

Caractérisation énergétique du biogaz issu du son de maïs violet pour la production de l'électricité verte

Bi Guessan Armand KOUASSI^{1,2*}, Essi Kouadio Francis KRA³, Fransisco Kouadio KONAN^{4,5,6,7}, Boko AKA⁵ et B. HARTITI⁶

¹ Université Jean Lorougnon Guédé, UFR-Environnement, Laboratoire des Sciences et Technologie de l'Environnement (LSTE), BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

² Université d'Etat Hydrométéorologique de Russie, Département d'Hydro-Physique et Prévision Hydrologique, Laboratoire des Sciences de l'ingénieur, Av. Malohtinsky 98, Saint-Pétersbourg, Russie

³ Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny, Laboratoire d'Ingénierie Mécanique, Energétique et de Développement Durable, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

⁴ Ecole Normale Supérieure (ENS) Abidjan, Département des Sciences et Technologies, Laboratoire des Sciences Physiques Fondamentales et Appliquées, Equipe de recherche : Sol-gel, Matériaux, Energies Renouvelables et Environnement, 08 BP 10 Abidjan 08, Côte d'Ivoire

⁵ Université Nangui Abrogoua, IREN (Institut de Recherches sur les Energies Nouvelles) Laboratoire d'Energie Solaire et de Nanotechnologie (LESN), 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

⁶ Université Hassan II de Casablanca (UH2C), Laboratoire de Mathématiques et Sciences Physiques Appliquées aux Sciences de l'Ingénieur (MSPASI), FSTM, BP 146 Mohammedia 20650, Morocco

⁷ INP-HB, Unité Mixte de Recherche en Science et Technique de l'Ingénieur, LIEESE (Laboratoire d'Ingénierie Électronique, d'Électricité et des Systèmes Embarqués), BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire

(Reçu le 01 Décembre 2025 ; Accepté le 15 Mars 2026)

* Correspondance, courriel : kouass_biarmand@yahoo.fr

Résumé

La croissance démographique mondiale s'accompagne d'une augmentation de la demande en énergie. Face à ce besoin galopant, les réserves fossiles les plus utilisées que sont le pétrole, le charbon, et le gaz pour l'essentiel, et dont l'utilisation présente une menace pour l'environnement et le climat, risquent de s'épuiser. Une alternative énergétique est le biogaz obtenu par un processus de méthanisation. L'objectif de ce travail est d'évaluer le pouvoir énergétique du biogaz issu du résidu agricole qu'est le son de maïs violet et à le comparer aux pouvoirs calorifiques des ressources fossiles. L'approche méthodologique porte sur une digestion anaérobie de ce résidu dans un digesteur de 20 litres de capacité, les constituants du biogaz sont identifiés : 58 % de méthane (CH₄), environ 41 % de dioxyde de carbone (CO₂), environ 1,2 % d'oxygène (O₂) et environ 771 ppm d'hydrogène sulfuré (H₂S) sous forme de traces. Le pourcentage appréciable du combustible principal qu'est le méthane permet de mettre en évidence l'inflammabilité du biogaz issu du son de maïs violet. Les résultats obtenus avec le pourcentage en méthane et la chaleur de condensation de l'eau contenue dans les fumées montrent que des pouvoirs calorifiques inférieur (PCI) et supérieur (PCS) ont pour valeurs 5,961 kWh/Nm³ et 6,523 kWh/Nm³ respectivement. Ensuite, la valeur énergétique PCI du biogaz en équivalent énergétique est trouvée inférieure aux énergies des combustibles usuels. En définitive, l'estimation du pouvoir énergétique du biogaz issu du son de maïs violet démontre une source alternance énergétique prometteuse et respectueuse de l'environnement avec une force énergétique proche de celle des combustibles gazeux.

Mots-clés : biogaz, méthane, son de maïs violet, pouvoir calorifique, pouvoir énergétique.

Abstract

Energy characterization of biogas produced from purple corn bran for green electricity generation

Global population growth is associated with a continuous increase in energy demand. In the face of this rapidly rising demand, the most commonly used fossil energy resources—primarily oil, coal, and natural gas—whose exploitation poses serious threats to the environment and climate, are at risk of depletion. Biogas produced through anaerobic digestion represents a viable alternative energy source. The objective of this study is to assess the energy potential of biogas generated from an agricultural residue, namely purple corn bran, and to compare it with the calorific values of fossil fuels. The methodology is based on the anaerobic digestion of this residue in a 20-L laboratory-scale digester. The composition of the produced biogas was determined as 58 % methane (CH_4), approximately 41 % carbon dioxide (CO_2), about 1.2 % oxygen (O_2), and trace amounts of hydrogen sulfide (H_2S) at a concentration of approximately 771 ppm. The relatively high methane content, which is the main combustible component, clearly demonstrates the flammability of the biogas produced from purple corn bran. Based on the methane fraction and the latent heat of condensation of the water vapor present in the exhaust gases, the lower heating value (LHV) and higher heating value (HHV) were estimated at 5.961 kWh/Nm³ and 6.523 kWh/Nm³, respectively. Furthermore, the LHV-based energy content of the biogas was found to be lower than that of conventional fuels. Overall, the estimation of the energy potential of biogas derived from purple corn bran demonstrates that it is a promising and environmentally friendly alternative energy source, with an energy performance comparable to that of gaseous fossil fuels.

Keywords : *biogas, methane, purple corn bran, calorific value, energy potential.*

1. Introduction

Les sociétés modernes se tournent de plus en plus vers des sources d'énergie plus verte et respectueuse des codes liés aux politiques environnementales afin d'éviter l'épuisement des ressources naturelles [1]. En effet, les pollutions des sols, de l'eau, de l'air et des émissions de gaz à effet de serre sont à l'origine du changement du climat fruit du résultat de la mauvaise gestion des ressources naturelles par l'homme. Les gaz notamment, le gaz carbonique (CO_2) et les oxydes d'azote (NO_x) issus de l'utilisation des énergies fossiles en l'occurrence le pétrole, le gaz naturel et le charbon ont un rôle prépondérant dans le phénomène du réchauffement climatique de la planète [2]. Face à ces menaces grandissantes, il est indispensable d'opérer une transition des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) vers des énergies renouvelables entre autres l'éolien, la géothermie, le solaire, l'hydraulique et la biomasse [3]. Les énergies renouvelables participent à accroître l'indépendance et la sécurité énergétique car elles impactent positivement les gaz à effet de serre en remplaçant les énergies fossiles et réduisent significativement les émissions de gaz à effet de serre [2]. C'est dans ce sens que les gouvernants de l'Afrique de l'Ouest se sont tournés vers ces énergies renouvelables. Parmi ces procédés énergétiques renouvelable existants, la biomasse est perçue comme l'une des méthodes de production d'énergie les plus vulgarisée de par ces différents domaines d'application. En effet, les pays Africains en particulier la Côte d'Ivoire disposent de grandes quantités de résidus provenant de la production agricole estimée à environ 4,3 millions de tonnes d'équivalent pétrole par an [1]. Dans ce contexte, la valorisation des résidus agricoles telle que le maïs, abondants dans des localités comme Katiola au nord de la Côte d'Ivoire, représente une stratégie prometteuse pour produire des bioénergies renouvelables [4]. Les résidus de maïs, composés de biomasse lignocellulosique fermentescible, sont reconnus pour leur potentiel en production de biogaz via digestion anaérobie, processus qui permet la conversion de matières organiques en un gaz riche en méthane [5, 6]. Cependant, l'exploitation énergétique de ces résidus reste faible malgré

l'abondance de la ressource, notamment en Afrique subsaharienne. En particulier, le résidu de maïs, malgré son énorme potentiel de fermentation, fait rarement l'objet de valorisation dans le secteur énergétique. Des études récentes ont montré que la valorisation du résidu de maïs en biogaz peut répondre à la fois aux besoins énergétiques locaux et aux impératifs de gestion durable des déchets agricoles [4]. De plus, l'adoption de techniques avancées de traitement des substrats et de configuration des réacteurs est essentielle pour optimiser la production énergétique. Malgré ces avancées technologiques, des défis subsistent, notamment l'accès au financement, l'adaptabilité des biodigesteurs pour les petites exploitations et les coûts d'installation qui limitent l'adoption des systèmes de biogaz à l'échelle rurale [7]. Dans le cadre de la recherche et du développement des sources d'énergies renouvelables, la présente étude s'inscrit dans la dynamique sus-indiquée en visant à évaluer la production de biogaz à partir du son de maïs violet et à caractériser son potentiel énergétique, en vue de proposer une source d'énergie alternative adaptée aux populations rurales. Pour atteindre le but assigné, les objectifs spécifiques suivants seront traités :

- La production du biogaz fondé sur le son de maïs violet
- La mesure de la proportion de chaque constituant gazeux contenu dans le biogaz produit.
- La détermination de la quantité d'énergie produite par le biogaz issu du son de maïs suivi de sa comparaison avec les énergies de certains combustibles usuels.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Biogaz

L'énergie renouvelable est une source d'énergie inépuisable [2] ; elle est assujettie à l'environnement naturel, à l'insolation et même à l'aspect géothermique de la terre. L'utilisation de cette énergie n'entraîne aucune substance toxique et néfaste à l'environnement. Elle est capable de se régénérer par des procédés naturels [8]. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables en l'occurrence l'énergie éolienne, l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie hydraulique, l'énergie marine, l'énergie de la géothermie et l'énergie de la biomasse. En Côte d'Ivoire, la production d'énergie électrique est dépendante du gaz naturel à environ 70 % et l'hydroélectricité à 30 % (**Figure 1**). La production basée sur la biomasse (environ 0,8 %) est quasiment insignifiante à cause de la sous exploitation de la biomasse à des fins énergétiques [9].

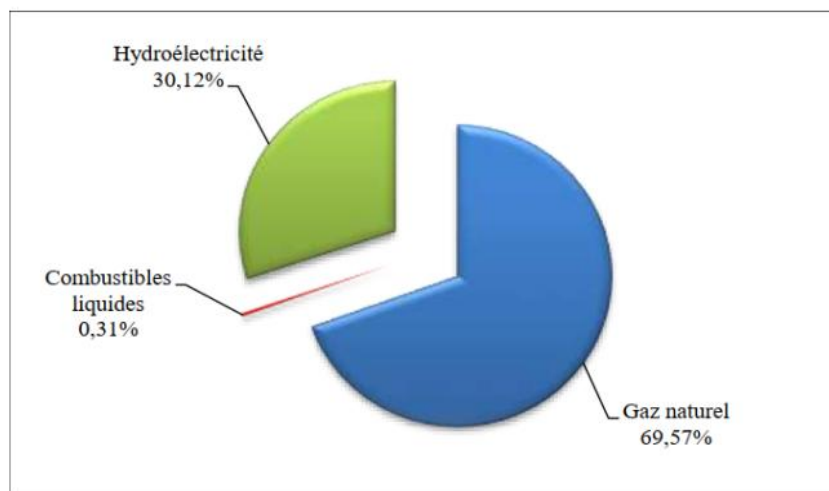


Figure 1 : Répartition de la production électrique par source énergétique en Côte d'Ivoire [1]

La biomasse est la matière organique biodégradable provenant des plantes, des micro-organismes et des animaux [1]. En effet, la valorisation de la biomasse pourrait jouer un rôle de choix dans le réchauffement climatique [2], car selon l'auteur, les scientifiques soutiennent que la valorisation des déchets organiques de même que celle des effluents industriels contribueraient à réduire de plus de 20 % les effets du réchauffement du climat. Ainsi la biomasse se compose essentiellement de tous les déchets forestiers, agricoles, aquatiques, organiques et les ordures ménagères tels que les boues de station d'épuration des eaux usées, les déchets des fruits et des légumes [1], etc. Chacun de ces types de biomasse constitue une source potentielle de production du biogaz. La **Figure 2** présente les différents procédés de conversion de la biomasse en énergie électrique.

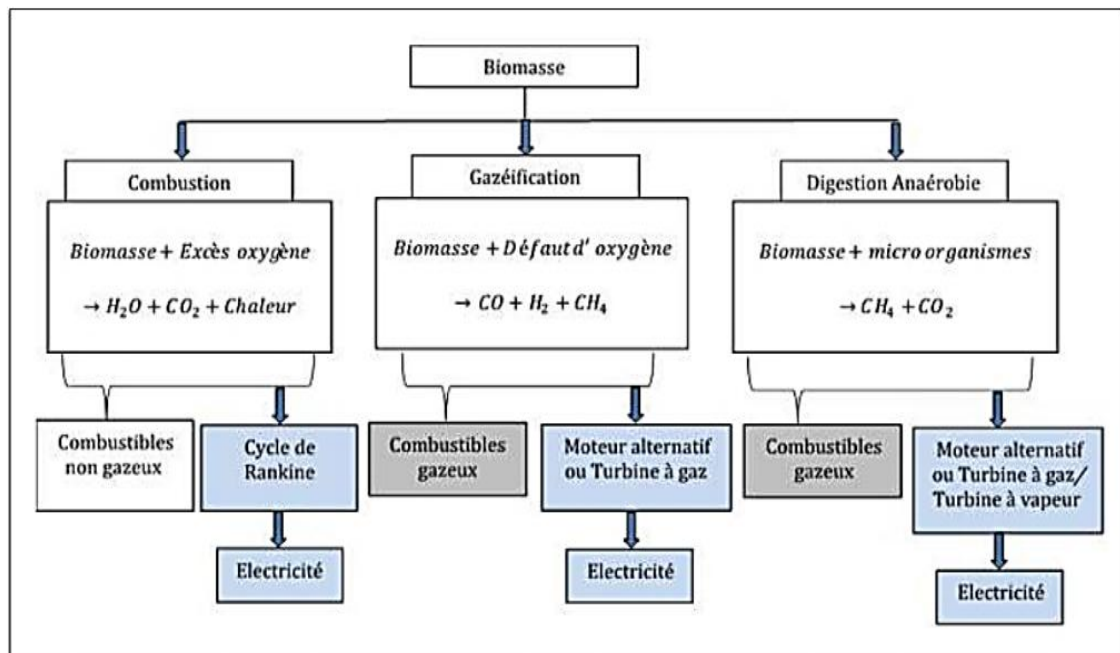


Figure 2 : Principaux procédés de conversion de la biomasse en électricité [1]

A partir de l'un des procédés de valorisation de la biomasse basé sur la fermentation dans un milieu dépourvu d'oxygène, l'on obtient du biogaz. Le biogaz à son tour est utilisé pour produire de la chaleur, servir de carburant automobile ou produire de l'électricité à partir des moteurs à gaz ou à vapeur [2]. Les différentes voies de valorisation du biogaz sont illustrées sur la **Figure 3** ci-dessous.

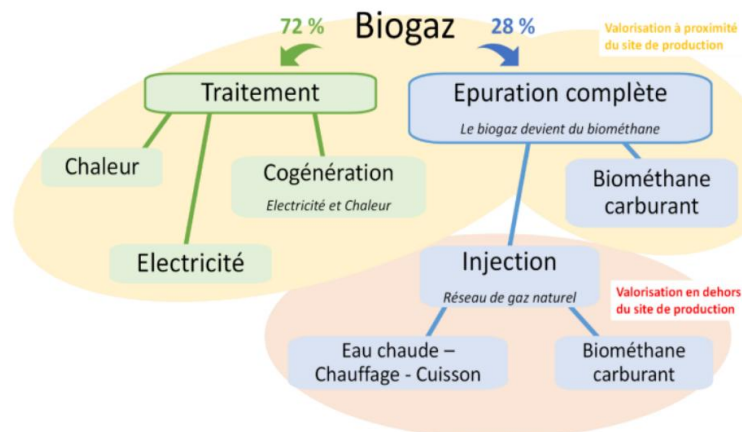


Figure 3 : Différentes voies de valorisation du biogaz [10]

La digestion anaérobie ou la méthanisation est un procédé qui consiste à transformer la matière organique par des micro-organismes en absence d'oxygène [12]. En effet, le biogaz se compose essentiellement de méthane (CH_4) de 50 à 75 % et d'environ 25 à 45 % de dioxyde de carbone (CO_2). Il contient également des gaz présents en faible concentration : le sulfure d'hydrogène (H_2S), la vapeur d'eau, l'ammoniac (NH_3), l'azote (N_2), le monoxyde de carbone (CO) [3].

2-1-2. Matériel technique et biologique

Le matériel technique se compose essentiellement de certains appareils de mesures indiqués par la (Figure 4).

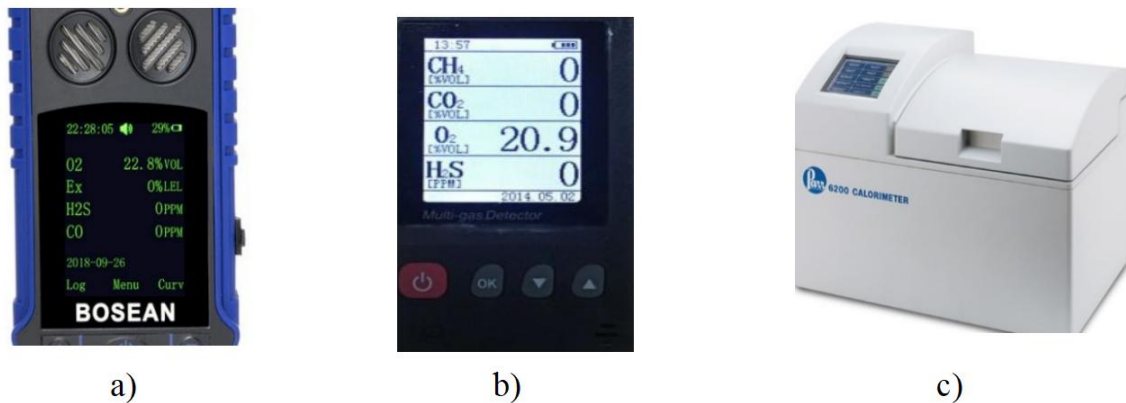


Figure 4 : Images des appareils de mesure (a) de l'Analyseur de gaz portatif BOSEAN, (b) de l'Analyseur de biogaz IRCD4 et (c) de la Bombe calorimétrique à oxygène 6200

De marque BOSEAN, le BH-4s portable multi (a) est un détecteur de gaz tels que le dioxygène (O_2) et le méthane (CH_4) dont les volumes sont donnés en pourcentage, l'hydrogène sulfuré (H_2S) et le monoxyde de carbone (CO) mesurés en partie par million (ppm), avec $1 \text{ ppm} = 1 \text{ mg/kg}$. L'analyseur de biogaz portable de modèle IRCD4 (b), conçu pour la surveillance et la mesure du biogaz permet d'identifier certains gaz tels que le méthane (CH_4), le dioxyde de carbone (CO_2), le dioxygène (O_2) dont les volumes sont donnés en pourcentage et l'hydrogène sulfuré (H_2S) dont le volume est mesuré en ppm. La bombe calorimétrique de modèle Parr 6200 (c) est utilisée pour mesurer le pouvoir calorifique en MJ/kg . Le matériel biologique (Figure 5a-d) se compose de « son de maïs violet » (a) et de l'inoculum (b). Ce dernier est constitué principalement de jus d'infusion de maïs violet, de bouse de porc et de l'eau (c). Cet ensemble biologique est introduit dans le digesteur (d) de type discontinu (Batch) de capacité en 20 L, qui est un bidon noir en matière Polychlorure de vinyle ayant pour accessoires un perfuseur médical, un PH-mètre et un gazomètre constitué de bidon d'eau minérale de 5L gradué en 400 mL.

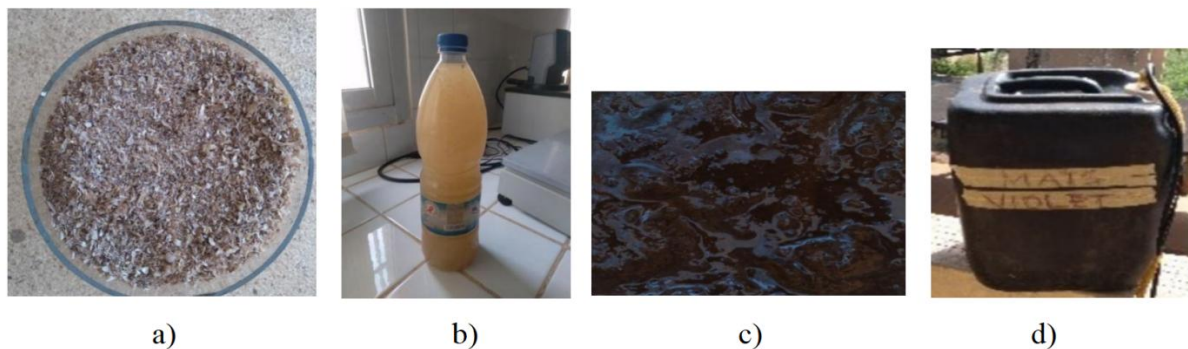


Figure 5 : Image du matériel biologique (a) de la coupole de maïs violet, (b) du jus d'infusion, (c) du mélange de déchets (vache, porc) avec de l'eau et (d) du digesteur type discontinu

2-1-3. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 *kg* de combustible solide ou liquide ou de 1 *m*³ de combustible gazeux mesuré dans les conditions normales (sous 1 atmosphère) [13]. Le comburant (en général l'air) de même que le combustible sont à 0° C. Le pouvoir calorifique d'un combustible gazeux peut s'exprimer en *kWh/Nm*³. Il existe deux types de pouvoir calorifique : le PCI (pouvoir calorifique inférieur) et le PCS (pouvoir calorifique supérieur). Le PCS se définit comme étant la quantité d'énergie dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible en considérant que la vapeur d'eau est condensée puis la chaleur est ensuite récupérée. Ensuite, le PCI a lieu lorsque l'eau qui résulte de la combustion des hydrocarbures et de l'hydrogène est considérée à l'état de vapeur dans les produits de combustion [14]. C'est l'énergie qui résulte de la combustion en ignorant l'énergie liée à la vaporisation de l'eau [13].

2-2. Méthodes

2-2-1. Technique de formation du biogaz contenant du méthane

Pour la charge du digesteur, un ensemble de matériel biologique a été introduit en respectant des proportions nécessaires à la méthanisation.

- Introduction d'une coupole de 535,5 *g* de son de maïs violet qui constitue le milieu réactionnel,
- Ajout de 3 *L* d'eau liquide et de 3 *L* de jus d'infusion dont le rôle est de faciliter la méthanisation grâce à l'introduction de micro-organismes méthanogènes qui accélèrent la formation du méthane dans le digesteur [11,15].
- Introduction d'un mélange pâteux de 1 *kg* de bouse de vache, de déchet de porc et de l'eau liquide.

L'ensemble est fermé pendant un cycle de fonctionnement pour maintenir le pH proche de la neutralité. Une période correspondant à la durée de production de gaz combustibles, allant de 30 à 180 *jours* est observée. La production du biogaz est dans la présente étude fondée sur la technique de la digestion anaérobie [2]. La présence effective du biogaz se manifeste par un grossissement des parois bien tendues du digesteur. Aussi, le test de transvasement du gaz devient-il concluant. Il consiste à ouvrir la conduite du biogaz et à recueillir dans un bidon intermédiaire rempli d'eau initialement, le volume de gaz par déplacement de niveau d'eau (*Figure 6*).



Figure 6 : Test de la présence de biogaz formé

2-2-2. Technique de la mesure des constituants du biogaz

L'utilisation de l'analyseur de gaz portatif est précédée de son calibrage qui se fait de manière professionnelle par le constructeur de l'appareil. Pour la prise de mesure des constituants, l'appareil est posé sur l'orifice d'ouverture du digesteur. Une fois mise en marche, il affiche les proportions des différents constituants gazeux qui composent le biogaz formé comme indiqué à l'écran de la **Figure 4**. Quant à l'analyseur de biogaz de modèle IRCD4, il est raccordé au digesteur par son ouverture grâce à un raccord qui fait le lien entre le digesteur et l'appareil de mesure. Les résultats sont ensuite affichés sur l'écran de l'appareil (**Figure 4**).

2-2-3. Technique de Calcul des pouvoirs calorifiques

La bombe calorimétrique 6200 est une enceinte métallique à volume constant. Elle reçoit dans le bain d'eau du calorimètre la chaleur de combustion (énergie thermique) d'un échantillon. La variation de température mesurée avec une résolution de 0,0001 °C permet de calculer l'énergie libérée avec une précision de 0,05-0,1 % [16].

$$q_{total} = C_{cal} \cdot \Delta T \quad (1)$$

ΔT étant l'élévation de température observée et C_{cal} la constante calorimétrique, c'est-à-dire l'équivalent énergie du système (J/°C). Elle est déterminée à partir d'un étalon de combustion connue : le benzoïque [16].

$$PCI \text{ ou } PCS = \frac{q_{corrigé}}{m_{échantillon}} \quad (2)$$

Le gaz combustible essentiellement recherché est le méthane (CH₄). Son PCS qui est celui du biogaz est calculé en s'appuyant sur la **Formule (3)** [13]. La différence entre le PCS et le PCI est fondée sur la chaleur de condensation de l'eau contenue dans les fumées. La **Relation (4)** est la **Formule** de calcul du PCI [17].

$$PCS - PCI = m(H_2O) \cdot Lv \quad (3)$$

$$PCI = 9,94 \times \% CH_4 \quad (4)$$

$m(H_2O)$ étant la masse de l'eau utilisée dans le digesteur en kg, Lv la chaleur latente de vaporisation de l'eau ($Lv = 2,258 \text{ MJ} / \text{kg}$) et $\%CH_4$ le pourcentage en méthane mesuré dans le biogaz.

La combustion de 1 m³ de méthane, engendre une température d'environ 1400°C avec un dégagement de chaleur compris entre 8500 et 9500 Kcal. La quantité de gaz varie en fonction du substrat fermenté. Elle part de 55 % à 75 % de CH₄ [18]. La **Figure 7** suivante présente les équivalences énergétiques de 1 m³ de CH₄.

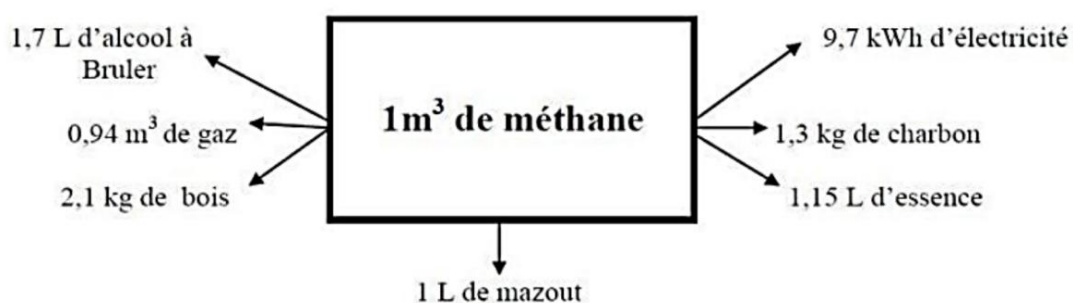


Figure 7 : Equivalences énergétiques de 1 m³ de CH₄ [12]

Lorsque le biogaz contient 70 % de CH_4 , son PCI est de $6,96 \text{ kWh/Nm}^3$, c'est-à-dire proportionnel à sa teneur en CH_4 et il est calculé comme suit : $9,94 \times 0,7 = 6,96 \text{ kWh/Nm}^3$ [17]. Où $9,94 \text{ kWh/Nm}^3$ représente le pouvoir calorifique du méthane [12]. Lorsque la flamme du méthane brûlé est bleue, la combustion est complète et on a un fort dégagement de chaleur [14].

2-2-4. Technique d'identification de la valeur énergétique du biogaz et comparaison

Considérant un digesteur de capacité X litres occupé par Y litres de digestat et Z litres de biogaz, le volume V litres de méthane qui y est présent se calcule à l'aide de la **Formule (5)** suivante :

$$V = \frac{n}{100} (X - Y) \quad \text{soit} \quad V = \frac{n}{100} \times Z \text{ litres} = n \cdot 10^{-5} \times Z \text{ m}^{-3} \quad (5)$$

n étant le pourcentage volumique occupée par le méthane.

S'appuyant sur l'équivalence énergétique présentée par la **Figure 4**, nous pouvons en déduire que Z litres de biogaz issu du son de maïs violet est l'équivalent de :

- $n \cdot 10^{-5} \times Z \times (1,7) \text{ L}$ d'alcool à brûler
- $n \cdot 10^{-5} \times Z \times (0,94) \text{ m}^{-3}$ de gaz
- $n \cdot 10^{-5} \times Z \times (2,1) \text{ kg}$ de bois
- $n \cdot 10^{-5} \times Z \times (9,7) \text{ kWh}$ d'électricité
- $n \cdot 10^{-5} \times Z \times (1,3) \text{ kg}$ de charbon
- $n \cdot 10^{-5} \times Z \times (1,15) \text{ L}$ d'essence
- $n \cdot 10^{-5} \times Z \times (1) \text{ L}$ de mazout

Il s'agit maintenant d'établir le positionnement de l'énergie E_1 (maïs) issue de la biomasse utilisée comme fondement de la présente étude, à côté de celle E_2 (λ) fondée sur un combustible quelconque λ cité par la **Figure 4**. Si λ correspond à l'essence, alors selon la **Figure 4**, on a l'égalité suivante :

$$1 \text{ m}^3 \text{ de } \text{CH}_4 = 1,15 \text{ L d'essence}$$

C'est-à-dire :

$$\frac{100}{n} \text{ m}^3 \text{ de biogaz issu du son de maïs violet équivaut à } 1,15 \text{ L} = 1,15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ d'essence}$$

Ou encore

$$\frac{100}{n} E_1(\text{maïs}) = 1,15 \cdot 10^{-3} E_2(\lambda)$$

Ainsi le coefficient $\xi = 1,15$ rattaché à l'essence est tel que

$$\frac{100}{n} E_1(\text{maïs}) = 10^{-3} \xi E_2(\lambda)$$

Soit le rapport :

$$\frac{E_1(\text{maïs})}{E_2(\lambda)} = \frac{10^{-3}}{100} n \cdot \xi = n \cdot 10^{-5} \xi \quad (6)$$

Et il s'en suit la conclusion suivante :

- Si $(n \cdot 10^{-5} \xi) < 1$ alors l'énergie E_1 (maïs) issue du son de maïs violet est inférieure à E_2 (λ) qui est celle issue du combustible λ
- Si $(n \cdot 10^{-5} \xi) > 1$ alors l'énergie E_1 (maïs) issue du son de maïs violet est supérieure à E_2 (λ).

3. Résultats

3-1. Test d'inflammabilité

Après la charge du digesteur dans le respect des proportions par constituant, la formation du biogaz est réellement constatée dès le quatrième jour. Cependant, le test de transvasement n'est concluant qu'une semaine après le mélange. Le biogaz formé contient alors plusieurs constituants gazeux à des proportions différentes. La présence du gaz combustible CH₄ se vérifie 30 jours après la charge du digesteur, grâce au test flamme (*Figure 8*).



Figure 8 : *Expérience de test flamme*

La flamme jaune montre qu'il n'y a pas suffisamment de dioxygène lors de la combustion. Le méthane brûle avec une flamme jaune par conséquent la combustion est dite incomplète. Il y a donc présence de gaz combustible ; il s'agit du méthane contenu dans le biogaz issu du son de maïs violet.

3-2. Proportion des constituants

A l'aide des deux appareils « Analyseur de gaz portatif BOSEAN » et « Analyseur de biogaz de modèle IRCD4 », les mesures des constituants gazeux contenus dans le biogaz issu du son de maïs violet sont obtenus par un contact direct avec ces appareils techniques. Elles sont présentées dans le *Tableau 1* selon leurs proportions respectives.

Tableau 1 : *Mesures des constituants du biogaz*

Composition Durée (semaines)	CH ₄ (% des volumes)	CO ₂ (% des volumes)	O ₂ (% des volumes)	H ₂ S (ppm)	CO (ppm)
Semaine 1	0	41	1,3	1092	-
Semaine 2	0	41	1,2	771	-
Semaine 3	-	12	13,6	268	-
Semaine 4	58	-	-	144	114

Le *Tableau 1* montre que le biogaz issu du son de maïs violet se compose essentiellement, par ordre croissant, de proportion, des gaz suivants : CH₄, CO₂, O₂, H₂S et CO. La quantité de méthane produite lors de la quatrième semaine de la méthanisation est donc estimée à 58 % du volume total de biogaz présent dans le digesteur, soit le pourcentage volumique noté $n = 58$.

3-3. Pouvoirs calorifiques du biogaz

Les PCI et PCS du biogaz sont mesurés à l'aide de la bombe calorimétrique. Cela constitue les valeurs expérimentales (PC_{exp}). De plus, leurs valeurs théoriques ($PC_{théo}$) calculées à l'aide des **Formules (3) et (4)** sont aussi présentées dans le **Tableau 2**, dans le but de vérifier la conformité des résultats.

Tableau 2 : Pouvoirs calorifiques supérieur (PCS) et inférieur (PCI) du son de maïs violet

Pouvoirs Calorifiques	PC_{exp}	$PC_{théo}$	PC_{moy}	$\frac{ABS(PC_{théo} - PC_{exp})}{PC_{moy}}$
PCI (kWh/Nm ³)	5,765	5,961	5,863	3,34 %
PCS (kWh/Nm ³)	6,477	6,523	6,500	0,71 %
$m(H_2O) \cdot Lv$ (kWh/Nm ³)	0,712	0,562	0,637	0,23 %

$ABS(x)$ indique la valeur absolue de x , et $PC_{moy} = \frac{(PC_{exp} + PC_{théo})}{2}$

Les valeurs théoriques des PCI et PCS sont quasi identiques à leurs valeurs expérimentales correspondantes, les écarts étant estimés respectivement à 3,34 % et 0,71 %. Ces faibles écarts témoignent de la fiabilité de la méthode de calcul adoptée dans ce travail. Expérimentalement et théoriquement les deux valeurs sont très proches à 97 %. Aussi, selon la **Formule (3)**, les chaleurs de condensation de l'eau contenues dans les fumées s'expriment-elles par $m(H_2O)Lv$ et leurs valeurs sont celles de $(PCS - PCI)$. Expérimentalement et théoriquement les deux valeurs sont très proches à 77,00 %.

3-4. Comparaison de la valeur énergétique du biogaz

Pour une masse de 535 g de maïs violet utilisé pour l'expérimentation, le mélange des composants biologiques donne :

$$X = 20 L$$

$$Y = 9,25 L$$

$$Z = 10,75 L$$

On déduit que le volume de méthane présent est $V = 6,235 \cdot 10^{-3} m^3$ de CH_4 . En somme, 535 g = 0,535 kg de son de maïs violet produit $6,235 \cdot 10^{-3} m^3$ de CH_4 . Dans le but de considérer une quantité autre que 0,535 kg de son de maïs violet, le **Tableau 3** établit la proportionnalité entre les mesures correspondantes.

Tableau 3 : Proportionnalité entre les mesures quantitatives issues de la Figure 4

kg de son de maïs violet	m ³ de CH ₄	Litres d' alcool à bruler	m ³ de gaz	kg de bois	kg de charbon	Litres d' essence	Litres de mazout	kWh d' électricité
0,535	$6,23 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-2}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$	$6,05 \cdot 10^{-2}$
1	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$	$1,34 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-1}$
85,81	1	1,7	0,94	2,1	1,3	1,15	1,0	9,7

Pour exemple, on lit : 1 kg de son de maïs violet produit 0,0117 m³ de CH₄ et une telle énergie équivaut à $1,34 \cdot 10^{-2}$ Litres d'essence. A partir des différents résultats obtenus, le **Tableau 4** qui suit nous montre la comparaison de l'énergie issue du son de maïs violet à celle du combustible λ .

Tableau 4 : Comparaison de l'énergie issue du son de maïs violet à celle du combustible λ

Combustible λ	1,7 litres d' alcool à brûler	0,94 m ³ de gaz	2,1 kg de bois	9,7 kWh d' électricité	1,3 kg de charbon	1,15 litres d' essence	1 litres de mazout
Coefficient ξ	1,7	0,94	2,1	9,7	1,3	1,15	1
$n \cdot 10^{-5} \xi$	$9,86 \cdot 10^{-4}$	$5,45 \cdot 10^{-4}$	$12,18 \cdot 10^{-4}$	$56,26 \cdot 10^{-4}$	$7,54 \cdot 10^{-4}$	$6,67 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$
$\frac{E_1(\text{maïs})}{E_2(\lambda)}$	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1

Le **Tableau 4** montre que le rapport $\frac{E_1(\text{maïs})}{E_2(\lambda)} < 1$. Ce résultat signifie que l'énergie produite à partir du biogaz fondé sur le son de maïs violet reste dans la plupart des cas inférieur à celle des combustibles. En particulier les PCI de l'alcool à brûler, du gaz, de l'essence et du mazout sont supérieurs à celui du biogaz étudié (**Figure 9**).

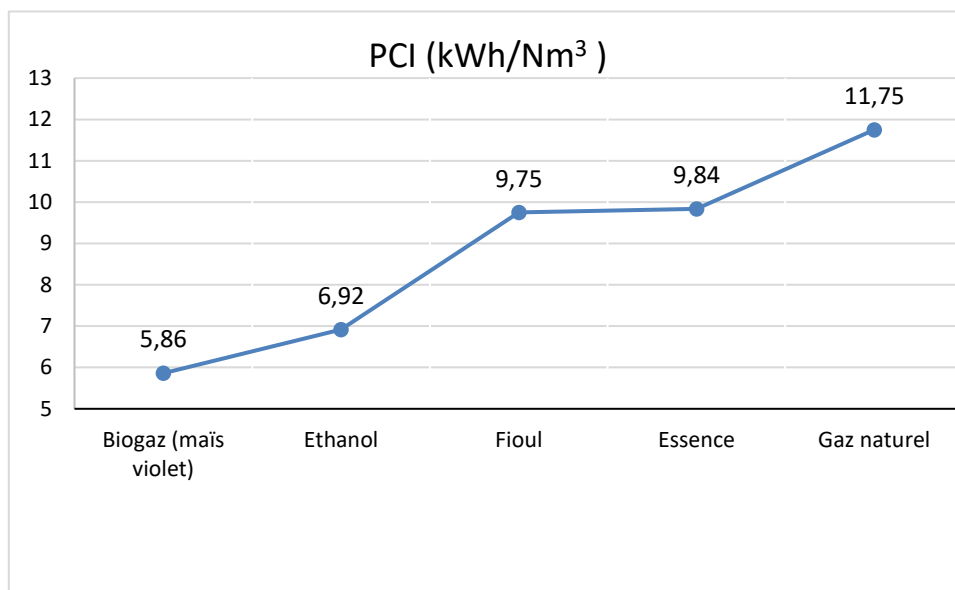


Figure 9 : PCI du biogaz sous comparaison

4. Discussion

4-1. Test d'inflammabilité

Un test d'inflammabilité atteste la combustion du biogaz. Il est indispensable que la proportion en méthane soit supérieure à 50 % pour l'inflammabilité du biogaz [17]. La proportion en méthane relativement élevée (58 %) a produit une flamme jaune indiquant ainsi une combustion incomplète du méthane contenu dans le biogaz issu du son de maïs violet.

4-2. Etude de la technique utilisée pour la production du biogaz

Les intervalles de mesures en teneurs moyennes des principaux composants du biogaz pour différents résidus, en particulier pour les résidus agricoles sont : CH_4 (45-70%), CO_2 (30-55 %), O_2 (0-2 %), H_2S (0,005-0,5 %) [14, 16]. Ainsi, dans cette étude, les proportions mesurées par constituant gazeux sont en accord avec ces indications. Notons que la composition du biogaz est dépendante des déchets utilisés dans le réacteur autrement dit elle varie en fonction des déchets organiques utilisés pour la fermentation à l'intérieur du digesteur.

4-3. Proportion des constituants

Le taux de méthane produit durant les 04 semaines croît avec temps. De plus le type continu de digesteur doté d'un système de contrôle continu au cours de la méthanisation est préférable. Ces affirmations constatées dans le **Tableau 1** corroborent avec les résultats issus des modèles cinétiques [20] (modèles sigmoïdes comme Gompertz ou Richards) pour décrire l'augmentation de la production de méthane au fil du temps dans des digesteurs anaérobies co-digérant déjections animales et déchets agricoles. Ils montrent que la courbe de production cumulée de méthane augmente avec le temps (d'abord une phase initiale lente, ensuite une phase rapide, enfin un plateau à la fin) ;

4-4. Pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique est un facteur indispensable dans le processus de combustion directe. De ce fait, la biomasse (son de maïs) possédant le pouvoir calorifique élevé est adapté au système de combustion directe [1]. En effet, la valeur du pouvoir calorifique du biogaz est fonction de sa densité en méthane [8]. Dans notre cas, les pouvoirs calorifiques du son de maïs violet varient entre 5,765 kWh/Nm³ et 6,523 kWh/Nm³. Ces valeurs sont influencées par la présence de l'oxygène qui est capable de ralentir le processus de méthanisation. Toutefois cela n'est pas immédiat et totale car une forte proportion en oxygène ralentit le développement des micro-organismes responsable de la méthanisation [21]. Ce constat est évident à l'issue de la présente étude qui s'est opérée par utilisation d'un digesteur discontinu, injectant à chaque prise de mesure une forte quantité d'oxygène dans le digesteur. Le pouvoir calorifique de notre biogaz issu du son de maïs violet peut avoir une valeur optimisée si nous procédons à son épuration. Ce qui consiste à éliminer les impuretés que contient le biogaz : le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, l'hydrogène sulfuré et l'eau. Dès lors, on verra sa proportion en méthane augmentée pouvant atteindre jusqu'à 95% de méthane (CH₄). Aussi, peut-on constater que l'énergie produite à partir du son de maïs violet reste inférieur à celles de la plupart des énergies issues des combustibles gazeux. En effet, le PCI (biogaz) est inférieur à ceux des combustibles inscrits dans le **Tableau 4**. Les facteurs en cause sont le type de digesteur (Batch) et le manque d'épuration par un procédé spécifique du biogaz obtenu.

5. Conclusion

La biomasse est l'une des sources énergétiques utilisable dans de nombreuses applications. De ce fait, la présente étude a mis en valeur le biogaz obtenu à partir du résidu agricole qu'est le « son de maïs violet », abondant dans la zone de Katiola (Côte d'Ivoire). La méthode de production du méthane est la digestion anaérobie de 0,535 kg de « son de maïs violet ». Sur un volume total de biogaz produit (10,75 L), 58 % représente le volume de méthane, soit $6,235 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ de CH}_4$. L'inflammation du biogaz produit est mise en évidence grâce au méthane qui est le porteur de son pouvoir énergétique parmi plusieurs de ses constituants gazeux : CH₄, CO₂, O₂, H₂S et CO. Les pouvoirs calorifiques inférieurs et supérieurs (PCI et PCS) sont respectivement 5,961 kWh/Nm³ et 6,523 kWh/Nm³. Le PCI du biogaz permet de le positionner au rang des gaz dont la force calorifique reste appréciable, bien qu'inférieure à celle des combustibles gazeux : Gaz naturel, Essence, Fioul et Ethanol.

Références

- [1] - B. T. D. ZINLA, “ Etude de la production d’électricité à partir d’une centrale thermique de 5MW utilisant de la biomasse : Cas des résidus des cultures de riz, café et cacao provenant de Kodaya”, Thèse de Doctorat, Génie Energétique et Environnement. Institut National Polytechnique Félix HOUPOUET BOIGNY de Yamoussoukro, Côte d’Ivoire, (2022) 160 p.
- [2] - M. Y. BALDE, “ Modélisation et estimation de digesteurs anaérobies pour la dépollution de déchets et la production d’énergie”, Thèse de Doctorat, Sciences et Technologies de l’information et de la communication, STIC, Automatique, Université Paris-Saclay et Université Gamal Abdel Nasser de Conakry, (2022) 126 p.
- [3] - A. BOUTOUTE, “ Modélisation d’un réacteur de méthanisation en voie sèche et étude du traitement in-situ de l’ammoniac”, Thèse de Doctorat, Génie des Procédés et de l’Environnement, Institut National Polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse, Toulouse, France, (2022) 241 p.
- [4] - R. KAMUSOKO et P. MUKUMBA, Valorization of Maize Stover into Biogas for Heat and Power Generation : A South African Perspective. *Fermentation*, 11 (2025) 338
- [5] - K. JINDO, GHA, Y. SAWADA and H. LANGEVELD, Assessment of trade-off balance of maize stover use for bioenergy and soil erosion mitigation in Western Kenya, *Front. Sustain. Food Syst.*, 9 (2025) 1409457
- [6] - F. PIADEH, I. OFFIE, K. BEHZADIAN, J. P. RIZZUTO, A. BYWATER, J. R. CÓRDOBA-PACHÓN and M. Walker, A critical review for the impact of anaerobic digestion on the sustainable development goals. *Journal of Environmental Management*, 349 (2024) 119458
- [7] - A. ROOPNARAIN, H. RAMA, B. NDABA, M. BELLO-AKINOSHO, E. BAMUZA-PEMU and R. ADELEKE, Unravelling the anaerobic digestion ‘black box’: biotechnological approaches for process optimization. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 152 (2021) 111717
- [8] - P. AGOGNON, S. ADJAHOSSOU, A. N. M. GBAGUIDI et D. KPADONOU, Valorisation des sous-produits issus de la transformation de l’Ananas comosus L. Merrill : Etat de l’art, *African Scientific Journal*, A paraître, 3 (20) (2023)
- [9] - IFDD (Institut de la Francophonie pour le Développement Durable), Système d’Information Énergétique de l’UEMOA — Chiffres clés : Côte d’Ivoire. Organisation Internationale de la Francophonie, (2019) 20 p.
- [10] - M. POSER, “ Procédés de traitement de l’ammoniac dans l’air et du sulfure d’hydrogène dans le biogaz. Application aux élevages porcins”, Thèse de Doctorat, chimie, Procédés et Environnement, Sciences de la Matière, des Molécules et Matériaux, Ecole Nationale Supérieure de Chimie Rennes, France, (2023) 264 p.
- [11] - I. MEHREZ, “ Augmentation du rendement de biogaz d’une biomasse lignocellulosique (déchets de palmiers dattiers) par prétraitement”, Thèse de Doctorat, Génie de l’environnement et sciences des matériaux, Département des Sciences de la matière, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Ahmed Draia Adrar, Algérie, (2022) 141 p.
- [12] - Y. A. ÇENGEL and M. A. BOLES, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw-Hill Education, (2015) (8^e éd.) 1024 p.
- [13] - Y. M’SADAK et A. BEN M’BAREK, Performances environnementales et énergétiques de la biométhanisation appliquée aux déjections bovines dans le contexte tunisien. *Algerian journal of arid environment*, 5 (1) (2015) 76 - 91
- [14] - M. J. MORAN, H. N. SHAPIRO, D. D. BOETTNER and M. B. BAILEY, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 9th ed. Hoboken, NJ: Wiley, (2018)

- [15] - F. ZHEN, T. XING, L. LI, Y. SUN et H. ZHANG, Optimisation de la production de méthane lors de la digestion anaérobie discontinue de la paille de maïs par ajustement de la teneur en matières sèches totales et du rapport substrat/inoculum basé sur la cinétique. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 17 (1) (2024) 225 - 231
- [16] - Parr Instrument Company, 6200 Calorimeter Operating Instruction Manual, Operating Instruction Manual No. 442M, Moline, IL, USA : Parr Instrument Company, (2010)
- [17] - K. HADRI, A. BOULAL and N. CHEIKH, Ethanol Production by *Balanites aegyptiaca* Fruits Valorization in the Adrar Region of Algeria, *Journal of Renewable Energies*, 1 (1) (2022) 109 - 115
- [18] - E. ONURSAL, H. OECHSNER and K. EKINCI, Biogas Production Potential of Rose Oil Processing Wastes and Quail Manure in Turkiye : Assessment by Hohenheim Batch Test. *Journal of Agricultural Machinery Science*, 7 (4) (2011) 393 - 398
- [19] - E. WANTZ, “ Epuration du biogaz à la ferme pour la production de biométhane : développement d’un procédé innovant par lavage à l’eau sous pression”, Thèse de Doctorat, Génie des Procédés et de l’Environnement, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Ecole doctorale : MEGEP-Mécanique, Energétique, Génie civil, Procédés, Université de Toulouse, France, (2023) 305 p.
- [20] - H. ZHANG, D. AN, Y. CAO, Y. TIAN and J. HE, Modeling the Methane Production Kinetics of Anaerobic Co-Digestion of Agricultural Wastes Using Sigmoidal Functions, *Energies*, 14 (2) (2021) 258 p.
- [21] - E. S. ROSAS-MENDOZA, A. ALVARADO-VALLEJO, N. A. VALLEJO-CANTÚ, R. SNELL-CASTRO, S. MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ and A. ALVARADO-LASSMAN, Batch and Semi-Continuous Anaerobic Digestion of Industrial Solid Citrus Waste for the Production of Bioenergy, *Processes*, 9 (4) (2021) 648 p.