

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/334277012>

MODELISATION DE LA REPONSE DE L'ANANAS CAYENNE LISSE A L'AZOTE, AU PHOSPHORE ET AU POTASSIUM SUR SOLS FERRALLITIQUES AU BENIN

Article · April 2017

CITATIONS

2

READS

129

5 authors, including:



Emile Codjo Agbangba

University of Abomey-Calavi

70 PUBLICATIONS 179 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Elvire Line Sossa

University of Abomey-Calavi

10 PUBLICATIONS 25 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Gustave Dieudonné Dagbenonbakin

National Institute of Agricultural Research of Benin

74 PUBLICATIONS 163 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Pierre Gbénoukpo Tovihoudji

University of Parakou

37 PUBLICATIONS 78 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Scaling-up fertilizers microdosing and indigenous vegetables production and utilization in West-Africa (MICRO-VEG) [View project](#)



Preliminary DRIS model parameterization to access pineapple variety 'Perola' nutrient status in Benin (West Africa) [View project](#)

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/315912208>

MODELISATION DE LA REPONSE DE L'ANANAS CAYENNE LISSE A L'AZOTE, AU PHOSPHORE ET AU POTASSIUM SUR SOLS FERRALLITIQUES AU BENIN

Article · December 2016

CITATIONS

0

READS

536

1 author:



Emile Codjo Agbangba

University of Abomey-Calavi

50 PUBLICATIONS 99 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Preliminary DRIS model parameterization to assess pineapple variety 'Perola' nutrient status in Benin (West Africa) [View project](#)



Programme d'Amélioration de la Productivité Agricole des Petits Exploitants (PAPAPE) [View project](#)

MODELISATION DE LA REPONSE DE L'ANANAS CAYENNE LISSE A L'AZOTE, AU PHOSPHORE ET AU POTASSIUM SUR SOLS FERRALLITIQUES AU BENIN

AGBANGBA Codjo Emile^{1&3*}, SOSSA Elvire Line², DAGBENONBAKIN Gustave Dieudonné³, Pierre TOVIHOUDJI³, KINDOMIHOU Valentin⁴

Résumé

L'objectif de l'étude est d'évaluer les modèles habituellement utilisés pour identifier les doses économiques des fertilisants N, P₂O₅ et K₂O. L'étude implique l'ajustement de chaque modèle aux résultats d'analyses chimiques des feuilles D et des rendements obtenus avec les niveaux de chaque fertilisant N, P₂O₅ et K₂O. On retient que la fertilisation minérale a un effet positif sur la nutrition minérale, la croissance et le rendement de l'ananas. Les modèles quadratiques sont les meilleurs estimateurs du rendement à partir des doses croissantes de fertilisants apportées. Les doses de fertilisants qui correspondent au maximum de profit sont de 6,75 g.plant⁻¹ pour l'azote, 1,60 g.plant⁻¹ pour le phosphore et 9,45 g.plant⁻¹ pour le potassium. Ce qui correspond à une dose de 405,6 kg.ha⁻¹ de N ; 96 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ ; 567 kg.ha⁻¹ de K₂O pour une densité de 60000 plants.ha⁻¹. Ces doses permettent d'obtenir un rendement optimal de 2,76 kg.plant⁻¹ soit 165,6 t.ha⁻¹ et un profit de 11.523.361 FCFA à l'hectare.

Mots clés : Fertilisation, Ananas, doses économiques, rendement, modèle

Abstract

The objective of the study was to evaluate models usually used to identify economic rates of fertilizers N, P₂O₅ and K₂O. The study involves the adjustment of each model to the results of chemical analysis of the leaves D yields obtained with the levels of each fertilizer N, P₂O₅ and K₂O. The results suggested that the mineral fertilization has a positive effect on the mineral nutrition, on the growth and the yield of pineapple. Quadratic models are the best estimators for yield from fertilizer applied. The fertilizer doses corresponding to maximum profit are 6.75 g.plant⁻¹ for nitrogen, 1.60 g.plant⁻¹ for phosphorus and 9.36 g.plant⁻¹ for potassium. That corresponds to a dose of 405 kg.ha⁻¹ of N; 96 kg.ha⁻¹ of P₂O₅ ; 561.6 kg.ha⁻¹ of K₂O for a density of 60000 plants.ha⁻¹. The optimal doses provide a yield of 2.76 kg.plant⁻¹, that is 165.6 t.ha⁻¹ and a profit of 11,526,318.18 FCFA per hectare.

Key words: Fertilization, pineapple, economic doses, yields, model

¹Université D'Abomey-Calavi, Laboratoire de Biomathématiques et d'Estimations Forestières

²Université d'Abomey-Calavi, Département de Production Végétale, Laboratoire des Sciences du Sol

³Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB),

Direction Générale

⁴Université d'Abomey-Calavi, Laboratoire d'Ecologie Appliquée

Auteur correspondant : Email: agbaemile@yahoo.fr, BP: 01 BP. 884 Recette Principale.

INTRODUCTION

L'ananas est le deuxième fruit tropical dans le commerce mondial et contribue à plus de 20% de la production mondiale de fruits tropicaux avec 24,8 million tonnes en 2013 (FAO, 2015). En Afrique de l'Ouest, le Bénin est le deuxième plus grand producteur d'ananas avec 160.000 tonnes en 2011, après le Nigeria (FAO, 2013). La culture de l'ananas est consommée en fruit frais localement et dans les pays tempérés où il est importé. La plus grande partie de la production est cependant mise en conserve dans les pays producteurs, sous forme de tranches ou de dés ; ou est usinée pour produire du jus, de la compote et du concentré (Schohier et Texido, 2001). La variété Cayenne lisse est cultivée pour le marché international tandis que les marchés national et régional sont visés par la variété "Pain de sucre" (Achigan-dako *et al.*, 2014). L'ananas du Bénin est produit principalement pour la consommation en frais et la transformation en jus (Sohinto, 2008). La chair de l'ananas contient (60% du fruit frais), 85% d'eau, 0,4% de protéine, 14% de sucre, 0,1% de matière grasse et 0,5% de fibre (Purseglove, 1972). Le fruit d'ananas est une bonne source de vitamines A, B₁, B₆ et C, de cuivre, de manganèse et un régime à fibre (Morton, 1987 ; Mateljan, 2007). La consommation de l'ananas contribue à l'équilibre alimentaire et nutritionnel des populations en raison de sa forte valeur en nutriments. Malgré l'importance de cette

culture, la nutrition et la fertilisation de l'ananas ont bénéficié de très peu d'attention de la part de la recherche agricole au Bénin. Il importe à cet effet de déterminer les doses optimales pour une production fruitière rationnelle de l'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). Ces décisions sont particulièrement importantes pour la production de l'ananas qui exporte de quantités importantes d'éléments minéraux (Bhugaloo, 2002). Les recherches antérieures ont montré clairement que la sélection du modèle est un facteur majeur affectant la dose qui est identifiée comme étant optimale et, par conséquent, la raison pour sélectionner un modèle sur les autres doit mériter plus d'attention (Barreto et Westerman, 1987 ; Blackmer et Meisinger, 1990; Cerrato et Blackmer, 1990). Au Brésil, les modèles quadratiques de type $y = \alpha + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$ (y est le rendement, b₁, b₂, b₃, b₄ et b₅ des constants à estimer, X₁ et X₂ les éléments minéraux) étaient les meilleurs pour prédire le rendement à partir des doses de fertilisants (Spironello *et al.*, 2004). Les documents scientifiques sur la fertilisation de l'ananas se résument en des fiches techniques et des enquêtes sur les pratiques en milieu paysan au Bénin. Les doses reconnues optimales actuellement recommandées par les services de vulgarisation sont calquées sur la fumure utilisée

en Côte d'Ivoire (Agbangba, 2008 ; Agbangba *et al.*, 2015). Les objectifs de cette étude sont (i) de comparer et d'évaluer les modèles habituellement utilisés pour identifier les doses économiques des fertilisants et (ii) de déterminer les doses maximales et optimales des unités fertilisantes N, P₂O₅ et K₂O. L'étude implique l'ajustement de chaque modèle aux résultats de rendements obtenus avec les niveaux de chaque fertilisant N, P₂O₅ et K₂O.

MATERIEL ET METHODES

Site expérimental

La commune d'Allada, située dans le Sud du Bénin, dans le département de l'Atlantique a été retenue pour cette étude en raison du plus grand nombre de producteurs qui y cultivent l'ananas (Ouinkoun et Lalèye, 2004). Elle est située dans le nord du département entre 6° 34' et 6°47' latitude Nord, 1°59' et 2°15' longitude Est à 54 km de Cotonou, capitale économique du Bénin (Figure 1). Les sols ferrallitiques couvrent la grande partie de la zone d'étude. La texture des sols est limono-sableuse à sablo-limoneuse avec des taux de sable et limon, variant respectivement entre 78,9% et 84,8% pour le sable et 4,2% et 6,8% pour le limon. La teneur en azote variant de 0,07% à 0,08% associée à un pH faiblement acide (6,1 à 6,5) est bonne. Le rapport carbone/azote variant de 10 à 10,3 indique une décomposition normale de la matière organique. La teneur en potassium (0,03 à 0,14 méq/100g) est faible. La teneur en phosphore assimilable selon Bray 1 est faible (4 ppm) à Sékou et à Ahouannonzoun et est moyenne dans les autres localités (10 ppm). La somme des bases échangeables et la CEC sont faibles (3,06 à 5,29 méq/100g).

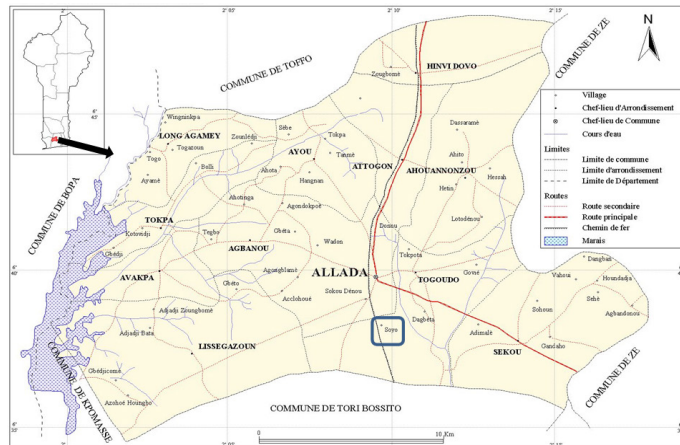


Figure 1. Localisation de la commune d'Allada montrant en bleu le village Soyo où l'essai a été installé

Dispositif expérimental et conduite de l'essai

L'essai a été réalisé du 13 Avril 2013 au 23 Juillet 2014 dans le village de Soyo situé dans l'arrondissement d'Allada. Le dispositif expérimental est un plan factoriel complet 2³ (c'est-à-dire trois fertilisants N, P et K ayant deux niveaux chacun), géré avec le logiciel Minitab16. Les niveaux minimum et maximum pour chaque facteur sont de 2,7 g.plant⁻¹ et 10,7 g.plant⁻¹ pour le N ; de 0,5 g.plant⁻¹ et 2,7 g.plant⁻¹ pour le P et de 2,7 g.plant⁻¹ et 16 g.plant⁻¹ pour le 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 (Memento de l'agronome, 2002). Dans le cas des essais factorielles 2^k, l'adjonction d'observations complémentaires

situées au centre du schéma factoriel offre aussi la possibilité de vérifier l'éventuelle linéarité ou non-linéarité de la relation entre les facteurs et la variable observée (Dagnelie, 2012). Ainsi le traitement T1 (6,7 g N.plant⁻¹, 1,6 g P.plant⁻¹, 9,3 g K.plant⁻¹) 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 en NPK suivants: T₁ : 6,7 g.plant⁻¹, 1,6 g.plant⁻¹, 9,3 g.plant⁻¹; T₂ : 2,7 g.plant⁻¹, 2,7 g.plant⁻¹, 2,7 g.plant⁻¹; T₃ : 10,7 g.plant⁻¹, 0,5 g.plant⁻¹, 2,7 g.plant⁻¹; T₄ : 10,7 g.plant⁻¹, 2,7 g.plant⁻¹, 16 g.plant⁻¹; T₅ : 2,7 g.plant⁻¹, 0,5 g.plant⁻¹, 16 g.plant⁻¹; T₆ : 2,7 g.plant⁻¹, 2,7 g.plant⁻¹, 16 g.plant⁻¹; T₇ : 10,7 g.plant⁻¹, 2,7 g.plant⁻¹, 2,7 g.plant⁻¹; T₈ : 2,7 g.plant⁻¹, 0,5 g.plant⁻¹, 2,7 g.plant⁻¹ et T₉ : 10,7 g.plant⁻¹, 0,5 g.plant⁻¹, 16 g.plant⁻¹. Quatre blocs de 6 unités expérimentales chacun ont été ainsi constitués, ce qui a permis d'avoir 24 unités expérimentales. Chaque unité expérimentale est constituée de 6 lignes de 5 plants. L'interligne était de 0,8 m et la distance entre poquets sur une même ligne de 0,4 m, soit une densité de 60000 plant/ha. Les engrais minéraux utilisés sont: L'urée (46% N), le superphosphate triple (46% P₂O₅) et le sulfate de potassium (K₂SO₄, 50% K₂O, 45% SO₃).

Le premier apport a eu lieu une semaine après la plantation (P₂O₅), le second apport à 45 jours après la plantation (JAP) (1/5N + 1/6K₂O), le troisième à 90 JAP (1/5N + 1/6 K₂O), le 4^{ème} à 135 JAP (1/5N + 1/6 K₂O), le 5^{ème} à 180 JAP (1/5N + 1/6 K₂O), le 6^{ème} à 225 JAP (1/5N + 1/6 K₂O) et le 7^{ème} à 270 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 est dilué dans un fût de 200 litres. Chaque plant a reçu entre 6 h - 8 h de la journée 50 cm³ de carbure d'acétylène. Les rejets de poids compris entre 400 et 500 g ont été plantés. Les rejets de taille homogène étant utilisés dans chaque bloc. Le désherbage manuel a été effectué à l'aide de la houe tous les deux mois jusqu'à la récolte.

Paramètres mesurés

Paramètres de croissance

Après les dernières fertilisations, quatre plants ont été sélectionnés par unité expérimentale pour le prélèvement 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. 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 totale de deux (02) plants sacrifiés et de quatre (04) feuilles D par unité expérimentale ont été mises à l'étuve à 65 °C jusqu'à obtention de poids constant.

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 évalués. Le rendement en fruit est déterminé par la formule

$$R = P_o/N_p,$$

où: R = rendement moyen des fruits en kg.plant⁻¹;

Po = poids des fruits d'ananas récoltés par parcelle élémentaire en kg ; Np = nombre de plants par parcelle élémentaire.

Analyses et modélisation statistiques

Analyses statistiques

Une analyse de variance suivie du test de la plus petite différence significative (ppds) de Fisher a été effectuée pour étudier l'effet de la fertilisation N, P et K sur le poids, la hauteur et la surface foliaire de la feuille D.

Modélisation de l'influence de la fertilisation minérale sur le rendement

Détermination des doses maximales et optimales de N, P₂O₅ et K₂O

Cas des modèles quadratiques de type $y = a + b_1X + b_2X^2$

Soit X une unité fertilisante et $y = a + b_1X + b_2X^2$ (a, b₁, et b₂ des constantes à estimer) le modèle quadratique. Les doses des unités fertilisantes N, P₂O₅ et K₂O qui correspondent aux maximums de rendement ont été obtenues en annulant les dérivées premières des fonctions y par rapport à l'élément en question (X_{max} = -b₁/2b₂). Les limites de confiance de cette dose ont été établies en résolvant par rapport à x l'équation du

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

deuxième degré (Dagnelie, 1998):

$t^2_{1-\frac{\alpha}{2}}$ à un degré de confiance égale à 1-α = 95% (α=5%)

SCE_x est la valeur de la distribution de Student pour un seuil de signification de α

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

SPE_{x,x^2} est la somme des carrés des écarts de x²

est la somme des produits des écarts de x et de x²

Cas des modèles quadratiques de type $y = a + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$

Pour les surfaces de réponse de type $y = a + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$ (y est le rendement ; X₁ et X₂ sont respectivement les doses d'azote et de potassium ou de phosphore et de potassium ; α, b₁, b₂, b₃, b₄, b₅ sont les coefficients de régression), les doses maximales des unités fertilisantes sont calculées en résolvant le système d'équation

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

constitué par les dérivés partielles par rapport aux unités fertilisantes:

Détermination des doses optimales pour les modèles quadratiques

Cas des modèles quadratiques de type $y = a + b_1X + b_2X^2$

Si x est 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 défini 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 b₁ par b₁-c.

Cas des modèles quadratiques de type $y = a + b_1X_1 + b_2X_1^2 + b_3X_2 + b_4X_2^2 + b_5X_1X_2$

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 (Ndiaye, 1988 ; Dagnelie, 1998). Le premier est le rapport entre l'accroissement de la quantité produite (Y) et la quantité de facteurs de production consommée (x), c'est-à-dire la productivité marginale de l'engrais ($\frac{\partial Y}{\partial X}$). Le second est le rapport de prix de l'engrais (P_x) rapporté au prix du produit (P_y). L'utilisation des fonctions de production permet donc un calcul économique dont l'objectif principal est de déterminer les doses de N, P₂O₅ et K₂O qui procurent le maximum de profit. Pour y arriver, il est nécessaire de considérer les dérivées partielles des fonctions par rapport à N, P₂O₅ et K₂O 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 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 le prix d'une unité du produit récolté.

RESULTATS

Influences de l'azote, du potassium et du phosphore sur la nutrition minérale de l'ananas

L'application des doses croissantes d'éléments fertilisants N, P₂O₅ et K₂O se traduit par une absorption croissante de la plante (Figure 2 a, b et c). La réponse d'absorption de K chez la Cayenne lisse est linéaire (P<0,05) tandis qu'elle est quadratique pour le N et le P (P<0,05). L'absorption de N et

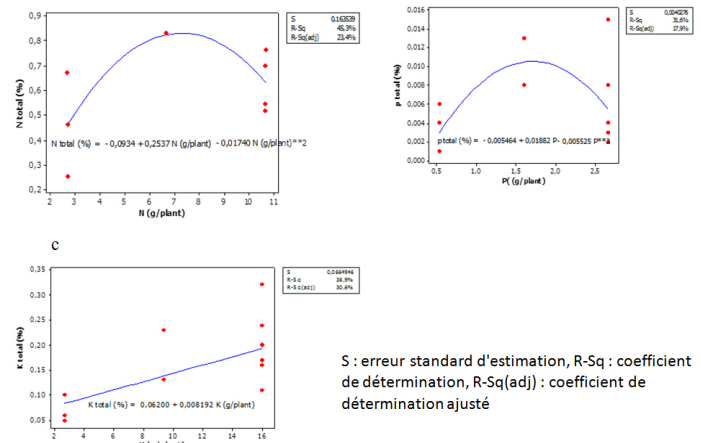


Figure 2. Influence de la fertilisation N (a), P (b) et K (c) sur la nutrition minérale de l'ananas Cayenne lisse

Tableau 1. Effet de la fertilisation N, P et K sur le poids, la hauteur et la surface foliaire de la feuille D

Niveau de nutriment (g.plant ⁻¹)	Poids feuille D (g)	Longueur feuille D (cm)	Surface foliaire (cm ²)
Azote			
2,7	89,85a	101,28a	508,77a
6,7	89,62a	100,22a	498,64a
10,7	85,72a	99,87a	485,8a
Phosphore			
0,5	90,94a	101,17a	510,28a
1,6	89,62ab	100,22a	498,64a
2,7	84,63b	99,98a	484,29a
Potassium			
2,7	85,94a	100,19a	489,21a
9,3	89,62a	100,22a	498,64 ^a
16	89,63 ^a	100,96 ^a	505,35 ^a
Traitements			
T5	95,1a	103,69a	537,62a
T8	91,99a	101,44ab	516,51ab
T9	91,89a	101,16ab	514,11ab
T6	91,29ab	100,6ab	507,18ab
T1	89,62ab	100,22ab	498,64ab
T7	85,96abc	99,89ab	493,68ab
T3	84,79abc	99,66ab	473,78b
T2	81,02bc	99,31ab	472,89b
T4	80,25c	98,84b	462,51b

Les moyennes portant des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 0,05

de P est maximale pour des doses comprises respectivement entre 6 g.plant⁻¹ et 7 g.plant⁻¹, entre 1,5 g.plant⁻¹ et 2 g.plant⁻¹.

Effet de la fertilisation N, P et K sur la croissance de la feuille D

Le phosphore a un effet significatif sur le poids de la feuille D (tableau 1). Par ailleurs, les différents traitements ont eu d'effets significatifs (P<0,05) sur le poids, la hauteur et la surface foliaire de la feuille D. Les traitements T5, T8, et T9 ont produit des feuilles ayant des poids plus élevées que les traitements T6, T1, T7, T3, T2 et T4.

Influences de l'azote, du potassium et du phosphore sur le rendement et ses composantes

L'azote a un effet sur le rendement en fruit, la longueur du fruit, le diamètre du fruit et la longueur de couronne (tableau 2). Le rendement en fruit le plus élevé est obtenu avec la dose 6,7 gN.plant⁻¹. Le phosphore a eu un effet significatif sur le rendement en fruit et la longueur du fruit. Le rendement en fruit le plus élevé est obtenu avec la dose 1,6 gP.plant⁻¹. La différence de l'effet des doses du potassium sur le rendement en fruit, la longueur du fruit et le diamètre du fruit est significative. Les valeurs les plus fortes de ces paramètres ont été obtenues avec la dose 9,3 gK.plant⁻¹.

Seule la tendance linéaire de l'effet de l'azote sur la longueur de la couronne est significative. La tendance quadratique de l'azote, du phosphore et du potassium est significative pour le rendement en fruit, hautement significative pour la longueur

Tableau 2. Effet de l'azote, du potassium et du phosphore sur le rendement et ses composantes

Doses de Nutriment (g.plant ⁻¹)	Poids moyen fruit (kg.plant ⁻¹)	Poids couronne (g.plant ⁻¹)	Longueur fruit (Cm)	Diamètre fruit (Cm)	Longueur couronne (Cm)	Nombre d'yeux
Azote						
2,7	2,57 a	192,6 a	19,75 b	45,10ab	14,20 a	138,74a
6,7	2,73 ab	161,2 a	20,86 a	47,14a	10,29 b	148,02a
10,7	2,50 b	152,9 a	20,08 b	45,32 b	11,27 b	139,70a
Tendances	L ^{ns} Q*	L ^{ns} Q ^{ns}	L ^{ns} Q**	L ^{ns} Q**	L*Q ^{ns}	L ^{ns} Q ^{ns}
Phosphore						
0,5	2,54 b	174,90 a	19,84 b	45,53 a	12,34 a	140,43a
1,6	2,73 a	160,70 a	20,87 a	47,14 a	10,30 a	147,94a
2,7	2,54 b	173,7 a	19,94 b	45,76 a	13,11 a	138,48a
Tendances	L ^{ns} Q*	L ^{ns} Q ^{ns}	L ^{ns} Q**	L ^{ns} Q**	L ^{ns} Q ^{ns}	L ^{ns} Q ^{ns}
Potassium						
2,7	2,49 b	169,10 a	19,87 b	45,14 b	12,55 a	137,33 a
9,3	2,72 a	159,90 a	20,86 a	47,04 a	10,21 a	147,72 a
16	2,64 b	184,10 a	19,96 b	46,77 a	13,40 a	142,89 a
Tendances	L ^{ns} Q*	L ^{ns} Q ^{ns}	L ^{ns} Q**	L ^{ns} Q**	L ^{ns} Q ^{ns}	L ^{ns} Q ^{ns}

Les moyennes portant des lettres différentes sont significativement différentes ; L : tendance linéaire ; Q : tendance quadratique ; ns: non significatif ; * : significatif, ** : hautement significatif, *** : très hautement significatif

du fruit et le diamètre du fruit.

Modélisation de l'influence de l'azote, du potassium et du phosphore sur le rendement

L'ajustement linéaire simple ou multiple des données est significatif (P<0,05). Les modèles linéaires simples ou multiples ont les valeurs les plus faibles de coefficient de détermination, de coefficient de détermination ajusté et de coefficient de détermination prédictif. Le coefficient de détermination varie entre 36,22% et 66,43% et le coefficient de détermination ajusté entre 32,46% et 59,72%. Le coefficient de détermination prédictif de ces modèles linéaires

Tableau 3. Modèles linéaires d'estimation de la production de Cayenne lisse

Modèles linéaires	F	R ² (%)	R ² ajusté (%)	PRESS	R ² (pred) (%)
Modèle 1. Poids fruit = 1,74+0,11 N	10,07**	37,21	33,51	7,11	16,71
Modèle 2. Poids fruit = 1,75+0,41 P	9,73*	36,40	32,66	7,15	16,31
Modèle 3. Poids fruit = 1,84+0,071 K	9,65**	36,22	32,46	7,07	17,28
Modèle 4. Poids fruit = 1,49+0,077 N+0,29 P	8,75**	52,23	46,26	5,82	31,89
Modèle 5. Poids fruit = 1,52+0,08 N+0,05 K	33,64**	54,41	48,71	5,67	33,64
Modèle 6. Poids fruit = 1,45+0,33 P+0,06 K	11,51**	58,99	53,86	5,23	38,80
Modèle 7. Poids fruit = 1,32+0,06 N+0,26 P+0,05 K	9,90***	66,43	59,72	4,55	46,77

ns: non significatif * : significatif, ** : hautement significatif, *** : très hautement significatif F : statistique de Fisher, R² : coefficient de détermination, R² ajusté : coefficient de détermination ajusté, PRESS : critère de validation croisé, R²(pred) : coefficient de détermination prédictif

oscille entre 16,31% et 46,77%. Les valeurs les plus élevées du critère de validation croisée (PRESS) ont été observées pour les modèles linéaires et varient de 4,55 à 7,15 (tableau 3).

Les ajustements non linéaires des données de rendement et de doses de fertilisants sont hautement significatifs ($P < 0,01$) à très hautement significatifs ($P < 0,001$). Les modèles non linéaires ont présenté des coefficients de détermination, des coefficients de détermination ajustés et des coefficients

Tableau 4. Modèles non linéaires d'estimation de la production de Cayenne lisse

Modèles non linéaires	F	R ² (%)	R ² ajusté (%)	PRESS	R ² (pred) (%)
Modèle 8. Poids fruit = 1,07 + 0,54 N - 0,039 N ²	46,1***	85,5	83,6	1,74	79,63
Modèle 9. Poids fruit = 1,16 + 2,08P - 0,60P ²	46,99***	80,67	78,25	2,28	73,32
Modèle 10. Poids fruit = 1,32 + 0,33 K - 0,02K ²	21,67***	73,03	69,66	3,19	62,69
Modèle 11. Poids fruit = 1,22 + 0,16 N + 0,59P - 0,06N*P	10,59***	67,93	61,52	4,65	45,57
Modèle 12. Poids fruit = 1,28 + 0,14N + 0,11K - 0,011N*K	11,35***	69,42	63,3	4,3	49,66
Modèle 13. Poids fruit = 1,20 + 0,57P + 0,12K - 0,05P*K	16,09***	76,29	71,55	3,28	61,61
Modèle 14. Poids fruit = 0,852 + 1,37N - 0,57K - 0,10N ² - 0,0012 N*K + 0,03K ²	62,25***	95,99	94,45	0,81	90,53
Modèle 15. Poids fruit = 0,85 + 2,40N - 7,58P - 0,18N ² + 0,01 N*P + 2,34P ²	57,33***	95,66	93,99	1,07	87,44
Modèle 16. Poids fruit = 0,85 + 13,05P - 1,84K - 4,07P ² + 0,10K ²	81,97**	95,9	94,73	0,7	91,75
Modèle 17. Poids fruit = 0,85 + 2,46 N - 8,07P - 0,009 K - 0,19N ² + 0,05N*P + 0,006N*K + 2,46 P ² + 0,01P*K - 0,004N*P*K	74,96***	98,68	97,37	0	0

ns: non significatif * : significatif, ** : hautement significatif, *** : très hautement significatif
 F : statistique de Fisher, R² : coefficient de détermination, R² ajusté : coefficient de détermination ajusté, PRESS : critère de validation croisé, R²(pred) : coefficient de détermination prédictif

de détermination prédictifs les plus élevés. Le coefficient de détermination variant entre 67,93% et 98,68% et un coefficient de détermination ajusté oscillant entre 61,52% et 97,37% (tableau 4).

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 et 3,19) (tableau 4).

Doses maximales et optimales de N, P et K

Cas des modèles quadratiques simples

L'effet quadratique de l'azote, du phosphore et du potassium sur le rendement en fruit étant significatif, la dose maximale est l'abscisse qui annule la dérivée première de la parabole (Figure 3 a, b et c). Les doses maximales solutions des systèmes d'équations sont: $N_{max} = 6,99 \text{ g.plant}^{-1}$, $P_{max} = 1,75 \text{ g. plant}^{-1}$ et $K_{max} = 10,37 \text{ g. plant}^{-1}$. En résolvant les équations on obtient les doses optimales d'azote : 6,94 g.plant⁻¹, de phosphore : 1,75 g.plant⁻¹ et de potassium : 10,15 g.plant⁻¹.

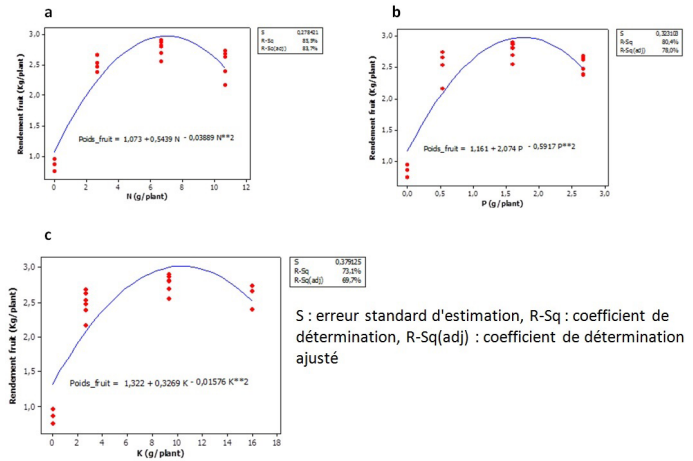


Figure 3. Courbes de réponse de l'ananas Cayenne lisse à la fertilisation N (a), P(b) et K(c)

Cas des modèles quadratiques multiples

Selon les modèles 14 et 16, on a le système d'équations :

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial N} = 1,37 - 0,20N - 0,0012K = 0 & (5) \\ \frac{\partial y}{\partial K} = -0,57 + 0,0012N + 0,06K = 0 & (6) \\ \frac{\partial y}{\partial P} = 13,05 - 8,14P = 0 & (7) \end{cases}$$

Les doses maximales solutions des systèmes d'équations sont respectivement pour l'azote

$$N_{max} = 6,79 \text{ g.plant}^{-1} ; P_{max} = 1,60 \text{ g.plant}^{-1} ; K_{max} = 9,36 \text{ g.plant}^{-1}.$$

Les doses optimales des unités fertilisantes sont solution du système d'équations :

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial N} = 1,37 - 0,20N - 0,0012K = \frac{P_N}{P_y} & (8) \\ \frac{\partial y}{\partial K} = -0,57 + 0,0012N + 0,06K = \frac{P_K}{P_y} & (9) \\ \frac{\partial y}{\partial P} = 13,05 - 8,14P = \frac{P_P}{P_y} & (10) \end{cases} \begin{cases} \frac{\partial y}{\partial N} = 1,37 - 0,20N - 0,0012K = 0,0068 & (5) \\ \frac{\partial y}{\partial K} = -0,57 + 0,0012N + 0,06K = 0,0053 & (6) \\ \frac{\partial y}{\partial P} = 13,05 - 8,14P = 0,0058 & (7) \end{cases}$$

En résolvant simultanément les équations (8), (9) et (10), on obtient les doses optimales de N, de P₂O₅ et de K₂O à recommander à l'agriculteur et qui correspondent au maximum de profit qui sont de 6,76 g.plant⁻¹ pour N ; 1,60 g.plant⁻¹ pour P₂O₅ et 9,45 g.plant⁻¹ pour K₂O. Ce qui correspond à une dose de 405,6 kg.ha⁻¹ de N ; 96 kg.ha⁻¹ de P₂O₅ ; 567 kg.ha⁻¹ de K₂O, la densité étant de 60000 plants.ha⁻¹. Les doses optimales permettent d'obtenir un rendement optimal de 2,76 kg.plant⁻¹ soit 165,6 t.ha⁻¹.

Les engrais représentent un investissement de 569.136 FCFA par hectare avec respectivement 608,70 FCFA.kg⁻¹ N, 521,74 FCFA.kg⁻¹ P₂O₅ et 480 FCFA.kg⁻¹ K₂O. Les autres coûts de production (les investissements et leur amortissement, les intrants et la main d'œuvre) (Sohinto, 2008 ; Agbangba, 2015) s'élèvent à 2.811.503 FCFA. Le coût total de production s'élève à 3.380.639 FCFA. Le bénéfice net vaut 11.523.361 FCFA à l'hectare si l'ananas est vendu à 90 FCFA.kg⁻¹.

DISCUSSION

Qualité des modèles sélectionnés

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. 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 veut le PRESS le plus petit). Le 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). Les modèles de régression quadratiques sont les meilleurs prédicteurs. Des réponses quadratiques hautement significatives de l'azote et du potassium sur le rendement de l'ananas ont été aussi obtenues par Spironello *et al.* (2004). Ces auteurs n'ont pas trouvé de réponse du phosphore ni sur la croissance, ni sur le rendement. Par contre, plusieurs auteurs n'ont pas trouvé de réponse de la plante au phosphore malgré les teneurs très faibles de l'élément dans le sol (Spironello *et al.*, 2004 ; Py *et al.*, 1987). Le phosphore est essentiel au métabolisme de la plante qui en a particulièrement besoin au moment de la différenciation de l'inflorescence et de la floraison. Une déficience en cet élément à cette période ne manque pas d'entraîner une chute de rendement qui peut être importante (Nightingale, 1936). Godefroy *et al.* (1971) rapportent cependant que les besoins en cet élément sont limités. La réponse du phosphore s'explique par une déficience caractéristique en cet élément des sols ferrallitiques dans le sud du Bénin. Ces sols ont une bonne capacité de rétention en cations et les réserves minérales se caractérisant par des taux de potassium extrêmement faibles et des teneurs en P_2O_5 faibles (Agossou, 1983).

Le potassium est l'élément le plus absorbé par la plante. Suite à une compilation des résultats de recherche menée à Cuba pendant 20 ans, Treto (1992) a rapporté que l'ananas consomme de grandes quantités de potassium (270 à 780 kg.ha⁻¹).

Doses économiques des unités fertilisantes

La fertilisation minérale a positivement influencé le rendement et la qualité de l'ananas cultivé au Bénin. L'influence positive de la fertilisation en potassium et en azote sur la taille et la qualité physico-chimique du fruit a été prouvée par Teisson *et al.* (1979); Reinhardt et Neiva (1986); Paula *et al.* (1991); Spironello *et al.* (2004).

Les doses économiques d'unités fertilisantes N et K_2O corroborent les normes du Mémento de l'agronome (2002) qui sont de 4 à 14 g.plant⁻¹ pour N, de 10 à 20 g.plant⁻¹ pour K.

Le profit net qu'on obtiendrait avec les doses optimales (6,75 g.plant⁻¹ pour l'azote ; 1,60 g.plant⁻¹ pour le phosphore et 9,36 g.plant⁻¹ pour le potassium) est de 4 fois celui obtenu actuellement par les producteurs (Achigan-Dako *et al.*, 2014). Le rapport K_2O/N des doses économiques pour la production de Cayenne lisse est de 1,39. Ce rapport peut avoisiner l'unité pour une production industrielle de qualité de tranche et de jus (Schohier et Texido, 2001). Ces doses pourraient donc aussi assurer une production fruitière de qualité.

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, variétés utilisées, gestion de l'exploitation, etc. Ainsi les doses établies dans ce travail devraient être validées dans d'autres zones de production d'ananas et tenir compte des variantes de morphotypes d'ananas (Tossou *et al.*, 2015).

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.

CONCLUSION

Au terme de cette étude, on retient que 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 fertilisants apportées. Les doses de fertilisants qui correspondent au maximum de profit sont de 6,76 g.plant⁻¹ pour l'azote, 1,60 g.plant⁻¹ pour le phosphore et 9,45 g.plant⁻¹ pour le potassium. Ce qui correspond à une dose de 405,6 kg.ha⁻¹ de N ; 96 kg.ha⁻¹ de P_2O_5 ; 567 kg.ha⁻¹ de K_2O , la densité étant de 60000 plants.ha⁻¹. Ces doses optimales permettent d'obtenir un rendement optimal de 2,76 kg.plant⁻¹ soit 165,6 t.ha⁻¹ et un profit de 11.523.361 FCFA à l'hectare.

REFERENCES

- Achigan-Dako E.G., Adjé C.A., Sognigbé N., Fassinou H.N.V., Agbangla C., Ahanchédé A. 2014. Drivers of conservation and utilization of pineapple genetic resources in Benin. SpringerPlus 20: 143-273.
- 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, p. 159.
- Agbangba C.E., Dagbenonbakin G.D., Djogbéno C.P., Houssou P., Assea D.E., Sossa E.L.Sossa, Kotomalé 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. Int. J. Biol. Chem. Sci. 9(3): 1277-1288.
- Agossou V. 1983. Les sols Béninois et leurs potentialités agricoles. Centre National d'Agropédologie (CENAP). Etude n° 260., Edition INRAB, Cotonou, p. 30.
- 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. 2^{ème} Edition DUNOD, France, p. 362.

- Bhugalo R. 2002. "Crop cycle study in pineapple: preliminary results," in Fifth Annual Meeting of Agricultural Scientists: Food and Agricultural Research Council, eds J.A. Lalouette and D.Y. Bachraz (Mauritius: University of Mauritius), Available online at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download>. Downloaded on April 22nd, 2014.
- Blackmer A.M., Meisinger J.J. 1990. Re-examination of the methodology used for selecting nitrogen inputs into crop production. *J. Contam. Hydrol.* 78: 571-575.
- Cerrato M.E., Blackmer A.M. 1990. Corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82: 138-143.
- Dagnelie P. 1998. Théories et Modèles Statistiques, Applications Agricoles, Tome 2, 21ème Édition Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique, p. 464.
- Dagnelie P. 2012. Principes d'expérimentation, planification des expériences et analyses de leurs résultats. Presses Agronomiques de Gembloux, p. 413.
- FAOSTAT. 2015. FAOSTAT Database. Available at: <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/browse/Q/> EDownloaded on July 12th, 2016.
- Godefroy J.P.Y.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.
- Mateljan G. 2007. The Worlds Healthiest Foods. Mateljan G. (eds), United States, Seattle WA.
- Morton J.F. 1987. Fruits of Warm Climates. Morton, J. F. (eds), Miami, Florida.
- 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. Available at <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010006486>. Consulté le 12 Mars 2015.
- Nightingale C.T. 1936. The growth status of the pineapple plant. *Pineapple News* 10 : 68-78.
- Ouinkoun G., Lalève P. 2004. La traçabilité des produits agricoles : cas de l'ananas, quels enjeux pour le Bénin? *Atelier Sci. Nat. Act.* 5: 190-201.
- Paula M.B., Carvalho R.V., Noyer F.D., Souza L.F.S. 1991. Effet de la chaux, du potassium et de l'azote sur le rendement et la qualité des fruits ananas. *Brésilienne de recherche agricole Brésil* 26: 1337-1343.
- Purseglove J.W. 1972. Tropical crops, Monocotyledons. Purseglove JW(ed.), Longman, London.
- Py C., Lacoëuilhe J.J., Teison C. 1987. The pineapple, cultivation and uses. G.P. Maisonneuve et Larose. Paris, 70 p.
- Reinhardt D.H.R.C., Neiva L.P.A. 1986. NPK et sources de potassium dans l'ananas 'Perola' dans la micro-région à Bahia de Feira de Santana. In: Congrès international de fruits. Actes Brésil, pp 41-46.
- Scohier P., Texido R. 2001. Ananas. In Agriculture en Afrique Tropical, Raemaekers HR (ed). Direction Générale de la Coopération Internationale (DGCI), Rue des Petits Carmes Bruxelles, Belgique, p. 302.
- Sohinto D. 2008. Analyse de la rentabilité économique des chaînes de valeur ajoutée de l'ananas au Bénin. Rapport de consultation, p.76.
- 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 plateau d'Allada au Sud-Bénin. *International Journal of Chemical and Biological Science* 8(3): 1030-1038.
- Spironello A., Quaggio J.A., Teixeira L.A.J., Furlani P.R., Sigris J.M.M. 2004. Pineapple Yield and Fruit Quality Affected By NPK Fertilization in a Tropical Soil. *Rev. Bras. Frutic.* 26(1):155-159.
- Teisson C., Lacoëuilhe J.J., Combres J.C. 1979. Le brunissement interne de l'ananas. *Recherches des moyens de lutte.* *Fruits* 34(6) : 399-415.
- Tossou C.C., Capo-Chichi D.B.E., Yedomonhan H. 2015. Diversité et caractérisation morphologique des variétés d'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merrill) cultivées au Bénin. *J. Appl. Biosci.* 87: 8113- 8120.
- Treto E. 1992. Nutricion y fertilizacion de la pina: 20 anos de investigaciones en el Instituto Nacional de Ciencias Agricolas (INCA). *Cultivos Tropicales* 13: 2 - 3.