

## Étude du potentiel énergétique par conversion des macrophytes et déchets agro-alimentaires en biogaz : cas d'*eichhornia crassipes*, *pistia stratiotes* et rafles de palmier à l'huile

Pierre NTAKIYIRUTA<sup>1\*</sup>, Marie-Reine IRAKOZE<sup>1</sup>, Prudence BARARUNYERETSE<sup>1</sup>,  
Patrice BIGUMANDONDERA<sup>2</sup> et Rosine AHISHAKIYE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université du Burundi, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Laboratoire de Chimie, Sciences de la terre et de l'Environnement, Centre de Recherche en Sciences Naturelles et de l'Environnement, BP 2700, Bujumbura, Burundi

<sup>2</sup> Université du Burundi, Institutif de Pédagogie Appliquée, Département de Biologie-Chimie, Laboratoire de Nutrition, Phytochimie, Ecologie et Environnement Appliqué, Centre Universitaire de Recherche et de Pédagogie Appliquées aux Sciences, BP 5223, Bujumbura, Burundi

(Reçu le 13 Septembre 2024 ; Accepté le 18 Octobre 2024)

---

\* Correspondance, courriel : [pierre.ntakiyiruta@ub.edu.bi](mailto:pierre.ntakiyiruta@ub.edu.bi)

### Résumé

La prolifération de plantes exotiques envahissantes dans les écosystèmes terrestres et aquatiques représente l'une des menaces majeures pour la biodiversité. De plus, la production de déchets organiques ne cesse pas d'augmenter en raison de la croissance démographique, de l'industrialisation et de l'urbanisation. Cette étude a pour objectif de caractériser les substrats utilisés dans la digestion anaérobie et d'optimiser la production de biogaz à partir de ces substrats. Le processus de digestion anaérobie a été réalisé en mode batch et différents paramètres physico-chimiques ont été mesurés avant et après la digestion anaérobie selon des méthodes standards. Cette digestion a été réalisée dans des digesteurs de 4 litres dans lesquels ont été introduit 4kg du mélange Substrat/Inoculum. En effet, 3 scénarios du mélange *P.stratiotes*-Rafles, *E.crasipes*-Rafles et *E.crasipes*, Rafles - *E.crasipes* avec l'inoculum dans les rapports (S/I) 3/1, 2/1 et en plus du témoin ont été réalisés. Les résultats montrent que le rapport 2/1 génère une production élevée de biogaz et de méthane. Le mélange *P.stratiotes*-Rafles a produit 17440 ml de biogaz et 68,6 % de méthane, tandis que le mélange *E.crasipes*-Rafles-*P.stratiotes* a produit 17830 ml de biogaz et 72,1 % de méthane. Le mélange *E.crasipes*-Rafles quant à lui a généré 17890 ml de biogaz et 76,8 % de méthane. Cette importante production pourrait servir à la valorisation en bio-méthane et en énergie électrique dans le but de générer du profit à la population.

**Mots-clés :** Biogaz, Co-digestion anaérobie, *E.crasipes*, *P.stratiotes*, rafles, valorisation.

## Abstract

### Study of the energy potential by converting macrophytes and agro-food waste into biogas : the case of *eichhornia crassipes*, *pistia stratiotes* and oil palm stalks

The proliferation of invasive alien plants in terrestrial and aquatic ecosystems represents one of the major threats to biodiversity. In addition, the production of organic waste is constantly increasing due to population growth, industrialization and urbanization. The objective of the study was to characterize the substrates used in anaerobic digestion and to optimize the production of biogas from these substrates. The process was carried out in batch mode and different physico-chemical parameters were measured before and after the anaerobic digestion according to standard methods. The anaerobic digestion was carried out in 4l digesters in which 4kg of the Substrate/Inoculum mixture was introduced. In fact, 3 scenarios of the mixture *P.stratiotes* - Rafles, *E.crassipes*-Rafles and *E.crassipes*— Rafles - *P.stratiotes* with the inoculum (S/I) in the ratios 3/1, 2/1 and in addition to the control were realized. The results show that the 2/1 ratio generates high biogas and methane production. The *P.stratiotes* - Rafles mixture produced 17440 ml of biogas and 68.6 % methane, while the *E.crassipes*— Rafles - *P.stratiotes* mixture produced 17830 ml of biogas and 72.1 % methane. The *E.crassipes*-Rafles mixture generated 17890 ml of biogas and 76.8 % of methane. This important production could be used for the valorization in bio-methane and electric energy in order to generate profit to the population.

**Keywords :** *Biogas, Co-digestion anaerobic, E.crassipes, P.stratiotes, rafles, valorization.*

## 1. Introduction

La Jacinthe d'eau (*Eichornia crassipes*) et la laitue d'eau (*Pistia stratiotes*) font partie des plantes aquatiques envahissantes et la prolifération de celles-ci dans les pays tropicaux et subtropicaux a provoqué de graves conséquences écologiques, économiques et sanitaires [1]. En eau douce, rivières, réservoirs et lacs, elles remplacent les plantes et animaux aquatiques causant ainsi des problèmes économiques et interfèrent avec les usages de l'eau[2]. En empêchant la pénétration du rayonnement solaire, le tapis dense de la jacinthe et laitue d'eau diminue la photosynthèse des producteurs primaires à la base des chaînes alimentaires. La décomposition des feuilles mortes de ces plantes rend le milieu anoxique, privant d'oxygène les espèces du milieu conduisant ainsi à l'eutrophisation du plan d'eau [3]. Au Burundi, les plantes envahissantes prolifèrent de façon très inquiétante. Dans le lac Tanganyika et dans les lacs du Nord du Burundi, il s'observe *Eichornia crassipes* qui constitue un grand danger à la biodiversité de ces derniers. Les roselières de bordure du lac Tanganyika, sont en compétition avec *Eichornia crassipes* [4]. Malgré qu'*Eichornia crassipes* et *Pistia stratiotes* constituent un danger pour les écosystèmes aquatiques, elles peuvent être utilisées dans l'alimentation du bétail, la fabrication des objets d'art, dans la médecine traditionnelle, dans la phytoremédiation et valorisation énergétique. Des publications sur la valorisation de *Pistia Stratiotes* et *Eichornia Crassipes* ont été faite par plusieurs auteurs dont [5, 6]. En plus des problèmes liés à la gestion des déchets des macrophytes même après leur utilisation notamment en phytoépuration ; la gestion des déchets agro-alimentaires constitue un autre défi majeur un peu partout dans le monde. Depuis de nombreuses années, la production de déchets organiques ne cesse d'augmenter en raison de pratiques d'élevage, d'industrialisation et de l'urbanisation [7]. En outre, l'augmentation des activités domestiques, agricoles ou industrielles génère un nombre élevé de résidus solides (fraction fermentescible des ordures ménagères, résidus des industries agro-alimentaires, résidus agricoles, boues résiduaires, etc.) [8, 9]. Le traitement et la valorisation de ces déchets sont d'une grande importance pour diminuer leurs impacts sur l'environnement. Pour répondre à ces enjeux environnementaux, des procédés biologiques de traitement et de valorisation sont mis en œuvre, notamment la méthanisation (digestion anaérobie). En effet, la méthanisation est un

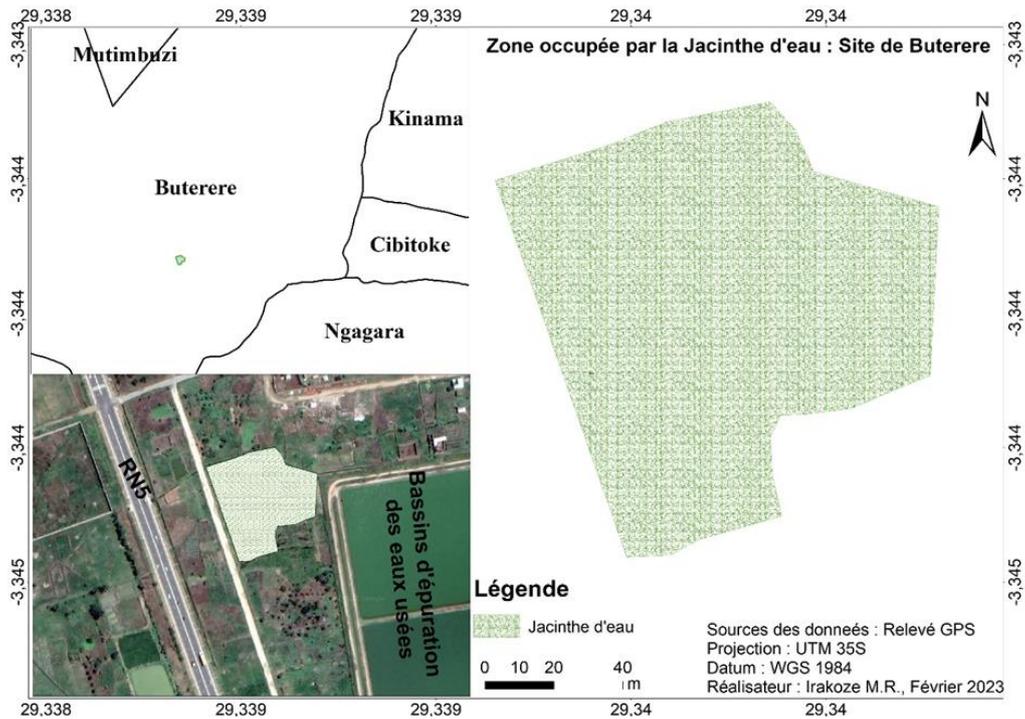
procédé qui permet de convertir la matière organique contenue dans les déchets en biogaz [10]. Parmi les déchets issus d'industries agroalimentaires étudiés, les déchets d'huilerie sont des Co-substrats particulièrement intéressants dans la production du biogaz par Co-digestion anaérobie. En effet, les substrats organiques, tels que les déchets agro-alimentaires, sont des sources potentielles importantes de production de biogaz. Ces substrats présentent généralement un potentiel méthanogène élevé en raison de leur teneur élevée en matière organique et de leur forte biodégradabilité [11]. Des auteurs comme [12 - 14] ont fait des publications sur la valorisation de ces déchets en biogaz. La Co-digestion anaérobie est la digestion simultanée de 2 ou plusieurs résidus solides et fait l'objet d'une attention croissante car elle présente de nombreux avantages par rapport à la mono digestion. D'une façon générale, la Co-digestion garantit un meilleur traitement de déchets en améliorant la stabilité des digesteurs. Ainsi, grâce à cette technique, des substrats de types différents peuvent être traités dans une installation commune [14]. Des auteurs comme [15, 16] ont montré que le traitement de différents types de déchets dans des installations centralisées permet la conception d'unités de méthanisation de taille plus importante, ce qui améliore la rentabilité des installations. C'est dans ce cadre que cette étude se propose à déterminer le pouvoir méthanogène par Co-digestion anaérobie d'*Eichornia Crassipes*, *Pistia Stratiotes* et les rafles de palmier à l'huile en présence des boues activées de la station d'épuration des eaux usées de BUTERERE jouant le rôle d'inoculum. L'objectif principal de notre étude est de valoriser les déchets d'huilerie (rafles) et les deux macrophytes (*Eichornia Crassipes*, *Pistia Stratiotes*) par Co-digestion anaérobie. Pour arriver à cet objectif principal, deux objectifs spécifiques ont été fixés dont (i) Caractériser les substrats qui seront utilisés dans la digestion anaérobie et (ii) Optimiser la production du biogaz à partir des substrats utilisés.

## 2. Matériel et méthodes

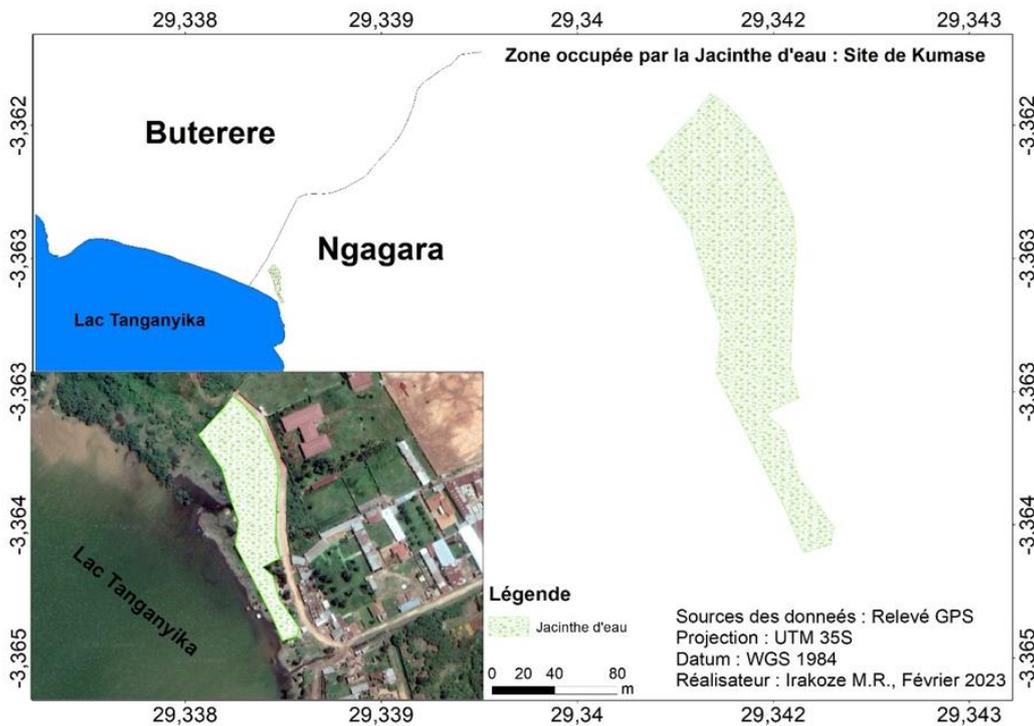
### 2-1. Matériel

#### 2-1-1. Matériel végétal

Les substrats utilisés dans cette étude ont été collectés à différents endroits. Les échantillons de *P. stratiotes* ont été prélevés dans l'un des bassins de la station d'épuration des eaux usées de Buterere (**Figure 1**), située à une latitude de -3,3642054 et à une longitude de 29,3418978, pendant la période du mois de novembre et décembre 2022. Les échantillons d'*E. crassipes* ont été récoltés à un site appelée KUMASE (**Figure 2**), situé au bord du lac Tanganyika, à -3,344615 de latitude et 29,3395032 de longitude, pendant les mois de novembre et décembre 2022. Les rafles ont été collectées dans une unité de production d'huile de palme située dans la ville de Bujumbura, à proximité du marché de COTEBU.



**Figure 1 :** Espace occupé par la jacinthe d'eau et la laitiue d'eau dans la commune BUTERERE



**Figure 2 :** Espace occupé par la jacinthe d'eau site KUMASE dans la commune NGAGARA

### 2-1-2. Dispositif pour la production du Biogaz

Le dispositif expérimental qui a été utilisé comprend trois (3) dispositifs : (i) le dispositif de digestion anaérobie, (ii) le dispositif de quantification du biogaz et (iii) le dispositif de détermination des teneurs en méthane ( $\text{CH}_4$ ) et en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) du biogaz (**Figure 3**).

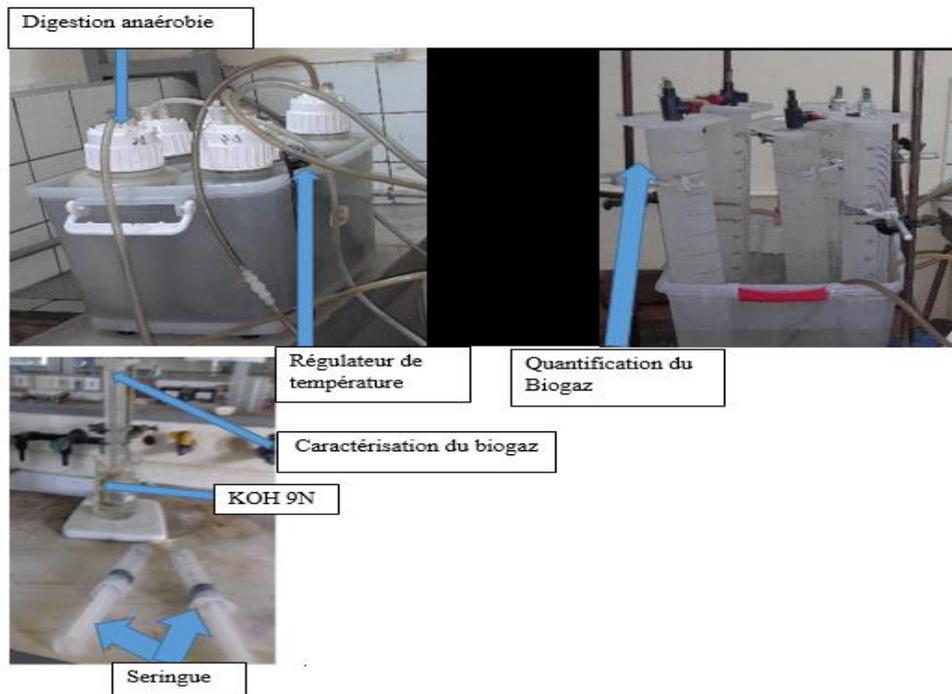


Figure 3 : Dispositif pour la production du biogaz

## 2-2. Méthodes

### 2-2-1. Analyse des paramètres physico-chimiques

#### ➤ pH

Le pH, a été déterminé au début et à la fin du processus de digestion anaérobie. Cela a été fait suivant la norme ISO 10-390 à l'aide d'un pH-mètre de marque HANNA Instruments, modèle HI 223 muni d'une électrode combinée [17].

#### ➤ DCO

La Matière Organique (MO) contenue dans l'eau est traité par oxydation au  $K_2Cr_2O_7$  en présence de  $H_2SO_4$  concentré et par chauffage à reflux pendant 2h. On ajoute  $Ag_2SO_4$  jouant le rôle de catalyseur et  $Hg_2SO_4$  qui a comme rôle de complexant des chlorures [18]. Pour notre étude, C'est la méthode à haut niveau qui a été utilisée car les concentrations sont supérieures à 80mg/l.

#### ➤ Dosage des ammoniums par méthode de Nessler

Dans une fiole de 50 mL, nous y avons ajouter 50 mL d'eau. Ensuite, nous avons ajouté deux gouttes de tartrate double de potassium et 1 mL de réactif de Nessler, puis la solution a été homogénéisée. Après avoir laissé reposer la solution pendant environ 20 à 30 minutes, nous avons mesuré l'absorbance de la solution à une longueur d'onde de 424 nm à l'aide d'un spectromètre pour ensuite faire correspondre avec la courbe d'étalonnage. Nous avons préparé une série de fioles de 50 mL contenant différentes quantités de solution étalon d'azote ammoniacal diluée à 50 mL. Les volumes préparés étaient de 0, 1, 3, 5, 8 et 10 mL de solution étalon. Après avoir mélangé les solutions, nous avons ajouté 1 mL de réactif de Nessler et homogénéisé les solutions. Après avoir laissé reposer les solutions pendant environ 20 à 30 minutes, nous avons mesuré l'absorbance de chacune des solutions à une longueur d'onde de 425 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. En utilisant les valeurs d'absorbance mesurées, nous avons construit une courbe d'étalonnage [18].

### 2-2-2. Caractérisation des substrats utilisés dans la digestion anaérobie

#### ✓ Détermination de la teneur en eau

La matière sèche (MS) représente ce qui reste lorsqu'on élimine l'eau d'un produit. Pour déterminer la matière sèche, une prise d'échantillon de masse égale à 2 grammes, soit (M1), est versée dans une capsule de masse connue préalablement nettoyée et séchée, soit (M). L'ensemble est introduit dans une étuve à 105°C pendant 12 heures. Après cette étape, la capsule est refroidie dans un dessiccateur et puis pesée ; soit M2. Le pourcentage de matière sèche est le rapport entre le poids de la matière sèche et la masse de la matière non-séchée (hydratée). Le pourcentage de teneur en eau s'obtient selon la **Relation** suivante [19] :

$$T(\%) = \frac{(M1+M)-(M2+M)}{M1} * 100 \quad (1)$$

avec, M : masse de la capsule ; M1 : masse de l'échantillon avant dessiccation ; M2 : masse de l'échantillon après dessiccation.

#### ✓ Détermination de la teneur en matière sèche

Elle a été calculée par l'intermédiaire de cette **Relation** :

$$MS = 100\% - \% \quad (2)$$

H : Taux d'humidité.

#### ✓ Détermination de la teneur en carbone

La teneur en carbone a été déterminée dans les 3 substrats par la méthode d'oxydation ou méthode Walkley-Black [20]. Le carbone organique total dans les solides peut être déterminé par titrage. Une solution de bichromate de potassium est ajoutée à un échantillon en présence d'acide sulfurique. Après avoir réagi, la quantité de bichromate qui n'a pas réagi avec l'échantillon permet d'établir la concentration de carbone organique total.

#### ✓ Procédure

Nous avons pesé environ 0,25 g de l'échantillon puis nous l'avons mis dans une fiole conique de 250 mL et nous avons ajouté 10 mL de bichromate de potassium 1N. Nous avons ajouté 20 mL d'acide sulfurique concentré et on l'a placé dans un verre de montre sur la fiole conique. Après agitation vigoureusement pendant une minute et nous avons laissé au repos pendant 30 minutes. Ensuite, un verre de montre a été rincé avec un ajout de 150 mL d'eau déminéralisée, 10 mL d'acide phosphorique concentré et 12 gouttes de la solution indicatrice de ferroïne. L'excès de bichromate de potassium a été titré avec la solution de sulfate ferreux 0,5N. Lorsque la coloration turquoise apparaissait, lentement nous avons titré jusqu'à l'obtention de la coloration finale brune, tout en notant le volume utilisé. Une solution témoin a été faite en suivant la même procédure sans l'échantillon. Ajouter 20 mL d'acide sulfurique concentré et placer un verre de montre sur la fiole conique [21].

#### ✓ Détermination de la teneur en azote

La méthode kjeldhal selon la norme AFNOR ISO 11261 nous a aidé à déterminer la teneur en azote dans chaque substrat. Les échantillons ont été d'abord séchés à 105°C puis finement broyés et tamisés à 800 µm de mailles [22].

**2-2-3. Protocole expérimental de digestion anaérobie**

Le principe du procédé est tel que la digestion est faite dans neufs (9) digesteurs biologiques de quatre (4) litres fermés hermétiquement avec des bouchons spécifiques (**Figure 3**). Une série de six digesteurs a commencé et ensuite de trois digesteurs après. Pour la première et la deuxième série, la durée d'expérimentation a été de 25 jours. Ces digesteurs sont déposés dans un bac de 50 mL d'eau afin d'éviter toute pénétration d'oxygène. Chacun des réacteurs possède trois ouvertures dont une permet d'amener le biogaz vers le dispositif de quantification, la 2ème ouverture permet d'introduire un milieu de culture favorisant la croissance des bactéries anaérobies puis de l'azote gazeux afin de chasser l'oxygène présent éventuellement dans le volume mort du digesteur. La troisième ouverture permet d'échantillonner dans le digesteur afin de déterminer l'évolution du milieu réactionnel (suivi de certains paramètres comme le pH, le NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et la DCO). Le dispositif de quantification du biogaz comprend un bac d'environ 25 litres dans lequel sont disposés de manière renversée six (6) éprouvettes graduées comportant un robinet à gaz. Les éprouvettes renversées sont plongées dans une solution piège constituée d'une eau saturée en NaCl pour éviter que le dioxyde du carbone (CO<sub>2</sub>) du biogaz ne se solubilise [16]. Un bouchon septum (préparé à cet effet) est ensuite appliqué sur chacun de ces robinets afin de prendre un échantillon de biogaz de volume connu et le faire passer dans le dispositif de détermination des teneurs en CH<sub>4</sub> et en CO<sub>2</sub>. Pendant l'injection de cet échantillon de biogaz dans le dispositif de détermination des teneurs en CH<sub>4</sub> et en CO<sub>2</sub>, le CO<sub>2</sub> est absorbé dans une solution de KOH à 9 N se trouvant dans ce dispositif et le CH<sub>4</sub> n'étant pas soluble, déplace celle-ci, ce qui facilite la quantification du volume de ce gaz méthane. Le volume de CO<sub>2</sub> correspond à la différence entre le volume de biogaz injecté et celui de CH<sub>4</sub>. Pour maintenir les digesteurs à la température mésophile (35°C), des résistances de chauffage réglables étaient plongées dans le bac contenant 50 L d'eau et les six (6) digesteurs. Le mélange pour la fermentation est composé de 4 kg d'un mélange d'E. crassipes fraîches, de P. stratiotes et de rafles finement broyées à l'aide d'un mixeur Binatone Blender BLG-451 -1.5L - 350W. La boue de la station d'épuration a été utilisée comme inoculum. Dans ces essais, neufs (3) scénarios différents définis sur la base d'un critère « rapport Substrat /Inoculum (S/I) ont été évalués où S représente le mélange de macrophytes E. crassipes, P. stratiotes et rafles tandis que I est la boue de la station d'épuration des eaux usées (jouant le rôle d'inoculum). Les ratios S/I qui sont respectivement égaux à 3/1, 2/1 et le témoin ont été évalués comme le montre le **Tableau 1**. La durée de suivi des digesteurs a été de 25 jours pour les scénarios 3/1, 2/1 et le témoin quel que soit le type de substrat.

**Tableau 1 : Composition du mélange des digesteurs au cours de la digestion anaérobie**

	<i>P. stratiotes</i> (%)	<i>E. crassipes</i> (%)	Rafles (%)	Inoculum (%)	Rapport (S/I)
Témoin	25	75	-	-	-
<i>P. stratiotes</i> + Rafles	18.75	56.5	-	25	3/1
	22	44	-	34	2/1
Témoin	-	25	75	-	-
<i>E. crassipes</i> + Rafles	-	18.75	56.5	25	3/1
	-	22	44	34	2/1
Témoin	16.6	50	33.4	-	-
<i>E. crassipes</i> + <i>P. stratiotes</i> + Rafles	12.5	37.5	25	25	3/1
	11	33	22	34	2/1

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Caractéristiques des substrats

Le **Tableau 2** montre les résultats obtenus lors de la caractérisation des substrats utilisés au cours de la digestion anaérobie. Ces résultats montrent que la teneur en matière sèche des substrats varie entre 13,13 % pour *E. crassipes* et 20,59 % pour *P. stratiotes*. Les résultats sont en accord avec ceux trouvés par Ntakiyiruta *et al.*, 2021 (17,79 % *E. crassipes*, 26,74 % *P. stratiotes*). Les rafles ont une teneur en matières sèches élevées de 80,39 %, cela pourrait être due à leur richesse en matières organiques. *E. crassipes* a la plus grande teneur en eau avec 86,87 %, suivie de *P. stratiotes* avec 79,41 % et les rafles qui ont 19,61 %. Les autres résultats du **Tableau 2** sont la teneur en carbone et en azote. Ces deux paramètres nous ont permis de déterminer le rapport C/N de nos substrats. Le rapport C/N des rafles est de 30,24 une valeur qui est proche à celle trouvée par [23] (Rapport C/N des rafles de 34). *E. crassipes* a un rapport C/N de 7, tandis que *P. stratiotes* a un rapport C/N de 30. Ces valeurs corroborent avec les résultats de [16]. Le mélange de rafles et *E. crassipes* et celui de *E. crassipes* – Rafles et *P. stratiotes* ont produit des résultats supérieurs à tous les autres mélanges. Cela pourrait s'expliquer pour le premier mélange par le rapport C/N élevé des rafles qui élève celui d'*E. crassipes* et le rend favorable à la digestion anaérobie. Tandis que pour le second, cela pourrait s'expliquer par un bon mélange des substrats. Equilibrer plusieurs mélanges constitue un facteur clé d'équilibrer plusieurs paramètres du mélange de substrats servant à l'alimentation du digesteur pour ajuster la composition de l'alimentation aux besoins des micro-organismes [24]. Par ailleurs, le rapport C/N optimal pour une meilleure digestion anaérobie doit être compris entre 20 et 30 [25]. Les résultats de la caractérisation des substrats montrent que les rafles ont une teneur en matières sèches et un rapport C/N élevés, ce qui les rend favorables à la digestion anaérobie.

**Tableau 2 :** Caractéristiques des substrats utilisés pendant Co-digestion anaérobie d'*E. crassipes*, *P. stratiotes* et Rafles

Types de substrats	Matière sèche (%)	Teneur en eau (%)	Carbone (%)	Azote (%)	Rapport C/N
<i>P. stratiotes</i>	20,59	79,41	34	1,19	28,57
<i>E. crassipes</i>	13,13	86,87	24,61	3,3	7,45
<i>D. huilerie</i>	80,39	19,61	42,34	1,4	30,24

#### 3-2. Évolution de certains paramètres dans les digesteurs durant la co-digestion anaérobie

Le **Tableau 3** présente les valeurs de la DCO, du pH et de  $\text{NH}_4^+$  au début et à la fin des essais de la co-digestion anaérobie. Les résultats montrent que la plupart des paramètres ont augmenté à la fin des essais. La DCO de certains mélanges a beaucoup augmenté, cela pourrait s'expliquer par la dégradation de la majorité des substrats, entraînant la production de biogaz. La valeur minimale du DCO à la fin de la digestion anaérobie est de l'ordre de 4000 mg  $\text{O}_2/\text{l}$  [13]. Parmi les valeurs trouvées du DCO, il y a celles qui n'ont pas atteint la valeur minimale. Cela pourrait s'expliquer par la non dégradation de la majorité des substrats entraînant la non production de biogaz. Les ions ammoniums ont également augmenté, probablement en raison de la dégradation des substrats riches en protéines [16]. Le processus de nitrification nécessitant d'oxygène n'a pas eu lieu parce qu'il s'agit de la digestion anaérobie. Pour certains essais, le pH a augmenté à la fin. Cela pourrait s'expliquer par la présence de bactéries méthanogènes qui ont consommé les acides gras volatils et l'acide acétique libérés lors des étapes d'acidogénèse et d'acétogénèse. Cependant, les rapports S/I avec des pH faibles à la fin des essais peuvent être causés par la domination des acides gras volatils et de l'acide acétique libérés par des substrats riches en glucides et lipides, qui occupent une grande partie de la ratio. L'augmentation des acides gras volatils et de l'acide acétique peut inhiber l'étape de la méthanogénèse en causant une diminution du pH [13].

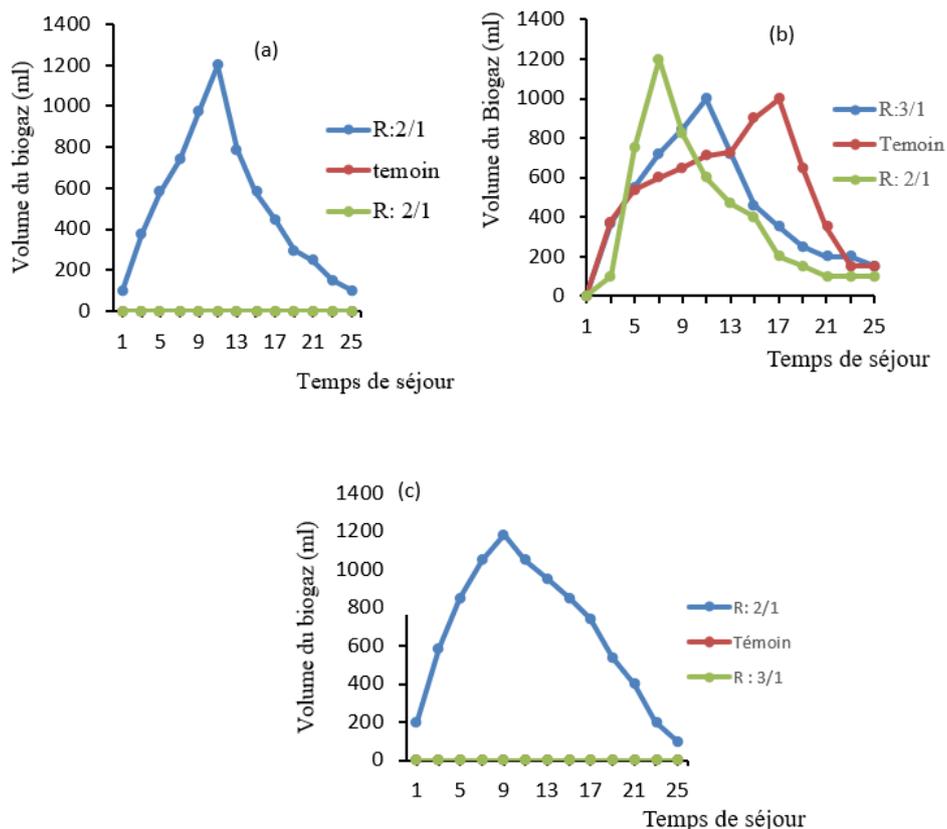
**Tableau 3 : Valeurs de quelques paramètres au début et à la fin du processus de la digestion anaérobie**

Substrats	Scénario (Rapport S/I)	pH		DCO (mgO <sub>2</sub> /L)		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	
		In	Fin	In	Fin	In	Fin
<i>P. stratiotes</i> + Raffles	T	6,47	6,16	1173	2006	22,92	47,01
	3/1	6,33	6,9	1673	2506	35,15	101,38
	2/1	6,57	7,5	1506	4673	28,43	95,50
<i>E. crassipes</i> + <i>P. stratiotes</i> + Raffles	T	6,36	6,55	673	940	49,09	77,24
	3/1	6,52	7,11	740	1006	38,33	136,46
	2/1	6,73	7,5	923	4340	46,25	130,63
<i>E. crassipes</i> + Raffles	T	6,74	6,23	2840	3340	31,43	71,12
	3/1	6,82	6,09	2673	4673	42,87	142,09
	2/1	6,89	7,23	2223	5173	48,71	112,38

T : Témoin ; S/I : rapport substrat/inoculum ; In : Initiale ; Fin : Finale.

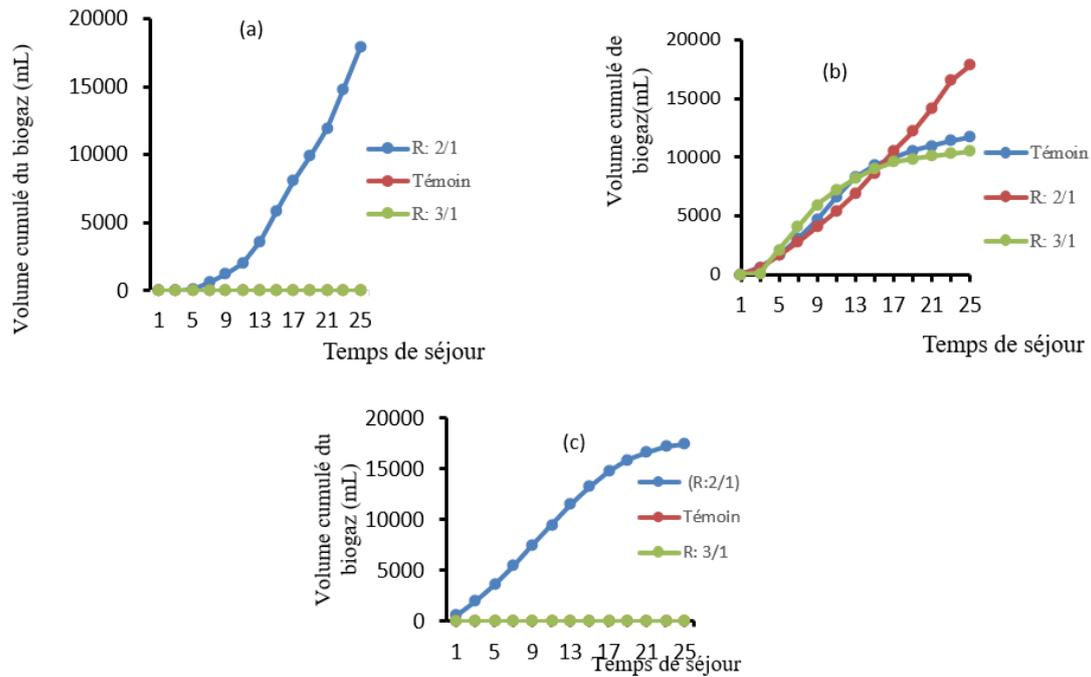
### 3-3. Cinétique de production du Biogaz

La **Figure 4** ((a),(b) et (c)) présente la quantité de biogaz produit durant le processus de co-digestion anaérobie. L'analyse des résultats de cette figure montre que le rapport S/I 2/1 a un rendement journalier en biogaz élevé par rapport à tous les autres scénarios. Il faut noter que le mélange *E. crassipes* - Raffles (**Figure 4 (c)**) produit une grande quantité de biogaz, ensuite *E. crassipes* – Raffles et *P. stratiotes* (**Figure (b)**) et enfin *P. stratiotes* – Raffles (**Figure 4 (a)**). Pour le mélange *E. crassipes* – Raffles, le rapport 2/1 a donné une grande production du biogaz. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le rapport C/N qui est de 30,24 pour les Raffles [23] et 7 pour *E. crassipes* [16], leur mélange a permis d'avoir un rapport C/N favorable à la digestion anaérobie. Le mélange *E. crassipes* – Raffles permet de ramener le rapport C/N dans l'intervalle de 20 à 30. Le rapport C/N de 20 à 30 est favorable à la digestion du substrat par les microorganismes [25]. Le rapport 3/1 et le témoin n'ont pas produit de biogaz. Cela pourrait s'expliquer par la composition du mélange de ces deux rapports qui est dominé par les raffles. Les raffles sont des sous-produits de l'huile de palme qui sont riches en glucides et lipides. Cela pourrait contribuer à l'inhibition de la digestion anaérobie en raison de la domination des acides gras volatils et de l'acide acétique libérés par ces substrats, qui peuvent diminuer le pH et inhiber l'étape de la méthanogénèse. Cela peut dépendre de la composition du mélange, du types de micro-organismes et de nature des substrats [27]. Pour le mélange *E. crassipes* – *P. stratiotes* et Raffles, dans lequel on y trouve tous les trois substrats, le témoin, le rapport 3/1 et le rapport 2/1 ont produit du biogaz. Cela pourrait s'expliquer par le faite qu'un bon mélange de raffles et des substrats végétales peut fournir une source riche en nutriments pour les bactéries anaérobies [28]. Le rapport 2/1 a une grande production, suivi par le rapport 3/1 et le témoin (**Figure 4(b)**). Cela pourrait s'expliquer par la présence dans le mélange d'une quantité suffisante de microorganismes. L'inoculum joue un rôle important dans l'activation du processus générant rapidement les microorganismes nécessaires à la co-digestion des substrats [16]. En effet, le 1er maxima est obtenu au 4ème jour de co-digestion pour un rapport de 2/1, puis au 10ème jour pour un rapport de 3 /1 et enfin au 17ème jour pour le témoin (**Figure 4 (b)**). Le mélange *P. stratiotes* – Raffles, seul le mélange du rapport 2/1 a donné une production du biogaz. Cela pourrait s'expliquer par le faite que le mélange de ces deux autres rapports est dominé par les raffles. Les raffles sont des sous-produits de l'huile de palme qui sont riches en glucides et lipides. Cela pourrait contribuer à l'inhibition de la digestion anaérobie en raison de la domination des acides gras volatils et de l'acide acétique libérés par ces substrats, qui peuvent diminuer le pH et inhiber l'étape de la méthanogénèse. Cela peut dépendre de la composition du mélange, du types de micro-organismes et de la nature des substrats [29].



**Figure 4 :** Évolution journalière de la production du biogaz pour *P. stratiotes*- *Raffles* (a), *E. crassipes* - *Raffles* et *P. stratiotes* (b), *E. crassipes* - *Raffles* (c)

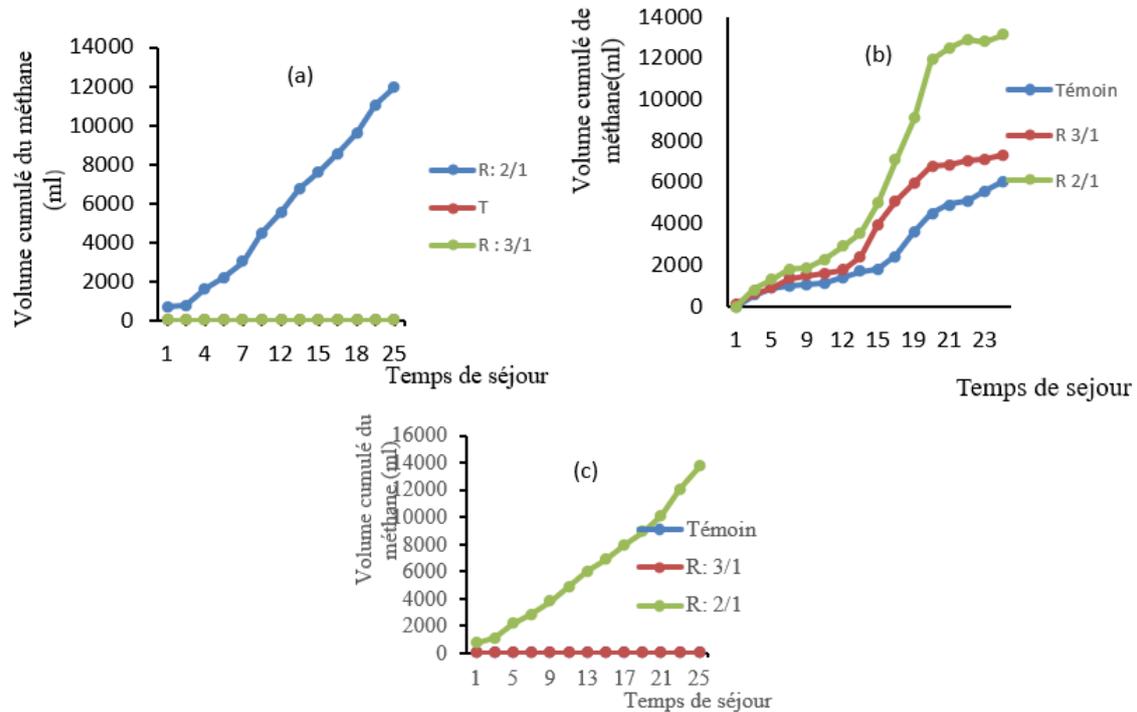
La quantité cumulative de biogaz produite sur 25 jours est de 17 440 mL, 17 830 mL et 17 890 mL pour *P. stratiotes* - *Raffles*, *E. crassipes* - *Raffles* et *P. stratiotes*, et *E. crassipes* - *Raffles*, pour un rapport S/I de 2/1. La grande production du rapport 2/1 pourrait être due à sa composition riche en matières organiques et une quantité suffisante d'inoculum, facilitant le développement des micro-organismes responsables de la digestion anaérobie. De plus, à partir du même rapport S/I, la quantité de biogaz produite par *E. crassipes* - *Raffles* est supérieure à celle de tous les autres mélanges. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le rapport C/N de ce mélange pourrait se situer entre 20 et 30, un intervalle très favorable à la digestion anaérobie. Cette étude montre qu'en mélangeant les déchets agro-alimentaires avec les macrophytes dans les bonnes proportions peut contribuer dans l'amélioration du rendement en biogaz ainsi que sa teneur en méthane. Cela a également été observé dans l'étude menée par Badey *et al* [27] sur la production de biogaz par co-digestion des déchets des huileries avec les déchets végétaux. Il convient de noter que la quantité cumulée de biogaz produite augmente avec le rapport substrat/inoculum. Cette augmentation se produit dans l'ordre du rapport 2/1, puis du rapport 3/1 (**Figure 5 (c)**). En effet, la quantité de biogaz produite lors de la digestion anaérobie est fonction de la teneur en matière organique [30]. En analysant les **Figures 5((a), (b) et (c)**, on peut dire qu'il a fallu au moins 10 jours pour observer l'augmentation exponentielle du biogaz cumulé. Cette période de latence correspond aux premières étapes de la digestion anaérobie (hydrolyse, acidogénèse et acétogénèse) avant d'atteindre la dernière étape (méthanogène) responsable de la production de biogaz [31].



**Figure 5 :** Évolution de la production cumulée du biogaz pour *P. stratiotes* - Rafles (a), *E. crassipes* - Rafles et *P. stratiotes* (b), *E. crassipes* - Rafles (c) dans le temps

### 3-4. Cinétique de production du méthane

La **Figure 6 ((a),(b),(c))** présente l'évolution du méthane lors d'une co-digestion anaérobie de différents substrats. Ces résultats montrent que le rapport S/l de 2/1 est le plus efficace pour produire du méthane par rapport aux autres rapports. La Co-digestion de *P. stratiotes* – Rafles, *E. crassipes* – Rafles – *P. stratiotes*, *E. crassipes* – Rafles augmentent le rendement en méthane. Ceci est attribuable à l'augmentation de la teneur en matière organique (MO) lorsque deux ou trois substrats sont mélangés ensemble [13]. Le rapport S/l de 2/1 est optimal pour la production de méthane en digestion anaérobie car il fournit une composition riche en MO et un rapport C/N compris entre 20 et 30, qui est la plage optimale pour la production de méthane [32]. Les résultats montrent également qu'il faut au moins 10 jours pour observer l'augmentation exponentielle de la production de méthane. Cette période de latence correspond aux premières étapes de la digestion anaérobie (hydrolyse, acidogénèse et acétogénèse) avant d'atteindre la dernière étape (méthanogène) responsable de la production de méthane [31].



**Figure 6 :** Évolution de la production cumulée du méthane (CH<sub>4</sub>) pour *P. stratiotes* - Rafles (a), *E. crassipes* - Rafles - *P. stratiotes* (b), *E. crassipes* - Rafles (c) dans le temps

Le biogaz produit selon les différents scénarios de méthanisation présentés dans le **Tableau 4** contient principalement du méthane (CH<sub>4</sub>) ainsi que du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Cependant, le mélange S/l dans le rapport 2/1 produit beaucoup plus de biogaz et de méthane que les autres scénarios. Les rendements en méthane de ce mélange sont de 68 %, 72 % et 76 % respectivement pour les scénarios *P. stratiotes* – Rafles, *E. crassipes* – Rafles et *P. stratiotes*, *E. crassipes* – Rafles. En termes de quantité de méthane cumulé produit sur une période de 25 jours de méthanisation, les rendements en volume sont respectivement de 11980 mL, 12860 mL et 13750 mL pour *P. stratiotes* – Rafles, *E. crassipes* – Rafles et *P. stratiotes*, *E. crassipes* – Rafles (**Tableau 4**).

**Tableau 4 :** Quantité cumulée et composition du Biogaz produit

Substrats	Types de digesteur	Quantité cumulée de Biogaz (mL)	Quantité cumulée de Méthane (mL)	% CH <sub>4</sub>	% CO <sub>2</sub>
<i>P. stratiotes</i> + Rafles	Rapport S/l (2/1)	17440	11980	68,6	31,4
	Témoin	10530	6350	60,3	39,7
<i>E. crassipes</i> + <i>P. stratiotes</i> + Rafles	Rapport S/l (3/1)	11730	7350	62,6	37,4
	Rapport S/l (2/1)	17830	12860	72,1	27,9
<i>E. crassipes</i> + Rafles	Rapport S/l (2/1)	17890	13750	76,8	23,2

### 3-5. Estimation de la quantité d'énergie produite

Le **Tableau 5** fournit une estimation de la quantité d'énergie électrique qui peut être produite par la co-digestion anaérobie de différents substrats, pour une tonne et par an. Selon les estimations du scénario rapport S/l 2/1, la co-digestion d'une tonne de *P. stratiotes* - Rafles peut produire jusqu'à 424,084 KW

d'énergie électrique par an, la co-digestion d'une tonne d'*E. crassipes* - Rafles - *P. stratiotes* peut produire jusqu'à 455,221 KW d'énergie électrique par an, et la co-digestion d'une tonne d'*E. crassipes* - Rafles peut produire jusqu'à 486,746 KW d'énergie électrique par an. Ces quantités d'énergie électrique peuvent être suffisantes pour répondre aux besoins d'un ménage rural pendant une année entière, en remplaçant le courant électrique. Cela peut être une solution viable pour les ménages ayant un faible niveau économique et qui ne disposent pas des moyens pour s'approvisionner en courant électrique. La co-digestion anaérobie de différents substrats peut être une méthode rentable et durable pour produire de l'énergie électrique, tout en réduisant les déchets organiques et en améliorant la qualité des cours d'eau.

**Tableau 5 : Estimation de la quantité d'énergie pour chaque type de substrat par tonne et par an**

Types de substrats	Types de digesteur	Quantité cumulée de biogaz (mL)	% CH4	Volume de CH4 (mL) pour 25 jours	Volume de CH4 (m <sup>3</sup> /T/an)	Energie (KW)
<i>P. stratiotes</i> + Rafles	Rapport S/l (2/1)	17440	68,6	11980	43,72	424,084
<i>E. crassipes</i> + <i>P. stratiotes</i> + Rafles	Témoin	10530	60,3	6350	23,17	224,749
	Rapport S/l (3/1)	11730	62,6	7350	26,82	260,154
<i>E. crassipes</i> + Rafles	Rapport S/l (2/1)	17830	72,1	12860	46,93	455,221
	Rapport S/l (2/1)	17890	76,8	13750	50,18	486,746

\*1m<sup>3</sup> de CH4 = 8570 Kcal = 9,7 Kw, [26]

#### 4. Conclusion

Cette étude montre que la co-digestion anaérobie des déchets agroalimentaires et des macrophytes, réalisée à l'aide de la boue de la station d'épuration comme inoculum, peut générer un rendement élevé de biogaz. Plus précisément, les résultats ont montré que le mélange de rafles sous-produits de l'huile de palme avec les deux macrophytes, dans un rapport substrat/inoculum de 2/1, produit le meilleur résultat en termes de volume de biogaz et de pourcentage de méthane. Les scénarios (3/1, 2/1, témoin) du rapport S/l ont été introduits dans les digesteurs pendant ce processus. Les résultats issus de cette étude montrent que *E. crassipes* – Rafles sont mélangées dans un rapport substrat/ inoculum 2/1, un volume de 17890 mL de biogaz a été produit dont sa composition en méthane vaut 76,8 %. Avec ce même ratio 17830 mL de biogaz dont le pourcentage en méthane vaut 72,1 % a été produit avec un mélange de *E. crassipes* – Rafles – *P. stratiotes*. Le mélange de *P. stratiotes* – Rafles toujours avec le même ratio S/l, a donné 17440 mL de biogaz dont le pourcentage en méthane vaut 68,6 %. Cette approche de gestion simultanée des deux plantes envahissantes et des déchets solides présente un intérêt environnemental et économique, car elle permet de réduire la quantité de déchets et de lutter contre la prolifération des plantes envahissantes, tout en produisant une source d'énergie renouvelable.

## Références

- [1] - E. A. GHABBOUR, G. DAVIES, Y.-Y. LAM et M. E. VOZZELLA, « Metal binding by humic acids isolated from water hyacinth plants (*Eichhornia crassipes* [Mart.] Solm-Laubach : Pontedericeae) in the Nile Delta, Egypt », *Environ. Pollut. Barking Essex 1987*, Vol. 131, N° 3 (oct. 2004) 445 - 451 p., doi: 10.1016/j.envpol.2004.02.013
- [2] - P. NTAKIYIRUTA, G. NSAVYIMANA, B. G. H. BRITON, K. ADOUBY, D. NAHIMANA et G. NTAKIMAZI, « Actions combinées de *Eichhornia crassipes* et *Pistia stratiotes* pour traitement tertiaire de l'effluent des bassins facultatifs de la station d'épuration de Buterere, Burundi », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol. 14, N° 7 (déc. 2020) 2463 - 2475 p., doi: 10.4314/ijbcs.v14i7.8
- [3] - S. BUHUNGU, E. MONTCHOWUI, E. BARANKANIRA, C. SIBOMANA, G. NTAKIMAZI et C. A. BONOU, « Spatio-temporal characterization of the water quality of Kinyankonge river, a tributary of Lake Tanganyika, Burundi. », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol. 12, N° 1 (2018) 576 - 595 p.
- [4] - « Stratégie Nationale et Plan d'Action sur la Biodiversité 2013-2020 », (2013)
- [5] - P. NTAKIYIRUTA, G. NSAVYIMANA, B. G. H. BRITON, K. ADOUBY, D. NAHIMANA et G. NTAKIMAZI, « Actions combinées de *Eichhornia crassipes* et *Pistia stratiotes* pour traitement tertiaire de l'effluent des bassins facultatifs de la station d'épuration de Buterere, Burundi », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol. 14, N° 7, Art. N° 7 (déc. 2020), doi: 10.4314/ijbcs.v14i7.8
- [6] - O. ALMOUSTAPHA et J. MILLOGO-RASOLODIMBY, « Production de biogaz et de compost à partir de *eichhornia crassipes*, (*mart*) *solms-laub* (*pontederiaceae*) pour un développement durable en Afrique sahélienne », *Vertigo - Rev. Électronique En Sci. Environ.*, Vol. 7, Numéro 2 (sept. 2006), doi: 10.4000/vertigo.2221
- [7] - R. GIRAULT, F. BELINE et A. DAMIANO, « Girault, R., Béline, F., Damiano, A., 2010, Méthanisation : Les premiers pas de la filière dans le secteur agricole, Environnement et Technique, N° 300, 38 - 42 p. - Recherche Google ». Consulté le : 7 mars 2023. [En ligne]
- [8] - R. A. LABATUT, L. T. ANGENENT et N. R. SCOTT, « Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates - PubMed ». Consulté le : 7 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21050752/>
- [9] - A. DEMIRBAS, O. TAYLAN et D. KAYA, « Biogas production from municipal sewage sludge (MSS) », *Energy Sources Part Recovery Util. Environ. Eff.*, Vol. 38, N° 20 (oct. 2016) 3027 - 3033 p., doi: 10.1080/15567036.2015.1124944
- [10] - T. H. PEPIN et J. MARTIN, « Pépin, T. H., Martin, J., Conversion biochimique de la biomasse : Aspects technologiques et environnementaux. Working Paper n°3, UCL Université Catholique de Louvain, (2003), - Recherche Google ». Consulté le : 7 mars 2023
- [11] - V. CHATAIN et P. GERMAIN, *Valorisation du biogaz et traitements épuratoires*. in Lavoisier Tec & Doc, no. Lavoisier Tec&Doc., (2008)
- [12] - L. BADEY, M. TORRIJOS, P. SOUSBIE, P. POUECH et F. BOSQUE, « La valorisation des coproduits de l'huilerie par méthanisation », *Ol. Corps Gras Lipides*, Vol. 19, N° 6 (nov. 2012), doi: 10.1051/ocl.2012.0483
- [13] - K. E. ADOU, O. A. ALLE, A. R. KOUAKOU, K. ADOUBY, P. DROGUI et R. D. TYAGI, « Anaerobic mono-digestion of wastewater from the main slaughterhouse in Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) : Evaluation of biogas potential and removal of organic pollution. », *J. Environ. Chem. Eng.*, Vol. 8, N° 3 (2020), doi: 10.1016/j.jece.2020.103770
- [14] - H. M. LO *et al.*, « Modeling biogas production from organic fraction of MSW co-digested with MSWI ashes in anaerobic bioreactors », *Bioresour. Technol.*, Vol. 101, N° 16 (août 2010) 6329 - 6335 p., doi: 10.1016/j.biortech.2010.03.048

- [15] - M. MACIAS-CORRAL *et al.*, « Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure », *Bioresour. Technol.*, Vol. 99, N° 17 (nov. 2008) 8288 - 8293 p., doi: 10.1016/j.biortech.2008.03.057
- [16] - P. NTAKIYIRUTA *et al.*, « Energetic Valorization of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* by Methane Production in an Anaerobic Co-digestion Process », *Sci. J. Energy Eng.*, Vol. 9, N° 4 (nov. 2021) 59 - 69 p., doi: 10.11648/j.sjee.20210904.13
- [17] - A. BOKOBANA *et al.*, « Traitement de déchets ménagers par co-compostage avec la légumineuse *Cassia occidentalis* L. et quelques adjuvants de proximité pour améliorer la qualité agronomique de composts », *Environ. Ingénierie Amp Dév.*, Vol., N° 73 (mai 2017)
- [18] - N. DIEUDONNE, « Caractérisation physicochimique des étangs du terrain de golf de Bujumbura de BuPajru : mbura », (2022)
- [19] - F. ADJAHATODE, A. S. M. KOBEBE, M. DAOUDA, A. HODONOU, B. GUEHOU et M. AÏNA, « Valorisation de la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) par la production de biocarburant : expérimentation », *Environ. Ingénierie Dév.*, LOMÉ, Vol., N° 72 (nov. 2016) 7787 p., doi : 10.4267/dechets-sciences-techniques.3445
- [20] - M. M. TCHICAMA, Z. ADAMOU, A. K. SAIDOU et L. M. MIJITABA, « Composting of the Urban Garbage : Assessment of the Nutrient Elements for the Plants, Case of Niamey in Niger », *Int. J. Sci. Eng. Sci.*, Vol. 2, N° 12 (déc. 2018), doi: 10.5281/zenodo.2540495
- [21] - D. RUCAKUMUGUFI, « Essai d'optimisation de la production du compost à partir du co-compostage des déchets solides ménagers organiques avec les déjections d'élevage », (juin 2023), Consulté le : 13 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://repository.ub.edu.bi/handle/123456789/467>
- [22] - F. CHARNAY, « Compostage des déchets urbains dans les pays en développement : élaboration d'une démarche méthodologique pour une production pérenne de compost », Thèse de doctorat, Limoges, (2005). Consulté le : 14 mars 2023. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.theses.fr/2005LIMO0035>
- [23] - E.-G. K. GNIMASSOUN, J. B. D. ETTIEN et D. MASSE, « Caractérisation des propriétés physico-chimiques et chimiques d'un compost issu d'un mélange de rafles de palmier et de fientes de volaille au Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol. 14, N° 1 (avr. 2020) 289 - 305 p., doi: 10.4314/ijbcs.v14i1.24
- [24] - I. ANGELIDAKI, L. ELLEGAARD et B. K. AHRING, « Modelling anaerobic codigestion of manure with olive oil mill effluent », *Water Sci. Technol.*, Vol. 36, N° 6 (janv. 1997) 263 - 270 p., doi: 10.1016/S0273-1223(97)00531-3
- [25] - N. BERNET, « principes et application de la digestion anaérobie pour la production d'Énergie », Colloque international sur la biodiversité Du 21 au 23 juillet 2015 à l'Université de Ngaoundéré, Cameroun, (2015)
- [26] - P. NTAKIYIRUTA, « Traitement tertiaire par phytoremédiation des eaux issues des stations d'épuration et valorisation énergétique des macrophytes (*Eichhornia crassipes* et *pistia stratiotes*) en biogaz », Thèse de de doctorat, Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Yamoussoukro (173P), (2021)
- [27] - L. BADEY, M. TORRIJOS, P. SOUSBIE, P. POUECH et F. BOSQUE, « La valorisation des coproduits de l'huilerie par méthanisation », *Ol. Corps Gras Lipides*, Vol. 19, N° 6 (nov. 2012) 358 - 369 p., doi: 10.1051/ocl.2012.0483
- [28] - L. BADEY, M. TORRIJOS, P. SOUSBIE, P. POUECH et F. BOSQUE, « La valorisation des coproduits de l'huilerie par méthanisation », *Ol. Corps Gras Lipides*, Vol. 19, N° 6 (nov. 2012) 358 - 369 p., doi: 10.1051/ocl.2012.0483

- [29] - K. E. ADOU, O. A. ALLE, A. R. KOUAKOU, K. ADOUBY, P. DROGUI et R. D. TYAGI, « Anaerobic mono-digestion of wastewater from the main slaughterhouse in Yamoussoukro (Côte d'Ivoire) : Evaluation of biogas potential and removal of organic pollution », *J. Environ. Chem. Eng.*, Vol. 8, N° 3 (juin 2020) 103770 p., doi: 10.1016/j.jece.2020.103770
- [30] - M. KOUAS, « Caractérisation cinétique de la biodégradation de substrats solides et application à l'optimisation et à la modélisation de la co-digestion », (2018)
- [31] - F. BELINE, R. GIRAULT, F. NAULEAU et G. BRIDOUX, « La co-digestion anaérobie des boues d'épuration et de déchets organiques d'origine périurbaine », *Sci. Eaux Territ.*, Vol. 12, N° 3 (2013) 54 - 57 p., doi: 10.3917/set.012.0054
- [32] - I. J. ONA, S. M. LOYA, H. O. AGOGO, M. S. IORUNGWA et R. OGAH, « Biogas Production from the Co-Digestion of Cornstalks with Cow Dung and Poultry Droppings », *J. Agric. Chem. Environ.*, Vol. 8, N° 3, Art. N° 3, (août 2019), doi: 10.4236/jacen.2019.83012