la norme NFU 44-051, établie par Leclerc (2001) et Sow (2018), ces composts répondent aux exigences des valeurs seuils. De plus, le pH final légèrement alcalin des bio-phospho-composts produits (compris entre 7,8 et 8,4) en fait des produits sans risques pour le sol et les plantes, conformément à la norme NFU 44-051. Cette valeur de pH obtenue dans notre expérimentation est cohérente avec les travaux de Ablet et *al.*, (2020), qui ont obtenu un pH final similaire (compris entre 7,5 et 8,5) pour le phospho-compost réalisé avec la roche phosphatée du Maroc (RPM).

Les valeurs du taux de décomposition, du pH, de la teneur en azote (N), phosphore (P), potassium (K), ainsi qu'en oligoéléments (calcium (Ca), magnésium (Mg), manganèse (Mn), zinc (Zn), fer (Fe), sodium (Na)) sont globalement plus élevées lorsque le compost contient la dose D450,

comparativement aux doses D300 et D150. Cette augmentation du pH, plus marquée lorsqu'on augmente la dose en RPM, pourrait être attribuée à sa richesse en CaO, représentant 49,5 % de la RPM, qui joue un rôle de tampon dans le milieu et élève le pH pendant le compostage. Selon Dabre et al. (2017), cette hausse du pH est due à la liaison du calcium contenu dans le phosphate naturel du Maroc (49 % Ca) au complexe argilo-humique, favorisant ainsi la baisse de la concentration des ions H^+ dans la solution du sol et, par conséquent, augmentant le pH du milieu. De même, l'augmentation de la teneur en phosphore (P), carbone (C), azote (N), ainsi que du nombre des bactéries totales aérobies (BT) et solubilisatrices de phosphates (BSP), plus importante à la dose D450 qu'à la dose D150 et D300, peut être attribuée à la diversité des espèces bactériennes présentes dans le consortium utilisé, dont les activités favorisent la décomposition des matériaux organiques du compost et la libération des minéraux. Comme l'ont souligné Kutu et al., (2019), la qualité et l'efficacité du compost dépendent de facteurs tels que la composition et la diversité de la communauté microbienne fonctionnelle présente dans le compost. Il est également possible que la teneur en P_2O_5 de la RPM, différente dans chaque dose, joue un rôle dans ces observations.

Conclusion

Cette étude a été entreprise dans le but d'analyser les propriétés physico-chimiques et microbiologiques des bio-phospho-composts élaborés afin d'apprécier leur valeur fertilisante. Nos résultats mettent en évidence que les bio-phospho-composts finaux produits (C1, C2, C3) présentent un pH légèrement alcalin, des rapports C/N compris entre 10,20 et 11,81, et sont enrichis en éléments fertilisants tels que le phosphore (P), l'azote (N), le potassium (K) et le carbone (C), quelle que soit la dose de RPM, ce qui atteste de leur qualité amendante et fertilisante.

Il ressort de cette étude que l'apport de bactéries solubilisatrices de phosphate a permis de réduire considérablement la durée des composts à 5 semaines 6 semaines au lieu de 4 mois à 07 mois.

Remerciements : Nous tenons à remercier sincèrement l'Office Chérifien du Phosphate (OCP-Africa) pour le soutien financier et le Centre National de Recherches Agronomiques (CNRA) de Man pour le soutien technique apporté à la réalisation du projet de recherche ASORPRI.

Conflits d'intérêts : Les auteurs déclarent qu'il n'y a pas de conflits d'intérêts.

Contributions des auteurs: Affi Jeanne **BONGOUA-DEVISME**, Wongbe Beralex **BOUEUNAN** ont participé à la réalisation des travaux sur le terrain,

à la conception, puis à la rédaction et à la mise en forme de l'article; Franck Michael Lemounou **BAHAN** étant le superviseur à la réalisation de toutes les étapes de ce travail.

Financement: Cette recherche a été financée par l'Office Chérifien du Phosphate (OCP) Africa.

Disponibilité des données: Les données générées ou analysées au cours de cette étude sont fournies dans leur intégralité dans l'article publié et sont accessibles chez l'auteur correspondant.

References:

1. Abbasi, M. K., Musa N., Manzoor M. (2015). Mineralization of soluble P fertilizers and insoluble rock phosphate in response to phosphate-solubilizing bacteria and poultry manure and their effect on the growth and P utilization efficiency of chilli (*Capsicum annuum* L.). *Biogeosciences*, 12(15): 4607–4619. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4607-2015>
2. Ablede K. A., Koudjega K., Ganyo K. K., Kpemoua E. K., Lombo Y., (2020). Amélioration de la solubilisation des phosphates naturels de faible réactivité par phospho compostage à base de fumier. *Bul. Rech. Agro. Ben.*, 175-181. DOI: http://www.slire.net/download/2583/article_22_pg_brab_n_sp_cial_it_ra_oct_2019_ablede_et_al_am_lioration_solubilisation.pdf
3. AFNOR (2006). Norme internationale ISO 22198 : 2006. Norme française NF U 44-051. Amendements organiques Dénominations, spécifications et marquage. 17p
4. Agegnehu, G., Amede, T., Erkossa, T., Yirga, C., Henry, C., Tyler, R., Sileshi, G. W. (2021). Extent and management of acid soils for sustainable crop production system in the tropical agroecosystems: a review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 71(9): 852-869. <https://doi.org/10.1080/09064710.2021.1954239>
5. Annabi, M. (2005). Stabilisation de la structure d'un sol limoneux par des apports de composts d'origine urbaine: relation avec les caractéristiques de leur matière organique. Thèse de Doctorat Institut National Agronomique, Paris-Grignon, Paris, France. 281p
6. Asuming-Brempong S. et Anipa B., (2014). The Use of Rock Phosphate and Phosphate Solubilising Fungi (*Aspergillus niger*) to Improve the Growth and the Yield of Upland Rice on Typical Kandiudal. *West African Journal of Applied Ecology*, 22(1). 27-39.

7. Atieno M, Herrmann L, Nguyen HT, Phan HT, Nguyen NK, Srean P, Than MM, Zhiyong R, Tittabutr P, Shutsrirung A, Bräu L, Lesueur D. (2020). Assessment of biofertilizer use for sustainable agriculture in the Great Mekong Region. *J Environ Manage*, 275(1): 111300. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111300.
8. Attrassi B., Mrabet L., Douira A., Ouine K., El Haloui N., (2005). Etude de la valorisation agronomique des composts des déchets ménagers. Université Ibn Tofail. Kenitra (Maroc) 6p.
9. Bekayo D. N., (2003). L'utilisation du compost est-elle une solution pour une production agricole durable des savanes africaines? In : Jamin J. Y., Boukar L. S., Floret C. . Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, mai 2002, Garoua, Cameroun. Prasac, N'Djamena, Tchad - Cirad, Montpellier, France, 3p.
10. Biaou, O. D. B., Saidou, A., Bachabi, F. X., Padonou, G. E., et Balogoun, I. (2017). Effet de l'apport de différents types d'engrais organiques sur la fertilité du sol et la production de la carotte (*Daucus carota L.*) sur sol ferrallitique au sud Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5): 2315-2326. 10.4314/ijbcs.v11i5.29
11. Biekre A.H. T, TIE Bi Tra et DOGBO D. O (2018). Caractéristiques physico-chimiques des composts à base de sous-produits de ferme de Songon en Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 12(1): 596-609, DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v12i1.45>
12. Boueunan W. B. (2019). Caractérisation des bactéries solubilisatrices des phosphates isolées des sols de rizière : cas de la parcelle rizicole de man (ouest de la côte d'ivoire). Mémoire de Master Diplôme de Master en Sciences de la Terre Spécialité Pédologie, Université Felix Houphouët Boigny, 67p.
13. Chennaoui M, Salama Y., Makan A., Mountadar M. (2016). Compostage en cuve des déchets ménagers et valorisation agricole du compost obtenu. *Algerian journal of arid environment*, 6(2) : 53-66
14. Dabre A., Hien E., Der Some et Drevonjj (2017). Effets d'amendements organiques et phosphatés sous Zaï sur les propriétés chimiques et biologiques du sol et la qualité de la matière organique en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(1), 473-487.
15. Dagbenonbakin G., Djenontin A. J., Ahoyo Adjovi N., Igue M. A., Mensah G. A., (2013). Production et utilisation de compost et gestion des résidus de récolte. Fiche technique. Dépôt légal N°6529 du 18/01/2013, 1er trimestre 2013, Bibliothèque Nationale du Bénin, 12 p.

16. Essui A.R. (2020). Effets des durées de compostage de la fiente de poulet sur les paramètres agronomiques de la laitue (*Lactuca sativa* L.). Mémoire de Master en Bioressources-Agronomie, option Amélioration des ressources agricoles. Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, 45 p.
17. FAO (2002). Biofertilizer production plant, Myanmar (FAO/UNDP Project), by H. Hiraoka. Back to Office Report. Bangkok, FAO–RAP.
18. Giles C.D., Richardson A.E., Druschel G.K., Hill J.A., (2012). Organic anion-driven solubilization of precipitated and sorbed phytate improves hydrolysis by phytases and bioavailability to *Nicotiana tabacum*. *Soil Science*, 177(10): 591-598.
19. Gnahoua, J. B. G., Ouattara, M. L. M. S., Coulibali, Z., Diomandé, L. B., Soro, Y. R. (2023). Integrated Soil Fertility Management: A Promising Pathway for Sustainable Intensification of Smallholder Cotton Farming Systems in Côte d’Ivoire. *Asian Journal of Research in Crop Science*, 8(1): 51-58. DOI: 10.9734/ajrcs/2023/v8i1157
20. Guety T. P., Bongoua-Devisme A. J., Kpan W. H., Kouadio K.-K. H., Bahan F. M. L. (2024). Rice straw effect on phosphate rock from Morocco (PRM) – phosphate solubilizing bacterium (PSB) combination on acid soil in Man (Ivory Coast, West Africa). *Journal of Animal and Plant Sciences*, 59 (2): 10843 -10855. <https://doi.org/10.35759/JAnmPISci.v59-2.1>
21. Petit, J. and Jobin, P. (2005) La fertilisation organique des cultures. Fédération d’Agriculture Biologique du Québec, 48p.
22. Kitabala, M.A., Tshala, U.J., Kalenda, M.A., Tshijika, I.M. and Mufind, K.M. (2016) Effets de différentes doses de compost sur la production et la rentabilité de la tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) dans la ville de Kolwezi. Province du Lualaba (RD Congo). *Journal of Applied Biosciences*, 102, 9669-9679
23. Konate Z., N’ganzoua K. R., Bi Zro F. G., Bakayoko S., Camara M. (2022). Effet de différentes doses de compost de fiente de poulet sur la fertilité des sols et les paramètres agronomiques de la laitue (*Lactuca sativa* L.). *Agronomie Africaine*, 34(1) : 34 (1) : 117 – 131
24. Kone B., Saidou, A., Et Camara M., (2010). Effet de différentes sources de phosphate ur le rendement du riz sur sols acides. *Agronomie Africaines*, 22(1), 55–63.
25. Kouadio, E. N., Koffi, E. K., Julien, K. B., Messsoum, G. F., Brou, K., & N’guessan, D. B. (2018). Diagnostic de l’état de fertilité des ols sous culture Cotonnière dans les Principaux Bassins de Production de Côte d’Ivoire. *European Scientific Journal*, ESJ, 14(33), 221. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n33p221>

26. Kpan W. H., Bongoua-D. A.J., Kouadio K.-K.H., Kone B., Bahan F. M. L (2023). Response of lowland rice to phosphate amendments in three acidics agroecological zones of Côte d'Ivoire: Man-Gagnoa-Bouaké. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, (2023), 8(5): 135-144. DOI: 10.22161/ijeab.85.18
27. Kutu, F.R., Mokase, T.J., Dada, O.A. et al. (2019). Assessing microbial population dynamics, enzyme activities and phosphorus availability indices during phospho-compost production. *Int J Recycl Org Waste Agricult* 8, 87–97. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0231-9>
28. Larbi M., (2006). Influence de la qualité des composts et de leurs extraits sur la protection des plantes contre les maladies fongiques. Thèse de doctorant. Université de Neuchâtel, Faculté des Sciences.161 p
29. Leclerc B., (2001). Guide des matières organiques Tome 1 (2ème édition). Institut technique de l'agriculture biologique (ITAB), 238 p.
30. Mahmood, I., Imadi, S.R., Shazadi, K., Gul, A. and Hakeem, K.R. (2016). Effects of Pesticides on Environment. In: Hakeem, K., Akhtar, M. and Abdullah, S., Eds., *Plant, Soil and Microbes*, Springer, Cham, 253-269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3_13
31. Mashori, N. M., Memon, M., Memon, K. S., Kakar, H. (2013). Maize dry matter yield and P uptake as influenced by rock phosphate and single super phosphate treated with farm manure. *Soil Environment*, (2013), 32(2): 130-134
32. Mehlich, A. (1984). Mehlich 3 Soil Test Extractant. A Modification of the Mehlich 2 Extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15, 1409-1416. <http://dx.doi.org/10.1080/00103628409367568>
33. Ousmane G., Mamane T. M., Saidou A. K., M. Hamissou I. GREMA., Adamou Z., (2020). Valorisation de glume de mil et balle de riz par compostage : caractérisations physico-chimiques des composts, Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Chimie, p 31-36
34. Sharma. S., Vijay, k and Ram, B.T. (2011). Isolation of Phosphate Solubilizing Microorganism (PSMs) From Soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research* (2): 90-95.
35. Saleem M. M., Arshad M., and Yaseen M. (2013). Effectiveness of various approaches to use rock phosphate as a potential source of plant available P for sustainable wheat production, *Int. J. Agric. Biol.*, 15, 223–230.
36. Sawadogo J., Coulibaly P. J. D'A., Traore B., Ouedraogo J. P., Diarra A., Legma J. B., (2022). Caractérisations physico-chimiques d'un sol

- hydromorphe amendé par un biofertilisant dans un système de culture à base de cucurbitacées au Burkina Faso, *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 16(5): 2457-2469. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>
37. Sawadogo J., Coulibaly P. J. D'A., Traore B., Bassole M. S. D., Kabore A. et Legma J. B., (2021). Amélioration des propriétés physico-chimiques et microbiologiques des sols par des fertilisants biologiques sous cultures de la tomate en zone Soudano-sahélienne. *Afrique SCIENCE* 19(4) : 189 – 202
 38. Sow M. (2018). Effets de deux types de compost et de la fertilisation minérale azotée sur les propriétés du sol et le rendement du riz (*Oriza sativa* L.) de Nappe en station au CRA de Djibélor. Mémoire de Master en Aménagement et Gestion des écosystèmes forestiers et agroforestiers, Université Assane Seck de Ziguinchor, 34p.
 39. Taktek S., (2015). Dissolution biologique des phosphates : Interaction bactéries – mycorhizes. Thèse Université Laval, Québec, Canada. 128p.
 40. Vessey J.K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil*, 255: 571–586.
 41. Yu X, Liu X, Zhu TH, Liu G.H, Mao C., (2011). Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from walnut and their effect on growth and phosphorus mobilization. *Biol Fertil Soils* 47: pp. 437–446