

Research Article

AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA FERTILISATION AGRICOLE PAR SULFATE D'AMMONIUM SUR SOL FERRALITIQUE ACIDE: CAS DE LA RIZICULTURE PLUVIALE SUR FLANC DE COLLINED'AMBOHIMHASOA, REGION ANALANJIROFO (MADAGASCAR)

*Christian Pierre RATSIMBAZAFY¹, Ignace RAKOTOARIVONIZAKA², Rijalalaina RAKOTOSAONA²

¹Centre de Valorisation Organique d'Ambohimahaso de l'Entreprise IAZAFO-COMPOST

²Laboratoire de Génie Chimique de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA)

Received 22th November 2020; Accepted 18th December 2020; Published online 30th January 2021

ABSTRACT

Le présent travail a clairement établi l'intérêt de sulfater d'ammonium pour booster la productivité agricole du fait de sa teneur suffisamment importante en azote et en soufre assimilable. Cependant, son utilisation agricole répétitive sur une même parcelle entraîne l'acidification du sol, en relation notamment avec une lixiviation plus importante de la réserve du calcium et du magnésium du sol. En effet, sous conditions pédo-climatique du sol ferrallitique d'Ambohimahaso district de Vavatenina, région Analanjirofo (Madagascar), l'apport répétitif du sulfater d'ammonium à raison de 580kg/ha/an pendant trois (03) années successives sur une même parcelle entraîne respectivement une diminution près de 51% du taux de calcium et d'environ 38% du taux de magnésium. Cette baisse du taux de bases échangeables entraîne inévitablement la chute du pH de la parcelle. Il est donc jugé nécessaire de recourir à la correction de cette acidification du sol notamment dans la zone d'application de cet engrais par des apports d'amendements calco-magnésiens (dolomie) et/ou par des apports d'amendement basiques équivalents (calcaire, chaux, phosphate tricalcique, etc.) afin d'atténuer l'effet acidifiant à court et à moyen terme de cet engrais. La correction sous forme d'apport d'amendement organique comme le compost est également possible du fait de la restitution calcaire et magnésienne procurée par ce compost. Cette correction doit être impérativement effectuée à partir de la deuxième année d'apport d'engrais sulfater d'ammonium.

Keywords: sulfate d'ammonium, lixiviation, drainage, bases échangeables, paddy, riz pluvial, fertilisation, acidification du sol, variété SEBOTA 41, hydrometallurgique.

INTRODUCTION

Avant 2011, la fertilisation azotée, dans la culture du riz à Madagascar, était presque exclusivement apportée sous forme d'urée. A partir de cette année, en raison de la production locale de sulfate d'ammonium par l'usine d'Ambatovy, cette fertilisation azotée est quasiment assurée par le sulfate d'ammonium actuellement. En effet, le projet Ambatovy produit localement environ 210.000 tonnes/an de sulfate d'ammonium connexe à la production de nickel et cobalt depuis l'année 2011, c'est-à-dire une quantité équivalente à la moitié des besoins de consommation annuelle de l'ensemble des pays africains subsahariens (Ambatovy, 2012). Dès lors, l'accès des utilisateurs paysans à cet engrais azoté devient plus facile. En plus, le prix du sulfate d'ammonium nettement en dessous du prix de l'urée est à la portée du pouvoir d'achat des utilisateurs potentiels. Signalons au passage que pouvant être utilisé comme équivalent de l'urée, cet engrais sulfate d'ammonium, peut apporter également du soufre sous forme de sulfate directement assimilable par les plantes. Cependant, bon nombre d'études scientifiques démontrent l'effet acidifiant à long terme, de l'utilisation agricole de sulfate d'ammonium. La présente étude a pour objectif d'examiner la performance agronomique de l'usage autonome de l'engrais sulfate d'ammonium sur la culture du riz pluvial d'une part, mais également d'évaluer le risque inhérent de son application répétitive sur le sol agricole, d'autre part.

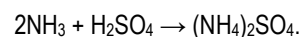
MATERIELS ET METHODES

Sulfate d'ammonium

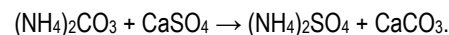
Le sulfate d'ammonium est un corps composé chimique ionique de

*Corresponding Author: Christian Pierre RATSIMBAZAFY,
Centre de Valorisation Organique d'Ambohimahaso de l'Entreprise IAZAFO-COMPOST

formule $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Il contient 21% d'azote sous forme d'ammonium NH_4^+ et 24 % de soufre sous forme de sulfate SO_4^{2-} . Il est notamment couramment utilisé comme engrais destiné à l'acidification des sols alcalins. Comme préparation, le sulfate d'ammonium est obtenu par réaction de l'ammoniac NH_3 avec l'acide sulfurique :



On produit également le sulfate d'ammonium à partir du gypse (sulfate de calcium dihydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) finement divisé qu'on ajoute à une solution de carbonate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ pour produire du carbonate de calcium CaCO_3 qui précipite en laissant le sulfate d'ammonium en solution :



Signalons que le sulfate d'ammonium du projet Ambatovy est un sous-produit obtenu par procédé hydrometallurgique, c'est-à-dire procédé par lequel des métaux (nickel, cuivre, zinc, cobalt, uranium, chrome, manganèse, etc.) sont extraits d'un minerai, au moyen de réactifs chimiques (acide sulfurique concentré), dans un milieu à haute température et sous pression, puis séparés pour produire un concentré ou un produit intermédiaire. Le sous-produit est le sulfate d'ammonium (Ambatovy, 2012). La performance agronomique de cet engrais sera donc évaluée à partir des rendements agricoles qu'il procure.

Riz

La semence du riz pluvial utilisée ici est la variété SEBOTA 41 (durée du cycle de 120 à 130 jours) et que la dose de semis adoptée est évaluée entre 70kg à 80 kg/ha. Signalons que cette variété est la plus utilisée et adaptée à la Région Analanjirofo voire sur l'ensemble des 22

Régions du pays (Madagascar) car c'est une variété réputée « poly-aptitudes », c'est-à-dire qui peuvent être cultivées à la fois en pluvial et en irrigué. Cette variété peut donner jusqu'à 12t/ha en riziculture améliorée particulièrement. Pourtant, au niveau de la Région Analanjirifo voire sur l'ensemble du territoire national (Madagascar), le rendement en paddy en culture pluviale n'excède guère de 1t/ha ou au maximum de 1,5t/ha. Ce faible niveau de productivité est lié à des nombreux paramètres (climat, maladie du riz appelée pyriculariose, insecte terricole (*Hétéronychus* sp.), pratique agricole, faute de moyens et équipement techniques nécessaires, faible niveau technique des agriculteurs, etc.), mais le paramètre le plus plausible est la perte de la fertilité des sols. Dans une opération de fumure de couverture, la fixation d'objectifs de rendement est déterminante pour quantifier l'azote à la culture du riz. Ainsi, le tableau ci-après nous récapitule les doses d'azote nécessaires suivant l'objectif de rendement visé.

Tableau 1 : Besoins d'unités fertilisantes suivant les objectifs de rendement

Objectif de rendement (t/ha)	Besoins en NO ₃ ⁻ (Kg/ha)	Equivalent enurée (Kg/ha)	Equivalent en sulfate d'ammonium (Kg/ha)
4	50	100	238
5	62	135	295
6	75	160	375
7	87	190	414
8	100	215	476
9	112	240	533
10	125	270	595

Source : Marc L., 2001.

Dispositifs et démarches expérimentales

L'étude fut réalisée sur des sols ferrallitiques acides sur flanc de colline d'un terrain privé appartenant à l'entreprise Izafo Compost sise à Ambohimahaso, district de Vavatenina qui s'étend sur une superficie de 1ha durant trois (03) années successives : 2016-2017-2018. Les semis ont eu lieu chaque année à partir du mois d'août au mois de septembre et les récoltes vers la fin du mois de novembre ou début décembre. Les caractéristiques chimiques du sol à la mise en place des essais sont résumées dans le tableau 2 ci-après.

Dans le but de mieux suivre et estimer l'efficacité agronomique du sulfate d'ammonium et également de pouvoir mieux apprécier son effet secondaire sur le sol (effet acidifiant particulièrement), il a été procédé à l'analyse du sol des parcelles d'essai et celles des parcelles témoins après chaque campagne de récolte.

Les résultats des études en laboratoire, réalisées sur ces parcelles (parcelles recevant de l'engrais sulfate d'ammonium et parcelles témoins cultivées sans engrais sulfate d'ammonium), nous ont permis plus tard de mieux apprécier l'effet de dose de cet engrais sur le sol particulièrement sur l'évolution des cations échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) et du pH. End'autres termes, cette analyse pédologique nous permet de suivre l'évolution du pH et des augmentations ou diminutions des quantités initiales de cations échangeables du sol durant les trois années d'expérimentations.

Dès lors, les analyses pédologiques à réaliser dans le cadre de cette étude sont : la détermination des bases échangeables et le pH du sol.

- les bases échangeables (ou cations échangeables) comme le calcium, magnésium et potassium sont extraits à partir d'une solution à base d'acétate d'ammonium suivant la norme AFNOR NF X31-108, 1992. L'extrait obtenu est dosé par spectrométrie d'émission atomique par plasma induit (ICP),
- le pH_{eau} ou acidité actuelle est mesuré dans une suspension de sol avec un rapport sol/solution de 1/5 et déterminé selon la norme NF ISO 10390. Le pH_{eau} est considéré comme celui qui subissent les racines et les micro-organismes.

Par ailleurs, les échantillons du sol ont été prélevés sur une profondeur de 20cm de chaque micro-parcelle destinée à l'essai, puis mélangés pour obtenir un échantillon composite et représentatif de la parcelle (protocole de prélèvement conforme à la norme AFNOR X31-100) et que le protocole de prétraitements de ces échantillons du sol avant de réaliser les différentes analyses physico-chimiques proprement dites suit la méthode normalisée ISO 11464, 2006. L'étude compare alors cinq protocoles de traitement répétés quatre fois chacun (soit des expérimentations sur 20 micro-parcelles élémentaires de 100m², parcelles témoins comprises) :

- T₀ : témoin sans engrais
- T₂₉₅ : traitement avec apport de 295Kg/ha de sulfate d'ammonium,
- T₃₇₅ : traitement avec apport de 375Kg/ha de sulfate d'ammonium
- T₄₇₆ : traitement avec apport de 476Kg/ha de sulfate d'ammonium
- T₅₉₀ : traitement avec apport de 590kg/ha de sulfate d'ammonium,
- Les modalités d'apports sont résumées dans le tableau 3 suivant :

Tableau 2 : Résultats d'analyses du sol avant l'expérimentation

Granulométrie	Paramètres agronomiques classiques	Bases échangeables	Oligo-éléments
Argile (%)	25	Matière organique (%)	1,5
Limon fin (%)	22	Carbone organique (%)	0,86
Limon grossier (%)	20,1	Azote total Kjeldahl (%)	0,078
Sable fin (%)	18	Rapport C/N	11,02
Sable grossier (%)	14,9	Phosphore assimilable (ppm)	7
Cailloux (%) (pierrosité)	20	pH _{eau}	5,8
Calcaire totale CaCO ₃ (%)	0,18	pH _{KCl}	5,1
Densité Apparente	1,35	Ca ⁺⁺ (meq/100g)	0,97
		Mg ⁺⁺ (meq/100g)	0,18
		K ⁺ (meq/100g)	0,10
		Na ⁺ (meq/100g)	0,06
		C.E.C (meq/100g)	8
		Sommes des bases échangeables (S)	1,31
		Taux de saturation V (%)	16,4
		Cu (ppm)	2,1
		Mn (ppm)	5,0
		Zn (ppm)	1,2
		Fe (ppm)	12

Tableau 3 : Modalité d'apport pour chaque traitement

Traitement exécuté	Dose d'unité en Kg de sulfate d'ammonium (kg/ha)	Application 1 (15 JAS) (kg/ha)	Application 2 (35 JAS) (kg/ha)	Application 3 (65 JAS) (kg/ha)
T ₀				
T ₂₉₅	295	147,5	-	147,5
T ₃₇₅	375	187,5	-	187,5
T ₄₇₆	476	238	-	238
T ₅₉₀	590	196,7	196,7	196,6

JAS : Jour Après Semis

Par précaution, un apport d'azote ne devrait pas dépasser 50 unités fertilisantes par hectare, soit ne dépassant pas d'une quantité équivalente de 238kg de sulfate d'ammonium (Marc L., 2001). Ainsi, excepté le traitement T₅₉₀ dont l'apport a été fractionné en trois ; l'apport de couverture a été divisé en deux pour les autres traitements T₂₉₅, T₃₇₅ et T₄₇₆ afin que la culture puisse absorber et surtout pour qu'il ne migre pas en profondeur (lixiviation) ou qu'il ne soit pas évacué de la parcelle par des mouvements d'eau (lessivage). Rappelons que la performance agronomique du sulfate d'ammonium sera évaluée en rendement moyen en paddy exprimé en t/ha/an pour chaque traitement, d'une part, mais également par son impact sur le sol agricole (son effet acidifiant), d'autre part.

Etude statistique

Il s'agit d'établir la corrélation (coefficient de corrélation de Pearson) entre l'évolution annuelle de la somme des bases échangeables (Ca²⁺, Mg²⁺ et K⁺) et pH des sols des parcelles utilisant le logiciel statistique SPSS 20 (Statistical Package for the Social Sciences.20)

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Résultat des essais agronomiques

Les rendements moyens de chaque protocole d'essai durant les trois (03) années d'expérimentation sont rapportés dans la figure 1 suivante:

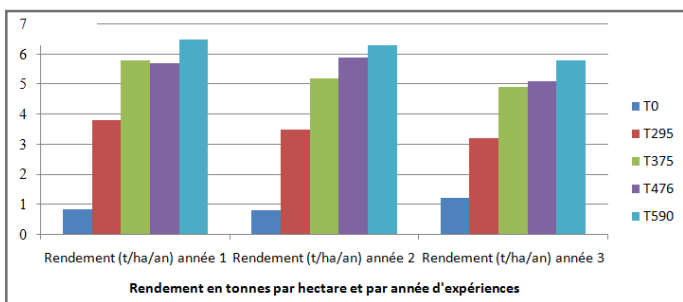


Figure 1: Rendements moyens de chaque protocole de traitement

D'une manière générale, une nette amélioration de rendement en paddy a été observée pour l'ensemble des traitements T₂₉₅, T₃₇₅, T₄₇₆ et T₅₉₀ par rapport aux traitements témoins. Durant la première année d'apport. Cependant, force de constater que les résultats obtenus sur les traitements T₃₇₅ et celles de parcelles T₅₉₀ sont presque identiques malgré la dose d'apport plus importante au niveau des traitements T₅₉₀. En outre, avec la même dose d'apport, les rendements en paddy ont tendance à baisser à partir de la troisième année de traitement pour l'ensemble des parcelles T₂₉₅, T₃₇₅, T₄₇₆ et T₅₉₀. Cela signifie que les apports excessifs et récurrents de sulfate d'ammonium sur une même parcelle peuvent avoir un effet dépressif sur la productivité agricole. Cette baisse relative de rendement en paddy à partir de la troisième année d'apport est liée probablement à la dégradation de la qualité chimique du sol, notamment par la baisse du pH du sol reflétant bien évidemment l'amenuisement du stock de cations du complexe absorbant du sol. Signalons que le calcium surtout et le magnésium (dans une mesure moindre) apparaissent comme des constituants essentiels des sols, constituants qui conditionnent nombre de propriétés physico-chimiques indispensables à l'agriculture : structure favorable à l'enracinement, élimination des

toxicités manganique et aluminique, assimilabilité de l'azote et du phosphore, le pH du sol, etc. (Jean Boyer, 1978).

Evolution des bases échangeables

Les courbes d'évolution de chaque base échangeable au cours des trois années d'expérimentation sont résumées dans les figures 2, 3 et 4 suivantes.

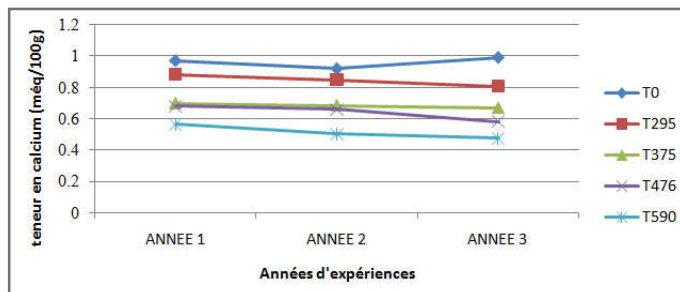


Figure 2 : Courbe de l'évolution annuelle de la teneur en calcium échangeable en fonction d'années d'expérimentations

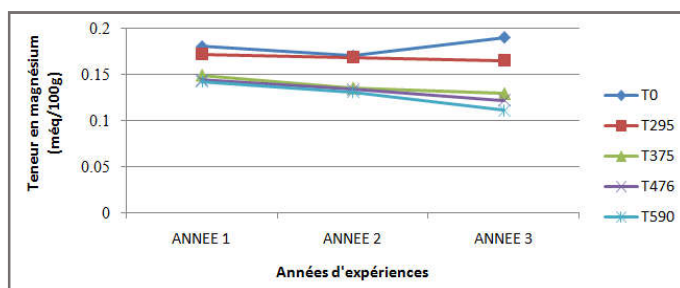


Figure 3 : Courbe de l'évolution annuelle du magnésium échangeable

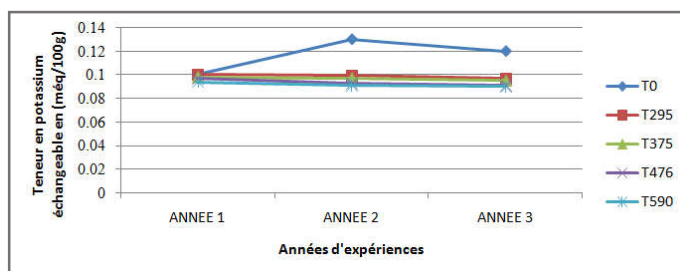


Figure 4 : Courbe de l'évolution annuelle du potassium échangeable

Les courbes d'évolution de teneurs en calcium et du magnésium montrent que les apports élevés en sulfate d'ammonium entraînent sans aucun doute une lixiviation très importante de ces deux éléments. Aussi, après trois années d'apport consécutifs, les parcelles T₅₉₀ dont l'apport annuel de sulfate d'ammonium est plus important par rapport aux autres traitements, les diminutions des teneurs en calcium et en magnésium par rapport aux parcelles témoins sont respectivement 51,03% pour le calcium soit une perte équivalente de 0,495 még/100g de terre et 38% pour le magnésium soit une diminution équivalente de 0,0684 még/100g de terre. En revanche, pour les doses intermédiaires notamment pour les traitements au niveau de parcelles T₃₇₅, l'abaissement des teneurs en calcium et magnésium au bout de trois années d'essais par rapport au sol de traitement témoin est beaucoup plus modérée avec respectivement une diminution de 31% pour le calcium et 28% pour le magnésium. On observe également des légères chutes des cations

échangeables au niveau des traitements T_{295} malgré l'apport en sulfate d'ammonium relativement raisonnable (environ 50 unités d'azote) par rapport aux autres parcelles (T_{375} , T_{476} et T_{590}), soit une diminution de 17% pour le calcium et 8% pour le magnésium au bout des trois années d'études. Ces résultats corroborent aux résultats trouvés par Smith en 1962 suite d'apport de sulfate d'ammonium dans des plantations de théiers sur des sols de l'Afrique orientale (Kenya, Tanzanie) et également aux résultats trouvés par Godefroy J. Guillemot J., (1975) sur l'étude de caractère chimique d'un sol de bananiers de la Côte d'Ivoire recevant d'apport en sulfate d'ammonium. L'élimination de ces bases semble se produire en grande partie sous forme de nitrates et principalement sous forme de nitrates de calcium $[Ca(NO_3)_2]$ (Tourte *et al.*, 1964 ; Roose, 1974). En effet, la transformation de l'azote ammoniacal en nitrates se fait avec une extrême rapidité (quelques jours) et il n'est pas possible à la plante d'absorber la totalité de l'anion NO_3^- dès que les doses sont un peu fortes : l'excès est alors éliminé par les eaux de percolation ou en partie lessivé (Godefroy J. et Roose, 1970). On observe également l'abaissement du taux de potassium pour l'ensemble des parcelles recevant l'apport en sulfate d'ammonium. Comme dans les cas du calcium et du magnésium, plus l'apport est important, plus la chute d'ion potassium l'est aussi. Cette chute de potassium peut s'expliquer par le déplacement d'ion K^+ par l'ion ammonium (NH_4^+) apporté par le sulfate d'ammonium et qui est par ailleurs lixivié en grande partie (Jean Boyer, 1978). Également, cette chute de potassium est imputable à la transformation d'ion potassium sous forme de nitrate de potassium (KNO_3) et que ce dernier est évacué de la parcelle par lixiviation ou par lessivage (Blondel, 1971). D'une manière générale, la lixiviation provoquée par le sulfate d'ammonium affecte essentiellement le calcium du sol. Tinker et Smilde (1963), arrivaient à la même conclusion sur sols ferrallitiques en Niger carencés en magnésium.

Evolution du pH

Les courbes montrant l'évolution du pH durant les trois années d'étude sont restituées dans la figure 5 suivante :

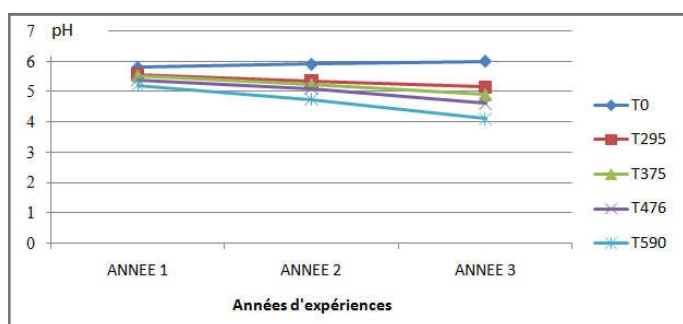


Figure 5 : Evolution de pH en fonction du temps

L'évolution du pH du sol confirme l'action acidifiante du sulfate d'ammonium. La baisse du pH par rapport aux traitements témoins est beaucoup plus importante pour les parcelles recevant la dose annuelle plus élevée de sulfate d'ammonium, soit une chute de pH de l'ordre de 0,62 unité par an pour les parcelles T_{590} ; 0,4 unité par an pour les traitements T_{476} ; 0,27 pour les sols de parcelles T_{375} et une chute annuelle de l'ordre de 0,23 unité pour le traitement T_{295} . Donc il y a un apport cumulé de sulfate d'ammonium à raison de 590 kg/ha/an entraîne une baisse de pH jusqu'à 1,7 unités au bout de trois (03) années d'application répétées. Des résultats analogues furent obtenus par Godefroy J. et Guillemot J., (1975), et également par Championet *al.*, (1958) et Dugain, (1959). En plus, d'après les résultats d'analyse, à partir de la 2^{ème} année d'apport de sulfate d'ammonium, le risque d'exposition des plantes à la

toxicité aluminiques et manganiques est très important notamment au niveau de parcelles T_{590} puisque les pH_{eau} des parcelles d'essai sont déjà largement en dessous de 5 (seuil où se manifeste généralement la toxicité aluminique (Pieri, 1974 et Forster, 1970)). Alors que cette toxicité aluminique entraîne : (i) un ralentissement de vie biologique, (ii) problèmes de structure, (iii) blocage des oligo-éléments, etc., donc des pertes de rendement (Aurea Agro Reporter, 2018). Le pH très bas ($pH < 5$) diminue également la disponibilité du phosphore (Chang et Chu, 1961 ; Shelton et Coleman, 1968 ; Fassbender, 1969 ; Pratt *et al.*, 1969 ; Dabin, 1971). Par ailleurs, pour les parcelles témoins, une légère augmentation de pH a été observée, soit une augmentation de 0,1 unité au bout de la troisième année d'essai. Cette amélioration est dû probablement à l'effet tampon des résidus de cultures restitués au niveau des susdites parcelles après chaque campagne de récolte. En effet, après enfouissement, les résidus de culture contribuent considérablement à l'augmentation du taux de calcium et magnésium du sol (Pichot *et al.*, 1974).

Etude statistique- corrélation entre l'évolution de pH et l'évolution des bases échangeables

L'analyse statistique de la matrice de corrélation (somme de bases et pH) a pour objectif la détermination de la relation entre l'évolution des sommes de bases échangeables et le pH dans le but de mettre en évidence leurs modifications à travers le temps et leur liaison avec l'acidification du sol. Ainsi, on note dans les tableaux ci-après :

Tableau 4: Evolution des bases échangeables et pH durant les 3 années d'expérimentations

Doses appliquées	Année 2016 1 ^{er} essai	Année 2017 2 ^{ème} essai	Année 2018 3 ^{ème} essai
	Somme des bases échangeables (méq/100g)	Somme des bases échangeables (méq/100g)	Somme des bases échangeables (méq/100g)
T_0	1,25	1,22	1,30
T_{295}	1,154	1,112	1,065
T_{375}	0,945	0,917	0,893
T_{476}	0,920	0,884	0,795
T_{590}	0,798	0,726	0,676
	pH	pH	pH
T_0	5,8	5,9	6
T_{295}	5,57	5,34	5,15
T_{375}	5,53	5,23	4,9
T_{476}	5,38	5,1	4,6
T_{590}	5,2	4,73	4,1

Pour la 1^{ère} année d'essai (2016), l'évolution de l'acidité est significativement corrélée avec celles des bases échangeables ; avec coefficient de corrélation « R^2 » est égal à 95,7. Ce coefficient est significatif à une probabilité supérieure à 93,40% ($\rho = 0,065$). Pour la deuxième année (2017), le coefficient de corrélation R^2 entre somme de bases et pH est égal 98,30. Ce coefficient est significatif à une probabilité de 92,07% ($\rho = 0,079$). Enfin, pour la troisième année d'essai, le coefficient de corrélation de Pearson $R^2 = 97,80$; soit significativement à une probabilité de 87,90% ($\rho = 0,121$). En terme plus claire, les diminutions des sommes des bases échangeables sont toutes significativement corrélées avec le pH.

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Après une étude plus approfondie des caractéristiques techniques et de la performance agronomique du sulfate d'ammonium, nous sommes en mesure de déclarer qu'à partir de la dose habituelle de 50 unités d'azote/hectare/an en fumure de couverture ; son application en agriculture améliore de façon remarquable le rendement en paddy notamment, durant la 1^{ère} année de son application. Cependant, même en apport fractionné, l'apport répété dudit engrais entraîne un effet secondaire, particulièrement « l'acidification du sol ». En effet, il y a des risques d'acidification élevée du sol dans la zone d'application du sulfate d'ammonium, surtout lorsqu'il est apporté en quantité excessive et répété sur

unemême parcelle. Cette baisse du pH du sol est liée à une diminution plus prononcée de taux des cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) du sol par lixiviation sous forme de nitrates de calcium et de magnésium et dans un moindre mesure sous forme de nitrate de potassium. Par conséquent, cette baisse du taux de ces cations et/ou bases échangeables du sol paraît responsable de la stagnation voire la diminution partielle de rendements en paddy à partir du 2^{ème} et 3^{ème} année d'apport répété en sulfate d'ammonium. Même à dose normale, l'utilisation répétée sur un même parcelle de cet engrais entraîne inexorablement la baisse du pH du sol. Dès lors, nous recommandons notamment après la deuxième année d'application, l'apport systématique d'amendement calco-magnésien comme la dolomite (CO_3Ca , CO_3Mg) ou d'amendement basique équivalent (chaux, phosphate tricalcique, cendre de bois, etc.), particulièrement dans la zone d'application de sulfate d'ammonium afin de compenser les pertes annuelles de calcium et de magnésium dues aux effets d'application récurrente de cet engrais azoté. Il est nécessaire, soit de faire un apport assez important de cet amendement basique, soit de le localiser dans la zone acidifiée. Cependant, il faut éviter l'apport trop excessif en amendement basique pour les sols ferrallitiques acides fortement déjà désaturés. En effet, une augmentation brutale de pH provoque une forte diminution d'assimilabilité du manganèse, du cuivre, du zinc, du fer et du bore (Birch, 1960 ; Malavolta, 1967 ; Sullivan, 1972). L'idéal est de procéder des apports modérés tous les ans ou tous les deux ans ou trois ans de façon à la modifier progressivement. Une autre technique qui pourrait être retenue serait d'épandre en quantité massive (plus importante) d'amendement organique « compost » par exemple. Ce dernier est réputé par son effet tampon du pH du sol du fait de sa teneur importante et soutenue en matière organique et surtout sa teneur non négligeable en éléments secondaires comme le calcium (CaO) et magnésium (MgO).

REFERENCES

AFNOR (Ed.), 1992. Norme Française X 31-108. Détermination des bases échangeables (Ca , MgO , K_2O , Na_2O) extractible par l'acétate d'ammonium-Méthode par agitation,

AFNOR (Ed.), 2006. Norme Française ISO 11464. Prétraitement des échantillons pour analyses physico-chimiques (indice de classement : X 31-412)

AFNOR, Ed., 1992. Norme Française X 31-100. Qualité des sols - Échantillonnage - Méthode de prélèvement d'échantillons de sol pour analyses physico-chimiques en vue d'une interprétation agronomique,

Ambatovy, 2012. Rapport de développement durable

Birch W.R., 1960. High altitude ley agronomy in Kenya. III The effects of lime and molybdenum and some observations on the use of legumes. *East Africa, Agric. and For. J.*, 25, 3; 156-164.

Blondel D., 1971. Evolution de l'azote minéral en sol ferrugineux tropical sous culture de mil (Pennisetum typhoides J.). Séminaire C.S.T.R./O.U.S. sur les facteurs du milieu qui influencent le rendement des cultures céréalières en Afrique Tropicale, Dakar 26-69 juillet 1971,

Champion J., Dugain F., Dommergues Y., Maingnien R., 1958. Les sols de bananeraies et leur amélioration en Guinée Française. *Fruit*, 13, 9-10 : 415-462.,

Chang S.C., Chu W.K., 1961. The fate of soluble phosphate applied to soils. *Jour. Soil Sci.*, (Oxford), 12, 2 : 286-293.

Dabin B., 1971. Evolution des engrais phosphatés dans un sol ferrallitique dans un essai de longue durée. *Phosphore et Agriculture*, 58 : 1-14.

Dugain F., 1959. Le sulfate d'ammonium dans le sol en culture bananière de bas-fonds. *Fruits*, 14, 4 : 163-169.

Fassbender H.W., 1969. Retención y transformación de fosfatos enochrosos de la Amazonia del Brasil. *Fitotecnología latinoamericana*, 6, 1: 1-10

Forster H.L., 1970. Liming continuously cultivated soils in Uganda. *East Africa, Agric. and For. J.*, 36, 1: 58-69

Godefroy J. et Roose E., 1970. Evolution des pertes par lixiviation des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie de basse Côte d'Ivoire. *Fruit*, 26, 6. 403-420.

Godefroy J., Guillemot J., 1975. Action comparée des apports d'urée et de sulfate d'ammonium sur les caractéristiques chimiques d'un sol de bananeraie. Relation avec la productivité. *Fruits*, Jan. 1975, vol. 30, n°1, p. 3-10,

Godefroy J., Roose E., Muller M., 1975. Estimation des pertes par les eaux de ruissellement et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du sud de la Côte d'Ivoire.

Jean BOYER, 1978. Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et subhumides. O.R.S.T.O.M. initiations - documentations techniques N° 35,

Malavolta E., 1967. - Manual de Química Agrícola. Adubos e dubação. 2^{ème} édition- Ceres editur (Sao Paulo), 606 p.

Marc Lacharme., 2001. « La fertilisation minérale du riz », fascicule n°6, p18-22.,

Norme ISO 10390, 2005. Qualité du sol – Détermination du pH

Pichot J., Burdin S., Charoy J., Nabos J., 1974. L'enfouissement des pailles de mil Pennisetum dans un sol sableux du nord. *L'Agron. Tropic.* 29, 10 : 995-1005

Pieri C., 1974. Premiers résultats expérimentaux sur la sensibilité de l'arachide à la toxicité aluminique. *L'Agron. Tropic.*, 29. 6-7 : 685-696.

Pratt P.F., Peterson F.F., Holzley C.S., 1969. Qualitative mineralogy and chemical properties of a few soils from Sao Paulo, Brazil. *Turrialba*. 19, 4 : 491-496

Roose E., 1974. Influence de type de plante et de niveau de fertilisation sur la composition des eaux de drainage en climat tropical humide. Soc. Hydrotechnique (Paris), XIII journées de l'hydraulique : question III, Rapport 13 : 1-7,

Shelton J.E., Coleman N.T., 1968. Inorganic phosphorus fractions and their relationship to residual value of large applications of phosphorus on high phosphorus fixing soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 32, 1: 91-94

Smith, 1962. The effects of fertilizers, sulphur and mulch on east African tea soils. II the effect on the base status and organic matter content on the soil. *East Africa, Agric. and For. J.*, 28, 1 : 16-21.,

Sullivan L.J., 1972. Les problèmes de l'augmentation de la concentration des engrais. Oligo-déments. *Phosphore et Agriculture*, 26, 60 : 1-15.

Tinker P.B., Smilde K.W., 1963. - Cation relationships and magnesium deficiency in the oil palm. *J.W.Afric. Inst. Oil Palm Res.*, 4, 13 : 82-100,

Tourte R., Vidal P., Jacquinot L. Fauche J. Nicou R., 1964. Bilan d'une rotation quadriennale sur sol de régénération au Sénégal. *L'Agron. Tropic.*, XIX, 12 : 1033-1072.,
