

VALORISATION DU DIGESTAT DE MÉTHANISATION DES DÉCHETS ORGANIQUES DANS LE MARAICHAGE AU BÉNIN

Djonoumawou Mèmèvègni Grâce Floriane CHIDIKOFAN^{1*},
Jacques Boco ADJAKPA², Hénock GNANGA³ et Nassim ASSOUMA²

¹ *Ecole Nationale Supérieure du Génie Énergétique et Procédé (ENSGEP), Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur et de Mathématiques Appliquées (LSIM), BP 2282 Abomey, Bénin*

² *Université d'Abomey-Calavi (EPAC), Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi, Laboratoire de Recherche en Biologie Appliquée (LARBA), 01 BP 2009, Bénin*

³ *Entreprise Biogaz Bénin Sarl, 10 BP 620 Houéyiho, Bénin*

(reçu le 12 Octobre 2022; accepté le 25 Novembre 2022)

* Correspondance, e-mail : gchidi2008@gmail.com

RÉSUMÉ

La présente étude vise à valoriser le digestat de méthanisation des déchets organiques dans le maraichage au Bénin. Ainsi, du digestat provenant de la digestion anaérobie des déchets d'ananas et de déjection d'animaux a été testé dans la culture de *Amaranthus hybridus* L. (amarante) afin d'évaluer son effet sur les propriétés du sol et la croissance des plants. Le dispositif expérimental est un Bloc aléatoire Complet. Trois traitements ont été appliqués avec trois répétitions : le digestat en deux doses, D₁ (9 %) et D₂ (18 %) et un traitement témoin (T) sans aucun apport de fertilisant. Les données collectées ont été analysées à l'aide du logiciel R 3.6.1. Les résultats ont montré un effet positif sur la teneur du sol en carbone organique, en phosphore assimilable et en calcium échangeable pour la dose D₁. Les deux doses de digestat ont contribué significativement à l'augmentation du nombre de feuilles des plants et du diamètre des tiges ($p < 0,05$) comparativement au témoin. Il est également noté une augmentation du rendement avec l'apport du digestat (D₁ : $1,61 \pm 0,05$ et D₂ : $1,53 \pm 0,03$ kg/m²) comparativement au témoin ($1,04 \pm 0,05$ kg/m²). Cela dénote d'une bonne réponse malgré qu'aucune différence significative sur le rendement n'ait été mise en évidence ($p > 0,05$). Le digestat est bien une source importante d'éléments nutritifs capables d'améliorer la fertilité des sols et peut être parfaitement substitué aux engrais chimiques.

Mots-clés : *méthanisation, digestat, Amaranthus hybridus* L., sol, maraichage.

ABSTRACT

Valorization of digestate from organic waste methanization in market gardening in Benin

The present study aims to valorize the digestate from organic waste methanization in market gardening in Benin. Thus, digestate from pineapple waste and animal dung was tested in the cultivation of *Amaranthus hybridus* L. in order to evaluate its effect on soil properties and plant growth. The experimental design is a Complete Random Block. Three treatments were applied with three replicates: digestate in two doses, D₁ (9 %) and D₂ (18 %) and a control treatment (T) without fertilizer. The data collected were analyzed using the R 3.6.1 software. The results showed a positive effect on soil organic carbon, available phosphorus and exchangeable calcium content for the dose D₁. Both doses of digestate contributed significantly to the increase in the number of plant leaves and stem diameter ($p < 0.05$) compared to the control. There was also an increase in yield with digestate (D₁: 1.61 ± 0.05 and D₂ : 1.53 ± 0.03 kg/m²) compared to the control (1.04 ± 0.05 kg/m²). This indicates a good response although no significant difference in yield was found ($p > 0.05$). Digestate is indeed an important source of nutrients capable of improving soil fertility and can be perfectly substituted for chemical fertilizers.

Keywords : *Amaranthus hybridus* L., organic fertilizer, digestates, Benin.

I - INTRODUCTION

La question de l'énergie reste un enjeu vital pour la plupart des pays africains parce qu'il ne peut y avoir d'industrialisation et de développement sans accès à une énergie propre, fiable et durable [1]. Ainsi, au cours des dernières années, le développement des sources d'énergie renouvelables s'est accru en raison de l'augmentation de la population, de l'industrialisation poussée, des ressources énergétiques fossiles limitées et du changement climatique [2]. L'abondance de la biomasse en Afrique Sub-saharienne en fait l'une des sources d'énergie renouvelable les plus attrayantes. La biomasse peut être d'origine animale ou végétale, de nature solide ou liquide et provenir de plusieurs sources : cultures énergétiques dédiées, résidus agricoles et agro-industriels et déchets municipaux [3, 4]. Parmi les procédés de valorisation énergétique de la biomasse, la méthanisation ou digestion anaérobique (en absence d'oxygène) suscite un intérêt croissant [5]. C'est un procédé biologique par lequel la matière organique (MO) est transformée en biogaz. Ce dernier est composé principalement de méthane (50 à 80 % en volume) et de dioxyde de carbone. Dépendamment du type d'intrant, le taux de dégradation de la

matière organique varie entre 20 et 95 % [6]. Le méthane contenu dans le biogaz peut être utilisé pour produire de la chaleur, de l'électricité ou du froid [7]. La matière non dégradée suite au processus de digestion est appelée digestat, un produit organique final biologiquement stable et partiellement hygiénique [8]. Le digestat brut peut représenter entre 70 et 90 % de la quantité initiale des intrants, dépendamment du taux de matière sèche des intrants et de leur biodégradabilité. Ainsi, la méthanisation permet d'une part, de réduire la teneur en matière organique des déchets en produisant du biogaz, et d'autre part, de transformer une fraction plus ou moins importante de l'azote organique en azote minéral [9]. Pour favoriser la durabilité de la production de biogaz et l'équilibre économique des unités de méthanisation tout en étant respectueux de l'environnement, il est incontournable de valoriser le digestat [10]. Le digestat est une source riche d'azote (N), de phosphore (P), de potassium (K) et de soufre (S), de divers micronutriments et de matière organique, dont l'apport au sol peut contribuer à stimuler la biomasse microbienne et les activités métaboliques en améliorant le fonctionnement de l'écosystème du sol [6, 11]. Les caractéristiques du digestat dépendent de la nature et de la composition de la matière ingérée, du type d'installation de méthanisation ainsi que des paramètres de fonctionnement du procédé notamment la température et le temps de rétention hydraulique.

Le digestat peut être utilisé à l'état solide (méthacompost) comme partie intégrante des substrats de culture ou être épandu, comme il peut être utilisé directement à l'état liquide (Jus de Process) comme fertilisant des sols agricoles [10, 13]. La valeur fertilisante en azote du digestat est supérieure à celle des intrants non digérés, en raison de la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal (N-NH₄), davantage disponible pour les plantes. Toutefois, les pertes d'azote (à l'entreposage et à l'épandage) peuvent réduire l'efficacité et le prélèvement de l'azote issu du digestat [6]. L'épandage du digestat ne se traduit donc pas toujours par une réduction des doses d'engrais minéraux azotés [13]. A dose équivalente d'azote, plusieurs auteurs ont obtenu des rendements similaires aux engrais minéraux [14] ; ou aux lisiers de porcs en épandant des digestats. Dans certains cas, les rendements ou la qualité des récoltes sont supérieurs avec les digestats, alors que d'autres études rapportent des effets négatifs [15, 16]. Toutefois, les effets négatifs du digestat sur la durabilité en termes de fertilité du sol et d'impact environnemental au niveau du champ peuvent être d'importance mineure. L'utilisation du digestat comme amendement pourrait minimiser l'énorme demande pour les engrais chimiques de synthèse et, par conséquent, réduire les coûts économiques et environnementaux associés à la production d'engrais

chimiques et à l'élimination des déchets. Outre les propriétés intrinsèques des digestats, l'efficacité de l'azote au champ varie en fonction de plusieurs facteurs comme les conditions pédoclimatiques et les modalités d'épandage [17]. La présente étude vise à évaluer la qualité agronomique du digestat brut de méthanisation des déchets organiques dans le maraîchage au Bénin.

II - MÉTHODOLOGIE

II-1. Milieu d'étude

Les travaux ont été réalisés dans la commune d'Abomey-Calavi, précisément dans l'arrondissement d'Akassato dans le Département de l'Atlantique au Sud du Bénin. La commune d'Abomey-Calavi se trouve à environ 30 km au Nord de Cotonou, capitale économique, entre 2°14'45'' et 2°22'15'' de longitude Est et 6°22'20'' et 6°30'51'' de latitude Nord avec une superficie de 539 km². La commune d'Abomey-Calavi compte cent quarante-neuf (149) quartiers de ville et villages et repartis en neuf (09) arrondissements dont Akassato [18]. Elle compte 145510 ménages pour 656 358 habitants selon le dernier Recensement Général de la Population et de l'Habitation [19]. L'arrondissement d'Akassato s'étend sur une superficie de 91,27 km² entre les méridiens 2°18'0'' et 2°27'0'' de longitude et entre 6°30'0'' et 6°35'0'' de latitude nord (*Figure 1*). Il est limité au nord par l'arrondissement de Zinvié, au sud par l'arrondissement d'Abomey-Calavi, à l'est par la commune de Sô-Ava et à l'ouest par l'arrondissement de Glo-Djigbé. La zone jouit d'un climat de type subéquatorial de transition, caractérisé par deux saisons de pluie (mars à juillet et septembre à novembre) alternées par deux saisons sèches (juillet à septembre et novembre à mars). Selon les données climatiques de l'Agence Nationale de la Météorologie du Bénin (1999-2019), la température moyenne annuelle est 27,3°C et la pluviométrie moyenne annuelle est 1346 ± 307 mm. L'hygrométrie est toujours élevée (supérieure à 70 % à 12 heures, supérieure à 89 % à 6 heures). La commune est majoritairement occupée par les sols ferrallitiques et les sols sablonneux. Les sols hydromorphes très inondables n'occupent qu'une petite partie au nord du territoire. Le réseau hydrographique est constitué du lac Nokoué et de la lagune côtière. Elle dispose d'une façade maritime juxtaposée à la lagune côtière, des marais, des ruisseaux et des marécages.

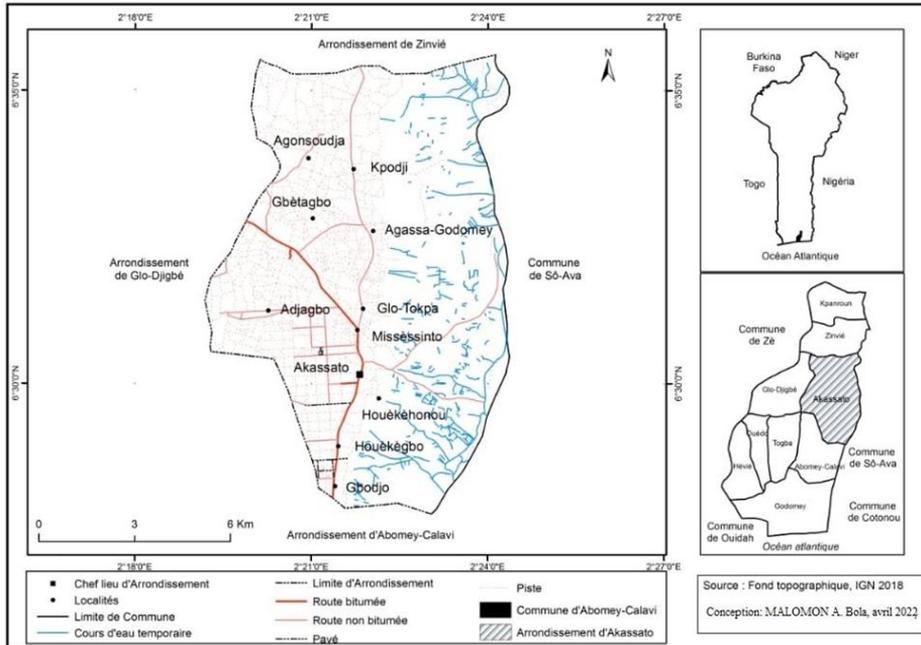


Figure 1 : Situation géographique de l'arrondissement d'Akassato [20]

Le relief est peu accidenté et caractérisé par une bande sablonneuse avec des cordons littoraux, un plateau de terre de barre et des dépressions et marécages.

II-2. Matériel végétal

La variété à feuilles et tiges vertes de l'amarante (*Amaranthus hybridus L.*) de la famille des *Amaranthaceae* a été utilisée dans le cadre de cette expérimentation. Elle a un cycle de production court entre 30 et 45 jours. De plus, sa demande est forte sur le marché local parmi les légumes feuilles après la grande morelle (*Solanum macrocarpum L.*).



Photo 1 : *Amaranthus hybridus L.*

II-3. Production du digestat

Le biodigester dénommé Organic Matter Digester (OMD) 2012 de l'entreprise Biogaz Benin SARL a servi à la production du digestat qui est l'engrais organique testé. Il s'agit d'un biodigester pilote de 4 m³ de type dôme fixe enterré, à alimentation manuelle en continu. Il est constitué d'un bac d'alimentation, d'un digesteur souterrain, en maçonnerie, de forme circulaire et d'un bassin d'effluent pour la récupération du digestat. Les déchets valorisés sont des déchets de fruits et légumes (60 %) ; des bouses de vache (30 %) et crottes de lapins (10 %) (**Photo 2**). A une quantité de déchets est ajoutée la même quantité d'eau (**Photo 3**). Après un temps de séjour des déchets dans le digesteur où ils sont digérés pour produire du biogaz sous l'action des microorganismes à une température de 38°C environ dans un milieu anaérobie, il est obtenu des résidus de matières appelés digestat (**Photo 4**).



Photo 2 : *Chargement du digesteur avec les déchets d'ananas et bouses de vache*



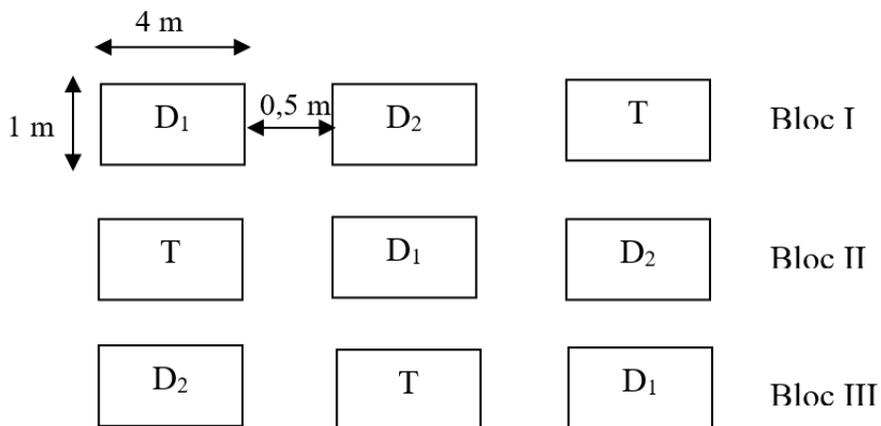
Photo 3 : *Liquefaction des déchets par ajout d'eau*



Photo 4 : *Bassin d'effluent*

II-4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est un Bloc Aléatoire Complet (BAC) avec un seul facteur étudié (rapport de dilution eau-digestat) et un seul facteur contrôlé (3 blocs). Trois traitements ont été réalisés avec trois répétitions : le digestat en deux différentes doses (D_1 et D_2) et un traitement témoin (T) sans aucun apport de fertilisant. Au total, neuf planches sont mises en place d'une superficie de 4 m² chacune (*Figure 2*).



T= Témoin, D₁ (dilution 9%) et D₂ (dilution 18%)

Figure 2 : *Dispositif expérimental en bloc aléatoire complet*

II-5. Mise en place de l'essai

L'expérimentation a été conduite en milieu réel sur le site de l'entreprise Biogaz Benin SARL. Elle a démarré par la mise en place de la pépinière qui a duré 2 semaines. Seules les plantules vigoureuses au stade 3 à 4 feuilles ayant des hauteurs homogènes ont été choisies puis transplantées dans des poquets avec des écartements de 20 x 20 cm sur chaque planche, soit 30 plantules/m². L'entretien des planches a consisté à l'arrosage, au sarclage et au binage des planches. L'arrosage a été fait trois fois par jour pendant une semaine après le repiquage et deux à quatre fois par jour le reste du cycle selon l'ensoleillement. Les apports de digestat ont été faits deux fois durant le cycle d'observation soit une semaine après repiquage et deux semaines après le premier apport. En raison de la forte concentration du digestat pour laquelle il ne pouvait pas être appliqué directement sur la culture, il a été dilué dans l'eau d'arrosage à un taux de 9 % (dose D₁) et 18 % (dose D₂). Un traitement phytosanitaire a été fait dès l'apparition des premières feuilles afin de lutter contre les ravageurs notamment les chenilles. Le produit phytosanitaire utilisé est un extrait de mélange des feuilles de *Azadirachta indica* (neem), de *Occimum gratissimum* (faux basilic), triturés, de l'ail, du savon noir (kôtô) et de la cendre.

II-6. Collecte des données

Le suivi a porté sur le nombre de feuilles par plant compté manuellement ; le diamètre de la tige au sol mesuré à l'aide d'un pied à coulisse de précision 0,1 mm et la hauteur cumulée des plants du sol à la cime mesurée à l'aide d'un mètre. Les données ont été collectées à intervalles réguliers d'une semaine pendant 4 semaines. Dans chaque bloc, dix (10) plants homogènes ont été sélectionnés suivant les diagonales du rectangle central de chaque planche afin d'éviter l'effet de bordure : 10 plants x 3 blocs = 30 plants/traitement, soit 90 plants d'amarante /suivi. A maturité (30 jours après le repiquage), la récolte a été effectuée une fois et simultanément sur chaque planche et les poids frais ont été pris à l'aide d'une balance de précision $\pm 0,5$ kg.

II-7. Analyse des propriétés du digestat et de son effet sur la qualité du sol

Un échantillon composite du digestat a été prélevé dans le bassin d'effluent en trois points dans un bidon en plastique d'un (1) litre, après avoir homogénéisé le contenu du bassin. Il a été analysé au Laboratoire d'Appui à l'Amélioration de la Santé des Sols, de la qualité des Eaux et de la Sauvegarde de l'Environnement (2A2S2E) de l'Institut des

Recherches Agricoles du Bénin (INRAB). Les paramètres mesurés sont le pH_{eau} , les teneurs en matière en suspension, l'azote, le carbone total, la matière organique, le phosphore, le potassium et le magnésium. Des échantillons de sol ont été également prélevés et analysés avant et après culture pour apprécier l'effet de l'utilisation du digestat sur sa qualité. Les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'une tarière à 0-20 cm de profondeur en trois différents points afin de constituer un échantillon composite. Ces points de prélèvement ont été fixés au hasard sur les diagonales de la parcelle d'expérimentation. Un échantillon composite de 500 g a été envoyé au 2A2S2E de l'INRAB. L'azote total, le carbone organique total, les matières organiques, le pH_{eau} et pH_{KCl} , le calcium, le magnésium, le potassium, le sodium, la capacité d'échange cationique et le phosphore assimilable ont été déterminés.

II-8. Traitement et analyse des données

Les données collectées ont été analysées à l'aide du logiciel R 3.6.1. L'analyse descriptive des données a été faite. Les valeurs moyennes des différents paramètres étudiés (nombre de feuilles, hauteur et diamètre des plants) ont été calculées et comparées entre elles à l'aide du test de la plus petite différence significative au seuil de 5 %.

III - RESULTATS ET DISCUSSION

III-1. Propriétés agronomiques du digestat

Les propriétés agronomiques du digestat produit sont présentées dans le *Tableau 1*.

Tableau 1 : *Caractéristiques agronomiques du digestat*

Paramètres	Valeurs
pH eau	6,8
Azote ammoniacal (mg/L)	63,28
Azote nitrique (mg/L)	7,84
Azote organique total %	2,64
Matières en Suspension (MES) %	3,83
Carbone organique total % (/MS)	32,71
Rapport (C/N)	12,37
P ₂ O ₅ (%/MS)	8,22
K ₂ O (%/MS)	2,0
MgO (%/MS)	2,58

La mesure du pH eau effectuée sur le digestat montre une valeur de l'ordre de 7 (proche de la neutralité). Des valeurs de pH plus élevés (8,2 ; 9) sont rapportées dans la littérature [8, 10]. Les digestats avec un pH élevé, proviennent principalement de déjections animales (fumier de porc, de bovin, d'oiseaux pondeur). Dans la présente étude, le digestat est issu de la co-digestion à 60 % de déchets de fruits et légumes notamment les déchets d'ananas dont le pH est voisin de 4 [21]. Un pH voisin de la neutralité constitue un atout pour une meilleure absorption racinaire des éléments nutritifs. De ce fait, il est plus conseillé en amendement agricole [22]. Les digestats de pH basique perdent leur nutriment par suite de la volatilisation de l'ammonium durant leur épandage dépendamment de la température et les digestats de pH acide acidifient les sols entraînant un relargage des éléments métalliques [8]. Toutefois, l'effet du pH sur un sol sera fonction des caractéristiques du sol qui le reçoit [23]. La teneur en azote ammoniacal (NH_4^+) est élevée par rapport à l'azote nitrique (NO_3^-) et organique total. Selon [24], plusieurs éléments minéraux sont solubles dans l'eau et après fermentation passent dans la phase liquide du digestat. Par conséquent, l'azote initialement sous forme organique se retrouve majoritairement sous forme ammoniacale qui est plus facilement assimilable par les cultures.

La méthanisation n'est donc pas un moyen pour détruire la charge azotée, comme c'est le cas du compostage, mais un procédé conservatif qui permet d'améliorer la gestion de l'azote. Il doit être pris en considération lors de l'épandage du digestat. L'azote organique total représente 2,64 %. Les teneurs en azote rapportées dans la littérature pour des digestats provenant du fumier d'animaux et des déchets alimentaires sont d'environ 1 à 3 % [25]. Le carbone organique total représente 32,71 % de la matière sèche. Selon [26], les pertes de carbone dans le méthaniseur sous forme de CO_2 et de CH_4 représentent entre 40 % et 75 % environ du carbone des substrats végétaux. Beaucoup moins de carbone retournera au sol via le digestat que si les substrats méthanisés étaient directement retournés au sol. Le carbone résiduel dans le digestat à l'issue de la méthanisation est cependant plus stabilisé que le carbone des matières entrantes méthanisées [27 - 29]. Ainsi, à quantité initiale de carbone égale, la quantité de carbone qui contribuera à la matière organique du sol peut être similaire voire supérieure dans le cas d'un épandage de digestat issu de matières végétales par rapport au retour au sol direct des mêmes matières végétales non méthanisées [29, 30]. Certains auteurs indiquent même un effet positif de la digestion anaérobie sur le stockage de carbone dans les sols du fait d'un « priming effect » moins important avec des substrats

méthanisés [27]. Le « priming effect » correspond à une augmentation de la minéralisation de la matière organique du sol suite à l'ajout de matière organique fraîche. Le rapport Carbone/Azote (C/N) est 12,38 ; inférieur aux rapport C/N des matières utilisées. En effet, les déchets d'ananas sont acides avec une faible teneur en azote et un rapport C/N de 55 tandis que la bouse de vache est basique et a un rapport C/N de 10-17. Ce résultat corrobore ceux de Tcha-Thom [31] qui affirme que suite à la dégradation de la matière organique, le digestat a généralement un rapport C/N plus faible que celui des substrats entrant dans sa production. Compris entre 10-20, le rapport C/N du digestat traduit une disponibilité potentielle en azote (N). En effet, des rapports C/N déséquilibrés dans les digestats peuvent limiter leur utilisation en agriculture. Un excès de substrat organique dégradé pour les micro-organismes par rapport à l'azote entraîne l'immobilisation de ce nutriment dans la biomasse microbienne et la carence des cultures. Par contre, l'excès d'azote entraîne des pertes par volatilisation de l'ammoniac et lixiviation des nitrates [32]. Les teneurs en Phosphore total (P_2O_5), Potassium total (K_2O) et Magnésium (MgO) sont 2 ; 8,22 et 2,58 % respectivement. Généralement, les quantités totales en éléments fertilisants et oligo-éléments du substrat sont conservées dans le digestat et sont très variables en fonction des intrants. Des teneurs similaires en Phosphore dans des digestats provenant de la digestion mésophile de résidus agroalimentaires sont rapportées dans la littérature. Par contre, des valeurs moins élevées de Potassium (5,12 %, 2,83 % et 0,62 %) sont rapportées pour des digestats provenant du maïs, de résidus agro-alimentaires et biomasse herbacée et de reste d'aliments respectivement. Pour le Magnésium, les valeurs rapportées sont comprise entre 0,85 et 3,47 % pour ces précédentes matières premières [25].

III-2. Effets de l'engrais organique sur la qualité du sol

Les propriétés physico-chimiques du sol pour les différents traitements sont présentées dans le **Tableau 2**. Il s'agit du pH eau, de la teneur en carbone (C), azote (N), en bases échangeables : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ , de leur somme (S), de la capacité d'échange cationique (CEC), ainsi que le rapport S/CEC (taux de saturation en bases V).

Tableau 2 : Propriétés physico-chimiques du sol

Sol	Témoin	Dosage 9 %	Dosage 18 %
Horizon	0 - 20	0 - 20	0 - 20
pH _{eau} (1/2,5)	6,2	6,26	5,99
pH _{KCl} (1/2,5)	5,67	5,65	5,34
C %	0,634	0,664	0,621
N %	0,0616	0,0546	0,056
C/N	10,306	12,170	11,087
Ca éch .méq/100 g	2,343	2,73	1,66
Mg méq/100 g	0,509	0,57	0,408
K éch.méq/100 g	0,074	0,125	0,081
Na éch.méq/100 g	0,190	0,212	0,177
Som. cations méq/100 g	3,12	3,65	2,33
CEC (meq/100 g)	4,53	4,51	3,73
Taux de saturation (V) en base (S/CEC) en %	68,8	80,8	62,5

Le pH eau du sol témoin est peu acide (6,2) et proche de la neutralité. Son potentiel d'acidification est modéré (pH_{KCl} 5,67). L'application des doses D₁ et D₂ de digestat, n'a pas eu d'effet majeur sur le pH du sol. Ces indicateurs suggèrent dans l'ensemble, un bon équilibre acido-basique du sol favorisant un bon développement de la vie du sol et des cultures. De même, ils ne présentent qu'une faible tendance de ce sol à l'acidification. Les teneurs en C et N des traitements D1 et D2 sont faibles et presque similaires à ceux du témoin. Les traitements n'ont pas eu d'effets majeurs sur les teneurs en carbone organique et azote total des sols. D'après les normes du référentiel pédologique [33], la teneur en carbone organique d'un sol est faible si elle est inférieure à 1 % ; si elle est comprise entre 1 et 2 %, elle est moyenne ; elle est élevée si elle est supérieure à 2 %. Quant à l'azote total, si %N total < 0,075 : le sol est pauvre ; si 0,075 < % N total < 0,125 : le sol est d'une fertilité moyenne et si %N total >0,125 : le sol est riche. En se basant sur ces normes, les sols sont donc demeurés pauvres en carbone organique et en azote total dans la courte durée d'application du digestat. Cette tendance a été signalée par [11, 17] qui ont rapporté que l'apport du digestat n'influence pas significativement le carbone organique du sol ; sans augmentation substantielle. Par contre, [34] ont obtenu dans leur étude une légère diminution du carbone du sol après trois ans d'application de digestats provenant de trois différentes matières premières. La teneur de l'azote total étant en relation avec celle du carbone organique, le rapport C/N sert à caractériser l'état de décomposition de la matière organique. Les ratios C/N des sols témoin

(10,3) et des traitements D₁ (12,2) et D₂ (11,1) sont similaires. Compris entre 8 et 12, ils indiquent un état d'humification normale de la matière organique et témoignent ainsi de sa bonne minéralisation. Lorsque le rapport C/N est inférieur à 25, la libération d'ammonium et de nitrates emporte et l'alimentation azotée des plantes devient possible à partir des réserves azotées du sol [33]. En ce qui concerne les bases échangeables, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺, l'analyse révèle que les teneurs en Ca²⁺ sont les plus élevées. Dans l'ensemble, il se dégage le classement ci-après : Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺. Le traitement D₁ a induit une légère augmentation de la teneur en Ca²⁺ (2,73 méq/100 g) tandis que D₂ une baisse de cette teneur (1,66 méq/100 g) comparativement au témoin (2,34 méq/100g). Le magnésium représente 17 % de la somme du calcium et du magnésium pour les traitements témoin et D₁ et 19 % pour le traitement D₂. Selon [35], une valeur comprise entre 10 et 20 % est souhaitable. En dessous, il y a un risque de carence pour les plantes et les microorganismes. Au-dessus, la structure du sol est fragilisée avec une plus forte sensibilité à la battance. Pour les organismes vivants, l'excès de magnésium perturbe l'absorption et l'utilisation du calcium. En ce qui concerne le potassium, le traitement D₁ a provoqué une légère augmentation de sa teneur par rapport au témoin.

Ces résultats concordent avec ceux de [34]. La somme S des bases échangeables du traitement D₂ (2,33méq/100g) est faible comparativement au traitement D₁ (3,64 méq/100g) qui est proche de celle du traitement témoin (3,11 méq/100g). Sur le plan agronomique, on considère que la somme S des bases est faible, lorsqu'elle est inférieure à 5 méq/100 g [33]. En ce qui concerne la capacité d'échange cationique (CEC), les valeurs sont faibles aussi bien pour le témoin que pour les traitements D₁ et D₂. Ces valeurs indiquent un sol pauvre en argile et humus et donc une capacité plutôt faible de rétention des éléments nutritifs d'un sol. Toutefois, par rapport au traitement D₁, le traitement D₂ a induit une baisse du CEC du sol. Le taux de saturation (V) est un précieux indicateur pédologique et agronomique quant à la richesse chimique du sol, laquelle détermine l'activité biologique, la qualité de la structure et les réserves en éléments fertilisants. Le taux de saturation (V) calculé pour ces sols est de 68,8 ; 80,8 et 62,5 % respectivement pour le témoin et les traitements D₁ et D₂. D'après l'échelle de saturation définie dans le référentiel pédologique si 50 < V% < 80, le sol est méso saturé. Ainsi, ces sols sont globalement méso saturés et présentent ainsi de faibles risques de lessivage [33]. On constate que le traitement avec la dose D₁ a relevé considérablement le taux de saturation du sol

(68,8 à 80,8 %). Il a donc permis au sol d'avoir des réserves calciques plus suffisantes. Quant à la teneur en Phosphore assimilable (Pass) des sols, les traitements D₁ et D₂ ont induit des valeurs supérieures (31,2 et 43,34 ppm respectivement) à celle du témoin (29,76 ppm). D'après l'échelle de fertilité pour le Phosphore assimilable Bray-I [36], si Pass < 40 ppm : la fertilité est très faible en phosphore disponible ; si 41 ppm < Pass < 60 ppm : le sol a une fertilité faible ; si 61 ppm < Pass < 80 ppm : le sol est d'une fertilité moyenne en phosphore disponible ; 81 ppm < Pass < 100 ppm : le sol est d'une bonne fertilité ; et si Pass > 100 : le sol est d'une très bonne fertilité. Sur la base de cette échelle, on peut dire que le traitement D₂ a légèrement amélioré la fertilité en phosphore assimilable du sol en la ramenant d'un niveau très faible à un niveau faible.

III-3. Effet des traitements sur les paramètres de croissance et le rendement

Les moyennes des différents paramètres étudiés (nombre de feuilles, hauteur, diamètre, rendement) des plantes à maturité sont présentées dans le *Tableau 3*.

Tableau 3 : Paramètres de croissance des plants d'amarante et rendement

Traitement	Nombre de feuilles	Hauteur (cm)	Diamètre (cm)	Rendement (kg/m ²)
Témoin	81 ± 9,8 ^b	53,1 ± 8,24 ^a	1,41 ± 0,15 ^b	1,04 ± 0,05 ^a
Digestat (dosage D ₁)	184 ± 12,3 ^a	63,86 ± 9,43 ^a	2,07 ± 0,16 ^a	1,61 ± 0,05 ^a
Digestat (dosage D ₂)	238 ± 5,19 ^a	62,7 ± 11,7 ^a	2,66 ± 0,37 ^a	1,53 ± 0,03 ^a

L'apport du digestat induit des variabilités importantes sur les valeurs du nombre de feuilles ($p < 0,05$). Le nombre moyen de feuilles varie entre 81 et 238. La forte valeur est obtenue pour le traitement D₂ (18 %). Quant à la hauteur des plants, ceux ayant reçus la dose D₁ ont une taille plus élevée. Néanmoins, l'écart observé entre les valeurs pour les trois traitements n'a aucune différence significative ($p > 0,05$). Concernant le diamètre au sol des plants, les tests statistiques ont montré une différence significative entre les résultats obtenus ($p < 0,05$). La valeur la plus élevée est obtenue pour le traitement D₂. A partir des rapports taille /diamètre, on constate que les plants se développent plus en hauteur qu'en diamètre (rapport > 1). Quant au rendement, il est à noter une augmentation avec

l'apport du digestat comparativement au témoin. Cela dénote d'une bonne réponse de celui-ci après les apports organiques malgré qu'une différence significative sur le rendement n'ait pas été mise en évidence ($p > 0,05$). En somme, les plants ayant reçus les traitements de digestat présentent une croissance plus intéressante que les plants n'ayant reçus aucun traitement. Ceci est dû à la disponibilité d'éléments nutritifs indispensables à la croissance et au développement des plants, contenus dans le digestat et qui sont facilement assimilables. Ces résultats corroborent ceux de [37] qui ont affirmé que la culture sans apport de fertilisant ne favorise pas la croissance et la vigueur des plants et consécutivement a un impact sur la production. D'où la faible croissance observée chez les plants témoins. De façon spécifique, concernant le nombre de feuilles et le diamètre des tiges, le traitement D_2 favorise une plus grande production foliaire et un fort développement des tiges que le dosage D_1 . Ceci s'explique par le fait que le dosage D_2 apporte plus d'éléments nutritifs aux plants que le dosage D_1 ; car selon Biauou et al. [38] la disponibilité des éléments nutritifs et leur utilisation augmentent la production de biomasse des plants. Quant à la hauteur et le rendement, ils sont sensiblement plus élevés pour les plants ayant reçus le dosage le plus faible (D_1). Ce résultat s'explique par le fait que dans certaines conditions, l'excès en éléments nutritifs peut être préjudiciable pour les plants et entraîner une diminution de rendement [38]. De ce fait, les doses de fertilisants doivent être mesurées et limitées en fonction de la finalité de la production et pour éviter l'excès d'éléments nutritifs comme l'azote [39].

IV - CONCLUSION

La présente étude est menée pour évaluer la valeur agronomique du digestat de méthanisation des déchets organiques dans le maraichage au Bénin. Ce digestat produit à partir des déchets d'ananas et des déjections d'animaux (bouse de vache, crottes de lapin) a un potentiel fertilisant élevé associé à son contenu en azote ammoniacal (NH_4^+). Son apport à deux différentes doses dans la culture de *Amaranthus hybridus* L (amarante) a eu des effets positifs très marqués sur les propriétés du sol et sur la croissance en hauteur, feuilles, diamètre des tiges des plants et le rendement. Ceci est dû à la disponibilité d'éléments nutritifs indispensables à la croissance et au développement des plants, contenus dans le digestat et qui sont facilement assimilables. On en déduit que le digestat est une source importante d'éléments nutritifs capables d'améliorer la fertilité des sols et peut être parfaitement substitué aux

engrais chimiques. Toutefois, le meilleur rendement obtenu avec le traitement à faible dose indique que les doses de fertilisants doivent être limitées pour éviter l'excès d'éléments nutritifs. Il est intéressant de poursuivre cette recherche pour tester l'efficacité du digestat sur une longue période d'application ; sur d'autres spéculations ; et l'efficacité d'autres digestats provenant d'autres types de déchets organiques.

RÉFÉRENCES

- [1] - F. RIVA, H. AHLBORG, E. HARTVIGSSON, S. PACHAURI et E. COLOMBO, « Electricity access and rural development : Review of complex socio-economic dynamics and causal diagrams for more appropriate energy modelling », *Energy for Sustainable Development*, Vol. 43, (2018) 203 - 223
- [2] - O. BAMISILE, A. BABATUNDE, H. ADUN, N. YIMEN M. MUKHTAR, Q. HUANG, W. HU, « Electrification and renewable energy nexus in developing countries; an overarching analysis of hydrogen production and electric vehicles integrality in renewable energy penetration », *Energy Conversion and Management*, Vol. 236, (2021) 114023
- [3] - B. V. MATHIESEN, H. LUND et K. KARLSSON, « 100 % Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth », *Applied Energy*, Vol. 88, N° 2 (2011) 488 - 501
- [4] - K. SRIRANGAN, L. AKAWI, M. MOO-YOUNG et C. P. CHOU, « Towards sustainable production of clean energy carriers from biomass resources », *Applied Energy*, Vol. 100, (2012) 172 - 186
- [5] - Y. M'SADAK, A. BEN M'BAREK et R. I. ZOGHLAMI, « Diagnostics environnemental et énergétique des digesteurs anaérobies expérimentaux des fientes avicoles », *Nature et Technologie*, N° 8 (2013) 19 - 26
- [6] - K. MÖLLER et T. MÜLLER, « Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth : A review : Digestate nutrient availability », *Eng. Life Sci.*, Vol. 12, N° 3, (2012) 242 - 257
- [7] - S. SIBILIO, A. ROSATO, G. CIAMPI, M. SCORPIO et A. AKISAWA, « Building-integrated trigeneration system : Energy, environmental and economic dynamic performance assessment for Italian residential applications », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68, (2017) 920 - 933
- [8] - R. NKOA, « Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review », *Agron. Sustain. Dev.*, Vol. 34, N° 2 (2014) 473 - 492

- [9] - W. CZEKAŁA, T. JASIŃSKI, M. GRZELAK, K. WITASZEK et J. DACH, « Biogas Plant Operation: Digestate as the Valuable Product », *Energies*, Vol. 15, N° 21 (2022) 8275
- [10] - J. A. ALBURQUERQUE C. DE LA FUENTE, A. FERRER-COSTA, L. CARRASCO, J. CEGARRA, M. ABAD et M. P. BERNAL, « Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agro-industrial residues », *Biomass and Bioenergy*, Vol. 40, (2012) 181 - 189
- [11] - P. BARŁÓG, L. HLISNIKOVSÝ et E. KUNZOVÁ, « Effect of Digestate on Soil Organic Carbon and Plant-Available Nutrient Content Compared to Cattle Slurry and Mineral Fertilization », *Agronomy*, Vol. 10, N° 3 (2020) 379 - 395
- [12] - P. POUÉCH, « Intérêt des digestats et possibilités de valorisation. », (2007) 14 p.
- [13] - K. A. SMITH, W. A. JEFFREY, J. P. METCALFE, A. H. SINCLAIR et J. R. WILLIAMS, « Nutrient value of digestate from farm- based biogas plants dans Proceedings of the Ramiran International Conference: "Treatment and Use of organic residues in agriculture : Challenges and opportunities towards sustainable management", Lisboa, Portugal, 12 septembre (2010)
- [14] - M. ODLARE, V. ARTHURSON, M. PELL, K. SVENSSON, E. NEHRENHEIM et J. ABUBAKER, « Land application of organic waste – Effects on the soil ecosystem », *Applied Energy*, Vol. 88, N° 6 (2011) 2210 - 2218
- [15] - M. H. CHANTIGNY, D. A. ANGERS, G. BELANGER, P. ROCHETTE, N. ERIKSEN- HAMEL, S. BITTMAN, K. BUCKLEY, D. MASSE et M. O. GASSER, « Yield and Nutrient Export of Grain Corn Fertilized with Raw and Treated Liquid Swine Manure », *Agronomy Journal*, Vol. 100, N° 5 (2008) 1303 - 1309
- [16] - B. GAGNON, N. ZIADI, M. H. CHANTIGNY, G. BÉLANGER et D. I. MASSÉ, « Biosolids from Treated Swine Manure and Papermill Residues Affect Corn Fertilizer Value », *Agronomy Journal*, Vol. 104, N° 2 (2012) 483 - 492
- [17] - K. MÖLLER, « Effects of anaerobic digestion on soil carbon and nitrogen turnover, N emissions, and soil biological activity. A review », *Agron. Sustain. Dev.*, Vol. 35, N° 3 (2015) 1021 - 1041
- [18] - MAIRIE D'ABOMEY-CALAVI, « Plan de développement Communal (PDC) 3eme génération de la commune d'Abomey-Calavi », (2017)
- [19] - INSAE, « Recensement Général de la Population et de l'Habitation au Bénin », (2013)
- [20] - M. WOROU, E. O. YAHA, S. A. VISSOH et B. A. MALOMON, « Operations De Lotissement Dans l'Arrondissement d'Akassato :

- Enjeux, Pratiques et Défis », *International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)*, Vol. 32, N° 1 (2022) 478 - 490
- [21] - S. AZONKPIN, C. D. CHOUGOUROU, K. ABDOUDOU, L. HEDIBLE et M. M. SOUMANOU, « Evaluation de la qualité de l'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merr.) de cinq itinéraires techniques de production dans la Commune d'Allada au Bénin », *Revue Internationale des Sciences Appliquées*, Vol. 2, N° 1 (2019) 48 - 61
- [22] - M. OGNALAGA, P. ODJOGU, J. M. LEKAMBOU et R. N. POLIGUI, « Effet des écumes à cannes à sucre, de la poudre et du compost de à base de *Chromolaena odorata* (L.) King R.M. & H.E. Rob sur la croissance de l'oseille de Guinée (*Hibiscus sabdariffa* L.) », *Int. J. Biol. Chem. Sci*, Vol. 9, N° 5 (2015) 2507 - 2519
- [23] - P. ALVARENGA, C. MOURINHA, M. FARTO, T. SANTOS, P. PALMA, J. SENGO, M. C. MORAIS, C. CUNHA-QUEDA, « Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors », *Waste Management*, Vol. 40, (2015) 44 - 52
- [24] - H. ERRAJI, M. E. AFILAL, K. AZIM, H. LAICHE et O. EL ASRI, « Valorization of Household Anaerobic Processed Digestate : A case study of Morocco », *Journal of Materials and Environmental Sciences*, N° 8 (2017) 4024 - 4031
- [25] - W. WANG et D.-J. LEE, « Valorization of anaerobic digestion digestate: A prospect review », *Bioresource Technology*, Vol. 323, (2021) 124626 - 641
- [26] - Y. BAREHA, R. GIRAULT, J. JIMENEZ et A. TRÉMIER, « Characterization and prediction of organic nitrogen biodegradability during anaerobic digestion : A bioaccessibility approach », *Bioresource Technology*, Vol. 263, (2018) 425 - 436
- [27] - R. BÉGHIN-TANNEAU, F. GUÉRIN, M. GUIRESSE, D. KLEIBER et J. D. SCHEINER, « Carbon sequestration in soil amended with anaerobic digested matter », *Soil and Tillage Research*, Vol. 192, (2019) 87 - 94
- [28] - R. CHEN, E. BLAGODATSKAYA, M. SENBAYRAM, S. BLAGODATSKY, O. MYACHINA, K. DITTERT, Y. KUZYAKOV, « Decomposition of biogas residues in soil and their effects on microbial growth kinetics and enzyme activities », *Biomass and Bioenergy*, Vol. 45, (2012) 221 - 229
- [29] - I. K. THOMSEN, J. E. OLESEN, H. B. MØLLER, P. SØRENSEN et B. T. CHRISTENSEN, « Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces », *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 58, (2013) 82 - 87

- [30] - M. SZERENCSEITS, C. WEINBERGER, M. KUDERNA, F. FEICHTINGER, E. ERHART et S. MAIER, « Biogas From Cover Crops And Field Residues : Effects On Soil, Water, Climate And Ecological Footprint », *International Journal of Environmental and Ecological Engineering*, Vol. 9, N°4, (2015) 413 - 416
- [31] - M. TCHA-THOM, « Recherche d'une filière durable pour la méthanisation des déchets de fruits et d'abattoirs du Togo : Evaluation du potentiel agronomique des digestats sur les sols de la région de la Kara. », Thèse de doctorat, Université de Limoges ; Université de Lomé, Togo, (2019) 205 p.
- [32] - M. P. BERNAL, J. A. ALBURQUERQUE et R. MORAL, « Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review », *Bioresource Technology*, Vol. 100, N° 22 (2009) 5444 - 5453
- [33] - D. BAIZE, M. C. GIRARD, B. JABIOL, J. P. ROSSIGNOL, M. EIMBERCK et A. BEAUDOU, *Référentiel pédologique*, 3ème Edition Quae. Paris, France : INRA, (2008) 435 p.
- [34] - M. O. DOYENI, U. STULPINAITE, A. BAKSINSKAITE, S. SUPRONIENE et V. TILVIKIENE, « The Effectiveness of Digestate Use for Fertilization in an Agricultural Cropping System », *Plants*, Vol. 10, N° 8 (2021) 1734
- [35] - Y. HERODY, *Le chaulage : l'état calcique des sols cultivés.*, BRDA édition. Paris, France, (2015) 90 p.
- [36] - J. BOYER, Les sols ferrallitiques. Tome X : Facteurs de fertilité et utilisation des sols, Paris (France) : ORSTOM, Vol. 52, (1982) 384 p.
- [37] - Z. KONFE, B. ZONOU et E. HIEN, « Influence d'intrants innovants sur les propriétés du sol et la production de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) et d'aubergine (*Solanum melongena* L.) sur un sol ferrugineux tropical en zone soudano-sahélienne au Burkina Faso », *Int. J. Bio. Chem. Sci.*, Vol. 13, N° 4 (2019) 2129 - 2146
- [38] - O. D. B. BIAOU, A. SAIDOU, F.-X. BACHABI, G. E. PADONOU et I. BALOGOUN, « Effet de l'apport de différents types d'engrais organiques sur la fertilité du sol et la production de la carotte (*Daucus carota* L.) sur sol ferrallitique au sud Bénin », *Int. J. Bio. Chem. Sci.*, Vol. 11, N° 5 (2018) 2315 - 2326
- [39] - F. BRESSOUD, L. PARES et F. LECOMPTE, Tomate d'abri froid. Fertilisation et restriction en azote : le standard actuel inadapté au sol. Réussir Fruits et Légumes, INRA, Paris, France, Vol. 220, (2003) 30 - 31