

Détermination des doses optimales d'azote, de phosphore et de potassium pour la production de l'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merrill, variété pain de sucre) au Sud du Bénin : comparaison de quatre modèles quadratiques

Elvire Line Sossa^{1*}, Codjo Emile Agbangba^{2,4}, Pierre Gbènoukpo Tovihoudji³, Florent Yalinkpon⁴, Jamali Oladédji Ayifimi¹

⁽¹⁾Université d'Abomey-Calavi (UAC). Faculté des Sciences Agronomiques (FSA). Laboratoire des Sciences du Sol (LSS). Unité de Recherche en Gestion Durable de la Fertilité des Sols Tropicaux (UR GDFST). 03 BP 2819 Cotonou (Bénin). E-mail : elvas2@yahoo.fr

⁽²⁾Université d'Abomey-Calavi (UAC). École Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC). Département de Génie de l'Environnement. Laboratoire de Recherche en Biologie Appliquée (LaRBA). 01 BP 2009 Cotonou 5Bénin). E-mail : agbangbacodjoemile@gmail.com

⁽³⁾Université de Parakou. Faculté d'Agronomie. Laboratoire de modélisation d'Hydraulique et Environnementale (HydroModE-Lab). 03 BP 351 (Bénin)

⁽⁴⁾Université d'Abomey-Calavi (UAC). École Doctorale des Sciences Agronomiques et de l'Eau (EDSAE). Laboratoire de Biomathématiques et d'Estimations Forestières (LABEF), 04 BP 1525 Cotonou (Bénin).

Reçu le 26 septembre 2023, accepté le 13 novembre 2023, publié en ligne le 30 décembre 2023

DOI : <https://dx.doi.org/10.4314/rafea.v6i4.5>

RESUME

Description du sujet. Pour maximiser la productivité de l'ananas (*Ananas comosus* L.), il est essentiel de déterminer les doses optimales d'éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore et le potassium.

Objectif. L'objectif de l'étude est d'évaluer les modèles habituellement utilisés pour identifier les doses optimales économiques des unités fertilisantes de N, P₂O₅ et K₂O à appliquer à la variété d'ananas Pain de sucre dans le contexte pédoclimatique du Bénin.

Méthodes. L'étude implique l'ajustement de chaque modèle aux résultats d'analyse chimique des feuilles D, de croissance des plants et de rendements obtenus avec les niveaux de chaque fertilisant N, P₂O₅ et K₂O.

Résultats. Les résultats ont montré que la fertilisation minérale a un effet positif sur la nutrition minérale, la croissance et le rendement de l'ananas Pain de sucre. Les modèles quadratiques sont les meilleurs estimateurs du rendement à partir des doses de fertilisants apportées. Les doses économiques de fertilisants N, P et K à préconiser pour le Pain de sucre sont de 6,55 g/plant pour l'azote, 1,60 g/plant pour le phosphore et 9,38 g/plant pour le potassium pour obtenir un rendement de 114 t/ha et un profit de 6 889 047 FCFA à l'hectare.

Conclusion. Cette étude met en évidence l'importance de l'équilibre des éléments nutritifs pour une croissance et un développement optimal de l'ananas, ainsi que pour le rendement et la qualité des récoltes. Elle ouvre la voie à de futures investigations et à l'amélioration continue des pratiques agricoles pour soutenir la sécurité alimentaire et la prospérité économique de la région.

Mots-clés : Fertilisation, doses économiques, rendement, Sud-Bénin

ABSTRACT

Determination of Optimal Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Levels for 'Sugar Loaf' Pineapple Production in Southern Benin: A Comparison of Four Quadratic Models

Description of the subject. To maximize pineapple (*Ananas comosus* L.) production, it is essential to determine the optimal doses of essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium.

Objective. The objective of the study is to evaluate the models usually used to identify the optimal economic doses of fertilizer units of N, P₂O₅ and K₂O to be applied to the Sugarloaf pineapple variety in the pedoclimatic context of Benin.

Methods. The study involves the adjustment of each model to the results of chemical analysis of the leaves D, plant growth and yields obtained with the levels of each fertilizer N, P₂O₅ and K₂O.

Results. The results showed that mineral fertilization has a positive effect on the mineral nutrition, the growth and the yield of pineapple. Quadratic models are the best estimators for yield from fertilizer applied. Economic doses of fertilizer N, P₂O₅ and K₂O to advocate for the Sugarloaf are 6.55 g/plant for nitrogen, 1.60 g/plant for phosphorus and 9.38 g/plant for potassium for a yield of 114 t/ha and a profit of 6 889 047 FCFA per hectare.

Conclusion. This study highlights the significance of nutrient balance for optimal growth and development of pineapple, as well as for yield and harvest quality. It paves the way for future investigations and ongoing enhancement of agricultural practices to support food security and economic prosperity in the region.

Keywords: Fertilization, economic doses, yields, South-Benin.

1. INTRODUCTION

L'ananas est la principale culture de rente au sud-Bénin qui contribue à 1,2 % au PIB global et à 4,3 % du PIB Agricole (INStaD, 2022). La filière ananas est inscrite au nombre de filières à promouvoir dans le Plan d'Action du Gouvernement à travers le Programme National de Recherches Agricoles (MAEP, 2017). La production nationale d'ananas est passée de 51 000 t en 2000 à 345 000 t en 2017 (Desclee *et al.*, 2021). Troisième produit d'exportation après le coton et l'anacarde, l'ananas est la principale culture fruitière produite par environ 70 % des producteurs du département de l'Atlantique au sud du Bénin (Helvetas-Bénin, 2008 ; INSAE, 2020). La filière ananas offre de l'emploi aux agriculteurs et particulièrement aux femmes exerçant surtout le commerce et la transformation des fruits frais dans le sud du pays (Sohinto, 2008).

Malgré tous ses atouts, la production de l'ananas est limitée par la dégradation rapide de la fertilité des sols (Sossa *et al.*, 2015 ; Atchada *et al.*, 2021) ; ceci pourrait s'expliquer par une diversité des pratiques culturales (Agbangba *et al.*, 2008 ; Agbangba *et al.*, 2010). En effet, Sossa *et al.* (2014) ont identifié cinq différents systèmes de culture d'ananas au Bénin qui se distinguent entre autres par les quantités d'engrais minéraux utilisées. En effet, les producteurs d'ananas utilisent de quantités variables d'engrais minéraux qui ne respectent pas les doses recommandées. De plus, les doses reconnues optimales et recommandées par les services de vulgarisation sont calquées sur la fumure utilisée en Côte d'Ivoire et n'ont pas été mises au point dans les conditions pédoclimatiques du Bénin (Agbangba, 2008 ; Agbangba *et al.*, 2015)

Il importe à cet effet de déterminer les doses optimales pour une production rationnelle d'ananas au Bénin. Les décisions qui concernent la détermination de dose optimale de fertilisant requièrent l'ajustement d'un type de modèle aux données de rendement collectées quand plusieurs niveaux de fertilisants sont appliqués (Cerrato et Blackmer, 1990). Ce processus est particulièrement important pour une production

rationnelle de l'ananas qui exporte de quantités importantes d'éléments minéraux. Les études précédentes ont clairement démontré que le choix du modèle constitue un élément primordial ayant un impact significatif sur la détermination de la dose optimale. Par conséquent, la sélection d'un modèle par rapport aux autres requiert une attention plus approfondie (Blackmer et Meisinger, 1990 ; Cerrato et Blackmer, 1990). Au Brésil, les modèles quadratiques de type $y = \alpha + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$ étaient les meilleurs pour prédire le rendement d'ananas (*Ananas comosus* L.) à partir des doses de fertilisants (Spironello *et al.*, 2004). Il est donc important de comparer les modèles utilisés afin de déterminer les doses optimales d'azote, de phosphore et de potassium pour la culture de l'ananas.

L'objectif de l'étude est d'évaluer les modèles habituellement utilisés pour identifier les doses optimales économiques des unités fertilisantes de N, P₂O₅ et K₂O à appliquer à la variété d'ananas Pain de sucre dans le contexte pédoclimatique du Bénin. Les résultats de l'étude peuvent aider à la gestion durable du sol et de l'environnement, à l'utilisation rationnelle des fertilisants et à la rentabilité de la production.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Site

Les essais ont été installés au sud du Bénin, dans le département de l'Atlantique et précisément dans le village de Soyo (1°59' N et 2°15' E). Cette zone jouit d'une pluviométrie annuelle moyenne de 1200 mm et d'une température moyenne de 33°C. Le type de sol dominant est le sol ferrallitique faiblement désaturé, communément appelée « terre de barre ». L'analyse physico-chimique du sol sur le site d'essai indique qu'il s'agit d'un sol à texture limono-argilo-sableuse, bien drainé, avec un pH moyen de 5,6 et un rapport C/N de 11,2. Ces caractéristiques répondent aux exigences édaphiques de la culture d'ananas (Schoier et Texido, 2001).

2.2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé était le plan factoriel complet 2^3 , généré avec le logiciel Minitab16. Les niveaux minimum et maximum pour chaque facteur était de 2,7 g/plant et 10,7 g/plant ; 0,5 g/plant et 2,7 g/plant et 2,7 g/plant et 16 g/plant, respectivement pour N, P et K. Les minima et maxima ont été fixés en tenant compte des doses minimales que les producteurs appliquent (Agbangba, 2008 ; Sossa *et al.*, 2014) et des doses maximales que le producteur ne peut excéder. Dans le cas des essais factoriels 2^k , l'adjonction

d'observations complémentaires situées au centre du schéma factoriel offre aussi la possibilité de vérifier d'éventuelle linéarité ou non-linéarité de la relation entre les facteurs et la variable observée (Dagnelie, 1998).

Ainsi, le traitement T1 (6,7g N/plant -1,6 g P₂O₅/plant -9,3 g K₂O/plant) a été introduit comme point central et répété deux fois par bloc. Les autres traitements (points sommets) ont été répétés deux fois sur l'ensemble du dispositif. Ce qui a permis de générer 9 traitements (Tableau 1).

Tableau 1. Les différents traitements utilisés

Traitements	N (g/plant)	P ₂ O ₅ (g/plant)	K ₂ O (g/plant)
T1	6,7	1,6	9,3
T2	2,7	2,7	2,7
T3	10,7	0,5	2,7
T4	10,7	2,7	16
T5	2,7	0,5	16
T6	2,7	2,7	16
T7	10,7	2,7	2,7
T8	2,7	0,5	2,7
T9	10,7	0,5	16

Quatre bocs de six unités expérimentales ont été ainsi constitués, ce qui donne au total 24 unités expérimentales. Chaque unité expérimentale était constituée de six lignes de cinq plants. Les écartements entre lignes et poquets étaient de 0,8 m et 0,4 m, soit une densité de 60 000 plants/ha. Les engrais minéraux utilisés sont : l'urée (46 % N), le triple superphosphate (TSP, 46 % P₂O₅) et le sulfate de potassium (K₂SO₄, 50 % K₂O, 45 % SO₃).

Le premier apport d'engrais a eu lieu sept (07) jours après la plantation (JAP) et concerne uniquement le phosphore (100 % P₂O₅), le second apport à 45 JAP (à raison de 1/5 N + 1/6 K₂O), le troisième à 90 JAP (1/5 N + 1/6 K₂O), le 4^{ème} à 135 JAP (1/5 N + 1/6 K₂O), le 5^{ème} à 180 JAP (1/5 N + 1/6 K₂O) et le 6^{ème} à 225 JAP (1/6 K₂O). L'induction florale a eu lieu au 10^{ème} mois à l'aide du carbure de calcium dilué. Un kilogramme du produit était dilué dans un fût de 200 litres. Chaque plant a reçu entre 6 heures et 8 heures du matin, 50 cm³ de carbure d'acétylène. Les rejets de taille homogène et de poids compris entre 400 et 500 g/plant ont été plantés dans chaque répétition.

2.3. Paramètres mesurés

Paramètres de croissance

Douze plants ont été sélectionnés par unité expérimentale sur lesquels le nombre de feuilles et la hauteur des plants ont été mesurés à intervalle de 30 jours jusqu'au 10^{ème} mois avec un mètre ruban. Après

les dernières fertilisations et prises de mesures, quatre plants ont été sélectionnés par unité expérimentale pour le prélèvement des caractéristiques (poids, longueur, surface) de la feuille D à 10 mois. La surface foliaire de la feuille D a été estimée en enlevant des carottes circulaires de 4 cm de diamètre au tiers inférieur au milieu et au tiers supérieur de la feuille (Figures 1 et 2).



Figure 1. Carotte circulaire prélevée sur la feuille D

La surface foliaire a été ensuite estimée par la formule suivante : $S_D = \frac{m_{sc}}{m_{pc}} * p_D$ avec : S_D = surface feuille D, m_{sc} = surface moyennes des carottes ; m_{pc} = poids moyen carottes, P_D = poids feuille D.

La biomasse foliaire sèche totale de 2 plants sacrifiés par unité expérimentale et la biomasse sèche de 4

feuilles D par unité expérimentale évaluées ont été mises à l'étuve à 65 °C pendant 5 à 7 jours.



Figure 2. Mesure de la hauteur de la feuille D

Paramètres de rendement

Le pourcentage de floraison, le poids frais des fruits, le diamètre des fruits, la longueur des fruits, le nombre d'yeux, la longueur et le poids de la couronne ont été estimés. Le rendement en fruit a été déterminé par la formule $R = P/N$, où : R = rendement moyen des fruits en kg/plant ; P = poids des fruits d'ananas récoltés par parcelle élémentaire en kg ; N = nombre de plants par parcelle élémentaire.

3.4. Analyses statistiques

La détermination des doses maximales et optimales de N , P_2O_5 et K_2O a été réalisée grâce aux *modèles quadratiques de type* :

$$y = \alpha + b_1X + b_2X^2$$

Soit X une unité fertilisante et $y = \alpha + b_1X + b_2X^2$ où α , b_1 , et b_2 les constantes à estimer, le modèle quadratique. Les doses des unités fertilisantes N , P_2O_5 et K_2O qui correspondent aux maxima de rendement ont été obtenues en annulant les dérivées du rendement par rapport à l'élément en question ($X_{max} = -b_1/2b_2$). Les limites de confiance de cette dose ont été établies en résolvant par rapport à x , l'équation du deuxième degré (Dagnelie, 1998) :

$$(b_1 + 2b_2x)^2 - \frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \alpha^2 (SCE_{x^2} - 4x SPE_{x,x^2} + 4x^2 SCE_x)}{SCE_x SCE_{x^2} - SPE_{x,x^2}^2} = 0 \text{ à}$$

un degré de confiance égale à $1-\alpha = 95\%$ ($\alpha=5\%$) où : $t_{1-\frac{\alpha}{2}}^2$ est la valeur de la distribution de Student pour un seuil de signification de α

SCE_x est la somme des carrés des écarts de x

SCE_{x^2} est la somme des carrés des écarts de x^2

SPE_{x,x^2} est la somme des produits des écarts de x et de x^2

Cas des modèles quadratiques de type

$$y = \alpha + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$$

Pour les surfaces de réponse de type $y = \alpha + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$ (y est le rendement ; X_1 , X_2 sont respectivement les doses d'azote et de potassium ou de phosphore et de potassium ; α , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 , b_5 sont les coefficients de régression), les doses maximales des unités fertilisantes sont calculées en résolvant le système d'équation constitué par les dérivés partielles par rapport aux unités fertilisantes :

$$\begin{cases} \frac{\delta y}{X_1} = b_1 + 2b_2X_1 + b_5X_2 = 0 \\ \frac{\delta y}{X_2} = b_3 + 2b_4X_2 + b_5X_1 = 0 \end{cases}$$

Détermination des doses optimales pour les modèles quadratiques de type $y = \alpha + b_1X + b_2X^2$

Cas des modèles quadratiques de type

$$y = \alpha + b_1X + b_2X^2$$

Soit x , le facteur de production de y , si le coût marginal de ce facteur peut être considéré comme une fonction linéaire de x , et le rendement ou le revenu marginal de y comme une fonction linéaire de y , un optimum relatif à y peut être obtenu en recherchant le maximum de la fonction $y-cx$, dans laquelle le coefficient c désigne le rapport du coût marginal de x au revenu marginal de y . L'abscisse estimée de l'optimum est, dans ces conditions (Dagnelie, 1998) : $x_{opt} = (c - b_1)/(2b_2)$, et les limites de confiance correspondantes ont été calculées comme précédemment, en remplaçant toutefois b_1 par b_1-c .

Cas des modèles quadratiques de type

$$y = \alpha + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$$

Les modèles sont des fonctions de production qui relient les facteurs de production (N , P , K) au rendement de la culture. Deux rapports ont ici une importance majeure (Dagnelie, 1998 ; Ndiaye et Barry, 1995). Le premier est le rapport entre l'accroissement de la quantité produite et la quantité de facteurs de production consommée, c'est-à-dire la productivité marginale de l'engrais. Le second est le rapport de prix de l'engrais (P_x) rapporté au prix du produit (P). L'utilisation des fonctions de production permet alors un calcul économique dont l'objectif principal est de déterminer les doses de N , P_2O_5 et K_2O qui procurent le maximum de profit. Pour y arriver, il est nécessaire de considérer les dérivées partielles des fonctions par rapport à N , P_2O_5 et K_2O c'est-à-dire le produit marginal qui est le rapport de la variation de rendement

à la variation d'engrais apporté. Le maximum de profit selon (Dagnelie, 1998 ; Ndiaye et Barry, 1995) est obtenu en égalant le produit marginal au rapport de prix facteur/produit :

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial N} = b_1 + 2b_2X_N + b_5X_K = \frac{P_N}{P_y} \\ \frac{\partial y}{\partial K} = b_3 + 2b_4X_K + b_5X_N = \frac{P_K}{P_y} \\ \frac{\partial y}{\partial P} = b_1 + 2b_4X_P + b_5X_K = \frac{P_P}{P_y} \end{cases}$$

où P_N , P_P , et P_K sont respectivement le prix d'une unité d'azote, de phosphore et de potassium et P_y , est le prix d'une unité du produit récolté. Toutes les analyses ont été faites à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2012).

3. RESULTATS

3.1. Influence de l'azote, phosphore et potassium sur la nutrition minérale de l'ananas

L'application des doses croissantes d'éléments fertilisants N, P et K se traduit par une absorption croissante de la plante (Figure 3). La réponse d'absorption de N, P est linéaire ($p < 0,05$) tandis qu'elle est quadratique pour le K. L'absorption est maximale en K pour des doses de K comprises entre 10 g/plant et 12 g/plant.

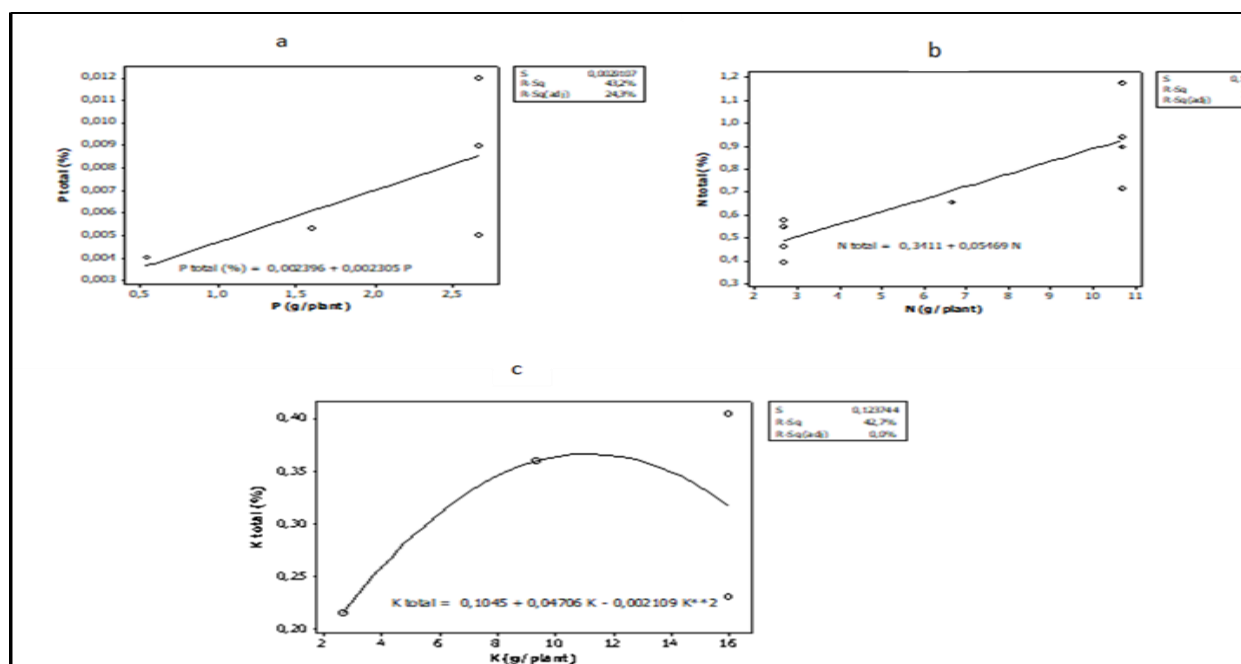


Figure 3. Influence de la fertilisation N (a), P_2O_5 (b) et K_2O (c) sur la nutrition minérale de l'ananas Pain de sucre

3.2. Effet de la fertilisation en P_2O_5 et K_2O sur la longueur, la surface foliaire et la matière sèche de la feuille D

Il s'agit de la réponse des plants à la fertilisation minérale sur la croissance de la feuille D. L'application de N, P_2O_5 et K_2O n'a eu aucun effet significatif sur les trois paramètres de croissance sauf le phosphore qui a montré un effet significatif sur la longueur de la feuille D (Tableau 2). Les traitements T6, T9, et T10 ont produit des feuilles ayant des poids plus élevés que les traitements T7, T1, T8, T3, T2 et T5.

Tableau 2. Effet de la fertilisation P_2O_5 et K_2O sur le poids, la hauteur et la surface foliaire de la feuille D

Nutriment (g/plant)	Poids feuilles (g)	Hauteur feuilles (cm)	Surface foliaire (cm ²)
Azote			
2,7	89,40a	99,82a	548,57a
6,7	94,57a	100,77a	572,90a
10,7	94,33a	99,31a	570,46a
Phosphore			
0,5	101,87a	101,87a	577,89a

1,6	94,56a	101,87ab	572,90a
2,7	94,56a	101,87b	541,14a
Potassium			
2,7	90,56a	99,07a	554,23a
9,3	94,56a	100,77a	572,90a
16	93,17a	100,06a	564,79a
Traitements			
T6	92,63a	101,45a	547,71a
T9	97,08a	103,90a	599,75a
T10	103,15a	102,83a	594,62a
T7	78,27ab	94,60a	521,94a
T1	94,57ab	100,76a	572,90a
T8	83,17bc	93,75a	522,87a
T3	92,35abc	99,30a	569,47a
T2	89,62abc	99,32a	524,87a
T5	98,65c	101,37a	594,89a

3.3. Influence de l'azote, du potassium et du phosphore sur le rendement et ses composantes

Les doses de N (6,7 g/plant), de P₂O₅ (1,6 g/plant) et de K₂O (9,3 g/plant) ont montré les poids de fruit les plus élevés. Des effets significatifs sur le poids moyen des fruits ($p = 0,01$) et le diamètre des fruits ($p = 0,02$) ont été observés. Seul le potassium a un effet significatif ($p = 0,01$) sur le nombre d'yeux par fruit. La différence de l'effet des traitements sur le poids de la couronne, la longueur du fruit et la longueur de la couronne n'est pas significative ($p > 0,05$). La tendance linéaire de l'effet de N, P₂O₅ et K₂O sur le poids moyen et le diamètre du fruit est significative tandis que la tendance quadratique est très hautement significative (Tableau 3).

Tableau 3. Effet de l'azote, du potassium et du phosphore sur le rendement et ses composantes

Doses de Nutriments	Poids moyen fruit kg/plant	Poids couronne g/plant	Longueur fruit cm	Diamètre fruit cm	Longueur couronne cm	Nombre d'yeux
Azote						
2,70	1,60 b	167,16 a	18,54 a	38,76 b	21,87 a	116,75 a
6,70	1,93 a	168,70 a	19,41 a	40,99 a	22,26 a	123,80 a
10,70	1,57 b	188,24 a	23,13 a	37,82 b	23,55 a	113,30 a
Tendances	L*Q***	L^{ns}Q^{ns}	L*Q***	L*Q***	L^{ns}Q*	L^{ns}Q***
Phosphore						
0,50	1,60 b	174,98 a	23,90 a	38,56 b	22,77 a	115,95 a
1,60	1,93 a	168,70 a	19,41 a	40,99 a	22,26 a	123,80 a
2,70	1,58 b	177,11 a	17,96 a	38,20 b	22,46 a	114,76 a
Tendances	L*Q***	L^{ns}Q^{ns}	L*Q***	L*Q***	L^{ns}Q*	L*Q***
Potassium						
2,70	1,55 b	183,89 a	22,34 a	37,85 b	23,17 a	111,79 b
9,30	1,93 a	168,70 a	19,41 a	40,99 a	22,26 a	123,80 a
16,00	1,63 b	168,51 a	18,68 a	38,86 b	22,01 a	118,75 ab
Tendances	L*Q***	L^{ns}Q^{ns}	L**Q***	L**Q***	L*Q^{ns}	L**Q***

La partie linéaire de la tendance de l'effet de l'azote et du phosphore sur la longueur du fruit est significative ($p = 0,02$) tandis que la tendance linéaire du potassium est hautement significative ($p = 0,002$). Les tendances quadratiques de l'effet de chaque unité fertilisante sur la longueur du fruit sont très hautement significatives ($p = 0,000$). Les tendances linéaires de l'effet de N, P sur la longueur de la couronne n'est pas significative ($p > 0,05$) alors que la tendance quadratique est significative ($p = 0,01$). L'effet linéaire du K sur ce paramètre est significatif alors que la tendance quadratique ne l'est pas. Enfin, pour le nombre d'yeux, seul l'effet linéaire de l'azote n'est pas significatif.

3.4. Modélisation de l'influence de N, P et K sur le rendement

L'ajustement linéaire simple ou multiple des données est significatif ($p < 0,05$). Les modèles linéaires simples ou multiples montrent les plus faibles coefficients de détermination, ajusté et prédictif.

Tableau 4. Modèles linéaires d'estimation de la production de Pain de sucre

A. Modèles linéaires	F	R ²	R ² ajusté	PRESS	R ² (pred)
Modèle 1. Poids fruit = $1,34 + 0,04 N$	5,36*	21,14	17,20	2,56	1,56
Modèle 2. Poids fruit = $1,35718 + 0,141918 P$	4,41*	18,06	13,96	2,63	-1,32
Modèle 3. Poids fruit = $1,34537 + 0,0275009 K$	6,56*	24,69	20,93	2,39	7,79
Modèle 4. Poids fruit = $1,26442 + 0,030557 N + 0,0931808 P$	3,60*	27,49	19,86	2,47	4,72
Modèle 5. Poids fruit = $1,22268 + 0,0309954 N + 0,02198 K$	5,25*	35,60	28,82	2,23	14,30
Modèle 6. Poids fruit = $1,23483 + 0,101861 P + 0,0225267 K$	4,72*	33,19	26,15	2,28	12,03
Modèle 7. Poids fruit = $1,176 + 0,0241198 N + 0,0680991 P + 0,0198792 K$	3,82*	38,86	28,67	2,31	11,20
B. Modèles non linéaires					
Modèle 8. Poids fruit = $0,88 + 0,33N - 0,03N^2$	52,07***	84,6	82,9	0,53	79,5
Modèle 9. Poids fruit = $0,94 + 1,30P - 0,40P^2$	42,26***	81,6	79,7	0,63	75,79
Modèle 10. Poids fruit = $0,98 + 0,21K - 0,01K^2$	38,69***	80,29	78,21	0,68	73,89
Modèle 11. Poids fruit = $1,10 + 0,08 N + 0,24P - 0,03N*P$	4,64*	43,6	34,2	2,35	9,33
Modèle 12. Poids fruit = $1,16 + 0,05N + 0,03K - 0,002N*K$	3,79*	38,74	28,53	2,35	9,41
Modèle 13. Poids fruit = $1,15 + 0,18 P + 0,04K - 0,01P*K$	3,71*	38,22	27,93	0,53	9,25
Modèle 14. Poids fruit = $0,85 + 0,53N - 0,15K - 0,04N^2 + 0,003N*K + 0,007K^2$	26,15***	89,1	85,69	0,55	78,79
Modèle 15. Poids fruit = $0,85 + 0,60N - 1,11P - 0,05N^2 + 0,004N*P + 0,34P^2$	18,58***	85,31	80,71	0,69	73,5
Modèle 16. Poids fruit = $0,85 + 5,19P - 0,66K - 1,65P^2 + 0,01P*K + 0,04K^2$	24,42***	88,41	84,79	0,59	77,38
Modèle 17. Poids fruit = $1,29 + 0,25N - 0,11P - 0,03K - 0,02N*N + 0,004N*P + 0,003N*K + 0,008P*K$	23,1***	73,99	57,44	0,79	0,58

Le coefficient de détermination varie entre 18,06 % et 38,86 % et le coefficient de détermination ajusté entre 13,96 % et 28,82 %.

Le coefficient de détermination prédictif pour les modèles linéaires oscille entre -1,32 et 14,30. Les valeurs les plus élevées du critère de validation croisée (PRESS) ont été observées pour les modèles linéaires et varient de 2,23 à 2,63 (Tableau 4A).

Les ajustements non linéaires des données de rendement et de dose de fertilisant sont significatifs ($p < 0,05$) à très hautement significatifs ($p < 0,001$). Les modèles non linéaires indiquent des coefficients de détermination ajustés et

prédictifs les plus élevés. Les modèles de rendement présentent un coefficient de détermination variant entre 38,22 % et 89,10 % et un coefficient de détermination ajusté oscillant entre 27,93 % et 85,31 % (Tableau 4B). Les modèles non linéaires et non quadratiques (Modèles 11, 12 et 13) ont les plus faibles coefficients de détermination et de détermination ajustés. Les plus faibles critères de validation ont été obtenus avec les modèles quadratiques (entre 0, 53 et 0,69) (Tableau 4B).

Tableau 5. Doses maximale et économique de N, P₂O₅ et K₂O

Unités fertilisantes	Dose maximale (g/plant)	Intervalle de confiance de la dose maximale à 95%	Dose optimale (g/plant)	Intervalle de confiance de la dose optimale à 95%
N	6,63	4,67-8	5,35	5,28-6
P ₂ O ₅	1,63	1,50-1,65	1,62	1,60-1,64
K ₂ O	9,86	8,71-10,45	9,52	9,5-10

3.5. Doses maximales et optimales de N, P₂O₅ et K₂O

Cas des modèles quadratiques simples

L'effet quadratique de N, P et K sur le rendement en fruits étant significatif, la dose maximale est l'abscisse qui annule la dérivée première de l'équation de la parabole (Figures 4). Les doses maximales sont de 6,63 g/plant (95% IC = 4,67-10,25 g/plant), 1,63 et 9,86 g/plant (95% IC = 8,71-10,45 g/plant), respectivement pour N, P₂O₅ et K₂O. Les doses économiques sont de 5,35 g/plant (95% IC = 5,28-6 g/plant), 1,62 g/plant (95% IC = 1,60-1,64 g/plant) et 9,52 g/plant (95% IC = 9,5-10 g/plant), respectivement pour N, P₂O₅ et K₂O (Tableau 5).

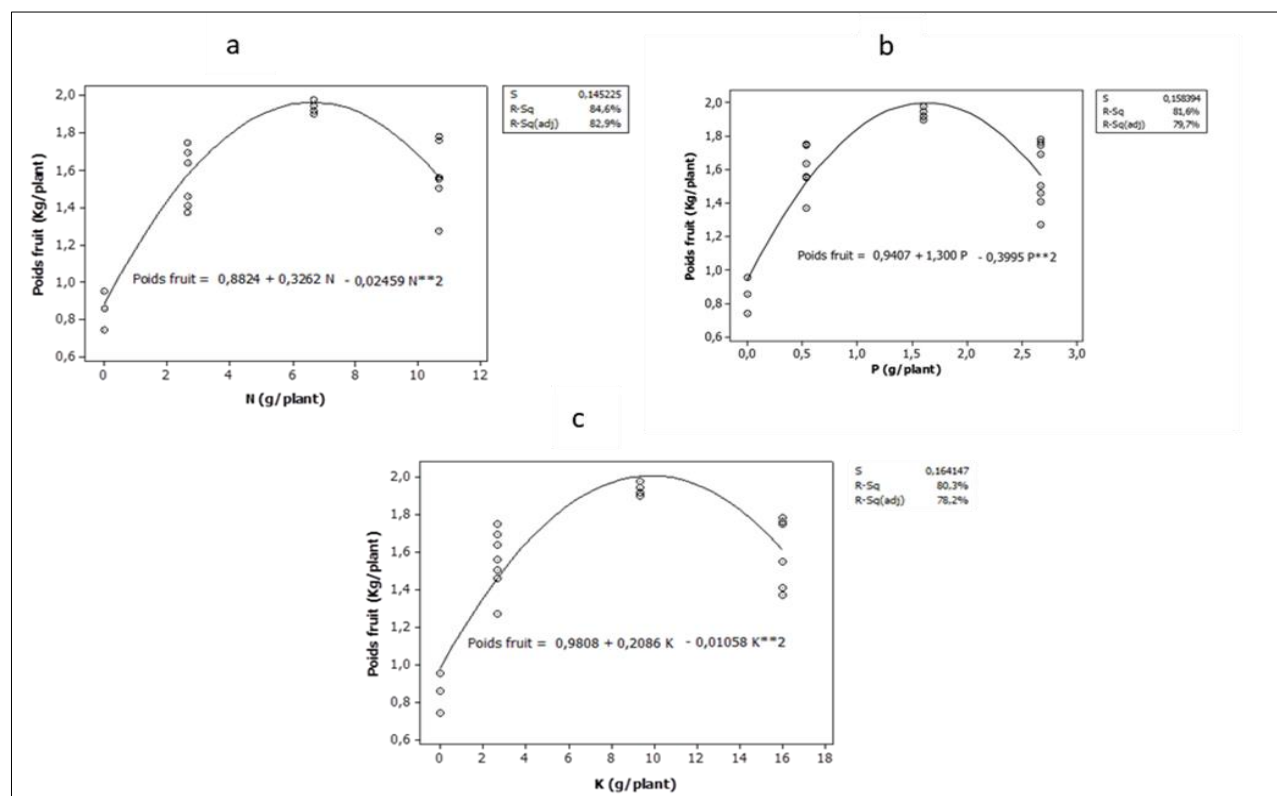


Figure 4. Courbes de réponses de l'ananas "Pain de sucre" à la fertilisation N (a), et P₂O₅ (b) et K₂O (c)

Cas des modèles quadratiques multiples

L'analyse des surfaces de réponse quadratiques a révélé que les modèles 14 et 16 (Tableau 4B) sont les

meilleurs estimateurs de la production (R^2 , R^2 ajusté et R^2 (pred) plus grands et PRESS plus faible). Ces modèles de réponse prennent la forme $y = \alpha + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$. Ici, y

représente le rendement, tandis que X_1 et X_2 correspondent respectivement aux quantités d'azote et de potassium dans le Modèle 14, ou de phosphore et de potassium dans le Modèle 16. Les termes a , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 et b_5 symbolisent les coefficients de régression associés à ces modèles.

Les doses maximales des unités fertilisantes sont calculées en résolvant le système d'équation constitué par les dérivés partiels par rapport aux unités fertilisantes :

Selon le Modèle 14, on a le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial N} = 0,529 - 0,084N + 0,003K = 0 & (1) \\ \frac{\partial y}{\partial K} = -0,151 + 0,014K + 0,003N = 0 & (2) \end{cases}$$

Selon le modèle 16, on a le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial P} = 5,188 - 3,308P + 0,010K = 0 & (3) \\ \frac{\partial y}{\partial K} = 0,660 + 0,07K + 0,010P = 0 & (4) \end{cases}$$

Les doses maximales solutions des systèmes d'équations sont de 6,63 g/plant, 1,60 g/plant et 9,44 g/plant, respectivement pour N, P_2O_5 et K_2O . Les doses optimales des unités fertilisantes sont solution du système d'équations :

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial N} = 0,529 - 0,084N + 0,003K = \frac{P_N}{P_y} \\ \frac{\partial y}{\partial K} = -0,151 + 0,014K + 0,003N = \frac{P_K}{P_y} \\ \frac{\partial y}{\partial P} = 5,188 - 3,308P + 0,010K = \frac{P_P}{P_y} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \frac{\partial y}{\partial N} = 0,529 - 0,084N + 0,003K = 0,0068 & (5) \\ \frac{\partial y}{\partial K} = -0,151 + 0,014K + 0,003N = 0,0053 & (6) \\ \frac{\partial y}{\partial P} = 5,188 - 3,308P + 0,010K = 0,0058 & (7) \end{cases}$$

En résolvant simultanément les équations (5), (6) et (7), on obtient les doses optimales de N, de P_2O_5 et de K_2O à recommander aux producteurs et qui correspondent au maximum de profit. Ces doses sont de 6,55 g/plant pour N, 1,60 g/plant pour P_2O_5 et 9,38 g/plant pour K_2O . Ce qui correspond à une dose de 393 kg/ha de N, 96 kg/ha de P_2O_5 et 562,8 kg/ha de K_2O . L'application des doses optimales permet d'obtenir un rendement optimal de 1,90 kg/plant soit 114 t/ha.

Au prix moyen de 608,70 FCFA N/kg, 521,74 FCFA P_2O_5 /kg et 480 FCFA K_2O /kg, les engrais représentent

un investissement de 559 450 FCFA/ha. Les autres coûts de production (les investissements et leur amortissement, les intrants et la main d'œuvre) s'élèvent à 2 811 503 FCFA/ha (Sohinto, 2008). Le coût total de production est donc de 3 370 953 FCFA/ha. Le bénéfice net est de 6 889 047 FCFA/ha si l'ananas est vendu à 90 FCFA/kg.

4. DISCUSSION

4.1. Qualité des modèles sélectionnés

Dans ce travail, les modèles quadratiques sont les meilleurs estimateurs du rendement à partir des doses de fertilisants apportés. Des réponses quadratiques hautement significatives de l'azote et du potassium sur le rendement de l'ananas ont été aussi obtenues au Brésil par Spironello *et al.* (2004). Les critères de sélection des modèles ont révélé que les modèles non linéaires expriment mieux la relation entre la fertilisation minérale et la croissance de l'ananas d'une part et entre la fertilisation et le rendement en fruit d'autre part. Le coefficient de détermination est une fonction croissante de la complexité du modèle. Il conduit donc toujours à choisir le modèle qui épouse le mieux les données, autrement dit le modèle le plus complexe. A partir du coefficient de détermination, on définit le coefficient de détermination ajusté qui consiste à pénaliser par l'augmentation du nombre de variables utilisées. Le critère de validation croisée permet de sélectionner les modèles ayant un bon pouvoir prédictif (on recherche PRESS le plus petit). R^2 (pred) indique dans quelle mesure le modèle prédit des réponses pour de nouvelles observations. Des valeurs plus élevées de R^2 (pred) permettent d'avoir des modèles de plus grande capacité prédictive (Azaïs et Bardet, 2012). Une réponse positive de la croissance et du rendement à l'adjonction du phosphore a été observée.

Par contre, aucune réponse au phosphore n'a été signalée malgré les teneurs très faibles de l'élément dans le sol (Spironello *et al.*, 2004 ; Py *et al.*, 1984). Le phosphore est essentiel à la différenciation de l'inflorescence et de la floraison. Godefroy *et al.* (1971) rapportent cependant que les besoins en P sont limités. La réponse au phosphore s'explique par la déficience caractéristique des sols ferrallitiques en cet élément dans le sud du Bénin. Ces sols ont une capacité de rétention en cations et les réserves minérales se caractérisant par des taux de K extrêmement faibles et des teneurs en P_2O_5 faibles (Agossou, 1983).

Le potassium est l'élément le plus absorbé par la plante. Des résultats de recherches menées à Cuba pendant 2 décennies indiquent que l'ananas consomme

de grandes quantités de potassium (270 à 780 kg/ha) (Treto, 1992).

4.2. Doses économiques des unités fertilisantes

Les doses économiques de fertilisants N, P₂O₅ et K₂O à préconiser pour la variété "Pain de sucre" sont de 6,55 g/plant pour N, 1,60 g/plant pour P₂O₅ et 9,38 g/plant pour K₂O. Les doses d'unités fertilisantes N et K₂O corroborent les normes du Ministère des Affaires Etrangères (2002) qui sont de 4 à 14 g/plant pour N, de 10 à 20 g/plant pour K₂O.

L'interprétation économique des essais de fumures minérales requiert la connaissance des variations continues des rendements et des prix, en fonction des doses de fumures appliquées à travers la fonction de production. Un premier goulot est celui des expressions de rendements en fonction des fumures à partir des résultats discontinus fournis par les essais. Cette question de "l'ajustement" relève du domaine de la statistique.

Dans cette étude, des surfaces polynomiales de réponse de second degré ont été utilisées. Il convient cependant de noter que ce polynôme n'est qu'un modèle empirique dont les coefficients de régression restent encore sans aucune signification biologique. L'emploi d'une fertilisation équilibrée permet d'obtenir des rendements élevés en fournissant des quantités appropriées d'éléments nutritifs au sol. Cependant, la notion de fertilisation équilibrée devient complexe lorsqu'on tient compte des facteurs variables, tels que la teneur en éléments nutritifs du sol, les variétés utilisées, la gestion de l'exploitation, etc. Le rapport Coût/Bénéfice met en évidence la rentabilité d'une fertilisation équilibrée et fait ressortir l'intérêt de l'optimisation, plutôt que de la maximisation du rendement (Ndiaye et Barry, 1995). Un autre aspect qui prend de l'importance est de savoir si l'agriculteur va accepter l'engrais équilibré dans le cadre de sa capacité d'investissement en engrais. Dans cette étude, il a été admis, comme cela se fait usuellement, que l'objectif majeur de la fertilisation est d'obtenir le maximum de profit pour ceux des agriculteurs qui ont la possibilité financière de payer une fumure minérale.

5. CONCLUSION

L'utilisation de modèles quadratiques pour déterminer les doses optimales constitue une étape prometteuse vers une agriculture plus efficiente et durable au Sud-Bénin. Cette étude met en relief combien la fertilisation minérale a un effet positif sur la croissance et le rendement de l'ananas. Les modèles quadratiques sont les meilleurs estimateurs du rendement à partir des doses de fertilisant apportés. Les doses

économiques de fertilisant N, P et K à préconiser pour le Pain de sucre sont de 6,55 g/plant pour l'azote, 1,60 g/plant pour le phosphore et 9,38 g/plant pour le potassium pour obtenir un rendement de 114 t/ha et un profit de 6 889 047 FCFA à l'hectare.

Remerciements

Nous remercions la coopération allemande à travers le DAAD « Deutscher Akademischer Austauschdienst Dienst » pour avoir financé en partie ce travail. Nous sommes aussi reconnaissants aux ingénieurs de travaux Ruth Afora, Crépin Houéno, Djamel Ayifimi, Claudel Agbangba et Jean Pierre Méssèko pour leur implication active dans la collecte des données de terrain.

Références

- Agbangba C.E., 2008. *Contribution à la formulation d'engrais spécifique pour la culture de l'ananas par le diagnostic foliaire dans la commune d'Allada*. Thèse d'ingénieur agronome, Université de Parakou, Parakou, 159 p.
- Agbangba C.E., Dagbenonbakin DG. & Kindomihou V., 2010. Etablissement des normes du système intégré de diagnostic et de recommandation de la culture d'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merr) variété Pain de sucre en zone subéquatoriale du Bénin. *Annales de l'Université de Parakou, Série Sciences Naturelles et Agronomie*, 1, 51-69.
- Agbangba C.E., Dagbenonbakin G.D., Djogbéno C.P., Houssou P., Assea D.E., Sossa E.L., Kotomalè U.A., Ahotonou P., Ndiaga C. & Akpo L.E., 2015. Influence de la fertilisation minérale sur la qualité physico-chimique et organoleptique du jus d'ananas Cayenne lisse au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Science*, 9(3), 1277-1288. DOI:10.4314/IJBCS.V9I3.13.
- Agossou V., 1983. *Les sols Béninois et leurs potentialités agricoles*. Centre National d'Agropédologie (CENAP). Projet agro-pédologique, Etude n° 260, 10 p.
- Atchada C.C. & Akplo T.M., 2021. Variabilité du carbone dans les différentes fractions organiques du sol suivant les modes d'utilisation des terres en Afrique de l'Ouest. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 10(1) 10-16.
- Azaïs J.M. & Bardet J.M., 2012. *Le modèle linéaire par l'exemple : Régression, analyse de la variance et plans d'expérience illustrés par R et SAS*. 2ème Edition DUNOD, 115 p.
- Blackmer A.M. & Meisinger J.J., 1990. Re-examination of the methodology used for selecting nitrogen inputs into crop production. *Journal of Contaminant Hydrology*, 78, 571-575.
- Cerrato M.E. & Blackmer A.M. 1990. Corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy Journal*, 82, 138-143.

<https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200010030x>.

Core Team R., 2012. *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Dagnelie P., 1998. *Théories et Modèles Statistiques, Applications Agricoles*. Tome 2, 21ème Édition, 464 p.

Desclee D., Sohinto D. & Padonou F., 2021. Sustainability Assessment and Agricultural Supply Chains Evidence-Based Multidimensional Analyses as Tools for Strategic Decision-Making. The Case of the Pineapple Supply Chain in Benin. *Sustainability*, 13, 2060. <https://doi.org/10.3390/su13042060>.

Godefroy J., Py C. & Tisseau M.A., 1971. Action de la fumure phosphatée en culture d'ananas en Côte d'Ivoire et en Guadeloupe. *Fruits*, 26(3), 207-210.

Helvetas-Bénin, 2008. *Appui à la Filière Ananas Biologique et Équitable*. Document du Projet, Helvetas-Benin, Cotonou, 71 p.

INSAE (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique du Bénin), 2020. *Monographie de la filière de l'ananas au Bénin*, 94 p.

INSTaD (Institut National de la Statistique et de la Démographie du Bénin), 2022. *Monographie de la filière ananas au Bénin* <https://instad.bj/statistiques/statistiques-economiques>. Consulté en ligne le 10 Mai 2023.

MAEP, 2017. *Stratégie nationale de promotion des filières agricoles intégrant l'outil clusters agricoles*. Ministère de l'Agriculture de l'Élevage et de la Pêche. Document final, 73 p.

Ministère des Affaires étrangères (France), 2002. *Mémento de l'agronome*. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD). Groupe de recherche et d'échanges technologiques (GRET), 1691 p.

Ndiaye J.P. & Barry B., 1995. *Fonctions de production, isoquantes et doses optimales d'azote, de phosphore et de potassium pour quelques cultures dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal*, 19 p. horizon.documentation.ird.fr

Py C., Lacoeylle J.J. & Teisson C., 1987. *L'Ananas, sa culture, ses produits*. G-P. Maisonneuve & Larose. Paris, 568 p.

Schoier P. & Texido R.A., 2001. Agriculture en Afrique Tropical. In *Raemaekers H.R., Ed. Direction Générale de la Coopération Internationale: Ministère des Affaires Étrangères, du Commerce Extérieur et de la Coopération Internationale: Brussels, Belgique*, 1634 p.

Sohinto D. 2008. *Analyse de la rentabilité économique des chaînes de valeur ajoutée de l'ananas au Bénin*. Rapport de consultation, 76 p.

Sossa E.L., Amadji G.L., Aholoukpè N.S.H., Hounsou B.M., Agbossou K.E. & Hounhouigan D.J., 2015. Change in a ferralsol physicochemical properties under pineapple cropping system in southern of Benin. *Journal of Applied Biosciences*, 91, 8559-8569. <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v91i1.11>.

Sossa E.L., Amadji G.L., Vissoh P.V., Hounsou B.M., Agbossou K.E. & Hounhouigan D.J., 2014. Caractérisation des systèmes de culture d'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merrill) sur le 168 plateau d'Allada au Sud-Bénin. *International Journal of Chemical and Biological Science*, 8(3), 1030-1038, <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i3.17>.

Spironello A., Quaggio J.A., Teixeira L.A.J., Furlani P.R. & Sigrist J.M.M., 2004. Pineapple Yield and Fruit Quality Affected by NPK Fertilization in a Tropical Soil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal - SP, 26(1), 155-159. DOI :10.1590/S0100-29452004000100041.

Treto E., 1992. Nutrition et fertilisation des pina : 20 ans de recherche à l'Institut national des sciences agricoles (INCA). *Cultures tropicales*, 13, 2-3.