

Optimisation des paramètres d'épandage du digestat, un engrais biologique utilisé dans la culture du manioc par la méthodologie des surfaces de réponse

OSSEPE Yapi Jean Louis Fernandez¹, KOKO Anauma Casimir^{1*}, AKMEL Djedjro Clément²

¹Université Jean Lorougnon Guédé, UFR Agroforesterie, Laboratoire d'Agrovalorisation (AGROVAL), BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

²Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Laboratoire des Procédés Industriels de Synthèses, de l'Environnement et des Énergies Nouvelles (LAPISEN), BP 1313 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

*Auteur correspondant, contact et Adresse E-mail : +225 0707364095, anaumako@yahoo.fr

Mots clés : Digestat, épandage, manioc, plans d'expériences, rendement.

Keywords: Digestate, spreading, cassava, experimental design, yield

Submitted 03/05/2024, Published online on 05/06/2024 in the [Journal of Animal and Plant Sciences \(J. Anim. Plant Sci.\) ISSN 2071 – 7024](#)

1. RÉSUMÉ

Le digestat est un engrais biologique issu de la méthanisation d'effluents de manioc. Pour son utilisation efficiente dans la culture du manioc, les conditions optimales d'épandage doivent être identifiées. La présente étude a donc pour objectif de déterminer les conditions les meilleures aboutissant au rendement maximal en tubercules frais pour l'utilisation de ce digestat. Pour ce faire, un plan central composite à deux facteurs utilisant la méthodologie des surfaces de réponse a été suivi. Ainsi, 13 essais de culture ont été réalisés en variant la concentration du digestat (X_1) de 25 à 100 % et le volume (X_2) à répandre de 0,5 à 2 L. A l'issue des essais qui ont duré 12 mois, le rendement en racines a été déterminé. Sur les données collectées, des traitements statistiques ont été réalisés. Les résultats ont révélé un rendement moyen compris entre 26,62 et 56,5 t/ha. Un lien clair a été établi entre les facteurs étudiés et le rendement selon la relation : $Y_{\text{Rendement}} = 49,01 + 5,21 X_1 - 5,51 X_1^2 - 7,47 X_2^2$. Par ailleurs, le coefficient de détermination (proche de 0,85), le taux de déviation (6,93 %) et la significativité de l'ANOVA révèlent que le modèle postulé est adéquat pour décrire le processus étudié. Les conditions optimales identifiées pour l'épandage du digestat sont une concentration et un volume respectifs de 75,03 % et 1,25 L pour un rendement maximal de 50,24 %. Ce modèle a été validé et peut être utilisé pour prédire le rendement en tout point du domaine d'étude.

ABSTRACT

Digestate is a biological fertilizer derived from the methanization of cassava effluent. For its efficient use in cassava cultivation, the optimum conditions for spreading must be identified. The aim of the present study is therefore to determine the best conditions leading to maximum fresh tuber yield for the use of this digestate. To achieve this, a two-factor composite central design using response surface methodology was followed. Thus, 13 cultivation trials were carried out, varying the digestate concentration (X_1) from 25% to 100% and the volume (X_2) to be spread from 0.5 to 2 L. At the end of the 12-month trials, root yields were determined. Statistical analyses were carried out on the data collected. The results showed an average yield of between 26.62 and 56.5 t/ha. A clear link was established between the factors studied and the yield according to the relationship: $Y_{\text{yields}} = 49.01 + 5.21 X_1 - 5.51 X_1^2 - 7.47 X_2^2$. Furthermore, the coefficient of determination (close

to 0.85), the deviation rate (6.93%) and the significance of the ANOVA reveal that the postulated model is adequate to describe the process studied. The optimum conditions identified for digestate spreading are a concentration and volume of 75.03% and 1.25 L respectively, for a maximum yield of 50.24%. This model has been validated and can be used to predict yield at any point in the study area.

2. INTRODUCTION

La fermentation des effluents de manioc dans des conditions comprenant une enceinte confinée, de la bouse de vache et de l'urine conduit à la production de biogaz combustible (Kpata-Konan *et al.*, 2011). Ce processus biologique libère en plus du biogaz, un digestat stable, désodorisé, débarrassé en grande partie des germes pathogènes (Couturier *et al.*, 2001). Selon Wallrich *et al.* (2021), ce digestat peut même être utilisé comme engrais biologique pour l'agriculture. En effet, le digestat liquide produit à la suite de la fermentation des effluents de manioc pourrait valablement remplacer les produits fertilisants commercialisés. Il a été utilisé avec succès dans la culture de haricot vert et de concombre en Côte d'Ivoire permettant d'améliorer les rendements de 11 et 13 % respectivement (Nitidae, 2020). Un dosage de 50 % a alors donné les meilleurs résultats. Dans le cas de la culture du manioc, quelles peuvent être les dosages de digestat conduisant aux meilleurs résultats en termes de rendement en racines fraîches ? La détermination des conditions optimales d'épandage de digestat issu de la méthanisation d'effluent de manioc est indispensable pour une utilisation efficiente. C'est d'autant plus important en ces périodes où la question d'économie circulaire bat son plein. Par ailleurs, un sous dosage de digestat utilisé comme engrais biologique est cause de baisse de rendement pendant qu'un surdosage est source de pollution (DDAE, 2014 ; Jacquin, 2023). C'est pourquoi, l'optimisation qui consiste à rechercher les conditions idéales pour la meilleure réponse est une des voies à explorer dans ce cas. Pour l'optimisation, plusieurs approches peuvent être suivies. Celle qui retient l'attention dans la présente étude est

l'utilisation de plans d'expériences. Ces plans sont un ensemble d'essais organisés pour atteindre un but précis : infirmer ou confirmer une hypothèse. Une multitude de dispositifs expérimentaux existent dont ceux utilisant la méthodologie des surfaces de réponses comme le plan composite centré ordinaire. De nombreux travaux (Goupy et Creighton, 2006 ; Osei-Owusu *et al.*, 2024) ont porté sur l'efficacité de ces plans et leur utilité. Ces plans sont applicables à de nombreux domaines. Adjoumani (2021) les a utilisés dans le traitement des eaux usées. Dans son étude, les conditions optimales d'activation des argiles pour le traitement des eaux ont été déterminées à partir de la méthodologie des surfaces de réponse (MSR). Guemache et Dadache (2021) ont recherché par cette méthodologie de surface de réponse des conditions optimales d'extraction des composés phénoliques totaux dans des déchets de fenouil. Osei-Owusu *et al.* (2024) ont utilisé cette approche pour prédire le rendement en biogaz et les effets synergiques de trois types de déchets lors de leur co-digestion anaérobie. La présente étude vise donc à déterminer les conditions optimales d'épandage d'un digestat liquide issu du processus de bio méthanisation d'effluents de manioc, utilisé dans la culture du manioc. Le dosage approprié ainsi que le volume à répandre sur les plants sont les paramètres à optimiser. La détermination de ces conditions permettra une utilisation efficiente en évitant le sous dosage d'une part et le surdosage d'autre part. Enfin, la modélisation de ce processus d'épandage permettra de prédire en fonction des paramètres du digestat le rendement en racines.

3. MATERIEL ET METHODES

3.1 Matériel biologique : Le matériel biologique est constitué de digestat liquide issu de la méthanisation d'effluents de manioc, d'urine et de bouse de vache. Ce digestat a été obtenu à l'issu de la dynamisation de la production de biogaz sur un site de fabrication d'attiéké du projet VECDA à Daloa (Région du Haut-Sassandra, Côte d'Ivoire), trois mois

après son implantation. Une quantité de 700 L de digestat a été collectée et conditionnée dans des bidons de 25 L. Quelques caractéristiques physicochimiques de ce digestat sont consignées dans le tableau 1. En outre, les boutures de la variété culturale Yacé utilisées proviennent d'une exploitation agricole spécialisée dans la production de boutures.

Tableau 1 : Paramètres physicochimiques du digestat utilisé

Paramètres	Valeurs
pH	8,28 ± 0,05
DCO (mg O ₂ /L)	228,87 ± 38,14
DBO (mg O ₂ /L)	64,67 ± 0,58
COT (mg/L)	61 ± 0,01
NTK (g/L)	2,2 ± 0,01
Phosphore (g/L)	1,157 ± 0,003
Potassium (g/L)	0,99 ± 0,01
C/N	0,027 ± 0,001

DCO : Demande chimique en oxygène ; DBO : Demande biochimique en oxygène ; COT : Carbone organique total ; NTK : Azote total ; C/N : Rapport carbone/azote

3.2 Méthodes

3.2.1 Préparation des parcelles expérimentales et conduite des opérations : L'expérimentation s'est déroulée sur une parcelle ayant subi un décapage une année plus tôt lors d'une opération de lotissement. Afin de s'assurer de l'homogénéité de la parcelle, une visite y a été réalisée. Elle a permis de constater qu'il n'existe pas de pente ni d'autres gradients d'hétérogénéité perceptibles. Cette parcelle a donc été subdivisée en 13 unités expérimentales correspondant chacune à un traitement. Sur chaque unité expérimentale, ont été mises en terre 16 boutures de manioc de variété Yacé en respectant l'itinéraire technique. Celle-ci recommande un intervalle de 1 m entre les boutures en largeur et 1 m en longueur. Les traitements ont été affectés aux unités expérimentales de façon aléatoire. L'épandage des différents dosages de digestat a débuté sur des plants âgés de trois mois. Un mois après le 1er épandage, un deuxième a eu lieu. Le troisième et dernier épandage a été réalisé un mois après le précédent. Au total trois épandages ont été effectués. Il est souligné que quatre sarclages ont été effectués.

3.2.2 Détermination du rendement en racines de manioc : Le rendement a été déterminé sur chaque unité expérimentale. Il a été calculé selon la formule décrite par Kouadio et al. (2023) :

$$\text{Rdt (t/ha)} = \text{MF} \times \text{DP} \quad (1)$$

Rdt : Rendement en racines fraîches (t/ha), MF : Masse moyenne de racines fraîches par plant (tonnes), DP : Densité de plantation (10 000 plants/ha)

3.2.3 Méthodologie des surfaces de réponses : plan composite centré

3.2.3.1 Inventaire des facteurs et réponses : Deux facteurs ont été retenus à savoir la concentration (%) et le volume (L) du digestat à répandre par plant de manioc. La réponse enregistrée a concerné le rendement en racines de manioc (tonnes/ha).

3.2.3.2 Définition du domaine expérimental : Le Plan composite centré fixe pour chaque facteur, 5 niveaux codés que sont $-\alpha$, -1 , 0 , $+1$ et $+\alpha$ (Adjoumani, 2021). Les niveaux $-\alpha$ et $+\alpha$ délimitent le domaine expérimental. Pour les deux facteurs étudiés, α est pris égale à 1,414. La formule décrite par Feinberg (1996) a été utilisée pour le calcul des valeurs des différents niveaux :

$$x_k = x_{\text{centre}} + z_k \times \frac{(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})}{(z_{\text{max}} - z_{\text{min}})} \quad (2)$$

Avec $x_{\text{centre}} = (x_{\text{max}} - x_{\text{min}})/2$

x_k : Valeur naturelle d'un niveau k

z_k : Valeur codée d'un niveau k

x_{max} : Valeur naturelle pour le niveau maximal

x_{min} : Valeur naturelle pour le niveau minimal

x_{centre} : Valeur naturelle pour le niveau central

z_{max} : Valeur codée correspondant à +1,414

z_{min} : Valeur codée correspondant à -1,414

Les différentes valeurs obtenues ont donné le domaine expérimental (Tableau 2).

Tableau 2 : Valeurs des différents niveaux de facteurs

Facteurs	Niveaux Z				
	-1,414	-1	0	+1	+1,414
X ₁	25	35,98	62,5	89,02	100
X ₂	0,50	0,72	1,25	1,78	2

X₁ : Concentration du digestat (%); X₂ : Volume du digestat (L) à répandre par plant

3.2.3.3 Établissement du tableau d'expérimentation : Trois catégories d'essais ont constitué le plan utilisé (Tableau 3). Il s'agit de :

- 4 essais factoriels constitués d'essais correspondant aux niveaux codés -1 et +1 ;
- 4 essais en étoile qui sont des points positionnés sur la sphère de rayon α délimitant le domaine expérimental ;
- 5 essais au centre du domaine (Feinberg, 1996). Ces essais ont été réalisés en prenant le niveau codé 0 pour les facteurs (Adjoumani, 2021).

Au total, 13 essais correspondant aux différents dosages de digestats ont été effectués en les affectant de manière aléatoire aux unités expérimentales précédemment préparées. Pour la préparation des dosages, plusieurs dilutions du digestat contenu dans des bidons ont été réalisées en utilisation de l'eau de robinet. Chaque dosage du digestat comprend un pourcentage de dilution et un volume à répandre par plant de manioc. Les différents dosages retenus sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Tableau d'expérimentation

Essais	Valeurs codées		Valeurs réelles	
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	-1	-1	35,98	0,72
2	+1	-1	89,02	0,72
3	-1	+1	35,98	1,78
4	+1	+1	89,02	1,78
5	-1,414	0	25	1,25
6	0	-1,414	62,5	0,5
7	+1,414	0	100	1,25
8	0	+1,414	62,5	2
9	0	0	62,5	1,25
10	0	0	62,5	1,25
11	0	0	62,5	1,25
12	0	0	62,5	1,25
13	0	0	62,5	1,25

X₁ : Concentration du digestat (%); X₂ : Volume du digestat (L) à répandre par plant

3.2.3.4 Détermination des coefficients du modèle postulé : Pour le plan central composite à deux facteurs (X_1 et X_2), l'équation du modèle postulé est polynomiale de second degré :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_{12}X_1X_2 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2$$

Avec $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}$ et a_{22} , les coefficients du modèle ; Y , le rendement en racines de manioc ; X_1 , la concentration du digestat et X_2 , le volume du digestat à répandre par plant.

Pour la détermination des valeurs de ces coefficients, une régression linéaire multiple a été effectuée avec le logiciel Design Expert 13.

3.2.3.5 Détermination des paramètres de qualité du modèle : La qualité du modèle a été évaluée à partir du coefficient de détermination R^2 , du pourcentage de déviation (%D) et la significativité de l'ANOVA. Des tests de normalité de distribution des résidus ont été également effectués. La formule utilisée pour le calcul du taux de déviation est la suivante :

$$D(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_{iexp} - Y_{ipred}|}{Y_{iexp}} \quad (3)$$

4 RÉSULTATS

4.1 Rendement en racines de manioc :

Après 12 mois de plantation et les différentes séries d'épandage réalisées, le rendement enregistré pour les différents dosages de

Avec Y_{iexp} : Rendement observé pour l'essai i ;

Y_{ipred} : Rendement prédit par le modèle pour l'essai i

N : Nombre d'essais

3.2.3.6 Détermination des conditions optimales d'épandage du digestat : Des graphes représentant des surfaces de réponses et des courbes d'isoreponses ont été produits à partir de l'équation du modèle obtenu en utilisant le logiciel STATISTICA 7. Release. De plus, le Solveur d'Excel avec l'algorithme GRG a été utilisé pour déterminer les valeurs optimales de concentration et de volume à répandre par plant de manioc lors de l'épandage.

3.2.3.7 Tests de contrôle : Pour valider le modèle, ont été réalisés des tests de contrôle. Pour ce faire les conditions optimales identifiées ont été utilisées. Au total, trois essais ont été effectués. Les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs prédites par le modèle et un pourcentage de déviation a été calculé aux fins d'apprécier la qualité de l'ajustement.

digestat est compris entre 26,62 et 56,50 t/ha (Tableau 4). Le rendement moyen est de $41,02 \pm 4,93$ t/ha.

Tableau 4 : Rendements en racines de la variété Yacé récoltée 12 mois après plantation

Essais	Valeurs réelles des facteurs		Rendement (t/ha)
	X_1	X_2	
1	35,98	0,72	37,00
2	89,02	0,72	42,50
3	35,98	1,78	26,62
4	89,02	1,78	37,80
5	25,00	1,25	29,16
6	62,50	0,50	38,85
7	100,00	1,25	46,87
8	62,50	2,00	29,35
9	62,50	1,25	45,20
10	62,50	1,25	56,50
11	62,50	1,25	51,05
12	62,50	1,25	40,25
13	62,50	1,25	52,05

X_1 : Concentration du digestat (%) ; X_2 : Volume du digestat (L) à répandre par plant

4.2 Modélisation de l'épandage du digestat et qualité du modèle : Les résultats de l'analyse de variance du modèle ont révélé que l'effet du modèle est significatif ($p < 0,05$). Pour la qualité du modèle, l'erreur expérimentale (169,86) est du même ordre de grandeur que l'erreur résiduelle (160,76) et l'erreur d'ajustement du modèle n'est pas significative ($p > 0,05$) (Tableau 5). Par ailleurs, les coefficients significatifs du modèle sont 49,01 (a_0), 5,21 (a_1), -5,51 (a_{11}) et -7,47 (a_{22}) (Tableau 6). L'effet principal du facteur concentration du digestat sur le rendement a été significatif. De plus, les effets quadratiques des facteurs étudiés (concentration et volume du digestat) ont été significatifs sur le rendement en racines fraîches de manioc (Tableau 6). Dès lors le modèle postulé pour le rendement s'écrit :

$$Y_{\text{Rendement}} = 49,01 + 5,21 X_1 - 5,51 X_1^2 - 7,47 X_2^2$$

Avec X_1 : Concentration du digestat (%);

X_2 : Volume du digestat (L) à répandre par plant.

Par ailleurs, la normalité des résidus du modèle a été vérifiée (Figure 2). Les résidus sont très proches de la droite théorique montrant leur distribution selon une loi normale. En outre, leur représentation en fonction des valeurs prédites a été faite (Figure 3). A l'analyse, aucune structure précise n'apparaît et la répartition des points semble être au hasard. Un coefficient de détermination R^2 de l'ordre de 0,83, supérieur à 0,80 et un taux de déviation (6,93 %) inférieur à 10 % ont été obtenus (Tableau 7). Le modèle est par conséquent, satisfaisant.

Tableau 5 : Analyse de variance pour le modèle de surfaces de réponse

Source	Sommes des carrés	Degré de liberté	Carré moyen	F	p	Significativité
Modèle	861,71	5	172,34	7,10	0,01	Sig.
Erreur résiduelle	169,86	7	24,27			
Erreur d'ajustement	9,10	3	3,03	0,07	0,97	Ns
Erreur expérimentale	160,76	4	40,19			
Total	1031,57	12				

Sig. : Significatif ; Ns : Non significatif

Tableau 6 : Coefficients du modèle postulé et effets des facteurs sur le rendement en tubercules de manioc

Facteurs	Notation des coefficients	Coefficients de régression	Erreur type	p
Constante	a_0	49,01	2,20	0,00
X_1	a_1	5,21	1,74	0,02
X_2	a_2	-3,56	1,74	0,08
$X_1 X_2$	a_{12}	1,42	2,46	0,58
X_1^2	a_{11}	-5,51	1,86	0,02
X_2^2	a_{22}	-7,47	1,86	0,00

X_1 : Concentration du digestat (%); X_2 : Volume du digestat (L) à répandre par plant; $X_1 X_2$: Effet d'interaction des facteurs concentration et volume de digestat; X_1^2 : Effet quadratique du facteur concentration du digestat; X_2^2 : Effet quadratique du facteur volume de digestat. Les coefficients sont significatifs à $p < 0,05$.

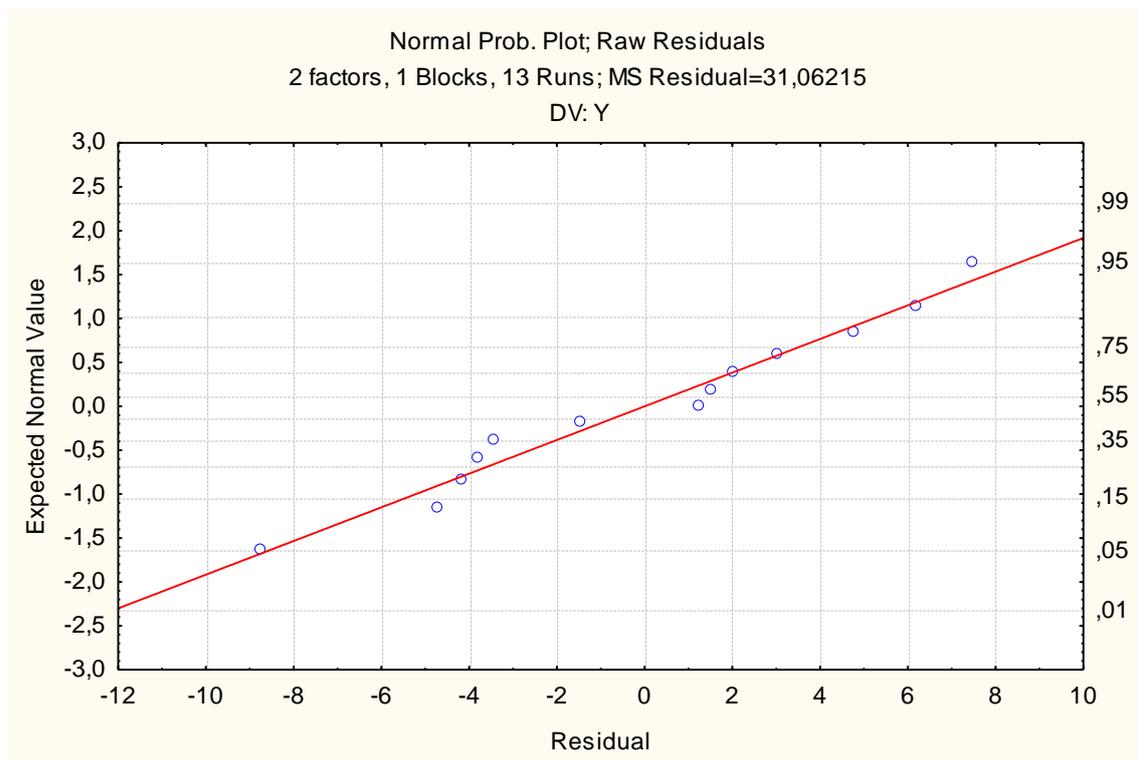


Figure 2 : Normalité des résidus

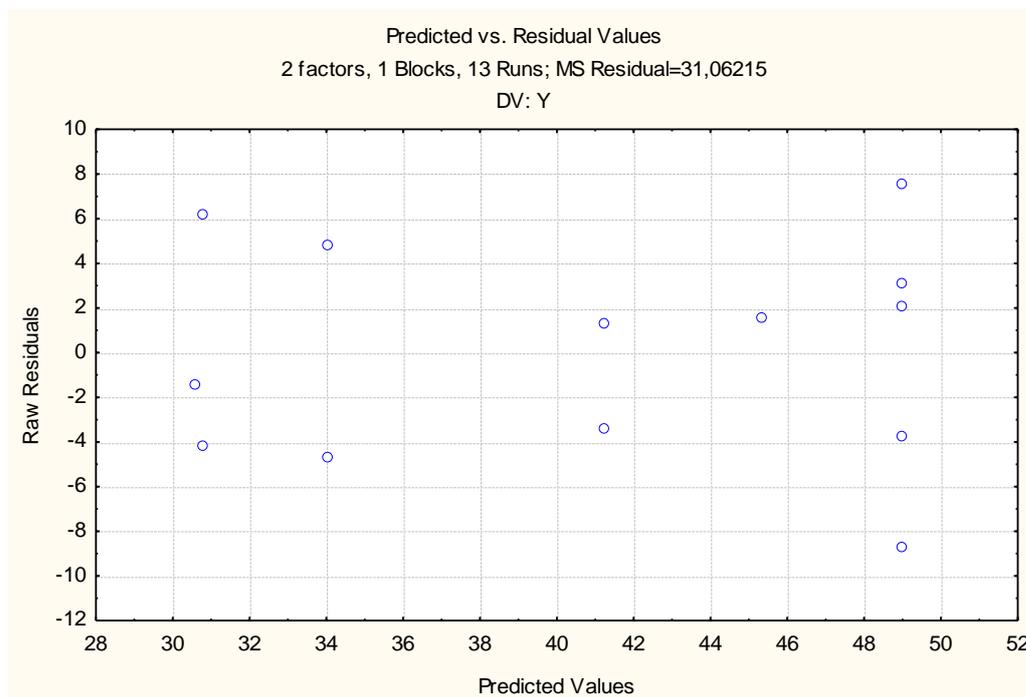


Figure 3 : Représentation des résidus en fonction des valeurs prédites par le modèle

Tableau 7 : Coefficient de détermination et taux de déviation du modèle

Paramètres	Valeurs
Coefficient de détermination R^2	0,83538
Coefficient de détermination ajusté $R^2_{ajusté}$	0,7178
Pourcentage de déviation (%)	6,9284

4.3 Paramètres optimaux ou stationnaires d'épandage du digestat : Un modèle de surface de réponse a été utilisé pour décrire le processus étudié. Le rendement maximum qui peut être atteint est supérieur à 50 t/ha (50,24 t/ha) (Figures 4 et 5). Il est

obtenu lorsque la concentration (X_1) et le volume du digestat (X_2) atteignent respectivement 0,4727 et $3,38.10^{-9}$ en valeurs codées. Les valeurs réelles correspondantes sont 75,03 % pour la concentration et 1,25 L pour le volume du digestat.

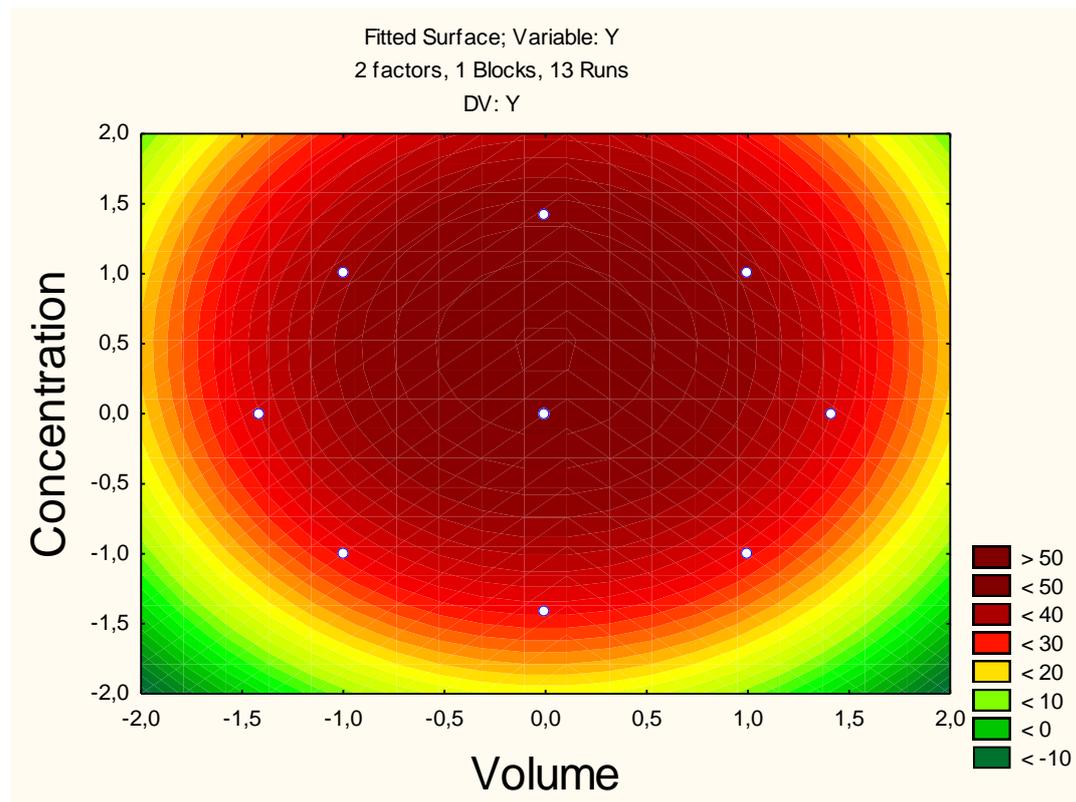


Figure 4 : Courbes d'isoréponses pour le rendement en racines fraîches de manioc

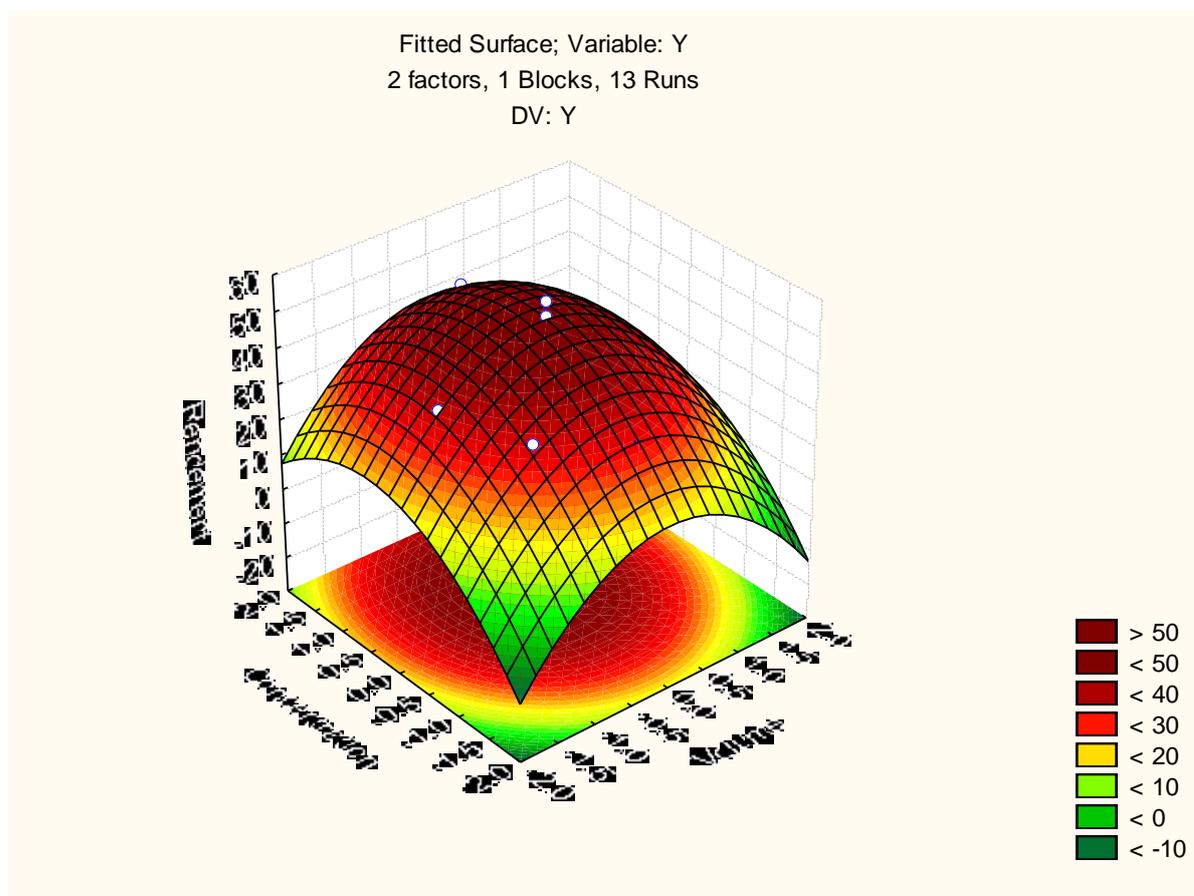


Figure 5 : Effet de la concentration et du volume de digestat sur le rendement en racines de manioc

4.4 Tests de contrôle : Les résultats des tests de contrôle ainsi que les conditions de réalisation des essais sont consignés dans le tableau 8. Le rendement moyen obtenu est de

47,06 t/ha. En outre, le pourcentage de déviation (7,14 %) est inférieur à 10 %. Ainsi, l'adéquation du modèle aux valeurs observées est satisfaisante.

Tableau 8 : Résultats des tests de contrôle dans les conditions optimales d'épandage du digestat

Essais	Valeurs réelles		Rendement prédit (t/ha)	Rendement Expérimental (t/ha)	Résidus en valeur absolue	%Déviation
	X ₁	X ₂				
14	75,03	1,25	50,24	47,80	2,44	
15	75,03	1,25	50,24	43,30	6,94	7,14
16	75,03	1,25	50,24	50,10	0,14	
Moyenne			50,24	47,06		

X₁ : Concentration du digestat (%); X₂ : Volume du digestat (L) à répandre par plant

5 DISCUSSION

Les rendements en tubercules frais enregistrés dans la présente étude avec le digestat utilisé à différentes concentrations sont compris entre 26,62 et 56,6 t/ha. Des valeurs plus élevées (63 t/ha) ont été rapportées par Bakayoko et al. (2007) qui travaillaient en Côte d'Ivoire, sur l'intensification de la culture du manioc. Cette

différence pourrait s'expliquer par le fait que les mêmes fertilisants n'ont pas été utilisés. En effet, contrairement à la présente étude, ces auteurs ont utilisés de la fumure de volailles et de bovins. De plus, les racines ont été récoltées 15 mois après plantation contrairement à celles de la présente étude qui sont âgées de 12 mois.

Bakayoko et al. (2012) ont rapporté des rendements plus élevés pour des variétés améliorées de manioc oscillant entre 70 et 76 t/ha. La recherche de relation entre les paramètres d'épandage du digestat et le rendement en racines fraîches a conduit à l'utilisation de plans d'expériences. En effet, les plans d'expériences s'apparentent à un système de boîte noire dans lequel, est recherché, l'effet des facteurs sur une réponse (Goupy, 2006 ; Pillet, 2011). Ces plans sont applicables à de nombreux domaines et sont particulièrement importants et utiles lorsqu'on recherche le lien entre une réponse (y) et des variables (xi). Concernant l'épandage d'engrais, un sous dosage est cause de baisse de rendement pendant qu'un surdosage est source de pollution (Jacquin, 2023). Il importe donc d'identifier les meilleures conditions pour cette opération. A ce propos, les coefficients significatifs du modèle postulé pour le plan central composite ont permis de déterminer l'équation reliant les facteurs au rendement qui suit :

$$Y_{\text{Rendement}} = 49,01 + 5,21 X_1 - 5,51 X_1^2 - 7,47 X_2^2.$$

Le rendement est donc lié aux facteurs étudiés que sont le taux de dilution et le volume du digestat à répandre par plant de manioc. D'ailleurs, le coefficient de détermination R^2 est supérieur à 0,80 ; ce qui montre que le modèle est bon (Adjoumani, 2021). Selon Goupy et Creighton (2006), le R^2 est un excellent indicateur de la qualité du modèle lorsque le nombre de points expérimentaux différents est plus que le nombre de coefficients dans le modèle postulé. C'est le cas dans la présente étude. En plus de ce coefficient, l'étude de la normalité des résidus du modèle et la représentation des résidus en fonction des valeurs prédites ont montré d'une part que les points sont proches de la droite théorique et d'autre part qu'ils sont répartis au hasard de sorte qu'il n'apparaît pas de structures particulières. Dès lors, on suppose qu'aucune autre information ne peut être extraite des données (Goupy et Creighton,

2006). Ceci confirme bien l'adéquation entre les rendements prédits par le modèle et ceux déterminés expérimentalement. Cette bonne adéquation montre que le modèle de surface de réponse présenté par l'équation de second degré, peut effectivement être utilisé pour décrire le processus étudié (Adjoumani, 2021). Ainsi, les conditions optimales (concentration et volume) d'utilisation du digestat peuvent être recherchées par la méthodologie des surfaces de réponses. On parle alors d'optimisation. Il s'agit de rechercher les conditions idéales qui permettent d'avoir la meilleure réponse. Le rendement maximal obtenu avec les graphes de surface de réponses et le solveur d'Excel est de 50,24 %. Cette valeur est atteinte lorsque les valeurs du taux de dilution et de volume du digestat sont respectivement de 75, 03 % et 1,25 L en valeurs réelles. Le rendement de 50 t/ha a été rapporté par Kosh-Komba et al. (2021) qui travaillaient sur les bonnes pratiques pour la production de manioc en République Centrafricaine. Ils ont utilisé une combinaison de fertilisants organiques et minéraux. Par ailleurs, les tests de contrôle réalisés en vue de la validation des résultats ont donné un pourcentage de déviation entre les valeurs prédites et celles observées de l'ordre de 7,14 %. Ce taux de déviation, inférieur à 10 %, montre que le modèle est bon (Djomdi *et al.*, 2020). Ce modèle peut donc être utilisé pour prédire les rendements en racines fraîches de manioc lorsqu'on connaît les valeurs des facteurs. En outre, il est bon de souligner que l'effet des facteurs étudiés sur le rendement est non linéaire au regard des termes quadratiques du modèle. Le digestat peut être utilisé dans la culture du manioc. Ainsi, pour l'utilisation efficace du digestat, un taux de dilution de 75,03 % doit être appliqué et un volume de 1,25 L doit être répandu par plant. Ce dosage doit être épandu trois fois au cours du cycle dès le 3^e mois à intervalle d'un mois. Avec ces conditions, un sous-dosage ou un surdosage sera évité.

6 CONCLUSION

La méthodologie des surfaces de réponses appliquée au processus d'épandage d'un digestat utilisé comme engrais biologique dans

la culture du manioc s'est révélée être très utile. Le rendement en racines fraîches est influencé par la concentration et le volume du digestat.

Les conditions optimales d'épandage du digestat issu de la méthanisation d'effluents de manioc sont un taux de dilution de 75 % et un volume de 1,25 L à répandre par plant. Avec ces conditions, le rendement maximal est de

50,24 t/ha de la variété Yacé. Les conditions optimales déterminées permettent d'éviter le sous dosage ou le surdosage. Pour ce digestat, l'utilisation efficiente nécessite l'observation de ces conditions optimales d'épandage.

7 RÉFÉRENCES

- Adjoumani YJ : 2021. Activation acide des argiles de Dabou et Katiola (Côte d'Ivoire) pour le traitement des eaux usées : élimination des ions dihydrogénophosphate ($H_2PO_4^-$), nitrate (NO_3^-) et cadmium (Cd^{2+}). Thèse de doctorat, EDP, Génie des Procédés, INPHB-Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). 215 pp.
- Bakayoko S, Kouadio KKH, Soro D, Tschannen A, Nindjin C, Dao D. et Girardin O : 2012. Rendements en tubercules frais et teneurs en matière sèche de soixante-dix nouvelles variétés de manioc (*Manihot esculenta* Crantz) cultivées dans le centre de la Côte d'Ivoire. *Journal of Animal & Plant Sciences* 14(2) : 1961-1977.
- Bakayoko S, Nindjin C, Dao D, Tschannen A, Girardin O. et Assa A : 2007. Fumure organique et productivité du manioc (*Manihot esculenta* CRANTZ) en Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 19(3) : 271-279.
- Couturier C, Berger S. et Meiffren I : 2001. La digestion anaérobie des boues urbaines : état des lieux, état de l'art. SOLAGRO, France, 36 pp.
- DDAE : 2014. Etude des dangers. In : Plan d'épandage digestat-FERTI NRJ. Edition ROUTIER/DDAE, pp. 304-310.
- Djomdi DR, Ejoh R, Ndjouenkeu R and Michaud P : 2020. Application of Peleg Model on Hydrothermal Treatment of Tiger Nut Tubers (*Cyperus esculentus*) and Effect of Dehulling Efficiency on Microbial Load. *Journal of Food Science and Nutrition* 6(4): 070.
- Feinberg M : 1996. La validation des méthodes d'analyse. Une approche chimiométrique de l'assurance qualité au laboratoire. Edition MASSON, Paris (France), 397 pp.
- Goupy J : 2006. Les plans d'expériences. *Revue MODULAD* 34 : 74-116.
- Goupy J. et Creighton L : 2006. Introduction aux plans d'expériences. 3^e Edition L'Usine Nouvelle – DUNOD, 336 pp.
- Guemache K. et Dadache N : 2021. Valorisation des déchets de fenouil : Optimisation par méthodologie de surface de réponse des conditions d'extraction assistée par micro-onde des composés phénoliques totaux et de l'activité antioxydante. Mémoire de Master Qualité des Produits et Sécurité Alimentaire, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi BBA, République Algérienne Démocratique et Populaire. 50 pp.
- Jacquin O : 2023. Méthanisation et risques de pollutions liées à l'épandage de digestats. Question écrite n°06508 - 16^e législature. *Journal Officiel du Senat du* 27/04/2023, 2766.
- Kosh-Komba E, Zaman M. et De Mon-Zoni GJL : 2021. Les bonnes pratiques de productions du manioc en république Centrafricaine. 2^e édition, ICRA/AIEA/FAO, 27 pp.
- Kouadio KH, Koné WA, Touré TG, Abibi DAH, Konan LN, Assi AJ, N'guessan AJD, Yapo RG, Dibi EB et Massé D : 2023. Amélioration du rendement du manioc (*Manihot esculenta* CRANTZ) par la jachère mixte *Chromolaena odorata-Cajanus cajan* au Centre de la Côte d'Ivoire. *Agronomie Africaine* 35 (1) : 63-74.
- Kpata-Konan NE, Konan KF, Kouamé KM, Kouamé YF, Gnagne T. et Tano K : 2011. Optimisation de la biométhanisation des effluents de manioc issus de la filière de fabrication de l'attiéké (semoule de manioc). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5 : 2330-2342.



- Nitidae : 2020. Valorisation du digestat liquide issu de la biodigestion de jus de manioc. Rapport NITIDAE, 15 pp. https://www.nitidae.org/files/6ff5049c/rapport_de_valorisation_du_digestat_liquide_issu_de_la_biodigestion_de_jus_de_manioc.
- Osei-Owusu AB, Arthur R, Baidoo FM, Oduro-Kwarteng S. and Amenaghawon AN : 2024. Anaerobic co-digestion of human excreta, food leftovers and kitchen residue: 1 ternary mixture design, synergistic effects and RSM approach. *Helvion* 10 : e24080.
- Pillet M : 2011. Les plans d'expériences par la méthode TAGUCHI. Editions 2011, 254 pp.
- Wallrich A, Poirier M, Diomard I, Savary C, MIRSPAA : 2021. Qualité agronomique des digestats en Normandie. Agricultures et territoires/Ministère de l'Agriculture et de l'alimentation (France), 35 pp.