

Participation de la République Démocratique du Congo dans la Lutte Contre la Déforestation par la Production et l'Utilisation à Domicile de Biogaz dans les Milieux Ruraux

Stanislas Maneno Saidi¹, Serge Kambale Bahati¹, Steven Kasereka Mulemberu²,
Mwenge Kasereka Mapendo³, Prof. Tondozi Keto⁴

Assistant Chercheur¹ Centre de Recherche en Géophysique
Assistant^{1,2} et Assistant de recherche³

Institut du Bâtiment et des Travaux Publics, IBTP/Butembo
Département d'attache, urbanisme

Département d'attache, Centre de Recherche du Bâtiment et des Travaux Publics
Professeur⁴

Centre de Recherche en Géophysique et Université de Kinshasa, faculté des Sciences, Département de physique.



Résumé – Jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle, l'expansion de l'homme s'est faite en utilisant l'énergie des animaux, du vent, de l'eau et du bois. Ce développement n'était pas durable car, il entraînait la déforestation. L'apparition des machines avec l'ère industrielle a relancé la croissance démographique et la demande en énergie. La deuxième moitié du 20^{ème} siècle a vu le pétrole s'installer comme énergie reine, suivi du gaz naturel. Parallèlement, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables se sont développées.

Parmi les énergies renouvelables, le biogaz est également l'un des nouveaux acteurs. Il est produit de plusieurs manières dont certains sont assistés, c'est le cas de la production par fermentation des biomasses dans les digesteurs.

Les biomasses utilisées dans ce procédé sont : les déchets solides urbains et industriels, les eaux usées, les sous-produits agricoles, les déchets d'abattoirs... ces substrats subissent cinq types de réactions de fermentation dont quatre aboutissent à la formation de biogaz et une autre en crée l'inhibition.

Le gaz obtenu présente quelques caractéristiques à l'état brut qui perturbe sa bonne utilisation comme tel, voilà pourquoi il passe à la purification, qui se fait soit pendant la fermentation ou après la production, donc, dans les filtres.

Le biogaz épuré peut être utilisé dans les différents domaines de la vie demandant la présence d'énergie. Pour le cas des milieux ruraux, il est utilisé pour la cuisson et l'éclairage des ménages. Le biogaz participe à la lutte contre la déforestation et le réchauffement climatique ; voilà pourquoi il est important d'installer les micros digesteurs dans les ménages où le courant électrique est quasiment inexistant.

Pendant la production, il se crée le résidu communément appelé digestat. Ce dernier est nécessaire dans le domaine agricole car, il est utilisé comme fertilisant bio. Son épandage dans les plantations produit un rendement non négligeable.

Mots clés – Biogaz, Digesteur, Déforestation, Milieux Ruraux, Digestat.

Abstract – Until the end of 18th century, the expansion of man was made using the energy of animals, wind, water and wood. This development was not sustainable because it led to deforestation. The appearance of machines with the industrial age revived population growth and demand for energy. The second half of the 20th century saw oil take hold as the main energy. Followed by natural gas. At the same time, nuclear energy and renewable energies have developed.

Among renewable energies, biogas is also one of the new energy players. It is produced in several ways, some of which are assisted, such as the production by fermentation of biomasses in digesters.

The biomasses used in this process are: solid urban and industrial waste, wastewater, agricultural by-products, slaughterhouse waste, etc. these substrates undergo five types of fermentation reactions, four of which result in the formation of biogas and another creates its inhibition.

The gas obtained exhibits some characteristics in the raw state which disrupts its proper use as such that is why it passes to the purification which is done either during fermentation or after production, therefore, in the filters.

The purified biogas can be used in different areas of life requiring the presence of energy. In the case of rural areas, it is used for cooking and lighting homes. Biogas contributes to the fight against deforestation and global warming; this is why it is important to install micro digesters in households where the electric current is almost non-existent.

During production, the residue commonly called digestate is created. The latter is necessary in the agricultural field because it is used as an organic fertilizer. Its spreading on plantation produces a significant yield.

Keywords – Biogas, Digester, Deforestation, Rural Areas, Digestate.

Introduction

Le développement durable est un développement qui répond au besoin présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (définitions données dans le rapport Brundtland 1987).

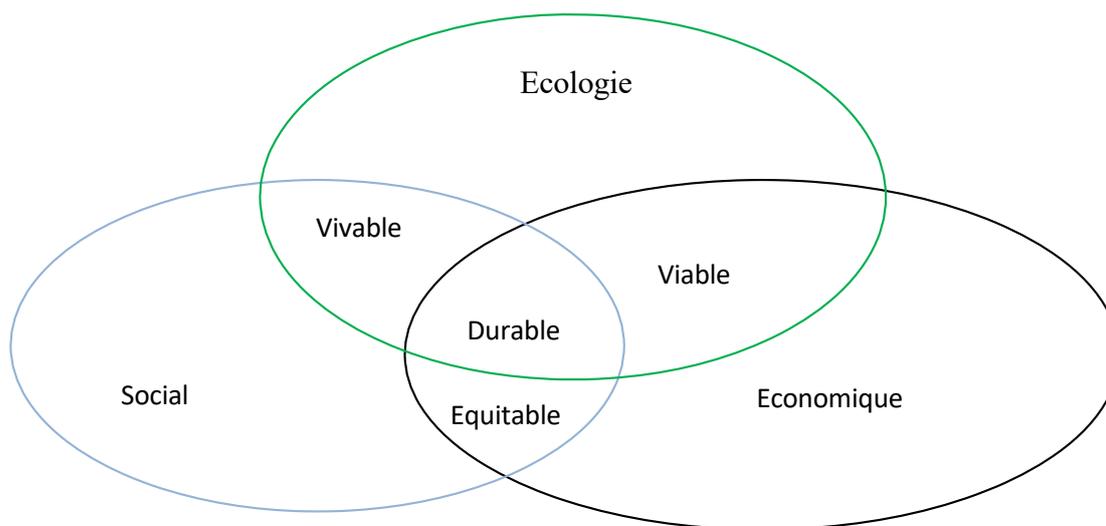


Schéma 1. Concept de développement durable

Ce développement est faisable grâce à la conjugaison de plusieurs domaines dont les énergies renouvelables. Le terme énergie renouvelable (ER) désigne une source d'énergie dont le renouvellement est suffisamment rapide pour être inépuisable à l'échelle de temps humain.

Le rapport Observ'ER 2006 considère comme l'énergie renouvelable a comme sources suivantes :

- L'éolien ;
- Le photovoltaïque ;
- Le micro hydraulique (<10 MW) ;
- La biomasse solide ;
- La géothermie ;
- L'hélio thermodynamique ;
- L'énergie marine ;
- Le biocarburant ;
- Le biogaz.

De ces sources d'énergie, nous nous intéressons du biogaz, car il provient de biomasse [1].

On inclut sous l'appellation biomasse, une grande variété de matériaux :

- Déchets verts de l'agriculture et de la sylviculture ;
- Fraction fermentescible des ordures ménagères brutes ;
- Bois ;
- Cultures énergétiques agricoles ;
- Rejets d'élevage ;
- Rejet des industries agro-alimentaires (IAA), papèterie, tanneries...

Pratiquement, tous les déchets organiques sont méthanisables (sauf les déchets ligneux).

Dans ce travail, nous essayons essentiellement de comprendre et d'expliquer la dynamique des processus liés à la production du biogaz et l'impact de ce dernier dans le cadre de la conservation des forêts par l'utilisation du biogaz comme source d'énergie dans les cuissons et l'éclairage des ménages dans les milieux ruraux où le courant électrique est inexistant.

Quelques définitions :

- **Biogaz** : est un mélange gazeux produit au cours de la dégradation en anaérobie de matière organique.
- **Biomasse** : est une matière organique d'origine végétale (micro-algues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignon utilisable comme source d'énergie (bioénergie)).
- **Energie renouvelable** : est une source d'énergie dont le renouvellement est suffisamment rapide pour être inépuisable à l'échelle de temps humains.
- **Digesteur** : est le résisteur dans lequel se déroule la fermentation.

- **Pré-fosse** : est un récipient qui sert à stocker des substrats.
- **Gazomètre** : est l'enceinte de stockage du biogaz.
- **Fosse de digestat** : est un couvercle en béton-armé.
- **Charge organique** : est le débit d'alimentation d'un digesteur en matière fraîche.
- **Temps de rétention** : est un procédé de transfert à l'échelle industrielle en raison de son impact du point de vue techno-économique. [2]
- **Composition** : est la forme de traitement aérobie des déchets organiques.

I. Problématique

La planète est menacée suite aux émissions des gaz à effet de serre et la déforestation où nous luttons pour la rendre heureuse à partir du biogaz ; voilà pourquoi quelques questions s'imposent, à savoir plus.

- Que faut-il faire pour produire de l'énergie propre ?
- Comment peut-on transformer les matières organiques à l'énergie électrique ?
- Quelles sont les matières qui nous serviront d'obtenir l'énergie après expérimentation ?
- Faudra-t-il conserver la matière de biomasse à l'air libre ?

Dans l'hypothèse de répondre à ces préoccupations, nous proposons ce qui suit :

- Il faut créer un service de collecte des matières organiques afin de produire de l'énergie propre.
- Pour transformer, il faut appliquer la technologie actuelle pour l'aménagement de l'énergie électrique à partir des plusieurs composantes des déchets (animales, agricoles, etc.)
- Les matières qui nous serviront sont les papayes, le lisier fraise de vache (bouse), feuille de patate douce et autres matières, ...
- Il ne faut jamais conserver à l'air libre une fois à contact avec celui-ci, il perd sa concentration pour une bonne énergie.

Historique

L'autonomisation de l'énergie a été une préoccupation de l'homme depuis la nuit de temps. Voilà pourquoi Monsieur Van Lemond vers 1630 avait découvert que la fermentation de matière organique dégage du gaz inflammable.

En 1776, volta (IT) découvre le méthane dans le gaz de marais.

Dès les années 1800, Dalton, Henry et Davy établissent la formule chimique du gaz inflammable comme étant du méthane et 78 ans après, Wolfe confirme cette composition.

En 1808, Davy (GB) expérimente la fermentation du fumier. Il produit du biogaz et identifie lui aussi le méthane.

Après cette découverte, il y a maintenant la production assistée de cette énergie à partir des digesteurs et les plus anciens digesteurs connus sont ceux de la ville d'Exeter en Angleterre

(1895) qui utilise le biogaz comme gaz d'éclairage de la léproserie de Mutanga près de Bombay (1897).

Dans les années 1940, on s'aperçoit que l'ajout de résidus gras augmente la production de biogaz.

Jusqu'en 1973, la majorité des installations n'utilisent le biogaz que pour le chauffage des digesteurs et parfois des locaux techniques.

A partir des années 1980, la cogénération de chaleur et d'électricité se développe fortement.

La méthanisation des déjections d'élevage a connu divers cycles de développement : dans les années 40, puis 50, ensuite pendant la crise du pétrole (1973 – 1985). [3].

1. Méthode et technique

Ce travail a été réalisé par plusieurs méthodes et techniques de conservation des produits bio-organiques (autrement-dit, déchets énergétiques).

Ce travail nous a permis d'interviewer la population quant à la conséquence de l'utilisation de bois domestique et savoir comment le réduire au profit du gaz méthane.

Pour mettre ce travail au vu de chercheurs, nous avons utilisé les matériels qui nous ont conduits à atteindre l'objectif particulier en se basant à la nouvelle technologie.

1. Construction de biodigesteur

a) Architecture générale

Le digesteur est constitué de (d'):

- Un bac d'alimentation ;
- digesteur central ;
- gazomètre
- bac d'accumulation de digestat ;

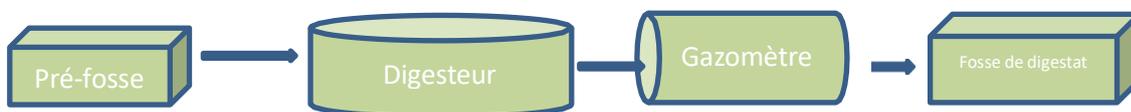


Schéma 2. Architecture générale du digesteur.

Ce schéma représente les étapes consistant : la réception, le stockage et le prétraitement des matières premières qui vont entrer en méthanisation. Les paramètres à déterminer au niveau de la pré-fosse sont : la quantité (volume et tonnage) et la qualité (potentiels méthanogènes et composition biochimique des substrats) de la matière.

Le digesteur est le réacteur dans lequel se déroule la fermentation. Il maintient un milieu favorable à la croissance des bactéries (absence d'oxygène, absence de lumière, température constante). Les matières y séjournent pendant 20 à 90 jours. Le digesteur doit être étanche aux gaz et aux liquides. Il peut être enterré au sous-sol ou hors sol.

Le post-digesteur souvent isolé et éventuellement chauffé permet de terminer la digestion et de récupérer la fraction du biogaz encore présente dans la matière digérée au niveau du digesteur. Cette production avoisine 20% de la production totale en biogaz. Le post-digesteur est un dispositif similaire au digesteur où se déroule la suite du processus de méthanisation et la récupération du biogaz.

Le gazomètre est l'enceinte de stockage du biogaz. Le biogaz est en général stocké à la pression atmosphérique dans les parties supérieures des digesteurs ou dans des géomembranes fixées au-dessus des digesteurs. Les premiers volumes de biogaz stockés dans le gazomètre doivent être vidés sans faire l'objet d'usage à cause des concentrations résiduelles d'oxygènes contenus dans le digesteur et dans le gazomètre pouvant engendrer des risques d'explosion.

Le volume utile et taux de charge organique est déterminé à partir du temps de rétention (TR) et du taux de charge organique (ORL). Elle varie entre 2 et $12KgMV/m^3/jour$, mais à condition mésophile est de $3KgMV/m^3/jour$ à moyenne de digesteur agricole de type CSTR.

Equation : 1

$$\begin{aligned} V_d &= RTXQ \text{ ou } V_d = \frac{QxS_o}{ORL} \\ ORL &= Qx\frac{S}{V} = \frac{S}{TRH} \end{aligned}$$

Avec : V_d : volume utile en m^3

RT : Temps de rétention en jour

Q : Taux de charge volumique en m^3/j

S_o : Concentration du substrat

ORL : Charge organique en $m^3/jour$.

Ce paramètre varie proportionnellement avec le volume de digesteur. En milieu tropical, il varie entre 20 et 50 jours. Cette variation est attribuable au taux de MS élevé qui sera moins vite dégradé. Couplé à une basse température, le temps de rétention sera plus long.

Equation : 2

$$RT \text{ ou } TRH \text{ (en jour)} = \frac{V}{Q}$$

Avec RT ou TRH : temps de rétention en jour

Q : Volume de substrat extrait par jour ($m^3/jour$)

V : Volume utile du digesteur (m^3).

b) Mise en route de digesteur

La mise en route est subdivisée en trois grandes étapes :

- 1) Détermination de la teneur en matière sèche et en matière volatile des substrats ;

- 2) Introduction d'une quantité d'inoculum représentant 1/10 du volume du biodigesteur ;
- 3) Suivi et observation des premières productions de biogaz par l'inoculum puis démarrage de l'alimentation.

c) **Fonctionnement du digesteur**

Le digesteur produit le biogaz par fermentation anaérobie en utilisant le substrat humide et mole ayant un taux de matière sèche inférieur ou égale à 15%. Ce produit est introduit à partir du bac d'alimentation où il est traité et homogénéisé. Puis il passe un bon bout de temps dans l'enceinte centrale communément appelé biodigesteur ou bioréacteur. Trois semaines après, si nous sommes dans la plage mésophile, c'est dix jours, si nous sommes dans la plage thermophile c'est deux mois et si nous sommes dans la plage psychrophile c'est plus de trois mois. Le biogaz est produit et récupéré par le gazomètre après avoir traversé la tuyauterie.

Le gaz obtenu peut être filtré ou épuré avant son utilisation et cela en passant dans les filtres où il subit entre autre : la désulfuration, la déshydratation, SPA...

Le déchet restant de la fermentation communément appelé digestat est accumulé dans le bac avant son épandage dans les champs comme fertilisant organique.

d) **Système de contrôle de la fermentation**

Toute centrale de valorisation de biogaz mérite une surveillance, étant donné qu'il peut survenir des défaillances pendant son fonctionnement. Voilà pourquoi, il y a certains paramètres qui sont en permanence observés dès le début du processus. Parmi eux, nous avons :

- **Le Taux de production de biogaz**

La quantité de biogaz générée est une variable cruciale qui sert à la fois à évaluer la réaction métabolique et à vérifier si l'objectif prévu a été atteint. Le taux de production de biogaz est la quantité de gaz produite par unité de temps (par exemple, d^{-1}). Associée au volume et à la composition du substrat, il permet de calculer la production spécifique de biogaz (liée au substrat utilisé et au volume).

- **Composition du gaz**

- **Méthane** : la proportion du CH_4 dans le biogaz sert à évaluer l'état de la biocénose méthanogène. Le taux de production de méthane peut être calculé en fonction du taux de production de gaz : si le taux de production de méthane diminue fortement alors que le niveau d'alimentation reste constant, cela signifie probablement que les archées méthanogènes sont inhibées.
- **Dioxyde de carbone** : le CO_2 se forme pendant la phase d'hydrolyse/ Acidogènes et pendant la formation du méthane. Il se dissout dans l'eau et joue ainsi le rôle crucial de tampon d'hydrogénocarbonate. Si le ratio CH_4/CO_2 du biogaz baisse alors que la composition du substrat n'a pas été modifiée, cela peut être le signe d'une augmentation du taux de formation d'acide par rapport au taux de formation de méthane.

Les CH_4 et CO_2 se mesurent au moyen de capteurs à infrarouge ou d'appareils de mesure de la conductivité thermique.

Sulfure d'hydrogène : les concentrations élevées en H₂S n'ont pas d'impact sur les archées méthanogènes tant qu'elles n'atteignent pas un niveau d'environ 20000ppm, un phénomène rare dans les centrales de valorisation de biogaz. Le H₂S se mesure au moyen de capteurs électrochimiques.

- **La Température**

La digestion anaérobie se décline sous trois types différents suivant la température :

- Lorsque la température est inférieure à 15°C : la digestion est de type psychrophile ;
- Lorsque la température varie entre 28°C ≤ t° ≤ 40°C : la digestion est de types mésophiles ;
- Lorsque la température est supérieure à 45°C : la digestion est de type thermophile.

En règle générale, plus la température est élevée, plus le taux de réaction augmente. Lorsque les procédés anaérobies sont utilisés pour des applications techniques, ils sont généralement repartis en deux fourchettes de température :

- Procédé mésophile : environ 37°C à 43°C ;
- Procédé thermophile : environ 50°C à 60°C.

La température doit être gardée constante pour éviter une perturbation de la digestion, car les bactéries méthanogènes sont particulièrement sensibles à toute variation de température, même de l'ordre de 1°C par jour. Voilà pourquoi il est important de placer les capteurs pour mesurer la température à différentes hauteurs du digesteur, ce qui permet de détecter le problème de stratification et de brassage inadéquat. Il est possible d'utiliser des capteurs à résistance (PT1000 ou PT100, par exemple) ou de thermocouples pour mesurer la température.

- **La Concentration en oligo-éléments**

Les oligo-éléments sont des substances minérales qui apparaissent en très faibles concentrations. Les centrales qui fonctionnent exclusivement aux cultures énergétiques (et celles qui utilisent des vinasses) sont susceptibles d'enregistrer des perturbations du procédé qui peuvent être corrigées par ajout des oligo-éléments. Une baisse de la production de gaz ou une augmentation des niveaux d'acidité sont d'autant d'indications de ces perturbations. Ces phénomènes ne surviennent pas dans les centrales alimentées au lisier. Le tableau ci-dessous propose des valeurs indicatrices pour les différents éléments.

Tableau 1. Valeurs indicatrices pour les oligo-éléments.

Eléments	Valeurs indicatrices mg/kg Ts	Valeurs indicatrices concentration mg/l
Cobalt	0,4-10 (optimum 1,8)	0,06
Molybdène	0,05-16 (optimum 4)	0,05
Nickel	4-30 (optimum 16)	0,006
Sélénium	0,05-4 (optimum 0,5)	0,008
Tungstène	0,1-30 (optimum 0,6)	
Zinc	30-400 (optimum 200)	
Manganèse	100-1500 (optimum 300)	0,005-50

Cuivre	10-80 (optimum 40)	
Fer	750-5000 (optimum 2400)	1-10

- Azote, ammonium, ammoniac

En pratique, les plantes thermophiles sont plus sensibles aux fortes concentrations en ammonium que les plantes mésophiles. La corrélation est démontrée par l'équation ci-dessous :

Equation : 3

$$C_{NH_3} = C_{NH_4} \cdot \frac{10^{pH}}{e^{273+T} + 10^{pH}}$$

Equation 3. Calcul de la concentration en ammoniac.

- C_{NH_3} : concentration en ammoniac (g.l⁻¹),
- C_{NH_4} : concentration en ammonium (g.l⁻¹),
- T : température (°C).

Tableau 2 : références aux concentrations en ammoniac inhibitrice dans la littérature.

Concentration		Commentaire
> 3000mg.l ⁻¹ NH ₄		Effet inhibiteur
> 150 mg.l ⁻¹ NH ₃		Effet inhibiteur
500 mg.kg ⁻¹ NH ₃		Fonctionnement stable, forte Concentration en acide,
1200mg.l ⁻¹ NH ₃		Effet inhibiteur
< 200 mg.l ⁻¹ NH ₃		Fonctionnement stable
	Degré de dégradation %	
106mg.l ⁻¹ NH ₃	71	Fonctionnement stable dans les cas, mais performances de dégradation limitées et forte concentration en acides.
155 mg.l ⁻¹ NH ₃	62	
207 mg.l ⁻¹ NH ₃	61	
257 mg.l ⁻¹ NH ₃		
> 700mg.l ⁻¹ NH ₃		Effet inhibiteur

- L'humidité

L'humidité est un paramètre vital de la croissance microbienne. Le taux d'humidité supérieure à 60% augmente la production de gaz. Le taux d'humidité doit être compris entre 40 et 80% de la masse sèche.

- **Couches des boues flottantes**

La formation des boues flottantes ou de croûte peut constituer un problème dans les centrales fonctionnant avec des substrats fibreux. Si ces couches s'accumulent sur plusieurs mètres sans être cassées par l'agitateur, elles peuvent être éliminées manuellement.

- **Formation de mousse**

La formation de mousse est le résultat d'une réduction de la tension superficielle due aux tensioactifs. Son origine est inconnue. La mousse peut avoir la conséquence de boucher les canalisations de gaz.

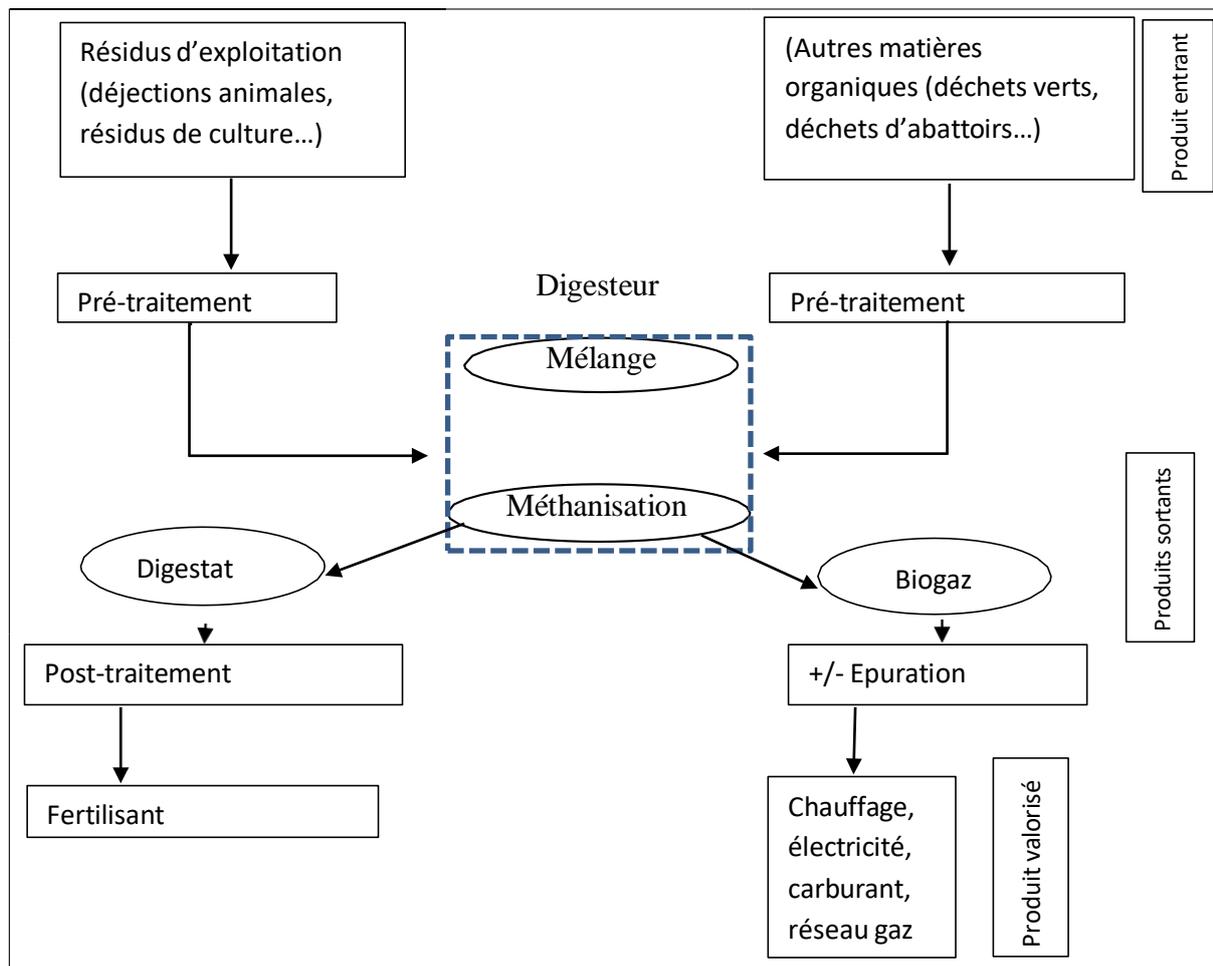
E) Indicateurs de la stabilité de l'environnement réactionnel.

- Un pH compris entre 4 et 9 favorise la croissance des microorganismes. Pour le bon fonctionnement du réacteur, la stabilisation du pH entre 6,8 et 7,2 est essentielle. Un pH en dehors de la gamme 6 à 8,5 est toxique pour les bactéries méthanogènes. Si le pH est trop acide, on le remonte en ajoutant de la chaux, des solutions de soude ou de suspendre immédiatement l'alimentation du digesteur. Dans le cas de pH très élevé, vers 9 à 11, des solutions d'acide sulfurique ou d'acide chlorhydrique peuvent être employées pour remédier momentanément au problème.
- Un potentiel redox de -300 à $-500mV$ caractérise un milieu anaérobie.

E.1. Production de biométhane

La production du biogaz est réalisée en chaîne partant de la collecte des substrats passant par la fermentation jusqu'à sa production. Ce système libère le résidu appelé digestat qui a une importance capitale dans le domaine agricole. Voici le schéma de la production du biogaz. [4].

Schéma 3 : De production du biogaz et digestat.



La fermentation dans le digesteur est réalisée par les substrats liquides, mais dans le cas des substrats solides difficilement dégradables, il peut être utile de faire appel à des prétraitements (chimiques ou physiques) pour solubiliser ces substrats complexes. Cette solubilisation facilite l'accès au substrat pour les bactéries et accélère la réaction globale. Par ailleurs, ces traitements permettent d'augmenter la matière organique disponible, en solubilisant les déchets que l'hydrolyse enzymatique seule n'aurait pas dégradés. L'utilisation d'ultrasons permet d'accroître la DCO de l'effluent à traiter. Le recours à la co-digestion

[rejets d'origine hétérogène (lisiers, effluents industriels, déchets verts ...)]
 Permet d'améliorer la production de méthane car traiter séparément généraient moins de biogaz.

Toujours dans le souci de maintenir une bonne production en quantité satisfaisante, il est préconisé d'installer le fermenteur face au soleil et de l'équiper d'une membrane isolante. Et pour bénéficier au mieux du rayonnement solaire, le bioréacteur est conseillé d'être placé sous une « serre ».

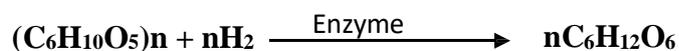
E.2. Réactions de formation

Pour aboutir à l'obtention du biogaz, les substrats subissent une fermentation qui se réalise à partir des quatre réactions suivantes :

1.1.1. Hydrolyse

L'hydrolyse permet la décomposition des substrats en éléments simples (sucres simples, acides aminés...). Les bactéries clostridium sont chargées pour la dégradation des celluloses et d'amidons; et les bactéries bacillus dégradent les protéines.

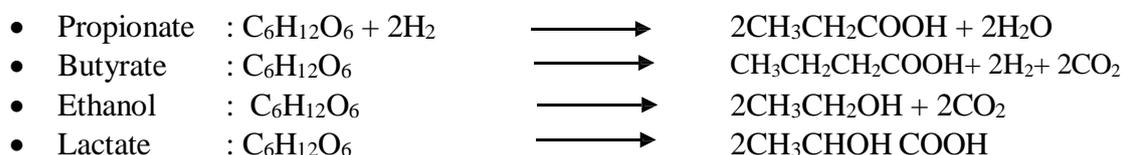
Le schéma des réactions d'hydrolyse enzymatique où les enzymes jouent le rôle de catalyseur se présente de la manière suivante:



2. Acidogénèse

L'acidogénèse est une réaction chimique qui consiste à transformer les composés simples en acides gras volatiles. Les microorganismes qui réalisent cette réaction sont les acetobacter ou streptococcus et les clostridium. Les résultats obtenus dans cette réaction sont des **acides gras volatiles (AGV)** de type: **propionate, butyrate, valerate**, mais aussi les **pyruvatilate** ou alcool tels que le **méthanol, l'éthanol...**

Les réactions qui se passent dans cette étape sont les suivantes:



3. Acétogénèse

L'acétogénèse est une réaction qui consiste à réduire les produits de l'hydrolyse et de l'acidogénèse en acétate, hydrogène et dioxyde de carbone par un groupe hétérogène de trois populations bactériennes:

- Les acétogènes syntrophes productrices d'hydrogène: syntromonas wolfei, syntrophobacter, ...

- Les bactéries acétogènes non-syntrophes:

- Les bactéries fermentatives acétogènes: selomonas, clostridium, rumunococcus, ...
- Les acétogènes hydrogénotrophes ou homoacétogènes: acetogenium, acetobacterium, clostridium...

Les réactions qui s'y déroulent sont les suivantes :

Tableau 4 : D'acétogénèse

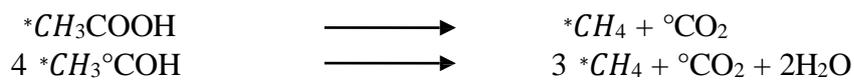
Substrats	Réaction	$\Delta G(kJ)$
Propionate	$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$	+76,1
	$CH_3CH_2COOH + 2H_2O + 2CO_2 \longrightarrow CH_3COOH + 3H_2 + 3HCOOH$	+82
Butyrate	$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$	+48,1
	$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2 + 2CO_2 \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 + 2HCOOH$	+55,2
Ethanol	$2CH_3CH_2OH + H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2$	+9,6
Lactate	$2CH_3CHOH COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2 + CO_2$	-4,2

4. Méthanogénèse

La méthanogénèse constitue l'étape de réduction finale de méthanisation. Elle est réalisée par une classe spécifique de bactéries anaérobies strictes, les Archae. Au sein de cette classe, on distingue deux familles responsables de la synthèse de méthane:

- Les méthanogènes acétoclastes, également appelés acétotrophes. Ces bactéries décomposent les acétates en méthanes et dioxyde de carbone.

Le processus de dégradation de l'acétate contribue à lui seul de générer environ 70% du méthane produit.



- Les méthanogènes hydrogénéophiles ou hydrogénéotrophes.

Les bactéries hydrogénéotrophes contribuent au reste de la production du méthane (environ 30%) en réduisant le couple H_2/CO_2 ou le formate en méthane.

Tableau 5 : De méthanogénèse

Substrats	Réaction	$\Delta G(kJ)$
H_2/CO_2	$4H_2 + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O$	-130,74
Formate	$4HCOOH + 2H_2O \longrightarrow CH_4 + 2H_2O + 3CO_2$	-144,54

A côté des réactions de productions du biogaz, il se crée une autre réaction qui inhibe la production du biogaz, mais participe à la dégradation des macromolécules en micromolécules, c'est la sulfato-réduction.

5. Sulfato-réduction

Les bactéries sulfato-réductrices (BSR) sont capables de puiser leur énergie d'un grand nombre de substrats dont le dihydrogène moléculaire. Elles utilisent comme accepteur final d'électrons les sulfates (SO_3^{2-}) et thiosulfates ($S_2O_3^{2-}$) qu'elles réduisent en sulfure (S^{2-}) par respiration anaérobie. Dans ce fait, dans des environnements riches en composés soufrés, il peut y avoir compétition entre les bactéries homoacétogènes (BH), les bactéries méthanogènes (BM) et BSR pour la dégradation de l'acétate et du dihydrogène.

Tableau 6 : De Compétition pour l'utilisation du couple H₂/CO₂ et de l'acétate

Bactéries	Réactions		
BSRH	4H ₂ + H ₂ SO ₄	→	H ₂ S + 4H ₂ O
BSRA	CH ₃ COOH + H ₂ SO ₄	→	H ₂ S + 2H ₂ O + 2CO ₂
BMH	4H ₂ + CO ₂	→	CH ₄ + 2H ₂ O
BH	2H ₂ + CO ₂	→	CH ₃ COOH
BMA	2H ₂ + CO ₂	→	CH ₃ COOH

Avec

BSRH : bactéries sulfato-réductrices hydrogénotrophes ;

BSRA : bactéries sulfato-réductrices acétotrophes ;

BMH : bactéries méthanogènes hydrogénotrophes ;

BH : bactéries homoacétogènes ;

BMA : bactéries méthanogènes acétotrophes.

1.2. Modélisation mathématique

La notion de modèle évoque une représentation simplifiée d'un concept ou d'un processus. La formulation mathématique de cette représentation par des équations, conduit à la notion de modèle mathématique.

De façon schématique, un système dynamique transforme des entrées (u), en sortie (y), par un ensemble d'équations différentielles.

Les modèles d'espace d'état considèrent un vecteur d'état, noté x , qui regroupe les biomasses et les composés, entre l'entrée et la sortie. A une date t , la vitesse d'évolution des variables dépend de l'état des entrées (u), et la sortie (y) dépend de l'état des entrées. Les équations générales d'évolution du processus sont données par le système suivant :

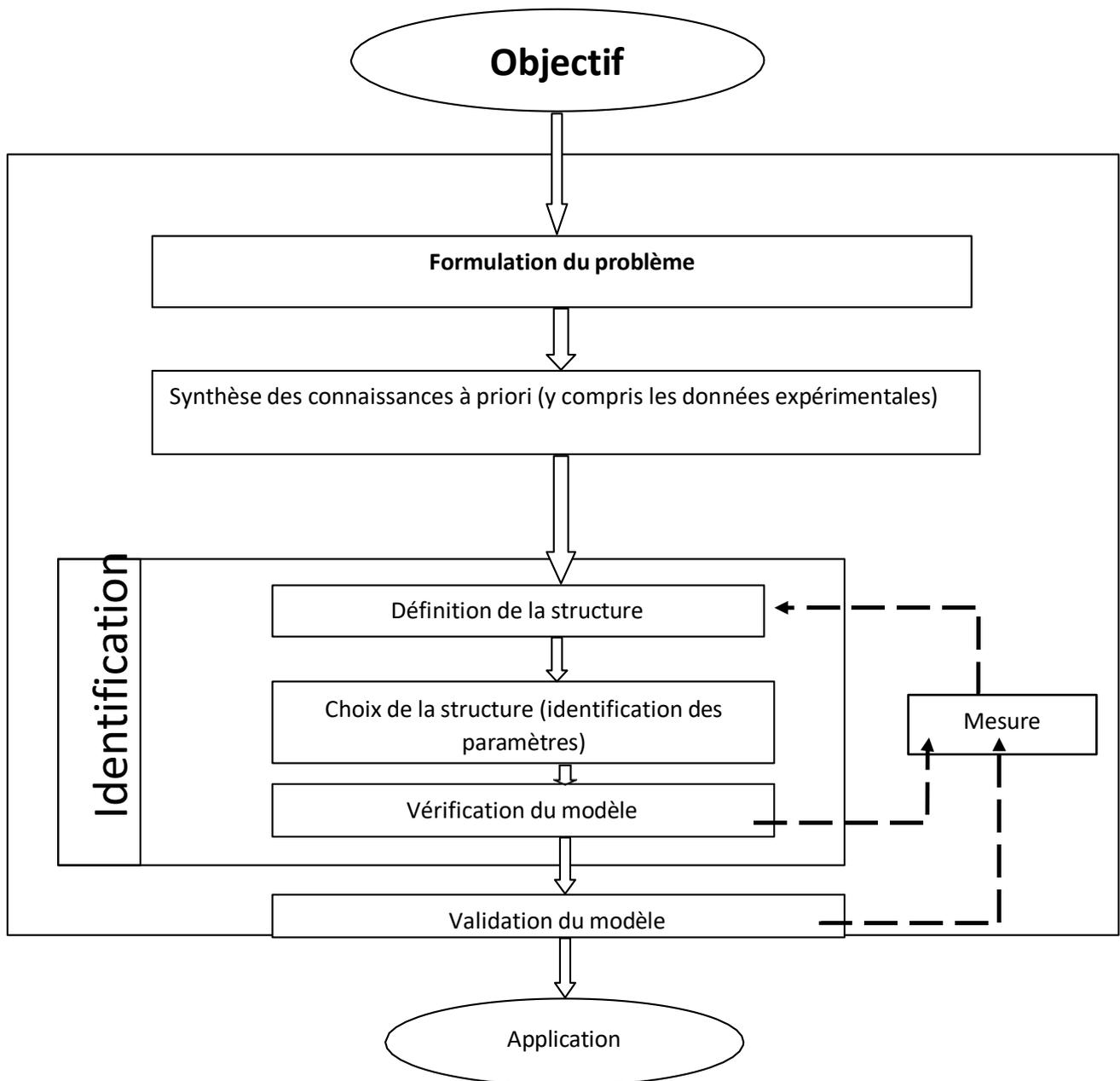
$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t, u, \theta), x(t = 0) = x_0 \\ Y(t) = h(x, t, u, \theta) \end{cases}$$

Où f est la fonction de transition d'état, h la fonction d'observation et θ le vecteur des paramètres.

1.2.1. Développement d'un modèle

Ceci obéit à une succession d'étapes depuis la définition précise des objectifs jusqu'à l'application du modèle.

Schéma 4 : De modélisation mathématique



1.2.2. Modèles de la digestion anaérobie

Les enzymes jouent le rôle catalytique. Une première étape essentielle est franchie lorsqu'un modèle mathématique est proposé pour décrire la vitesse d'une réaction enzymatique v comme une fonction du substrat s :

Formule 1

$$v = V_m \frac{s}{K_s + s}$$

Où V_m est la vitesse maximale de réaction et K_s la concentration pour laquelle la vitesse est la moitié du maximum.

En introduisant une équation représentant l'inhibition d'une réaction enzymatique par un excès de substrat :

$$v = V_m \frac{s}{K_s + s + \frac{s^2}{K_i}} \quad (1)$$

Où K_i est la constante d'inhibition.

Le ralentissement et l'arrêt de la croissance des bactéries sont liés à l'appauvrissement en substrat du milieu de culture.

A partir du bilan de masse, la croissance bactérienne est représentée par une fonction à deux paramètres μ_m et K_s selon l'équation :

$$v = \mu_m \frac{s}{K_s + s} \quad (2)$$

Où le paramètre K_s représente l'affinité des microorganismes pour le substrat et μ_m la vitesse maximale de croissance.

La vitesse de croissance d'une population bactérienne est représentée par le produit de biomasse vivante x et d'un autre facteur μ qui serait le taux de croissance.

$$\frac{dx}{dt} = \mu x$$

Les équations de conservation de deux variables, la concentration (densité) de biomasse x et le substrat limitant s , dans un biodigester continue en considérant les « sources » et « puits » pour ces grandeurs et le système d'évolution est décrit par :

$$\frac{ds}{dt} = -Dx + \mu(s)x \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = D(s_{in} - s) + \frac{\mu(s)}{Y} x; \mu(s) = \mu_m \frac{s}{K_s + s}$$

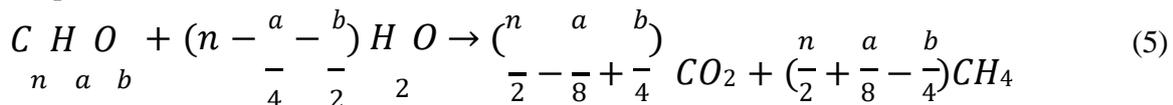
Où Y désigne le rendement de la conversion du substrat en biomasse, et s_{in} est la concentration du substrat organique dans l'alimentation du chémostat. Le taux de dilution D est défini comme le rapport du débit d'alimentation Q_{in} , au volume V_l du réacteur :

$$D = \frac{Q_{in}}{V_l}$$

Ce système permet de déterminer par intégration les équations d'évolution des variables et aussi le taux de croissance au travers le taux de dilution ; en effet la première équation se réduit à l'équilibre d'égalité :

$$D = \mu(s) \quad (4)$$

L'équation générale de la dégradation de matière organique par fermentation constitue en quelque sorte un premier modèle qui permet, connaissant les caractéristiques de l'alimentation, les produits formés.



La fermentation étant un processus complexe, le choix de réactions à représenter constitue la première étape de la construction du modèle mathématique, il faut ensuite obtenir les équations d'évolution des différentes variables.

L'utilisation de bilan matière constitue un outil puissant pour déduire les équations du modèle. L'évolution de la masse M d'un constituant est définie par l'équation suivante :

$$\frac{dM}{dt} = \underbrace{M_{\text{entrée}} - M_{\text{sortie}}}_{\text{Flux entrée/sortie}} + \underbrace{M_{\text{gaz} \rightarrow \text{liquide}} - M_{\text{liquide} \rightarrow \text{gaz}}}_{\text{Echanges gazeux}} + \underbrace{M_{\text{produite}} - M_{\text{consommée}}}_{\text{Bioréaction}} \quad (6)$$

Un grand nombre de modèles reposent sur cette méthode et les différences se situent principalement au niveau de choix de représentation des cinétiques bactériennes.

Les premiers modèles se sont surtout focalisés sur la méthanogénèse sous l'hypothèse qu'elle serait l'étape limitant dans le procédé global de digestion anaérobie. En utilisant la fonction de Haldane (équation 1) pour représenter l'inhibition de la croissance des méthanogènes aux fortes concentrations de substrats, le système (7) dans le cas d'une culture fermée ($D = 0$) et d'une culture continue.

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = -Dx + \mu(s)x \\ \frac{dx}{dt} = D(S_0 - S) + \frac{\mu(s)}{y} x \\ \mu(s) = \mu_m \frac{s}{K_s + s + \frac{s^2}{K_i}} \end{cases} \quad (7)$$

En considérant une formule moléculaire empirique de la biomasse bactérienne ($C_5H_7NO_2$), l'équation stœchiométrique représentant la conversion de l'acétate en biogaz et biomasse :



En s'intéressant à l'inhibition non compétitive de la croissance sur un substrat simple où I est la concentration de l'inhibiteur et K_i la constante d'inhibition :

$$\mu = \mu_m \frac{s}{K_s + s} \frac{K_i}{K_i + I} \quad (8)$$

En incluant un terme supplémentaire dans l'équation de Haldane (1) du taux de croissance des méthanogènes pour représenter la double inhibition par les AGV et l'ammoniac dissout (NH_3) dans la digestion des effluents d'élevages :

$$\mu = \mu_m \frac{agv}{agv + K_s + \frac{agv}{K_i} + \frac{\text{NH}_3 \cdot agv}{K_n}} \quad (9)$$

Les étapes extracellulaires (solubilisation et hydrolyse) sont représentées par des cinétiques du premier ordre. Le taux de réactions intracellulaire (Acidogénèse des monomères, Acétogénèse et Méthanogénèse) repose quant à eux sur des cinétiques substrat-dépendante et les différentes formes possibles d'inhibition (compétitions, par le pH...) sont introduites à l'aide des termes multiplicatifs de façon similaire :

$$\rho_j = \frac{K_m S}{K_s + S} X \cdot I_1 \cdot I_2 \dots I_n \quad (10)$$

Où S est le substrat, X la biomasse et I_i le composé inhibiteur. L'équation (10) permet de distinguer l'inhibition par plusieurs AGV, ce que ne permet pas un modèle Haldane. L'inhibition par un excès des substrats azotés est représentée au travers d'un des termes multiplicatifs I_i .

Concernant les échanges liquide/gaz, le modèle représente les transferts des matières pour les trois principaux gaz : le dihydrogène, le méthane et le dioxyde de carbone. Le modèle de transfert choisi repose sur la théorie des deux films :

$$q_i = k_{La}(S_i - K_H P_i) \quad (11)$$

Où k_{La} est le coefficient volumique global et S_i et P_i sont respectivement la concentration dissoute et la pression partielle du composé i .

Une particularité de ce modèle réside dans l'expression du pH qui peut être calculé de deux manières différentes :

- Soit à partir de l'équation d'évolution d'hydrogène, incluse dans le système différentiel ;
- Soit à partir d'un système algébrique décrivant les équilibres acide/base des espèces en solution.

1.2.3. Structure ADM1 (Anaerobic Digestion Modelling)

Ce modèle repose sur un bilan entrée/sortie de DCO. Il considère cinq étapes pour la digestion anaérobie impliquant 7 espèces bactériennes : les deux premiers sont extracellulaires et les trois dernières étapes sont intracellulaires.

- 1) La solubilisation de la matière particulaire ;
- 2) L'hydrolyse enzymatique extracellulaire de la matière soluble ;
- 3) L'acidogénèse ;
- 4) L'acétogénèse ;
- 5) La méthanogénèse.

A ce processus biochimique s'ajoutent les échangent physico-chimiques :

- Les équilibres acide/base
- Les transferts entre les phases liquide et gazeuse.

1.2.1. Modèle de création et d'évolution des bulles dans un méthaniseur

a) Equation d'évolution de la taille des bulles

Considérons une colonne circulaire de hauteur H , ayant un volume effectif Vr . Une bulle créée à l'altitude Z_0 est décrite à l'altitude Z par son rayon $r_b(x, z_0)$ (le volume est noté V_B), sa concentration molaire en chacun de gaz $N_{CO_2}(Z, Z_0)$, ainsi que sa pression interne $P_o(Z, Z_0)$.

Nous étudions la dynamique des bulles en considérant les hypothèses suivantes :

- i. Les bulles sont créées à partir de CO_2 dissous et le CH_4 est immédiatement incorporé dans celle-ci ;
- ii. Après leur nucléation, les bulles n'échangent plus des méthanes avec le milieu ;
- iii. Le taux de production du méthane et la concentration en $CO_2(CO_2, d)$ sont homogènes dans l'ensemble du digesteur ;
- iv. Les processus physiques sont beaucoup plus rapides que les processus biologiques qui sont considérés être à l'équilibre ; les bulles atteignent donc instantanément leur vitesse ascensionnelle finale ;
- v. Les bulles sont idéalement sphériques ;
- vi. Les gaz obéissent à la loi des gaz parfaits.

La pression interne d'une bulle P_B s'exprime à partir de l'équation de Young-Laplace

$$P_B = P_L + \frac{2\sigma}{r_B}$$

Où σ représente la tension de surface et P_L la pression de la phase liquide à une altitude Z .

Sous l'effet des transferts liquide/gaz, le contenu N_B des bulles va évoluer. Seuls les échanges de CO_2 sont à prendre en compte.

Les équations de base pour décrire l'évolution des bulles s'écrivent comme suit :

$$N_B = N_{CO_2} = 4\pi r_B^2 k_L (CO_{2d} - K_{HCO_2} P_{CO_2}) \quad (12)$$

$$v_b(r_B) = \frac{2}{9} g \frac{r_B}{\mu_L} \rho_L \quad (33)$$

$$P_B V_B = N_B R T \quad (14)$$

$$P_B = \underbrace{P_T + \rho_L g (H - z)}_{P_L} + \frac{2\sigma}{r_B} \quad (15)$$

En dérivant ces équations, on obtient le système qui décrit l'évolution d'une bulle isolée avec l'altitude z .

$$\begin{cases} \frac{\partial N_{CO_2}}{\partial z} = \frac{18\pi\mu_L k_L \rho_L}{g\rho_L} \left(\omega_{2,d} - K_{HCO_2} \frac{N_{CO_2} R T}{V_B} \right) \\ \frac{\partial N_{CO_2}}{\partial z} = \frac{18\pi\mu_L k_L \rho_L}{g\rho_L} \left(\omega_{2,d} - K_{HCO_2} \frac{N_{CO_2} R T}{V_B} \right) \end{cases} \quad \text{Equation 4}$$

1.3. Production volumétrique de biogaz

Il est possible de déterminer d'avance la quantité du biogaz en utilisant l'expression suivante :

$$y_p = B_o S V_o \left[1 - \frac{k}{\theta \mu_m^{-1} + k} \right] x \left[\frac{m_{fumier}}{\rho_{fumier}} + \frac{m_{eau}}{\rho_{eau}} \right] \quad \text{Equation 5}$$

y_p : taux de production volumétrique du méthane ($m^3 CH_4 / d$) ; B_o : rendement ultime de méthane, ($m^3 CH_4 / Kg SV$) ; $S V_o$: concentration solide volatile initiale ($Kd SV / m^3$) ; k : paramètre cinétique (sans dimension) ; θ : temps de digestion (d) ; μ_m : taux spécifique maximum ($1/d$) ; m_{fumier} : taux de fumier (Kg/d) ; ρ_{fumier} : densité du fumier (Kg/m^3) ; m_{eau} : débit d'eau (Kg/d) ; ρ_{eau} : densité de l'eau (Kg/m^3) = $1000 kg/m^3$.

Taux spécifique: $\mu_m = 0,066[1 + 1100e^{-0,187T}]^{-0,546}$

μ_m : Taux maximale spécifique (1/d)

T : température ambiante ($^{\circ}C$) $5 \leq T \leq 60$

Temps de digestion : $\theta = 122,16e^{-0,05T}$

Les paramètres cinétiques :

- Buffle : $k = 0,6 + 0,021e^{-0,05SV_o}$
- Bovins : $k = 0,8 + 0,01e^{-0,06SV_o}$
- Porcs : si $SV_o \leq 58,6 Kg \leq m^3$ $k = 0$
Si $SV_o > 58,6 Kg m^3$ $k = 0,0866SV_o + 4,2755$

Une fois que le taux volumétrique de production de méthane est connu, le taux de production de volume du biogaz peut être calculé en tenant compte du pourcentage de méthane dans le biogaz en fonction du fumier utilisé.

Tableau 7 : Des Propriétés de base du fumier

Propriétés	Fumier			Référence
	Buffles	Bovins	Porcs	
Densité Kg/m^3)	960	960	1140,9	(Hubard and R.R ; Queeland Government ; Tao and Mancl)
Matières volatiles (SV)	0,1364	0,1325	0,2360	(Alvarez. Villca et al. 2006)

Tableau 8 : Analyse détaillée du fumier

Fumier	C(%)	H(%)	N(%)	S(%)	O(%)	C/N	Référence
Buffles	32,90	1,70					(Thi Ngo. Rumpel et al. 2011)
Bovins	50,39	5,77	3,94	1,31	38,58	12,80	(santoiani. Bingham et al. 2008).
Porcs	48,44	7,07	4,90	0,93	38,66	9,89	(O'Palko. Jensen et al. 2003)

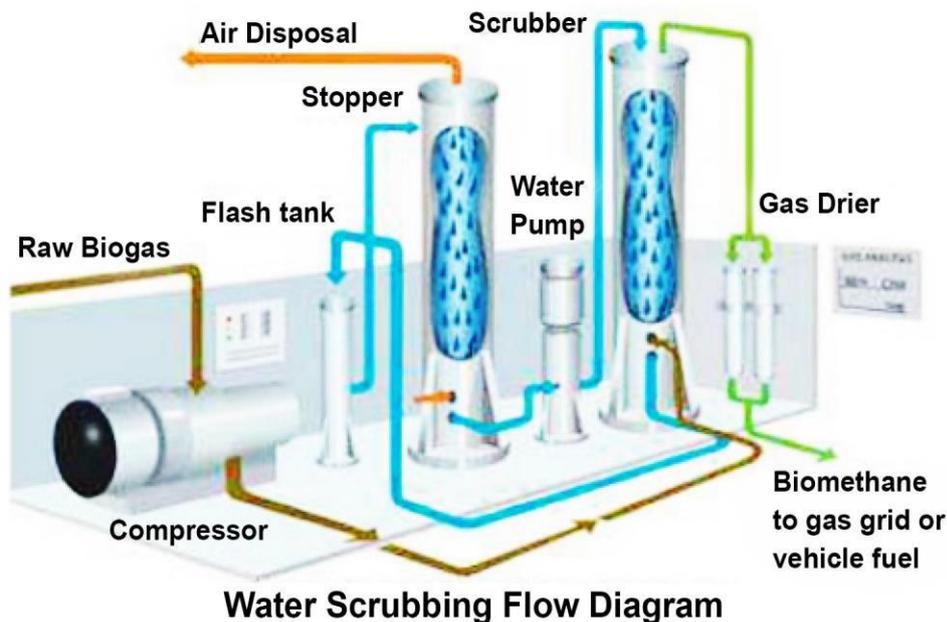
b) Déshydratation (ou lavage à l'eau)

C'est une méthode qui consiste à laver le gaz à l'eau sous pression. Le gaz se détend dans la colonne de filtre provoquant la condensation de l'eau qu'il contient pour ressortir en haut presque sec. La déshydratation n'élimine pas seulement l'eau, mais aussi le dioxyde de carbone, les éléments sous forme de trace, quelques gaz comme l'ammoniac... Voici l'exemple d'une déshydratation :

A 7 bars, on peut dissoudre 0,5 litre de CO_2 par litre d'eau environ. Le débit de biogaz étant par exemple de 1 m^3 /heure ce qui donne 16 litres/minute. Avec cette relation, l'élimination est estimé à $16 \times 0,4 = 6$ litres/minute de CO_2 . Si nous considérons que le biogaz contient environ 40% de CO_2 , il faut donc, un débit d'eau de $6/0,5 = 12$ litres d'eau/minute propre.

Ces deux types de filtrage enrichissent le biogaz à hauteur de plus de 95% en méthane, ce qui permet à le baptiser sous le nom de biométhane. Le schéma suivant illustre comment s'effectue ce traitement.

Schéma 5 : Procédé de déshydratation ou lavage du biogaz.



c) **Épuration cryogénique (distillation à froid)**

La cryogénie met à profit les différents points d'ébullition des composés gazeux du biogaz :

- Le CO_2 a son point d'ébullition à $-78^\circ C$ à pression atmosphérique ;
- Celui de méthane se situe à $-160^\circ C$ à pression atmosphérique.

On porte le biogaz à $-165^\circ C$, ce qui permet d'extraire le méthane durant sa phase liquide. Deux produits apparaissent : l'un composé de méthane, l'autre de CO_2 . L'eau et le H_2S doivent être préalablement traités pour notamment éviter les problèmes de gel.

Le tableau suivant résume les paramètres les plus importants des technologies décrites appliquées à un biogaz brut de composition moyenne.

Tableau 9 : Des technologies appliquées dans la purification du biogaz.

Paramètres	Lavage à l'eau	Lavage avec un solvant organique	Lavage aux amines	PSA	Technologie membranaire
Taille moyenne des installations [m^3/h biométhane]					
Méthane contenu [Vol%]	95,0-99,0	95-99	> 99,0	95-99	95-99
Taux de récupération du méthane [Vol%]	98,0	96,0	99,96	98	80-99,5
Perte en méthane [Vol%]	2,0	4,0	0,04	2,0	20-0,5

Pression en sortie [bar(g)]	4-8	4-8	0	4-7	4-7
Besoin en électricité [kWhel/m ³ biométhane]	0,46	0,49-0,67	0,27	0,46	0,25-0,43
Désulfuration requise	Dépendant du process	Oui	Oui	Oui	Oui
Besoin en consommable	Agent de désengorgement, agent de séchage	Solvant organique (non dangereux)	Solution aux amines (dangereux, corrosif)	Charbon actif (non dangereux)	
Taux de charge partiel [%]	50-100	50-100	50-100	85-115	50-105
Nombre d'installation de référence	Important	Bas	Moyen	Important	Bas

d) Procédés d'élimination des autres composés indésirables

- **Les particules**

Les particules se retrouvent fréquemment dans le biogaz et doivent être éliminées en utilisant des filtres. Ces particules sont principalement un mélange de biomasses et des dépôts minéraux riche en fer, calcium et silice.

- **Les composés hydrocarbonés halogénés**

Ces composés (spécialement les chlorés et les fluorés) sont éliminés en utilisant le charbon actif imprégné. Normalement, les techniques pour éliminer le CO₂ traitent aussi les composés organiques halogénés.

- **L'ammoniac**

L'ammoniac est habituellement séparé quand le biogaz est séché par refroidissement, sa solubilité dans l'eau liquide et dans l'acide nitrique ou sulfurique étant forte. Il est aussi séparé par le charbon actif.

- **Oxygène**

L'oxygène peut être introduit pendant la fuite et peut être éliminé par le traitement thermique catalytique.

- **Les composés organo-siliconés et les siloxanes**

Leur élimination peut être réalisé par refroidissement du gaz jusqu'à 4°C plus l'utilisation du filtre ou un séparateur.

a) Modélisation des émissions et évaluation de risque des expositions

Le modèle utilisé prend en compte une phase d'allumage (émissions de biogaz pendant 5 secondes) et une phase de cuisson (émissions liées à la combustion). Ce modèle permet de déterminer la concentration d'une substance émise par une source ponctuelle dans une pièce en fonction du temps.

Le modèle mathématique utilise une équation de bilan de masse (loi de la conservation de la masse) pour calculer les concentrations d'un polluant dans une pièce sur la base de la connaissance :

- De la source (quantité de polluant émise par unité de temps) ;
- Du volume de la pièce (m^3) ;
- Du taux de renouvellement d'air de la pièce (heure⁻¹) ;
- Du taux de perte en polluant par dépôt ou réactions chimiques. On suppose les hypothèses suivantes :
 - Une émission de polluant constante dans le temps ;
 - Un mélange parfait dans le volume considéré ;
 - Un modèle non réactif (pas de dégradation du polluant, pas de dépôts sur les surfaces) ;
- Un taux de renouvellement d'air constant et efficace (pas de rétrodiffusion de la pièce voisine) ;
- L'absence d'autres sources variables pouvant interférer lors de l'évènement ;
- Un air entrant propre.

b) Expérience à domicile de production

Le samedi 19 juillet 2020, était le jour du démarrage de l'expérience de la production de biogaz. Pour y parvenir, nous avons utilisé les substrats suivants :

1. Une papaye en décomposition et une poignée de feuille fraîche de patate douce provenant du jardin.

Photo 1 : Papaye et feuilles de patate douce découpée. Photo prise le 19 juillet 2020.



Photo 2: De lisier frais de vache



Ce même samedi matin, nous sommes allés à l'abattoir de Mwemezi pour récupérer le lisier frais de vache que nous avons amenés dans un sachet blanc. Ce vase nous a permis d'éviter la pollution odorifère sur le paysage environnant notre passage et le lieu d'expérimentation.

Photo 3 : Emballage contenant le lisier de vache provenant de l'abattoir de Mwemezi. Photo prise le 19 juillet 2020.



La papaye et les feuilles de patate douce ont été réduites en fines particules d'environ 10 mm pour permettre leur décomposition par les bactéries lors de la fermentation. Les produits pilés ont été plongés dans l'eau douce puisée au robinet. L'ensemble de ce mélange a été mis dans un bidon de 20 litres et étalé au soleil durant toute la journée afin d'amener le produit à la température ambiante de fermentation.

Photo 4 : Bidon de 20 litres emballé dans le sachet jaune contenant le substrat prêt à la fermentation et étalé au soleil. Photo prise le 19 juillet 2020.



Le bidon jouant le rôle de digesteur est introduit dans le sachet plastique jaune de marque SIMBA.

Au sommet du digesteur est placé un robinet attaché au bouchon de ce bidon. Pour réaliser une bonne étanchéité, le robinet est collé au bouchon du bidon par la colle PVC dont l'image est ci-dessous.

Photo 5 : Boîte de la colle PVC, le bouchon du bidon, le robinet attaché au bouchon du bidon et le bidon jouant le rôle du digesteur.



Ce robinet permet de vérifier la présence du gaz dans le digesteur après un temps. L'expérience commence 11 h, heure de Baraka, en République démocratique du Congo soit GMT+2.

Comme dit dans la littérature, la fermentation réalisée à partir de plusieurs substrats est appelée la codigestion et c'est ce que nous avons appliquée pour espérer obtenir plus de gaz.

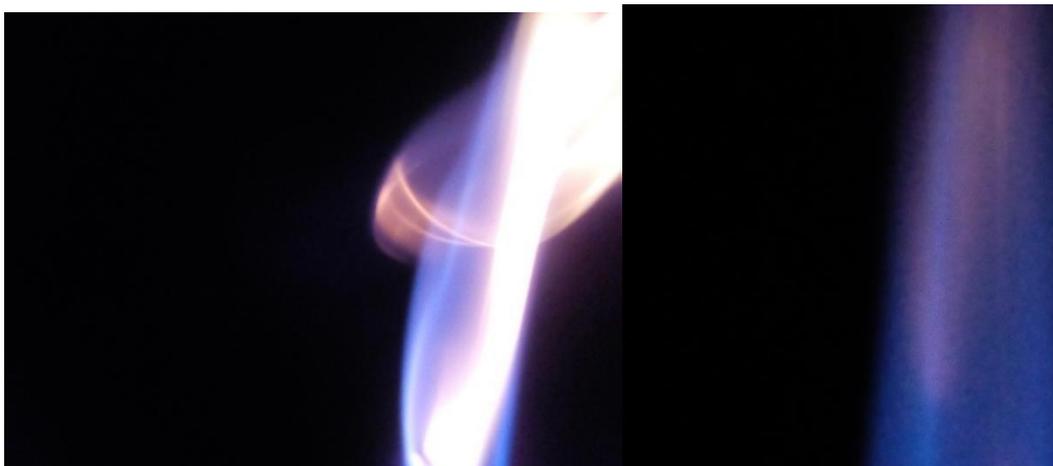
Après l'homogénéisation de tous les substrats, le mélange est versé dans le bidon jaune puis recouvert par deux sachets de marque Simba et enfin placé dans un espace confiné pour permettre la bonne fermentation des substrats.

Photo 6 : Le digesteur couvert par les sachets pendant la fermentation. Photo prise le 20 juillet 2020.



Le 8 septembre 2020, soit 1 mois et demi de la fermentation, nous avons vérifié la présence de gaz dans le digesteur. À 20h30', nous avons ouvert le robinet et allumé à l'aide d'une tige d'allumette, le résultat était impressionnant car, le gaz s'est enflammé avec la couleur bleue. La littérature renseigne : pour que la flamme soit de la couleur bleue, il faut que le taux de méthane dans le biogaz soit supérieur de 40%. Avec le résultat obtenu, nous pouvons conclure qu'il y avait un taux important de méthane.

Photo 7 : Flammes du biogaz brûlé. Photo prise le 8 septembre 2020 à 20h30'.



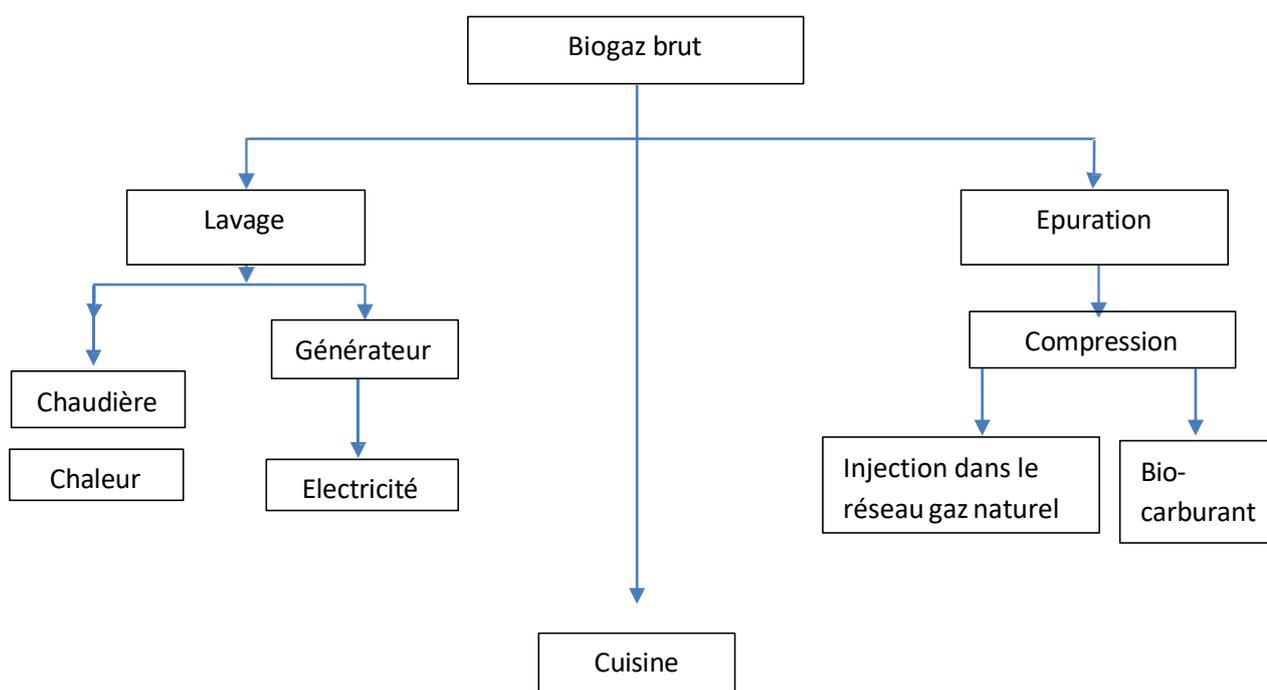
L'expérience était réalisée dans des conditions extrêmes, là où la température n'est pas maîtrisée car toute fluctuation diurne et nocturne de la température impactait sur la présence des microorganismes qui réalisaient la production du biogaz.

En étant dans la zone tropicale, la température avoisine 27°C, ce qui signifie que la fermentation s'est réalisée dans la plage mésophile.

g) Valorisations courantes de biogaz dans le monde

Le biogaz est une énergie d'avenir qui jouera le rôle de substitution des énergies fossiles et nucléaire car ces derniers causent des dégâts énormes sur l'environnement et sur l'écosystème. Le schéma ci-dessous montre comment est valorisé le biogaz, partant de l'extraction jusqu'à son utilisation [6].

Schéma 6 : schéma de valorisation de biogaz.



Les caractères physico-chimiques du biogaz sont proches de celles du gaz naturel et il peut être valorisé sous diverses formes :

- Energie thermique (Production de chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur, groupe frigorifique, Production d'air chaud pour le séchage) ;
- Energie de travail seul (moteur à gaz, turbine à vapeur, pile à combustible) ;
- Production d'électricité par turbine ou moteur à gaz ;
- Production combinée d'électricité et de la chaleur par cogénération ;
- Production simultanée de chaleur, de travail et de froid par tri génération ;
- Utilisation comme carburant automobile (après compression et stockage) ;
- Injection dans le réseau de gaz de ville.

Le volume du biogaz utilisé pour la cuisson varie selon les caractéristiques de cuisson entre 0,22 et 1,1m³/h. Les lampes destinées à l'éclairage consomment 0,07 à 0,14m³ de biogaz/heure.

Le biogaz peut être conditionné car il ne se liquéfie pas sous pression à la température ambiante. La température et la pression critiques sont respectivement de -82,5°C et 47,5 bars. Le biogaz peut être compressé de 5 à 150 bars dans les cylindres conventionnels utilisés pour l'embouteillage des gaz butane et propane. Des systèmes de compression tri- étage permettent de compresser le biogaz à des pressions de 20000kPa. [7].

h) Lutte contre la déforestation

L'objet de ce travail est de limiter l'utilisation de bois de chauffage pour la cuisson dans les milieux ruraux en République Démocratique du Congo, comme cela se fait dans d'autres coins du monde.

i.1) Evaluation des besoins

Compte tenu du pouvoir d'achat actuel de la population et d'autres considérations de terrain, nous avons ciblé environ 10 % de ménages (si et seulement si un ménage est constitué de 8 personnes en moyenne) comme consommateurs potentiels de gaz.

Il en résulte que la population cible pour l'utilisation de biogaz peut s'estimer à :

Formule 2 : évaluation des besoins

$$\text{ménages cibles} = \frac{\text{nombre de la population congolaise}}{8} * 10\%$$

$$\frac{91\ 780\ 263}{8} * 10\% = 1\ 147\ 254 \text{ ménages}$$

En considérant une consommation mensuelle de 12 kg de biogaz par ménage, le besoin en biogaz se chiffre à :

$$1.147.254 * 12 = 13\ 767\ 048 \text{ kg/ménages}$$

i.2. Calcul de la capacité de production

Les besoins de biogaz pour la république ont été estimés à 13 767 048 kg par mois. En considérant 26 jours de travail par mois et 8 heures de travail par jour dont 6 heures de production effective ; la capacité horaire sera de :

$$\frac{13\,767\,048}{26 * 6} = 88\,250,3 \text{ kg/heure}$$

Avec cette production, les forêts congolaises seront préservées et l'environnement sera maintenu propre et sa dégradation réduite.

i.3. Estimation de la substitution de l'énergie de bois de chauffage par le biogaz

Le pouvoir calorifique renvoie à la quantité maximale d'énergie produite par la combustion complète d'un combustible. Toutefois, on parle le plus souvent de PCI ou de PCS. Ces expressions précisent un peu la notion générale :

- Le PCI, ou pouvoir calorifique inférieur, est l'énergie produite par la combustion du combustible seule ;
- Le PCS, ou pouvoir calorifique supérieur, renvoie à l'énergie produite lors de la combustion et à celle récupérée par la condensation de la vapeur d'eau.

Le plus souvent, c'est bien le PCI qui est utilisé pour déterminer le pouvoir calorifique d'une source d'énergie.

La quantité d'énergie produit par les bois bûches (20% d'humidité) est de 3,8 kWh/kg, celle des bois plaquettes est de 3,5 kWh/kg et celle des granulés de bois est de 4,6 kWh/kg. Comparativement à la quantité d'énergie de biogaz qui est de 10 kWh/m³, la substitution de bois de chauffe par le biogaz apporte plus d'avantage énergétique.

i) Le digestat

Le digestat est un résidu, ou déchet "digéré", issu de la méthanisation des substrats organiques. Il est constitué des bactéries excédentaires, des matières organiques non dégradées, des matières minérales, ... La fermentation étant continue même après que ce dernier quitte le réacteur, il est stocké dans des fosses ou dans des réservoirs hors sol ou enterrés dans des fosses équipées des couvertures étanches au gaz et pour le maintien des matières nutritives.

Qualité et utilisation du digestat

Les effets positifs de la fermentation des effluents d'élevage sur les propriétés du digestat sont:

- Réduction de mauvaises odeurs;
- Large dégradation des acides organiques à chaîne courte et donc minimisation du risque de brûlure des feuilles;

- Amélioration des propriétés rhéologique (flux), d'où une simplification de l'homogénéisation et une réduction de l'encrassement des feuilles des cultures fourragères;
- Amélioration de l'efficacité de l'azote à court terme grâce à une concentration accrue en azote à action rapide;
- Elimination ou inactivation des graines de mauvaises herbes et des germes (pathogènes).

Les éléments nutritifs sont intégralement préservés dans le digestat. Le tableau suivant présente une comparaison des ses paramètres et des ses propriétés à valeur ajoutée avec ceux des effluents d'élevage.

Tableau 10 : De taux de la composition chimique des différents digestats.

Paramètre	Unité/nom	Lisier brut principalement lisier de bovin	Lisier de bovin et cultures énergétiques	DIGESTAT		
				Lisier de porcin et cultures énergétiques	Cultures énergétiques	Déchets et cultures énergétiques
Matière sèche	%MF	9,1	7,3	5,6	7,0	6,1
Acidité	pH	7,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Rapport carbone/azote	C/N	10,8	6,8	5,1	6,4	5,2
Substances basiques	Kg CaO/t MF	2,9	-	-	3,7	3,5
		Kg/MF				
Azote	N _{total}	4,1	4,6	4,6	4,7	4,8
Ammonium – N	NH ₄ – N	1,8	2,6	3,1	2,7	2,9
Phosphate	P ₂ O ₅	1,9	2,5	3,5	1,8	1,8
Potassium	K ₂ O	4,1	5,3	4,2	5,0	3,9
Magnésium	MgO	1,02	0,91	0,82	0,84	0,7
Calcium	CaO	2,3	2,2	1,6	2,1	2,1
Soufre	S	0,41	0,35	0,29	0,33	0,32
Matière organique	MO	74,3	53,3	41,4	51,0	42,0

Le digestat joue le rôle de fertilisant organique et bio du sol agricole, mais aussi comme un insecticide et/ou pesticide s'il est aspergé à l'état liquide sur les feuilles. Cette méthode protège la plantation contre les insectes ravageurs. Il est aussi utilisé pour le traitement des semences en vue de l'augmentation de leur pouvoir germinateur, l'augmentation de la coloration, la saveur et la douceur des fruits.

Le digestat peut également être utilisé comme des sources de nutriment en aquaculture. Pour cette dernière utilisation, la fraction liquide doit être diluée dans le ratio liquide/eau de 1/1,5 ou 1/2.

La fraction liquide du digestat peut servir d'inoculum en digestion anaérobie. Cependant, il est recommandé que le volume de recirculation n'excède pas 50% du volume de la fraction liquide du digesteur afin de maintenir stable la production du méthane.

j) L'épandage de digestat sur les terres agricoles

L'utilisation durable des terres agricoles est subordonnée à un apport suffisant en matière organique, ainsi qu'à l'apport d'éléments nutritifs adaptés aux besoins des cultures et au type de sol. La hausse du prix d'engrais minéraux a occasionné de recourir à l'engrais biologique issu des digestats.

L'épandage du digestat comme engrais sur les terres agricoles fait appel aux mêmes techniques que celles utilisées pour l'épandage des engrais liquides. Le digestat est appliqué dans la couche superficielle du sol (0 à 30 cm), ce qui évite toute contamination des cultures.

Selon Pivato et al., (2016), les doses d'amendement de digestat utilisés par les agriculteurs varient de 30 à 60 tonnes par hectare par an suivant les types de culture, les caractéristiques du sol et les limites d'épandage de la forme azotée.

A des doses identiques, certains chercheurs ont révélé que l'efficacité des digestats liquides était similaire et parfois supérieure à celle des engrais minéraux (Ortenblad, 2000 ; Kapuinen et Regina, 2010) ; Tcivienne et al., 2010 ; Odlare et al. 2011).

Le système de compostage et utilisation dans le champ (norme NFU 44-095)

Le compostage a un objectif celui de :

- Stabiliser les composants organiques ;
- Tuer les jeunes pathogènes et les graines de mauvaises herbes ;
- Eliminer les composants malodorants ;

Sachant que le digestat n'est pas structuré, l'opération de compostage nécessite l'ajout d'un matériau plus structuré (tel que du paillis d'écorce) où le remplissage fréquent de la matière.

Photo 8 : De différence de la coloration du feuillage entre l'espace appliqué le digestat et l'espace non appliqué. Photo prise le 08 janvier 2021



Conclusion et suggestion

L'épuisement annoncé des ressources énergétiques fossiles, allié au problème environnemental du réchauffement climatique ont renforcé l'intérêt pour les énergies renouvelables et les alternatives qu'elles peuvent offrir.

Les enjeux des énergies renouvelables sont vastes ; elles permettent d'une part, de limiter l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, d'autres parts, elles offrent des moyens de production d'énergies à une échelle locale. Parmi les multiples sources d'énergies renouvelables, le biogaz produit par la digestion anaérobie s'inscrit dans une politique de développement durable. Les gisements de matière organique pouvant servir à produire du biogaz sont nombreux (effluents industriels et agricoles, déjections animales, déchets ménagers, ...), mais ils restent néanmoins sous-exploités.

Voilà pourquoi dans ce travail, nous avons commencé par montrer l'aperçu historique de la découverte du biogaz dans différents endroits du monde et les premiers digesteurs mise en place.

Ensuite, nous nous sommes focalisés sur la mise en route du digesteur, les systèmes de contrôle jusqu'à la production du biogaz. Ce dernier a montré ses caractéristiques en étant brut et après

les différentes étapes d'épuration. Le biogaz, étant une énergie de substitution est utilisée dans les différents domaines selon que ce dernier est épuré.

Toujours dans le cadre de la protection de l'environnement, le biogaz est l'énergie capable de remplacer les bois de chauffage, car il montre son importance sur le plan environnemental et énergétique. En se basant sur le pouvoir calorifique de chaque source, le biogaz produit plus d'énergie que le bois de chauffage.

Étant donné que dans le système de production de biogaz rien ne se perd, le résidu issu de cette fermentation joue le rôle capital dans le domaine agricole car, le digestat devient le substituant de l'engrais chimique et, le résultat obtenu est supérieur à ce dernier. Le digestat est aussi utilisé pour le traitement des semences.

Enfin, pour préserver les forêts congolaises et participer dans la lutte contre la déforestation et le réchauffement climatique, il est conseillé d'installer les micro-digesteurs d'environ 1 mètre cube (1 m³) dans les ménages des milieux ruraux, mais aussi dans les milieux urbains à carence de courant électrique. Leur production à domicile et son utilisation rationnelle améliorera leur condition de vie.

Bibliographie

- [1].Édora : fédération des énergies renouvelables : « qu'est-ce que le biogaz ? ». www.edora.be
- [2]. Afsset, « avis et rapport de l'Afsset relatif à : l'évolution des risques sanitaires liés à l'injection de biogaz dans le réseau de gaz naturel » 2008.
- [3].Anti biogaz digesteur (inde) : « bharatlaxmi stoves save lives in village Nandal ». copyright 2018.
- [4].Ch. COUTURIER-SOLAGRO : technique de production d'électricité à partir du biogaz de synthèse. Février 2009. www.record-net.org
- [5].D. GAU, S. LOTZ : le biodigesteur : « technico-économique ». CIRAD-EMVT. 2001. <http://pigtrop.cirad.fr>
- [6].Fabien Dauriac : « les clés de réussite d'un projet biogaz ». ONNOV-AGRI 2011.
- [7].FAO : « bioénergie et sécurité alimentaire ». Évaluation rapide (BEFS RA). Biogaz communautaire. www.fao.org/publications.
- [8].FSTF (Faculté des Sciences et Techniques de Fès) : « projet biogaz : prototype de production de biogaz. www.iresen.org.
- [9].Guide sur le biogaz : « de la production à l'utilisation. www.biogasportal.info.
- [10].Injection biométhane, outil d'aide à l'injection de biométhane dans les réseaux de gaz naturel : « principes et procédés d'épuration du biométhane pour l'injection dans le réseau de gaz naturel ». Faisabilité du projet d'injection-considérations générales. Version 19/08/2011. www.injectionbiomethane.com
- [11].Installation de biogaz autoconstruite ou comment rouler avec du caca. <http://forum.adabio-autoconstruction.org>

- [12].M. Beudet, D.L. : « les biogaz et les sites d'enfouissement ». 2003. <http://www.mendeleiv.cyberscol.qc.ca/chimistrie/2002-2003/MBeudet.html>
- [13].Nicolas Dupont : « valorisation de biogaz de fermentation : combustion catalytique ». Autre. Université Claude Bernard-Lyon I, 2010. Français. NNT :2010LYON10081. Tel-00816867.
- [14].TCHA-THOM Maglwa (thèse 2019) : « recherche d'une filière durable pour la méthanisation des déchets de fruits et d'abattoir du Togo : évaluation du potentiel agronomique des digestats sur les sols de la région de la Kara ». géochimie. Université de Limoge ; Université de Lomé (Togo), 2019. Français. NNT : 2019LIMO0061. Tél-02370133. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02370133>.
- [15].TNA Report : évaluation des besoins en technologies et plans d'action technologiques aux fins d'adaptation aux changements climatiques-côte d'Ivoire. <http://tech-action.org/>
- [16].TUWIEN et TVT : « du biogaz au biométhane » : revue technique. www.thvt.at. Référence EIE : IEE/10/130. Delivery reference : W.P.3.1.1. 2012.
- [17].http://www.biogazpourproduiredubiomethane_78.pdf
- [18].http://www.biogazrhonealpes.org/dump/lestraitementsdubiogazpourproduiredubiomethane_78.pdf
- [19].http://www.developpement_durable.gouv.fr/valorisation-du-biogaz.html
- [20].<http://www.fritz-seeger-verschluesse.com>
- [21].ressources énergétiques : http://www.biogaz_energierenouvelable.info/biogaz_ressources.html
- [22].<https://www.total-proxi-energies.fr/particuliers/actualites/pouvoir-calorifique-du-bois-de-chauffage>
- [23].Zenabou SEGDA : le biodigesteur, méthanisation : « de la bouse au biogaz et à l'engrais ». Women Environmental Program Burkina. 2014.