

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITÉ SALAH BOUBNIDER, CONSTANTINE 03**  
**FACULTÉ DE GÉNIE DES PROCÉDÉS**  
**DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT**

N° d'ordre : ... ..

Série : ... ..

## **Mémoire**

**PRESENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER**  
**EN GÉNIE DES PROCÉDÉS**  
**OPTION : GÉNIE DES PROCÉDÉS DE L'ENVIRONNEMENT**

# **Amélioration de la production en biogaz par un prétraitement acide**

**Présenté par :**  
**Gat Mayar Narimene**  
**Hammadi Amani**  
**Hamama Maroua**

**Dirigé par : Dr.Kheirddine Bani**

**Année universitaire**

**2023-2024**

**Session : juin**

## Remerciements

Nous remercions Allah le tout puissant, qui nous a donné la volonté et la patience pour étudier et élaborer ce modeste travail.

Il est difficile de résumer en quelques lignes toute la gratitude que nous ressentons envers les nombreuses personnes qui nous ont accompagné et soutenu tout au long de ce parcours nous souhaitons exprimer notre plus profonde reconnaissance à l'encadrante, **Dr.Khierdine Bani**, pour son encadrement exceptionnel, sa patience et ses conseils avisés. Sa confiance en nos capacités et ses encouragements constants ont été des piliers essentiels pour la réalisation de ce travail. Nous remercions également les membres de jury, pour leurs remarques constructives, leur disponibilité et Leur expertise a considérablement enrichi ce mémoire. Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette mémoire. Votre soutien, vos encouragements et vos conseils ont été essentiels pour mener ce projet un grand merci.

## **Dédicace**

Je dédie ce travail à ma persévérance, ma résilience et ma force intérieure qui m'ont guidée à travers les moments les plus difficiles. Pour chaque obstacle que j'ai surmonté et chaque succès que j'ai atteint, j'ai prouvé ma détermination et mon engagement envers mes rêves. Je suis fière de tout ce que j'ai accompli et je continue de croire en moi-même. Je suis une source d'inspiration et de courage.

### **À Mon Cher père, MOURAD,**

Mon père, mon héros et mon guide. Ton courage et ta sagesse ont été les phares qui m'ont guidée à travers les tempêtes de la vie. Merci pour chaque leçon, chaque étreinte et chaque mot d'encouragement. Ton amour inconditionnel a façonné la personne que je suis aujourd'hui.

### **À Mon Adorable mère, SAMIA,**

Ma mère, la source de mon inspiration et la lumière de ma vie. Ton amour infini et ta tendresse m'ont offert un refuge sûr dans ce monde parfois chaotique. Merci pour chaque sacrifice, chaque moment de réconfort et pour m'avoir toujours soutenue. Tu es mon ange gardien.

### **À Mes Sœurs, LINA, BOUCHRA, ALAA,**

Mes sœurs, mes complices et mes amies éternelles. Votre présence dans ma vie a été un cadeau précieux. Merci pour les rires partagés, les secrets chuchotés et le soutien indéfectible. Vous avez enrichi ma vie de joie, de compréhension et d'un amour sans limite.

### **À Mon Mari, BADR EDDINE,**

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mon mari, pour son soutien inébranlable, sa patience et sa compréhension. Ses encouragements constants ont été une source de force et de motivation, surtout dans les moments de doute. Sa présence à mes côtés a rendu ce parcours beaucoup plus supportable.

A tous les membres de la famille **HAMMADI** sans aucune exception.

**HAMMADI AMANI**

## Dédicace

Je remercie Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné  
durant tous ces années d'études.

A ma famille, pour leur générosité et leurs disponibilités, son amour a fait de moi ce  
que je suis aujourd'hui, les mots ne sont pas assez forts pour exprimer l'estime et la  
gratitude que je leur doit, Je dédie ce mémoire aux êtres les plus chers à mon cœur :

A mon très cher père **KAMEL**

Pour ses encouragements son soutien Ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel  
amour, que ce mémoire soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.

A ma très chère mère **ILHEM**

Pour ses efforts et ses prières au Dieu Tout-Puissant. J'espère que mon succès sera un  
cadeau pour tout ce que tu as fait pour moi

À la mémoire de ma grande mère **ZAHIA**

Puisse Dieu l'accueillir dans son infinie Miséricorde.

À mes chères sœur **NOUSSA, ASSIL, OUMEIMA**

Qui m'avez toujours soutenus et encouragés durant ces années d'études, je remercie  
tout particulièrement ma chère sœur **NOUSSA**

À mon très cher frère **OUSSAMA**

À mes cher amis avec les quelle j'ai passé des bons moments.

A tous les membres de la famille **GAT** et **HAOUAR** sans aucune exception

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à ma famille proche, et à toutes les  
personnes qui connaissent et aiment "**MAYAR**".

**GAT MAYR NARIMENE**

## Dédicace

Je dédie cet humble travail :

A la mémoire de mon cher père **DJAMEL**

Ce travail dédié à mon père, qui m'a toujours poussée et motivée dans mes études. J'espère que du monde qui est sien maintenant, il est apprécié et humble geste comme preuve de connaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu l'accueillir dans son infinie Miséricorde.

A ma cher mère **NADIRA**

Pour leur soutien indéfectible, pour l'amour dont elle m'a toujours entourée et pour l'éducation qu'elle m'a offerte.

A mes très chères sœurs **NOUR EL HOUDA** et **NOUR EL IMENE**.

A ma nièce **ALAA ERAHMEN** et mon neveu **ADEM**.

A ma chère grande mère maternelle **ZAHIA**, pour son affection à mon égard, et que dieu la bénisse.

A tous les membres de la famille **HAMAMA** et **BENARIBA** sans aucune exception.

A mes très chères amis avec les quelle j'ai passé des bons moments.

A ma promotrice **Mme KHEIREDDINE BANI** pour son suivi et son précieux conseil.

A tous qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

**HAMAMA MAROUA**

## Table des matières

Remerciements .....	3
Dédicace.....	4
Liste des figures .....	VIII
Liste des tableaux .....	IX
Liste des abréviations.....	X
Introduction générale.....	1
Chapitre I .....	1
Généralité sur les déchets urbains .....	1
I Définition des déchets.....	4
I.1 Déchets urbains .....	5
I.2 Composition et caractéristiques des déchets urbains .....	5
<b>I.2.1 Les déchets industriels</b> .....	5
I.2.1 Les déchets municipaux .....	6
I.3 Principes relatifs à la gestion des déchets .....	6
I.4 Épluchure d'artichaut.....	8
I.4.1 Composition épluchure d'artichaut .....	8
Chapitre II .....	4
<b>La digestion anaérobie Les prétraitements de la digestion anaérobie</b> .....	4
II Introduction.....	11
<b>II.2 La digestion anaérobie</b> .....	11
<b>II.2.1 Définition</b> .....	11
<b>II.3 Principe de la digestion anaérobique</b> .....	12
<b>II.4 Processus biologique de la digestion anaérobie</b> .....	12
<b>II.4.1 Étapes du processus</b> .....	12
<b>II.5 Applications de la digestion anaérobie</b> .....	14
<b>II.6 avantages et ses inconvénients de la digestion anaérobie</b> .....	16
<b>II.7 Prétraitements de la digestion anaérobie</b> .....	16
<b>II.7.1 Prétraitement mécanique</b> .....	16
<b>II.7.2 Prétraitement thermique</b> .....	17
<b>II.7.3 Prétraitement biologique</b> .....	17
Chapitre III.....	21
<b>Matériels et méthodes</b> .....	21

III	Introduction.....	22
III.1	Matériels utilisés.....	22
III.1.1	Origine de l'inoculum.....	22
III.1.2	Substrat.....	23
III.1.3	Amélioration de la solubilité du substrat.....	25
III.2	Tests de potentiel de méthane biochimique (BMP).....	25
III.2.1	Régime de température.....	26
III.2.2	La répartition des réacteurs batch.....	27
III.3	La mesure de volume du biogaz.....	27
III.3.1	La mesure de composition du biogaz.....	27
III.4	Les méthodes analytiques.....	28
III.4.1	Mesure du PH.....	28
III.4.2	Matière en suspension « MES » et matière volatile en suspension « MVS ».....	29
III.4.3	Matière sèches « TS ».....	29
III.4.4	TA et TAC.....	30
III.4.5	Demande chimique en oxygène « DCO ».....	31
Chapitre IV	.....	33
<b>Résultats et Discussions</b>	.....	33
IV	Introduction.....	34
IV.1	Méthodologie.....	34
IV.2	Solubilité.....	34
IV.3	Caractérisation physico-chimique de l'inoculum et substrat utilisée.....	34
IV.4	Effet du prétraitement acide sur les paramètres Physicochimiques du substrat (Déchets d'artichaut) et solubilisation de la matière.....	36
IV.4.1	L'influence du prétraitement sur le PH.....	36
IV.4.2	L'influence du prétraitement sur TA et TAC.....	36
IV.4.3	L'influence du prétraitement sur MES et MVS.....	37
IV.4.4	L'influence du prétraitement sur le TVS%.....	37
IV.4.5	Effet du rapport $DCO_S/DCO_T$ .....	38
IV.5	Conclusion de la solubilité.....	39
IV.6	Résultat de la phase gazeuse des prétraitements acide après incubation (Phase mésophile).....	39
IV.6.1	Variation du volume cumulé totale en biogaz (ml/g TVS).....	39



IV.6.2	Variation du volume cumulé en méthane .....	40
IV.7	Amélioration de la production en biogaz pour le prétraitement acide .....	41
IV.8	Conclusion de la biodégradabilité .....	43
IV.9	Caractéristiques de la phase liquide après incubation (phase mésophile).....	44
IV.9.1	pH après incubation .....	45
IV.10	Pourcentage d'élimination de quelques paramètres après la phase d'incubation dans les réacteurs.....	45
➤	Pourcentage d'élimination des TS et TVS.....	45
IV.11	Pourcentage d'élimination de DCOT après incubation.....	46
IV.12	Conclusion.....	47
<b>Chapitre V</b>	.....	<b>48</b>
<b>Résultats de modélisation</b>	.....	<b>48</b>
V	Introduction.....	49
V.1	Cinétique de production cumulée de méthane .....	49
V.1.1	Modèle de Gompertz (1825) .....	50
V.1.2	Modèle Logistic (LM) :.....	50
V.2	Résultats de la modélisation du prétraitement chimique sur la production du méthane en phase mésophile .....	50
V.3	Influence du temps de latence $\lambda$ des deux modèles :.....	53
V.4	Influence de la vitesse maximale de production du méthane des deux modèles.....	53
V.5	Conclusion.....	54
<b>Conclusion générale</b>	.....	<b>55</b>
<b>Références bibliographiques</b>	.....	<b>51</b>
<b>Perspectives</b> .....	.....	<b>52</b>
<b>Résumé</b> .....	.....	<b>58</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b>	Objectifs de la gestion des déchets.	7
<b>Figure II.1</b>	Le principe de la méthanisation	12
<b>Figure II.2</b>	Les étapes de la digestion anaérobie.	15
<b>Figure III.1</b>	homogénéisation mécanique de la boue	23
<b>Figure III.2</b>	Epluchures d'artichaut	24
<b>Figure III.3</b>	processus de broyage des artichauts	25
<b>Figure III.4</b>	Les réacteurs batch utilisés (250ml).	27
<b>Figure III.5</b>	La solution de KOH.	28
<b>Figure III.6</b>	La mesure de biogaz	28
<b>Figure III.7</b>	pH mètre	28
<b>Figure III.8</b>	La filtration.	29
<b>Figure III.9</b>	Appareillage de mesure de DCO.	30
<b>Figure III.10</b>	Evolution du MES et MVS en fonction de prétraitement acide	37
<b>Figure III.11</b>	Evolution du TVS% en fonction de prétraitement acide	37
<b>Figure IV.1</b>	Evolution du DCO s/DCO t en fonction du pH	38
<b>Figure IV.2</b>	volume cumulatif du biogaz total produit des différents pH testés en phase mésophile	39
<b>Figure IV.3</b>	volume cumulatif du méthane produit	40
<b>Figure IV.4</b>	Amélioration de la production en biogaz traité par un acide	42
<b>Figure IV.5</b>	Rendement d'élimination en TS et TVS en fonction du prétraitement acide	45
<b>Figure IV.6</b>	Rendement d'élimination en DCO totale en fonction du prétraitement acide	46
<b>Figure IV.7</b>	(C0, C1, C2, C3, C4, C5) : Production cumulée du méthane (ml/g TVS) et régression de GM, LM en fonction du temps pour différentes testes de prétraitements chimique (acide) en phase mésophile	51
<b>Figure V.1</b>	prétraitements chimique (acide) en phase mésophile	52
<b>Figure V.2</b>	l'influence du temps de latence $\lambda$ en utilisant GM et LM (prétraitement chimique	53
<b>Figure V.3</b>	Influence de la vitesse maximale R max de production du en méthane en utilisant LM et GM	53

## Liste des tableaux

<b>Tableau I .1</b>	Composition de l'épluchure d'artichaut	9
<b>Tableau II .1</b>	les avantages et les inconvénients	16
<b>Tableau III.1</b>	équipements utilisé	22
<b>Tableau III.2</b>	compositions de la solution nutritive.	26
<b>Tableau IV.1</b>	Caractérisation physico-chimique de la boue utilisée.	35
<b>Tableau IV.2</b>	Caractérisation physico-chimique du substrat	35
<b>Tableau IV.3</b>	Effet du prétraitement acide sur les paramètres physicochimiques du substrat (Déchet d'artichaut)	36
<b>Tableau IV.4</b>	Effet du prétraitement acide avant et après incubation	44
<b>Tableau IV.5</b>	Rendement d'élimination des TS et TVS	45
<b>Tableau IV.6</b>	Rendement d'élimination en DCO totale	46
<b>Tableau V.1</b>	Estimation des paramètres cinétiques du modèle de GM ainsi que leurs valeurs R2 en Mésophile	52
<b>Tableau V.2</b>	Estimation des paramètres cinétiques du modèle de LM ainsi que leurs valeurs R2 en Mésophile	52

## Liste des abréviations

**OMS** : organisation mondiale de la santé.

**DCO** : déclaration de conformité des objectifs

**DIB** : déchets industriels banals.

**DIS** : déchets industriels spéciaux.

**AGV** : concentration des acides gras volatils (mg DCO/l).

**BMP** : Biochemical méthane potentiel.

**DCO** : demande chimique en oxygène (mg/l).

**DCOT** : demande chimique en oxygène total (mg DCO/l).

**DCOS** : demande chimique en oxygène soluble (mg DCO/l).

**GM**: Gompertz Modifier.

**LM** : logistic model.

**MES** : matière en suspension.

**MO** : matière organique.

**MVS** : matière volatile en suspension.

**TS** : solides totaux (g/l).

**TVS** : solides volatils.

**OMS** : organisation mondiale de la santé.

**DCO** : déclaration de conformité des objectifs

**DIB** : déchets industriels banals.

**DIS** : déchets industriels spéciaux.

**V(t)** : Production cumulée de méthane (mLCH<sub>4</sub>/g TVS).

**V max** : la production cumulée de méthane à la fin de l'expérience (mL.g/TVS).

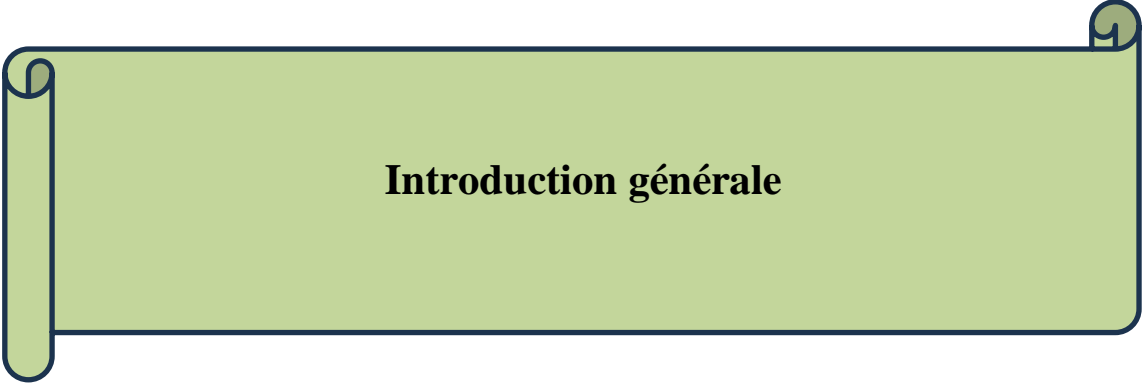
**R max** : la vitesse maximale de production du méthane (mL.g/TVS.j).

**e** : Constante mathématique ( $\exp(1) = 2,718282$ ).

**$\lambda$** : Période de phase de latence ou temps minimum pour produire du méthane (jours).

**LM** : Logistic model.

**GM** : Gompertz model.



## **Introduction générale**

## Introduction générale

Le développement industriel et l'accélération de l'urbanisation, ont été accompagnés d'une demande accrue en énergie, surtout en combustibles fossiles, qui est considéré comme la première source d'énergie. Et qui ne dureront pas éternellement, la pénurie du pétrole va progressivement s'installer [1].

Par ailleurs, la croissance des activités humaines génère une production de plus en plus de déchets de différentes sortes : déchets industriels, ordures ménagères, déchets agricoles, eaux usées urbaines...etc. Tous ces déchets ont bien sur des impacts très néfastes sur l'environnement ainsi que sur la santé humaine.

La digestion anaérobie est l'une des principaux traitements biologiques permettant de réduire la matières organiques et substances toxiques, et de générer, en même temps, de l'énergie sous forme de biogaz. Ce dernier est une énergie renouvelable. Il pourrait être valorisé, après son épuration, pour la production de biocarburant, d'électricité et/ou de chaleur.

Dans le souci d'une valorisation énergétique d'un déchet organique, nous avons muni cette étude expérimentale qui a eu lieu à la faculté de génie des procédés de l'université Constantine 3 dans le laboratoire REMEDD. Toute en procédant à une méthanisation améliorée par un prétraitement acide.

L'amélioration de la production de biogaz revêt une importance capitale dans la transition vers une économie plus durable et respectueuse de l'environnement. À cet égard, le prétraitement acide apparaît comme une approche prometteuse pour améliorer la digestion anaérobie des substrats organiques et ainsi accroître la production de biogaz. Cette méthode implique de faire agir des acides sur les matières premières organiques avant de les introduire dans le digesteur anaérobie [2].

Ainsi, l'objectif de cette étude est d'analyser l'impact du prétraitement acide sur le rendement volumique spécifique (volume produit) et énergétique (taux de  $\text{CH}_4$ ) du biogaz en utilisant un déchet d'artichaut comme substrat et les boues de la STEP OUED EL ATHMANIA comme inoculum.

Le prétraitement acide présente de nombreux bénéfices importants, tels que l'accroissement du taux de méthane, la diminution des temps de rétention requis et l'amélioration de la stabilité du processus de digestion. L'optimisation des conditions environnementales dans le digesteur entraîne ces bénéfices, ce qui favorise l'activité des microorganismes qui produisent du méthane.

Dans le premier chapitre : On présente une étude bibliographique des déchets ménagères leurs composition physico-chimiques, ces caractéristiques ainsi que et son impact sur l'environnement.

Dans le chapitre suivant (chapitre 2) : On examine en profondeur les principes essentiels du prétraitement acide et ses mécanismes d'action dans L'objectif de présenter quelques références bibliographiques sur la digestion anaérobie.

Dans le troisième chapitre On présente les équipements et les méthodes employées dans cette étude, en particulier les réacteurs en série utilisés dans le laboratoire, le pH, TA, le TAC, DCO, TS, TVS, MES, les MVS en prenant en considération le paramètre principale « volume produit du biogaz et du méthane ».

Le quatrième chapitre présente l'interprétation des résultats obtenus par le prétraitement acide en phase mésophile.

Le chapitre cinq a permis de mettre en application deux modèles numériques en utilisant les équations de Gompertz modifier, et Logistic

Enfin, une synthèse résume les résultats les plus significatifs obtenus dans cette étude à la fin de cette description qui a ouvert le débat sur les perspectives de ce travail.





**Chapitre I**

**Généralité sur les déchets urbains**

## I Définition des déchets

Le terme « déchet » apparaît au XIV<sup>e</sup> siècle, il est dérivé du verbe déchoir qui signifie la baisse de valeur d'une matière ou d'un objet, jusqu'à ce qu'il devienne inutilisable dans un lieu et un temps spécifique [3].

En raison de l'étendue du concept et de son importance dans les domaines de la recherche, Mary Douglas, la notion de déchets est associée à celle de saleté. Selon elle, il est défini comme « le résultat d'organisation et d'une classification de la matière, toute mise plusieurs auteurs ont donné une définition du mot déchet.

- D'après en ordre aboutit au rejet d'éléments non adaptés » [4].
- Selon certains auteurs les ordures sont des déchets dégoûtants qui sont rejetés où abandonnés après un processus de production ou de consommation. Ils sont les déchets provenant de la fabrication ou de la transformation de quelque chose, ainsi que les restes de matériaux qui peuvent être récupérés ou non [5].
- Selon l'OMS, les déchets sont des objets dont le propriétaire n'a plus envie à une époque et à un endroit donné, et qui n'ont plus de valeur. En droit civil et dans la terminologie du droit des biens, le "déchet" est défini comme "un bien meuble qui est juridiquement rattaché à la catégorie des choses sans maître, qui a été volontairement délaissée par son propriétaire" [6].
- D'après la réglementation environnementale algérienne, les déchets sont tous les déchets qui résultent d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien meuble qui a été abandonné ou destiné à l'abandon par son propriétaire.
- Le code de l'environnement désigne "toute matière ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le propriétaire se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défait" [7].
- Selon la loi n 01/19 du 12/12/2001 relatif à la gestion et élimination des déchets en dans le cadre du développement durable en Algérie, les déchets sont définis comme "tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, ainsi que toute substance ou produit et bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, prévoit de se défait ou doit s'en débarrasse [8].

## I.1 Déchets urbains

Les déchets urbains varient en fonction de leur composition et de leurs caractéristiques. Le niveau de revenu de vie des populations, le niveau d'industrialisation des villes et le développement des pays sont responsables de cette variabilité.

Le concept de déchets urbains est souvent défini comme étant l'ensemble des déchets issus de différentes activités des foyers. Ils comprennent les déchets ménagers, également connus sous le nom de déchets solides, les vidanges des fosses septiques, les eaux usées et les déchets provenant des abattoirs. Toutefois, la production des déchets d'une ville englobe à la fois les déchets municipaux et les déchets des industries qui y sont implantées [9].

## I.2 Composition et caractéristiques des déchets urbains

L'origine des déchets est le critère de classification. Les déchets industriels et les déchets municipaux (déchets ménagers et déchets des services, hôpitaux, marchés...) peuvent être divisés en deux grandes catégories. Chaque catégorie est caractérisée en fonction de l'état physique des déchets.

### I.2.1 Les déchets industriels

Les résidus de l'industrie désignent les déchets générés par différentes industries (ou usines) et entreprises implantées dans la région urbaine. Ce genre de déchets reflète le niveau et la nature de l'industrie présente dans la ville. La nature et l'importance des matières premières ainsi que la technique de production influencent leur quantité et leur composition [10].

- **Déchets industriels banals (DIB):** Les DIB, également appelés déchets industriels banals, sont des déchets provenant des entreprises (commerce, artisanat, industrie, service) qui, en raison de leur nature, peuvent être traités ou stockés dans les mêmes installations que les déchets ménagers. Ils sont tous les mêmes éléments, mais dans des proportions variées.
- **Déchets industriels spéciaux (DIS) :** Les déchets spécifiques sont appelés Déchets Industriels Spéciaux, ou DIS. Les substances potentiellement polluantes peuvent

contenir des substances toxiques en quantités variables, ce qui peut entraîner des dangers pour l'environnement si elles ne sont pas traitées ou stockées de manière adéquate [11].

### **I.2.1 Les déchets municipaux**

#### ➤ **Les déchets solides municipaux**

Les déchets sont traités par les services municipaux. Les déchets produits par les foyers et les marchés sont à peu près les mêmes en termes de caractéristiques et de composition. Il est possible de classer ces déchets solides en fonction de leur origine. Les déchets issus des activités domestiques et des marchés incluent les déchets de cuisine et de balayures (éventuellement des bureaux), les débris végétaux et animaux, les verres ou les vaisselles, les plastiques, les cendres, les feuilles, ainsi que divers déchets décomposés. La composition diffère en fonction du niveau de vie des ménages [9].

#### ➤ **Les déchets liquides urbains**

Les eaux usées des ménages, des marchés, des services, des écoles, des hôpitaux, etc. sont considérées comme des eaux usées. Les caractéristiques de ces eaux varient en fonction de leur origine. Les informations les plus précises seront fournies dans le chapitre consacré aux eaux usées [12].

### **I.3 Principes relatifs à la gestion des déchets**

Dans une société axée sur la consommation et le gaspillage, il est essentiel de prendre en charge la gestion des déchets pour les raisons mentionnées précédemment (santé publique, préservation de l'environnement, hygiène, toxicologie écologique, etc.). De cette manière, la DCO de l'environnement établit tous les objectifs et mesures liés à cette gestion. Parmi ces articles, l'un d'entre eux est le suivant : « Toute personne qui produit ou possède des déchets est tenue d'en garantir ou d'en faire garantir l'élimination ».

Il établit les mesures concernant la gestion des déchets en se basant sur quatre objectifs principaux toujours selon la réglementation algérienne.

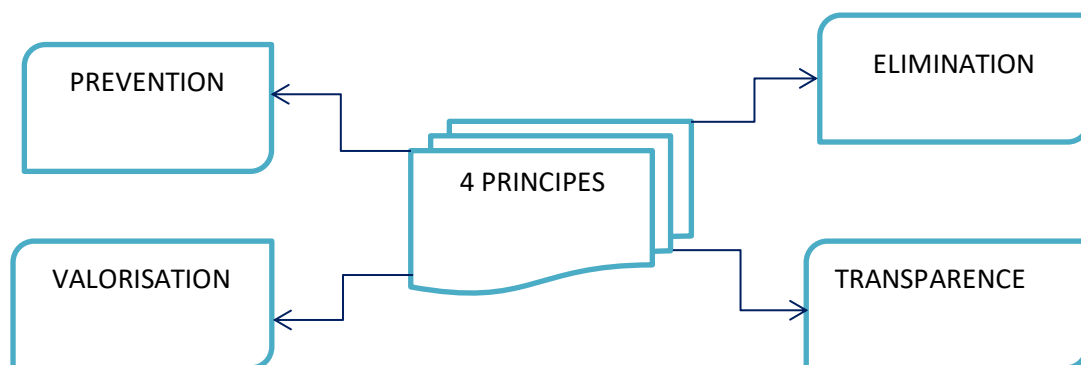


figure I .1 : Objectifs de la gestion des déchets.

### ➤ **Prévention**

Son objectif est de diminuer la quantité de déchets produites (en intervenant sur les méthodes de fabrication, la distribution,) ; La réduction de leur dangerosité ; La planification des déplacements (moins de distance, de volume, déclaration à la préfecture) ; Le concept du responsable-payeur.

### ➤ **Valorisation**

Il s'agit d'un des atouts du DCO de l'environnement : Les composés et les matières premiers présents dans les déchets sont valorisés. La réutilisation, l'utilisation, le recyclage, la valorisation énergétique, la valorisation des matières,... etc. peuvent être réalisées.

### ➤ **Élimination**

Elle concerne :

- Interdiction d'abandon-de brulage ;
- Interdiction de certaine mélange (huiles, emballages.....) ;
- Interdiction de rejetés non conformes dans les réseaux collectifs ;
- Interdiction d'enfouissement des déchets bruts ;

Le producteur est tenu d'assurer ou de faire assurer l'élimination d'un déchet Polluant ou dangereux.

➤ **Information (transparence)**

Elle aborde les aspects suivants : rapport entre l'industrie et l'administration (contrôle des surcoûts, bordereaux de suivi...) ; rapport entre l'industrie et la population ; relation entre les différents acteurs de la chaîne. Transporteur, établissement de tri, établissement de stockage technique... etc.

Depuis 2002, le débat sur la gestion des déchets et les controverses récurrentes concernant les risques environnementaux liés aux décharges sauvages incinérateurs qui ne respectent pas les nouvelles exigences de plus en plus rigoureuses, tels que les déchets industriels, les boues d'épandage, les déchets ménagers, etc., ont été relancés. Effectivement, la prise en charge des déchets constitue un défi majeur dans différents domaines tels que la préservation de l'environnement, l'économie des ressources naturelles, la maîtrise des impacts sur l'environnement et les aspects socio-économiques [13].

#### **I.4 Épluchure d'artichaut**

L'épluchure d'artichaut est un déchet organique riche en protéine et en lipide donc peut être utilisé dans le traitement biologique spécialement dans la digestion anaérobie pour la production de biogaz, ce qui offre de nombreux bénéfices potentiels, tels que la valorisation des déchets, la production d'énergie renouvelable et la diminution des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, il est nécessaire de prendre en considération plusieurs critères afin de garantir l'efficacité et la pérennité du processus. L'épluchure d'artichaut est une matière organique riche en fibres et en composés bioactifs qui peuvent être utilisés pour produire du biogaz par digestion anaérobie [14].

##### **I.4.1 Composition épluchure d'artichaut**

La quantité de matière sèche idéale est généralement comprise entre 20 et 30% [15]. La présence d'une plus grande quantité de matière sèche indique une disponibilité accrue de matière organique pour la production de biogaz.

**Tableau I .1** : Composition de l'épluchure d'artichaut [13] [4] [43]

<b>Teneur en matière sèche</b>	La teneur en matière sèche optimale se situe généralement entre 20 et 30%. Une teneur en matière sèche plus élevée signifie qu'il y a plus de matière organique disponible pour la production de biogaz[15].
<b>Rapport C/N</b>	Le rapport C/N optimal se situe généralement entre 20 et 30. Un rapport C/N équilibré garantit une dégradation optimale de la matière organique et une production de biogaz efficace[16].
<b>Composés bioactifs</b>	L'épluchure d'artichaut contient des polyphénols et des flavonoïdes qui peuvent influencer le processus de digestion anaérobie [17].

**Chapitre II**

**La digestion anaérobie et les prétraitements de la  
digestion anaérobie**



### III Introduction

Les déchets organiques d'origine animale et végétale peuvent être décomposés par des processus aérobie ou anaérobies. En fait, la méthanisation est une forme de décomposition microbienne sans oxygène de résidus organiques solides ou liquides, ce qui est intéressant car elle produit un gaz combustible. Ce bénéfice peut encourager l'utilisation de systèmes de traitement anaérobie des déchets, ce qui peut améliorer l'indépendance énergétique des processus existants, surtout avec l'augmentation des déchets due à l'amélioration du niveau de vie. Les prétraitements des boues font référence aux diverses méthodes physico-chimiques, mécaniques et biologiques utilisées pour stabiliser et éliminer les boues dans les stations d'épuration et les industries. Ces techniques cherchent à mieux gérer les boues en augmentant la production de gaz, en rendant les nutriments plus accessibles aux micro-organismes, en réduisant le volume des boues et le temps nécessaire à leur traitement, tout en favorisant la production de méthane dans les processus anaérobies [18] [19] [20].

## II.2 La digestion anaérobie

### II.2.1 Définition

La méthanisation (également connue sous le nom de digestion anaérobie) consiste à décomposer la matière organique (glucides, lipides, protéines) par des micro-organismes dans des conditions contrôlées et sans oxygène [21]

Ce mécanisme biologique génère un résidu de digestion stabilisé et hygiénisme, connu sous le nom de digeste, ainsi qu'un biogaz à composition variable :

De 50 à 80 % de méthane (CH<sub>4</sub>), de 30 à 50 % de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), de l'eau (H<sub>2</sub>O) à saturation, des composés traces (NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, CO).

La digestion anaérobie est utilisée dans le cadre du processus de traitement des déchets biodégradables et des boues d'épuration. Dans le cadre d'un système intégré de gestion des déchets, la digestion anaérobie réduit les émissions de gaz de décharge dans l'atmosphère. Elle a un pouvoir de destruction cellulaire parmi les plus puissants du monde biologique, et permet l'élimination d'une quantité importante de MO.

La digestion anaéro-bie des boues est normalement mise en œuvre sans recyclage de boues digérées épaissies, le temps de séjour et la concentration initiale des boues en MO permettant la synthèse de la flore bactérienne sans risque de lessivage [21].

- La méthanisation en deux phases est une excellente solution pour : assurer une hydrolyse rapide de la MO dans un premier réacteur thermophile à faible temps de séjour.
- Optimiser la phase de méthanisation dans un second réacteur mésophile.

### II.3 Principe de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie est réalisée par des micro-organismes, principalement des bactéries, qui décomposent la matière organique en des éléments plus simples. Contrairement à la digestion aérobie qui utilise l'oxygène, la digestion anaérobie suit un chemin métabolique différent [18].

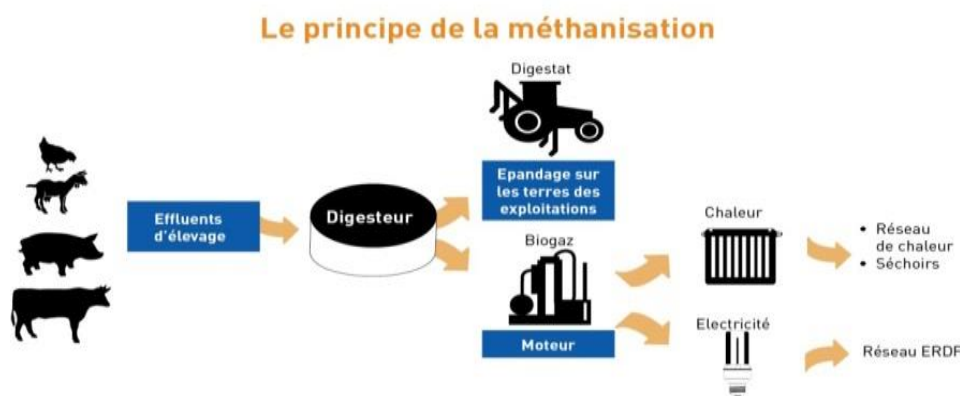
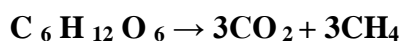


Figure II .1 : Le principe de la méthanisation [22].

## II.4 Processus biologique de la digestion anaérobie

### II.4.1 Étapes du processus

Les quatre étapes clés de la digestion anaérobie impliquent L'Hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Le processus global peut être décrit par la réaction chimique, où une matière organique telle que le glucose est digérée biochimiquement en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et en méthane (CH<sub>4</sub>) par les micro-organismes anaérobies.



#### II.4.1.1 L'Hydrolyse

L'Hydrolyse est le premier des quatre principaux processus biochimiques [23]. Au cours de L'Hydrolyse des composés organiques polymérisés, principalement insolubles, comme les glucides et les protéines, les graisses sont décomposées en

monomères et dimères solubles, c'est-à-dire en monosaccharides, acides aminés et acides gras [24].

Les bactéries hydrolytiques dégradent la matière organique fraîche (les polymères) en fragments solubles (monomères). Ces bactéries produisent des exoenzymes qui vont dégrader les polymères de la matière organique. Les vitesses de dégradation dépendent des substrats [25].

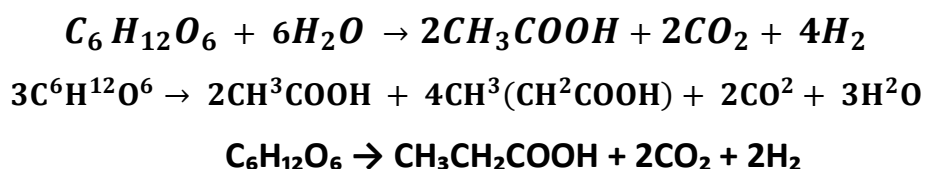
L'Hydrolyse des polymères difficilement décomposables, c'est-à-dire la cellulose et les cellulose-cotons est considérée comme une étape qui limite le taux de digestion des déchets [2].

#### II.4.1.2 Acidogénèse

L'acidogène est la seconde étape du processus de conversion de la matière organique cette phase, également appelée phase fermentative, transforme les différents monomères issus de L'Hydrolyse [26] [23].

Les bactéries acidogènes dégradent les molécules simples de matière organique (monomères) en acides et en alcools. Les acides synthétisés sont des Acides Gras Volatils (AGV). Ces AGV sont des acides avec une chaîne carbonée plus ou moins longue (de 2 à 10 atomes de carbone en général) [25].

La dégradation des monosaccharides par exemple, peut offrir plusieurs voies de dégradation comme illustré sur trois réactions suivantes [23] :



Les acides formés durant la phase d'acidogènes et d'hydrolyse des lipides vont ensuite subir une autre étape de transformation, l'étape d'acétogénèse [23].

#### II.4.1.3 Acétogénèse

Dans l'étape d'acétogénèse, ces intermédiaires métaboliques sont transformés en acétate, hydrogène et gaz carbonique grâce notamment, à trois groupes de bactéries [27] :

- **Les bactéries acétogènes productrices** obligées d'hydrogène (bactéries syntrophiques) oxydent les composés préalablement réduits (alcools et AGV) en hydrogène, gaz carbonique, et acétate [28].

- **Les bactéries homos acétogènes** réalisent la respiration acétogénique des bicarbonates, le catabolisme des mélanges d'hydrogène et de dioxyde de carbone et la production d'acide acétique, entrant ainsi en compétition avec les bactéries méthanogènes pour l'hydrogène [28].
- **Les bactéries sulfato-réductrices** oxydent les composés réduits (alcools, acides butyrique et propénoïque) en dioxyde de carbone et acétate, puis l'acétate en dioxyde de carbone. L'hydrogène est également oxydé en présence des sulfates. [28].

#### II.4.1.4 Méthanogenèse

La méthanogenèse implique la consommation d'hydrogène et la réduction par paliers du dioxyde de carbone. Un certain nombre de substrats peut être utilisé pour la méthanogenèse (acétate, formate, alcools de petite taille issus de la dégradation des pectines, ...), mais le dioxyde de carbone et l'hydrogène sont néanmoins les principaux substrats impliqués. Ainsi, la majorité du dihydrogène provenant de la dégradation des glucides termine en méthane [29].

#### II.5 Applications de la digestion anaérobie

La compréhension de la digestion anaérobie a permis de développer des applications intéressantes :

- **Production de biogaz** : En confinant la matière organique dans des digesteurs, on peut contrôler le processus pour produire du biogaz, une source d'énergie renouvelable [30].
- **Traitement des déchets organiques** : La digestion anaérobie permet de valoriser les déchets organiques tout en réduisant leur volume et leur impact environnemental [30].
- **Production d'engrais** : Le digestat, le résidu solide issu de la digestion, peut être utilisé comme fertilisant agricole [30]. La digestion anaérobie est donc un processus naturel ingénieux exploité par l'homme pour produire de l'énergie et valoriser les matières organiques [30].

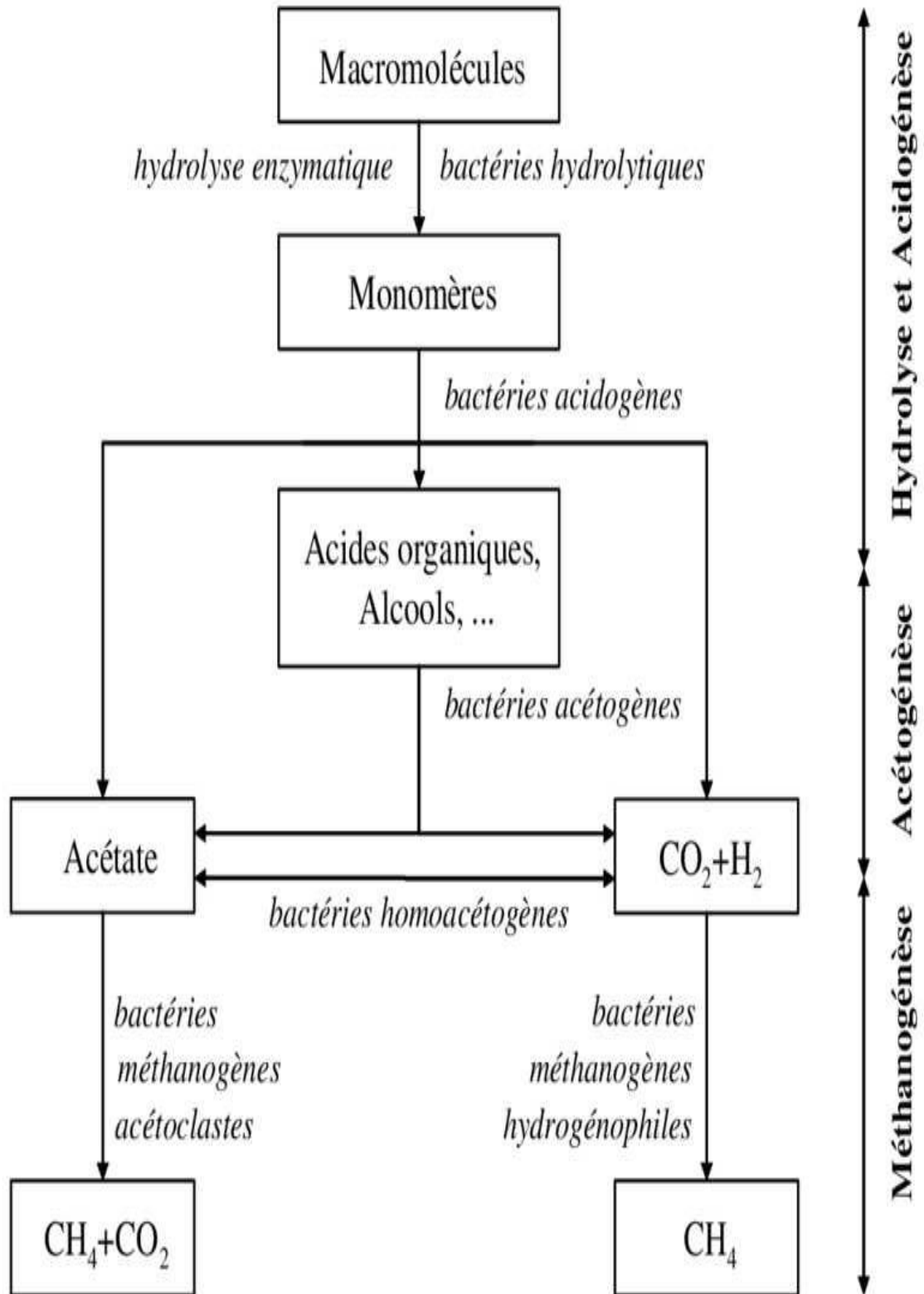


Figure II .2 : Les étapes de la digestion anaérobie [31].

## II.6 Avantages et ses inconvénients de la digestion anaérobie

Tableau II .1 : les avantages et les inconvénients [32]

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>☺ Une production d'un Biogaz valorisable sous forme d'énergie (chauffage, cogénération d'électricité).</li> <li>☺ Une réduction du nombre de micro-organismes pathogènes.</li> <li>☺ Un intérêt agronomique, lié à une concentration importante en azote ammoniacal <math>\text{NH}_4^+</math> et en phosphates (<math>\text{PO}_4^{3-}</math>) due à la lyse de la matière organique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☹ Une forte sensibilité aux variations de charges et aux composés toxiques.</li> <li>☹ Une dégradation plus lente que pour les procédés aérobies.</li> <li>☹ Des coûts d'investissement importants.</li> <li>☹ Du fait de la faible vitesse de croissance bactérienne, la cinétique d'épuration est lente et les périodes de démarrage des réacteurs relativement longues</li> </ul>

## II.7 Prétraitements de la digestion anaérobie

### II.7.1 Prétraitement mécanique

Pour améliorer l'efficacité du processus de la digestion anaérobie, différentes méthodes de prétraitement mécanique peuvent être utilisées, notamment le broyage, le criblage, la centrifugation et l'homogénéisation. Voici un aperçu de chaque méthode avec des références pertinentes

#### ➤ Broyage

Le broyage est un processus mécanique qui réduit la taille des particules de la biomasse, augmentant ainsi la surface spécifique disponible pour les microorganismes et facilitant la décomposition. Le broyage peut être effectué à l'aide de différents types de broyeurs (à marteaux, à disques, à couteaux, etc.) [33].

#### ➤ Criblage

Le criblage consiste à séparer les matériaux en fonction de leur taille en utilisant un tamis ou un dispositif similaire. Cela permet d'éliminer les impuretés et de trier les matériaux en fonction de leur granulométrie pour optimiser le processus de digestion [34].

### ➤ Centrifugation

La centrifugation est une technique de séparation basée sur la différence de densité des composants. Elle permet de séparer les solides en suspension du liquide, ce qui peut concentrer la biomasse et éliminer les particules non désirées [35].

### ➤ Homogénéisation

L'homogénéisation est un procédé qui vise à rendre homogène la consistance de la biomasse en la soumettant à des forces de cisaillement élevées. Cela favorise la décomposition microbienne en brisant les structures cellulaires et en augmentant la disponibilité des substrats [36].

## II.7.2 Prétraitement thermique

Le prétraitement thermique implique l'utilisation de la chaleur pour modifier les propriétés physiques et chimiques du substrat, ce qui peut accroître la solubilisation de la matière organique et réduire la taille des particules. Ce processus est particulièrement utile dans le processus de méthanisation des boues d'épuration, où il entraîne la liquéfaction des particules organiques en polysaccharides, lipides et protéines solubles, ou leur conversion en composés chimiques de plus faible masse. La solubilité des protéines est également augmentée, ce qui entraîne une augmentation de leur dégradation entre les boues brutes et les boues traitées thermiquement. La quantité de biogaz produite est également augmentée en raison de la dégradation accrue de la matière organique. Le processus de prétraitement entraîne des boues plus concentrées, qui occupent un volume plus petit pour la même quantité de matière, ce qui permet d'utiliser des réacteurs plus petits dans le processus de méthanisation [37].

## II.7.3 Prétraitement biologique

Le prétraitement biologique dans la digestion anaérobie utilise des micro-organismes pour décomposer le substrat la lignine et la cellulose, améliorant l'efficacité du processus et réduisant les inhibiteurs. Les méthodes varient selon le substrat et les besoins spécifiques du processus. Les études soulignent l'importance de la teneur en eau pour contrôler le procédé, la nécessité de micro-organismes pour le démarrage, et recommandent le broyage fin malgré les risques. Ces approches innovantes visent à

optimiser l'interaction entre substrat et micro-organismes, essentielle pour la digestion anaérobie [38].

Les différents Types de prétraitements biologiques :

➤ **Prétraitement enzymatique**

Le prétraitement enzymatique implique l'ajout d'enzymes spécifiques qui dégradent les composants complexes de la biomasse, comme les lignocelluloses, en sucres simples et autres composés facilement dégradables. Cela accélère la biodégradation et améliore l'efficacité de la digestion anaérobie [39].

➤ **Prétraitement microbien**

Le prétraitement microbien utilise des microorganismes spécifiques, tels que des champignons ou des bactéries, pour dégrader les composants difficiles à digérer de la biomasse avant la digestion anaérobie. Ce traitement peut améliorer la solubilisation des matières organiques complexes [40].

➤ **Co-digestion**

La Co-digestion consiste à mélanger différents types de biomasses organiques pour équilibrer les nutriments et optimiser les conditions de digestion. En combinant des matières ayant des compositions complémentaires, on peut améliorer la performance globale du processus [41].

➤ **Hydrolyse biologique**

L'Hydrolyse biologique utilise des microorganismes pour hydrolyser les polymères complexes, tels que les protéines, les lipides et les polysaccharides, en monomères plus simples. Ce processus est souvent la première étape de la digestion anaérobie, facilitant la biodisponibilité des substrats pour les étapes ultérieures [42].

➤ **Fermentation acide**

La fermentation acide est un prétraitement qui convertit les matières organiques en acides gras volatils (AGV) par le biais de la fermentation. Ces AGV sont des précurseurs du méthane et peuvent être facilement convertis en biogaz lors de la digestion anaérobie [43].

#### II.7.4 Prétraitement chimique

Le prétraitement chimique dans la digestion anaérobie est crucial pour améliorer la biodégradabilité des matières organiques complexes, facilitant ainsi leur conversion en biogaz.



Voici une présentation détaillée des différents types de prétraitement chimique :

➤ **Prétraitement acide**

Le prétraitement acide utilise des acides forts comme l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) ou l'acide chlorhydrique (HCL) pour hydrolyser les composants complexes de la biomasse, en particulier la lignocellulose. Les acides brisent les liaisons glycosidiques dans les polysaccharides, libérant des sucres simples qui sont facilement fermentables [44].

L'Acide Sulfurique ( $H_2SO_4$ ) est l'un des agents acides les plus couramment utilisés pour le prétraitement des biomasses. Il est très efficace pour hydrolyser les hémicelluloses et la cellulose, mais il peut aussi entraîner la formation de sous-produits inhibiteurs comme les furfurals et les acides phénoliques. Généralement, Les concentrations d'acide sulfurique allant de 0,5% à 2% sont utilisées, avec des temps de traitement variant de quelques minutes à plusieurs heures, en fonction de la température (généralement entre 120°C et 180°C) [45].

L'Acide Chlorhydrique (HCL) est également utilisé pour le prétraitement des biomasses lignocellulosiques. Il fonctionne de manière similaire à l'acide sulfurique, en hydrolysant les polysaccharides en monomères de sucre. Cependant, il est moins courant en raison de son coût plus élevé et de sa manipulation plus dangereuse, Typiquement utilisé à des concentrations de 1% à 5%, avec des températures de traitement allant de 100°C à 150°C. Le temps de traitement peut varier de 30 minutes à plusieurs heures [46].

➤ **Prétraitement alcalin**

Le prétraitement alcalin utilise des substances alcalines comme l'hydroxyde de sodium (Na OH) ou l'hydroxyde de calcium ( $Ca(OH)_2$ ). Ces substances augmentent le pH, ce qui provoque la saponification des graisses, la dépolymérisation des lignines et la solubilisation des hémicelluloses. Cette action rend les matières organiques plus accessibles aux microorganismes et aux enzymes.

**(Na OH) :** C'est l'agent alcalin le plus couramment utilisé. Il peut être appliqué à différentes concentrations et températures pour maximiser l'efficacité de la dégradation.

(Ca (OH)<sub>2</sub>) : Utilisé pour son coût plus bas et son impact environnemental réduit par rapport à Na OH. Il est particulièrement efficace pour les substrats riches en lignocellulose [47].

➤ **Oxydation chimique**

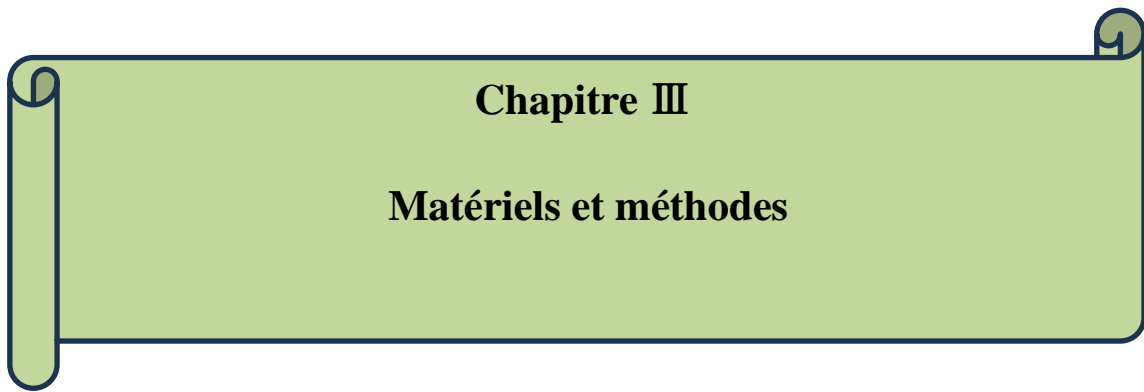
L'oxydation chimique implique l'utilisation d'agents oxydants pour dégrader les matières organiques récalcitrantes. Les agents oxydants, tels que le peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), l'ozone (O<sub>2</sub>) et l'acide per acétique, créent des radicaux libres qui décomposent les liaisons chimiques dans les matériaux organiques [48].

**Prétraitement à l'urée**

Le prétraitement à l'urée (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) exploite l'action alcalinisant de l'urée qui, en se décomposant, libère de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>). Cela augmente le pH et solubilise la lignine et les hémicelluloses, améliorant la biodisponibilité des substrats organiques pour la digestion anaérobie [49].

➤ **Hydrolyse thermochimique**

L'Hydrolyse thermochimique combine la chaleur et les produits chimiques pour décomposer les composants organiques complexes. Ce prétraitement est souvent utilisé pour les biomasses lignocellulosiques, car la chaleur et les produits chimiques (acides ou bases) agissent en synergie pour casser les liaisons chimiques. Combinaison de chaleur et d'acides/bases : Cette méthode permet une hydrolyse plus rapide et complète des composants résistants, augmentant ainsi la disponibilité des substrats pour la digestion anaérobie [50].



**Chapitre III**

**Matériels et méthodes**

### III Introduction

La méthanisation, également connue sous le nom de digestion anaérobie ou bio-méthanisation, représente une option prometteuse pour la gestion des déchets organiques et la génération d'énergie. Cette dégradation naturelle permet de convertir la matière organique en biogaz, principalement constitué de méthane et de gaz carbonique, ainsi que de digestat [39].

Le but de cette étude expérimentale est de déterminer les conditions optimales pour obtenir le meilleur rendement en matière de production de biogaz ET DE METHANE lors de la digestion anaérobie d'un substrat organique 'les déchets d'artichauts' d'un inoculum issu du bassin secondaire de la station d'épuration OUED EL ATHMANIA, et d'étudier l'effet de prétraitement chimique (Acide HCL à température 60°C) sur la production en biogaz et en méthane.

Les protocoles et les analyses expérimentaux ont été réalisés au niveau du laboratoire REMEDD de la faculté du génie des procédés de Constantine 3, pour la détermination des paramètres en relation avec notre travail à savoir TS, TVS, MES, MVS, TA, TAC, DCO.

#### III.1 Matériels utilisés

Pour cette étude, nous avons utilisé les équipements ci-dessous.

**Tableau III.1** : équipements utilisé

Matériels utilisés	La marque
Une étuve	(CHC binder)
Un four	(nabertherm)
Balance analytique	DIAB MS-H-S)
pH mètre	HANNA (instruments)
Agitateur mécanique	(Heidolph)
Bain marie	Schutzart DIN 40050-ip20

#### III.1 Description des échantillons

##### III.1.1 Origine de l'inoculum

L'inoculum a été préparé en utilisant des boues activées secondaires provenant de la ligne de retour des boues des stations d'épuration municipale de la STEP de OUED EL ATMANIA.

Avant d'être utilisée, la boue a été laissée reposer pendant 2 jours afin de permettre une bonne décantation et de faciliter l'élimination du surnageant. Cette déshydratation permet de réduire la teneur en eau des boues et d'augmenter les concentrations microbiennes. Cette dernière a été bien mélangée avec un agitateur mécanique afin de l'homogénéiser. Voir Figure III.1



**Figure III.1:** homogénéisation mécanique de la boue.

Une pré-incubation de l'inoculum a été réalisée dans des réacteurs batch étanches et fermés hermétiquement à une température de 37°C (phase mésophile) pendant 7 jours dans un bain-marie, pour permettre aux microorganismes de s'adapter aux conditions de travail. En outre, il a été indispensable de procéder à cette opération pour décomposer entièrement la matière organique biodégradable résiduelle des boues.

### III.1.2 Substrat

Le substrat utilisé peut être divers types de matières organiques, telles que des déchets agricoles, des déchets alimentaires ou des boues d'épuration.

On a choisi de travailler avec les déchets d'épluchure d'artichauts.

- Riches en matière organique : Les épluchures d'artichaut contiennent environ 20% de matière sèche, dont une grande partie est constituée de fibres et de sucres. Ces composés sont facilement dégradés par les micro-organismes anaérobies, ce qui en fait un bon substrat pour la production de biogaz.

- Disponibilité : Les épluchures d'artichaut sont un sous-produit abondant de l'industrie agroalimentaire. Leur utilisation comme substrat dans la digestion anaérobie permet de valoriser ces déchets et de réduire leur impact environnemental.
- Propriétés bénéfiques : Les épluchures d'artichaut contiennent des composés tels que les inulines et les fructanes, qui peuvent stimuler l'activité des micro-organismes anaérobies et améliorer l'efficacité de la digestion [46].

### III.1.2.1 Préparation du substrat

La préparation du substrat est une étape cruciale pour optimiser la digestion anaérobie et garantir un bon rendement en biogaz. Elle consiste à ajuster les caractéristiques du substrat pour offrir des conditions optimales aux micro-organismes responsables de la dégradation de la matière organique.

#### ➤ Séchage

Afin de faciliter le broyage on a effectué un Séchage dans une étuve pendant 24 heures à température 60°C. voir figure III.2



**Figure III.2** : Epluchures d'artichauts.

### ➤ Broyage et réduction de la taille des particules

Le broyage des matériaux solides en particules plus petites augmente la surface disponible pour les micro-organismes, facilitant ainsi l'Hydrolyse et la dégradation de la matière organique. C'est une méthode de prétraitement mécanique. Le substrat a été réduit à de taille 250  $\mu\text{m}$  en utilisant un tamis. Voir **Figure III.3**



**Figure III.3** : processus de broyage des éplucheurs artichauts

### III.1.3 Amélioration de la solubilité du substrat

#### ➤ Prétraitement chimique par l'acide chlorhydrique (HCL)

Le substrat est mélangé avec une solution d'acide d'HCL à différentes concentrations qui correspondent aux C0 (B+S), C1 (pH=2), C2 (pH=3), C3 (pH=4) et C4 (pH=).

Le mélange est maintenu à une température 60°C pendant 30minutes.

### III.2 Tests de potentiel de méthane biochimique (BMP)

Le potentiel méthanogène correspond à la quantité de méthane générée lors de la dégradation de l'échantillon, en fonction de la quantité de matière organique initialement présente dans l'échantillon examiné. On représente ce volume de gaz dans des conditions de température et de pression normales.

Grâce à ce test, il est possible de mesurer et de déterminer la quantité du biogaz et du méthane cumulées générés pour tous les tests effectués.

L'utilisation de bouteilles de sérum en verre de 250 ml a été réalisée en série, avec un volume de travail de 125 ml, Partager avec un ratio I/S égale 1/3 comme suit :

- 40 ml de boue
- 5 ml solution nutritive voir tableau III.3.
- HCL jusqu'à obtenir le pH requis,
- Quantité nécessaire d'eau distillé.

Pour garantir une atmosphère anaérobie, toutes les bouteilles ont été fermées de manière hermétique avec des bouchons en caoutchouc. Cette expérience a été réalisée dans des conditions mésophiles (37°C) placés dans un bain marie.

**Tableau III.3:** compositions de la solution nutritive[55].

Nutriments	Concentration (g/l)
FeCl <sub>3</sub> .4H <sub>2</sub> O	2
CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	2
MnCl <sub>2</sub>	0.318
CuCl <sub>2</sub>	0.024
ZnCl <sub>2</sub>	0.051
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.051
NiCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0.051
EDTA	1.001
HCL	1 ml
NH <sub>4</sub> Cl	1.401
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1.250
MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0.510
CaCl <sub>2</sub>	0.041
NO <sub>3</sub> Na	2.001

### III.2.1 Régime de température

Dans notre travail, les réacteurs ont été soumis à régime mésophile 37°C.

La température du milieu réactionnel a été maintenue constante grâce à une incubation dans un bain marie. On a procédé à une agitation manuelle afin d'uniformiser le contenu et d'accroître le contact entre les micro-organismes et le substrat.



### III.2.2 La répartition des réacteurs batch

- Les réacteurs blancs : ce sont des réacteurs qui ne contiennent que de l'inoculum, remplaçant ainsi la quantité du substrat par de l'eau distillée. Le biogaz est produit en raison de la dégradation résiduelle de l'inoculum.
- Réacteur témoins ce sont des réacteurs qui n'ont pas été prétraités, ils renferment un mélange de substrat et d'inoculum. Il sera possible de déduire la performance des prétraitements testés dans cette étude en utilisant ces réacteurs.
- Les réacteurs prétraités de substrat sont des réacteurs qui ont été soumis à des tests de prétraitement acide : pH=2, pH=3, pH4, pH=5.

Les tests BMP ont été effectués en duplicatas. L'enregistrement s'effectue quotidiennement de biogaz et du méthane à l'aide d'une seringue d'une contenance de 100 ml. Voir figure III.4



**Figure III.4:** Les réacteurs batch utilisés (250ml)

### III.3 La mesure de volume du biogaz

Le biogaz produit dans chaque bouteille est évalué chaque 24 heures .

#### III.3.1 La mesure de composition du biogaz

La composition du  $\text{CH}_4$  dans le biogaz est telle que suit :

En utilisant une seringue, on prélève un volume spécifique de biogaz produit par l'une des bouteilles, nous le notons (V1), puis on l'injecte dans une autre bouteille de 500ml contenant 20g/l de la solution de KOH et quelques gouttes de phénophtaléine.

Ensuite, on agite manuellement cette dernière pendant 2 à 3 minutes afin que tout le  $\text{CO}_2$  soit absorbé par la solution de KOH.

Puis, on évalue la quantité de  $\text{CH}_4$  présente dans la bouteille de KOH et on enregistre le volume ( $v_2$ ).

La composition du  $\text{CH}_4$  dans le biogaz est donnée par le rapport  $v_2/v_1$ .

On calcule la composition du biogaz en utilisant la relation suivante :

$$\text{La fraction \%} = (v_2/v_1) \times 100.$$

$V_1$ = volume du biogaz produit par l'une des bouteilles qui prend par la seringue.

$V_2$ = volume de  $\text{CH}_4$  contenant dans la solution de KOH. Voir **figure III.5**



**Figure III.5** : Détermination de la composition du biogaz par la solution de KOH.



**Figure III.6** : test d'inflammabilité de biogaz.

### III.4 Les méthodes analytiques

#### III.4.1 Mesure du PH

La mesure se fait en utilisant un capteur équipé d'une membrane en verre sensible aux ions hydronium (électrode PH) et en observant la réaction entre la membrane et l'échantillon : mesure d'un potentiel.



**Figure III.7** : pH mètre.

### III.4.2 Matière en suspension « MES » et matière volatile en suspension « MVS »

Les abréviations MES et MVS sont employées dans le traitement de l'eau et des eaux usées pour les Matières Sèches (MS), les Matières En Suspension (MES) et les Matières Volatiles en Suspension (MVS). Ces paramètres permettent de déterminer la charge organique de l'inoculum et le substrat.

La détermination des matières en suspension se fait par la méthode de filtration.



Figure III.8 : filtration gravitaire.

#### ➤ Procédure de fonctionnement

En utilisant du papier filtre ordinaire, on filtre 15 ml d'échantillon. Les matières retenues sur le filtre sont séchées à 105°C avant d'être pesées avec le filtre (M1).

La concentration de MES est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{MES (g/l)} = ((M1-M0) / V) * 100$$

Et la concentration des MVS déduite Après avoir placé le papier filtre au four à une température de 525°C pendant 2 heures

$$\text{MVS (g/l)} = \text{MES} - \text{MM} [55].$$

### III.4.3 Matière sèches « TS »

Afin de mesurer la quantité de matière sèche et de matière volatile présente dans la boue et le substrat, nous procéderons à ces étapes :

- Peser les capsules vides (M0).
- Peser les capsules remplies avec l'échantillon (M1) et les mettre dans l'étuve à une température de 105°C pendant une durée de 24 heures.

- Après avoir retiré les capsules de l'étuve, il est nécessaire de les placer dans le dessiccateur et de les peser (M2).

$$TS \text{ (g/l)} = ((M2-M0) / (M1-M0))*1000$$



**Figure III.9 :** Etuve de séchage.

Lorsque les capsules ont été séchées, placez-les dans le four à moufle à une température de 525°C pendant 2 heures qui nous renseignent sur la matière minérale (M3).

Les TVS et donnés par la formule suivante :

$$TVS \text{ (g/l)} = (((M2-M0) - (M3-M0)) / (M1-M0))*1000 \text{ [55]}.$$

#### III.4.4 TA et TAC

Selon la définition, l'alcalinité de l'eau est sa capacité à absorber les ions H<sup>+</sup> libérés par un acide fort pendant un titrage jusqu'à un point spécifique (point d'équivalence). On mesure manuellement l'alcalinité partielle (TA) et l'alcalinité totale (TAC) en ajoutant une solution titrée acide en présence d'un pH-mètre. On relève le pH d'un échantillon de volume V<sub>e</sub>.

Le volume V<sub>1</sub> représente la quantité d'acide (de l'acide chlorhydrique à 0,01 mol/l) requise pour atteindre une valeur de pH=6. Ensuite, on ajoute un autre volume d'acide V<sub>2</sub> jusqu'à ce qu'il atteigne un pH de 4.

TA et TAC sont calculés à partir de ces mesures, les résultats sont exprimés en mg CaCO<sub>3</sub>/l.

Le TA et TAC sont calculés à partir de ces mesures.

**L'alcalinité= (V HCL \*normalité de HCL \*50000\*M eq) /V échantillon [55].**

Avec :

**M<sub>eq</sub>** : masse équivalente de CaCO<sub>3</sub>.

Les résultats sont exprimés en mg CaCO<sub>3</sub>/l.

#### III.4.5 Demande chimique en oxygène « DCO »

Les oxydants chimiques forts utilisent l'oxygène pour oxyder les substances organiques et minérales de l'eau, ce qui entraîne une demande chimique en oxygène (ou DCO). C'est l'une des techniques les plus couramment employées pour évaluer la quantité totale de polluants organiques présents dans une eau.

Par digestion avec l'acide sulfurique et le dichromate de potassium, les échantillons sont oxydés de matière standard en présence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure (II). L'argent joue un rôle catalyseur dans l'oxydation des matières organiques les plus résistantes. La détection titrimétrie et le dosage colorimétrique sont utilisés pour détecter les turbides ou présenter une couleur inhabituelle après digestion. On utilise une solution de sulfate de fer (II) et d'ammonium comme indicateur coloré. La DCO est exprimée en mg O<sub>2</sub>/l selon l'équation suivante :

$$\text{DCO} = (8000 * C * (V1 - V2)) / V0$$

La mesure de la DCO soluble est effectuée de la même façon, mais après avoir passé l'échantillon par une centrifugation et une filtration sous vide millipores (0.45) [55].

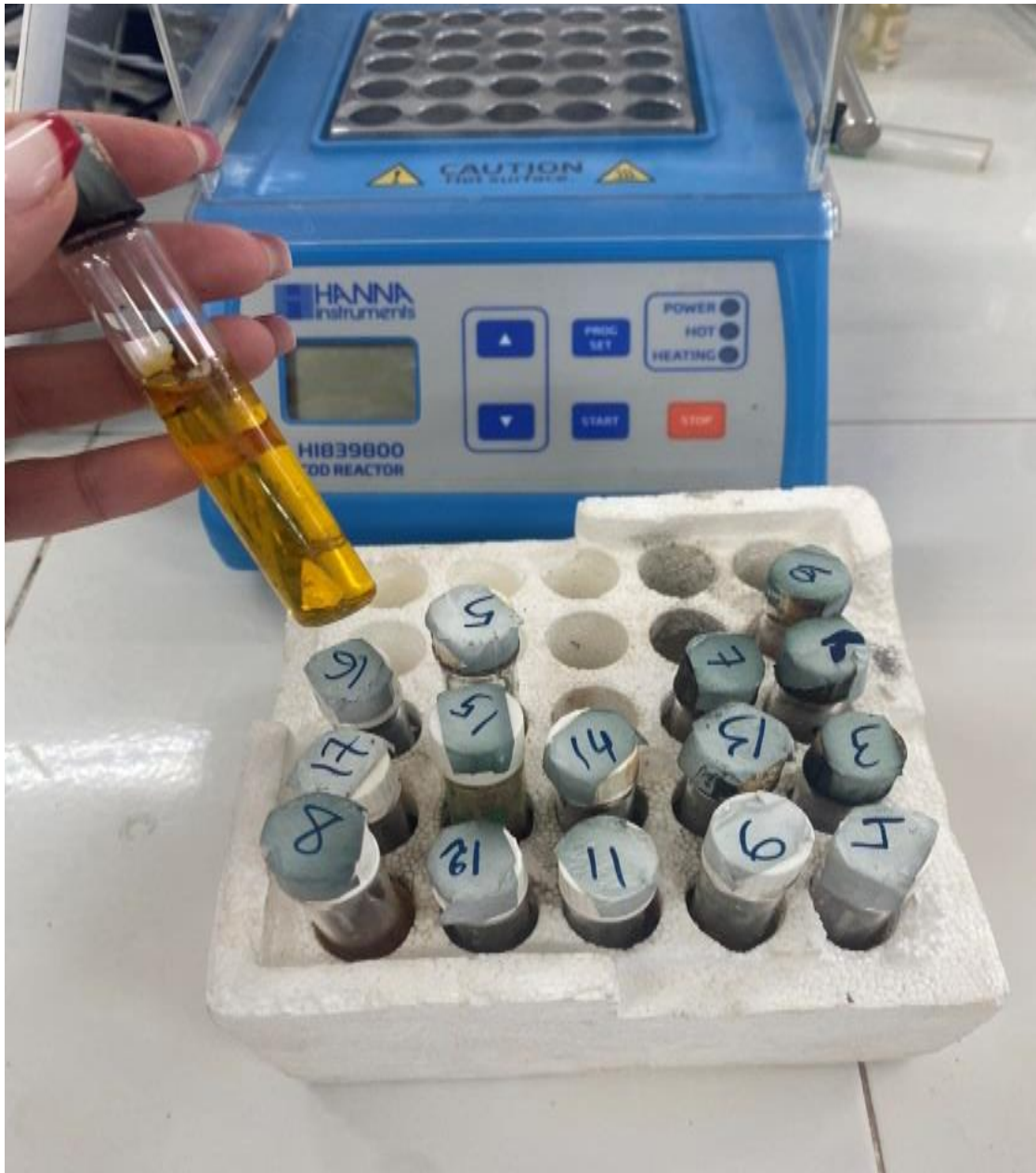


Figure III.10 : Appareillage de mesure de DCO.



**Chapitre IV**  
**Résultats et Discussions**

## IV Introduction

Plusieurs études ont montré que le prétraitement acide peut améliorer significativement la production de biogaz à partir de diverses matières premières, telle que les déchets alimentaires, les déchets agricoles et les boues d'épuration.

Les résultats trouvés ont été discuté par rapport à la solubilité et la biodégradabilité du substrat après avoir subi un prétraitement chimique dans un réacteur batch de 250 ml en phase mésophile (37°).

Le but est de déterminer le PH qui donne une production maximale en biogaz.

### IV.1 Méthodologie

Notre étude est basée sur une source de biomasse ayant un potentiel de production de biogaz élevé, spécifiquement l'artichaut et l'inoculum utilisé.

On a préparé 12 bouteilles de sérum en verres de 250 ml avec quatre arrangements de concentration en HCL qui correspondent aux pH suivants (pH=2, pH=3, pH=4, pH=5) pendant 30 min, avant l'incubation ces bouteilles ont été ajusté a un pH =7 en utilisant Na OH.

Durant toute la période de la digestion anaérobie, la quantité du biogaz et celle du méthane produit a été mesurée tous les jours en mode mésophile.

### IV.2 Solubilité

La solubilité du substrat Considérée (déchets de l'artichaut) a été déterminée en effectuant les rapports des paramètres (MES /MS), (TVS/TS) et le ratio de la DCO (DCOS /DCOT) dans l'objectif d'identifier que le prétraitement par un acide testés augmente mieux la solubilité de l'artichaut.

### IV.3 Caractérisation physico-chimique de l'inoculum et substrat utilisée

A partir le tableau de la Caractérisation physico-chimique de la boue on observe que :

Un pH=7 de la boue est neutre, ce qui est favorable pour l'activité microbienne dans le processus de méthanisation.

TA (pH=6) (mgCaCO<sub>3</sub>/l) et TAC (pH=4) (mgCaCO<sub>3</sub>/l) est entre (4,6 et 25), indiquant une faible capacité tampon, ce qui peut indiquer une faible concentration en bicarbonates.

AGV (g/l) est de 20,4 Les acides gras volatils sont présents à une concentration modérée, suggérant une activité de fermentation active.



Une grande proportion des solides totaux TVS% sont des solides volatils 59,71%, indiquant une forte proportion de matière organique dans les solides totaux

La demande chimique en oxygène totale DCO t (g/l) est élevée varie entre (59,22 et 43,64) indiquant une forte charge organique.

**Tableau IV.1** : Caractérisation physico-chimique de la boue utilisée

Paramètres	Boue
PH	7
TA (pH=6) (mgCaco3/l)	4,6
TAC(pH=4) (mgCaco3/l)	25
AGV	20,4
TS (g/l)	40,38
TVS(g/l)	24,11
TVS%	59,71
MES(g/l)	0,28
MVS(g/l)	0,16
DCO t (g/l)	59219,2
DCO s (g/l)	43635,2

**Tableau IV.2** : Caractérisation physico-chimique du substrat

Paramétrées	Substrat
TS(g/l)	893,32
TVS(g/l)	762,76
TVS%	85,38
MES(g/l)	0,309
MVS(g/l)	0,018

A partir les tableaux de la Caractérisation physico-chimique du substrat on observe que :

Une grande proportion des solides totaux sont des solides volatils **TVS%** (**85,38%**), ce qui signifie que la majorité des solides dans le substrat est organique et donc potentiellement biodégradable.

#### IV.4 Effet du prétraitement acide sur les paramètres Physicochimiques du substrat (Déchets d'artichaut) et solubilisation de la matière

Les principales caractéristiques physico-chimique du mélange réactionnel avant l'incubation Sont présentées dans le tableau

**Tableau IV.3 :** Effet du prétraitement acide sur les paramètres physicochimiques du substrat (Déchet d'artichaut)

Contact des réacteurs avec différents pH pendant 30 min					
paramètres	C0 (pH=ajusté)	C1 (PH=2)	C2 (PH=3)	C3 (PH=4)	C4 (PH=5)
PH	7	7	7	7	7
TA (ph=6) (mgCaco3/l)	0	0	0	0	0
TAC (ph=4) mgCaco3/l)	3460	3700	4140	4640	4480
TS(g/l)	32,69	22,03	28,36	29,34	27,9
TVS(g/l)	10,61	9,06	15,65	10,21	11,9
TVS%	32,47	41,15	55,17	34,8	42,64
MES(g/l)	0,03	0,026	0,025	0,026	0,028
MVS(g/l)	0,024	0,019	0,017	0,018	0,021
DCO <sub>T</sub> (g/l)	79478,4	57660,8	59219,2	59219,2	59219,2
DCO <sub>s</sub> (g/l)	46752	35843,2	37401,6	38960	42076,8
DCO <sub>s</sub> /DCO <sub>T</sub> (g/l)	58	62	63	66	71

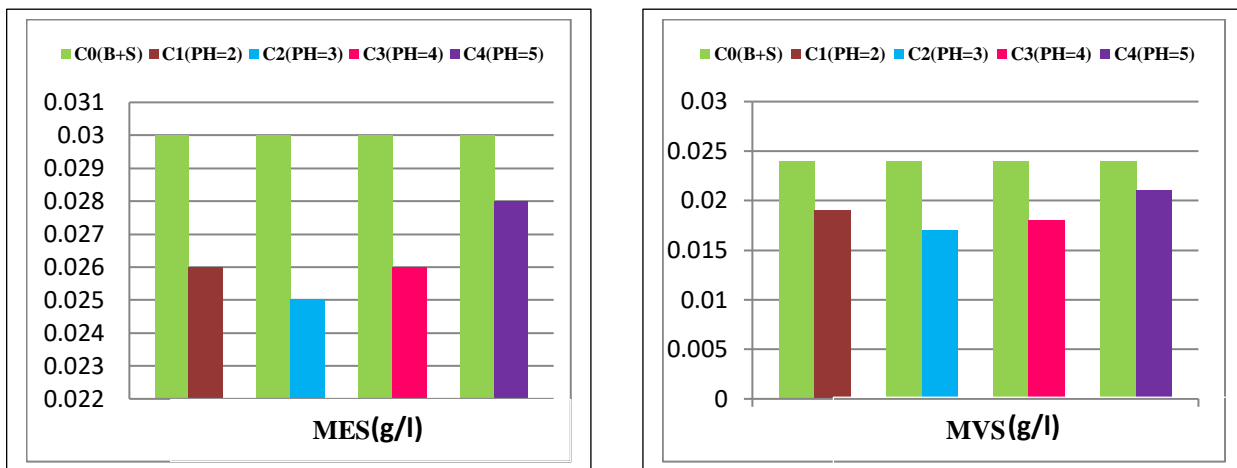
##### IV.4.1 L'influence du prétraitement sur le PH

D'après les premiers résultats obtenus voir le tableau... on remarque que le pH dans tous les réacteurs est neutre. Le pH du digesteur doit généralement être compris entre 6,8 et 7,6 afin d'assurer une digestion anaérobie efficace et une production optimale de biogaz.

##### IV.4.2 L'influence du prétraitement sur TA et TAC

L'alcalinité totale est nulle pour tous les échantillons. Cela pourrait indiquer une absence ou une neutralisation complète des carbonates dans les mélanges Le TAC augmente avec la diminution du pH initial du prétraitement, atteignant son maximum pour le mélange à pH=4 (C3) et diminuant légèrement à pH=5 (C4). Un TAC élevé indique que le mélange réactionnel est instable dans le processus de méthanisation. On était obligé de faire une correction du pH.

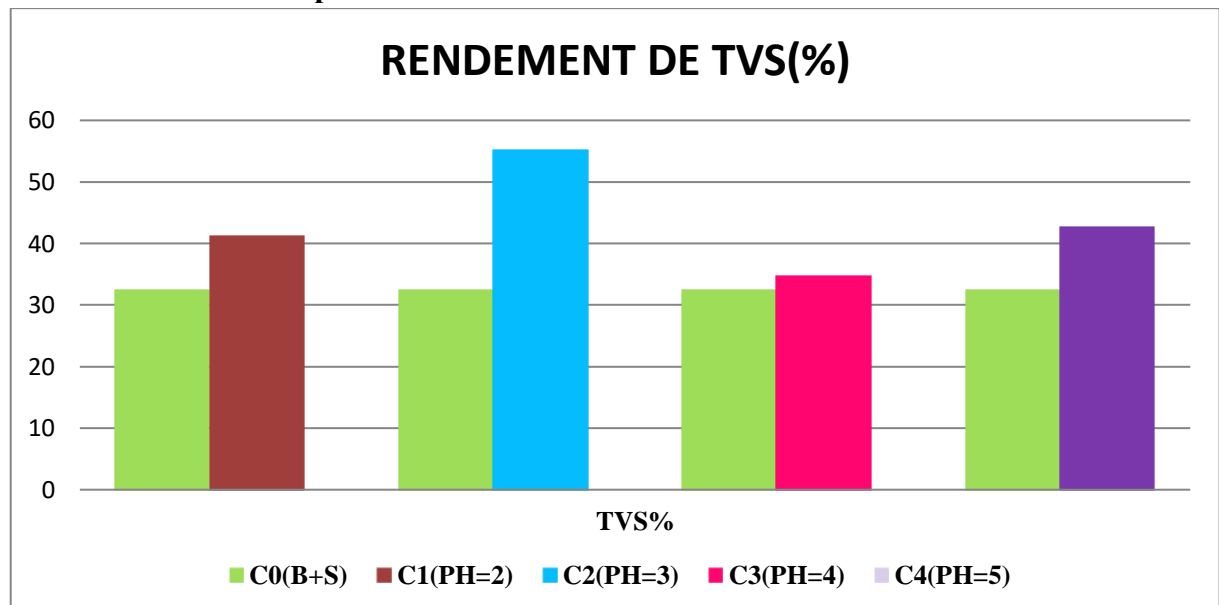
#### IV.4.3 L'influence du prétraitement sur MES et MVS



**Figure IV.1 :** Evolution du MES et MVS en fonction de prétraitement acide.

MES et MVS sont deux paramètres très importants pour comparer la solubilisation de la matière solide se trouvant dans les différents réacteurs de substrat testé. Les résultats de la figure IV.1 montrent que la MES et la MVS sont plus importantes pour le teste sans prétraitement ils diminuent sous l'effet de prétraitement acide ceci peut être expliqué par le fait que la quantité de matière contenue dans le surnageant (matière solide) du test sans prétraitement est plus grande quantité que celui des autres tests.

#### IV.4.4 L'influence du prétraitement sur le TVS%

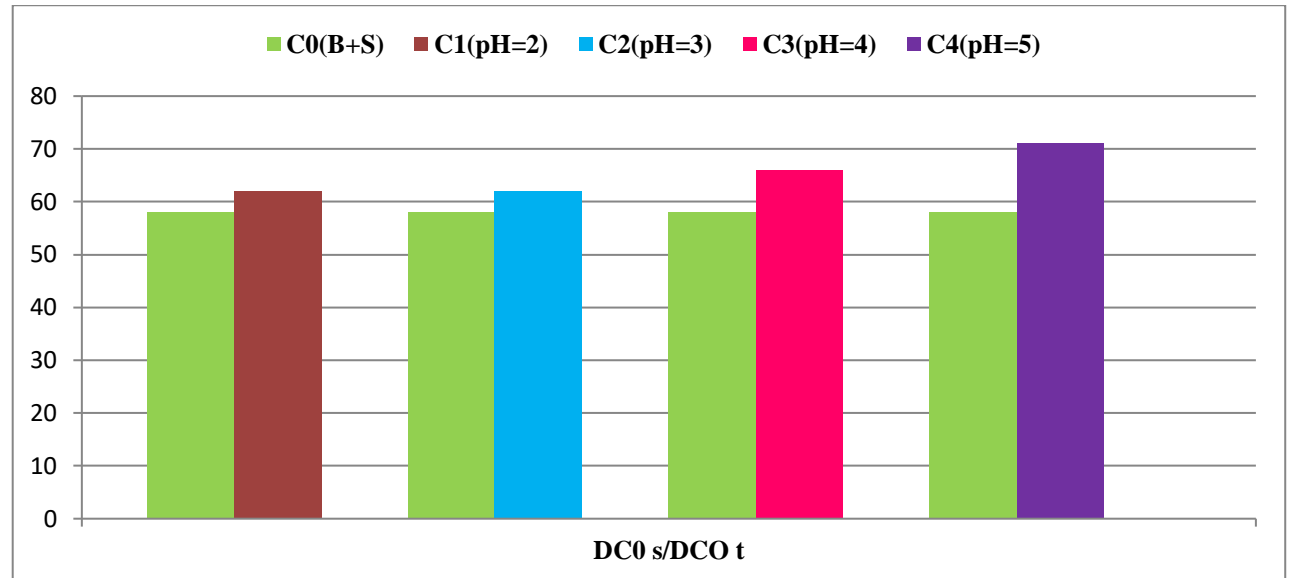


**Figure IV.2 :** Evolution du TVS% en fonction de prétraitement acide.

Le pourcentage en TVS est plus important pour les tests de prétraitement acide, il atteint 55% pour le prétraitement acide à pH=3.

Cela nous permet de conclure que le prétraitement améliore la proportion de matière organique par rapport aux solides totaux.

#### IV.4.5 Effet du rapport $DCO_s/DCO_T$



**Figure IV.3 :** Evolution du  $DCO_s/DCO_T$  en fonction du pH.

Afin de voir mieux l'effet du prétraitement vis-à-vis la solubilisation de la matière il était préférable d'introduire le ratio  $DCO_s/DCO_T$  qui reflète le transfert de la phase particulaire vers la phase soluble. **Ratio= $DCO_s/DCO_T * 100$ .**

Le graphique montre l'effet du prétraitement acide sur le rapport entre la demande chimique en oxygène soluble ( $DCO_s$ ) et la demande chimique en oxygène totale ( $DCO_T$ ) pour différents prétraitements acides.

On observe que le Prétraitement à pH=5 est le plus efficace, car il donne le rapport  $DCO_s/DCO_T$  le plus élevé, ce qui pourrait se traduire par une meilleure biodégradabilité et une production accrue de biogaz et indiquant une solubilisation maximale des composés organiques.

Le prétraitement à pH=3 (C2) montre également une bonne efficacité avec une augmentation significative du rapport  $DCO_s/DCO_T$  par rapport au C0 (B+S).

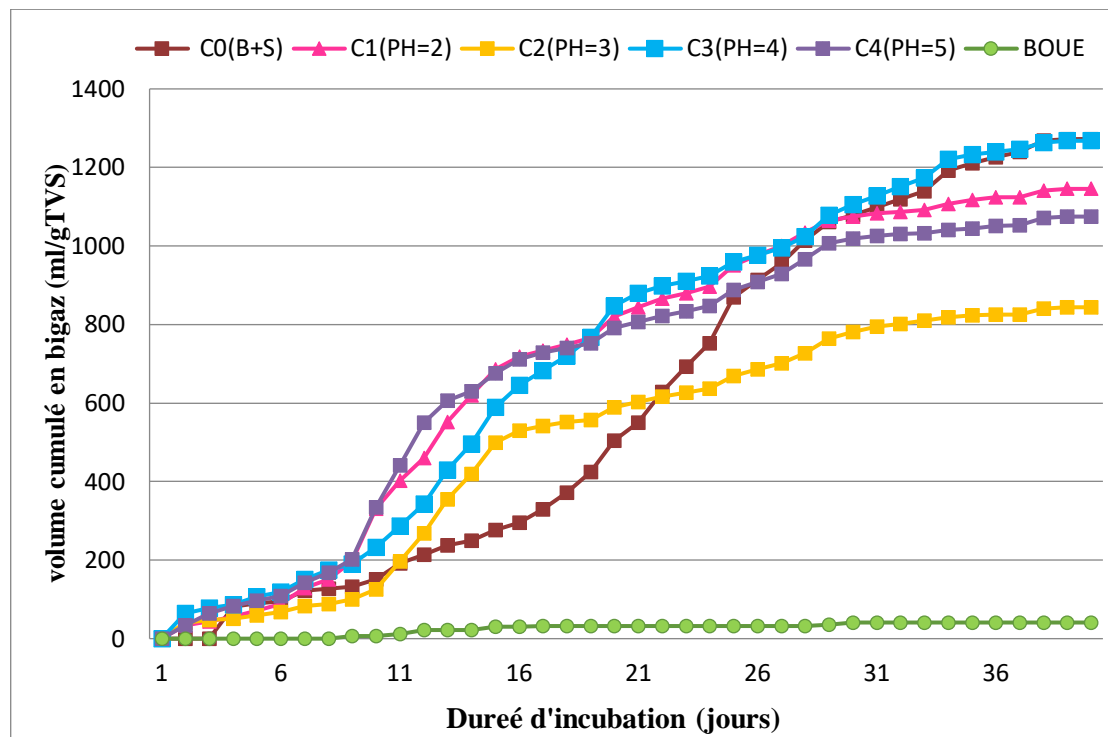
Le Prétraitements à pH=2 (C1) et pH=4 (C3) ont une efficacité intermédiaire, améliorant la solubilisation par rapport à C0, mais moins que pH=3 et pH=5.

### IV.5 Conclusion de la solubilité

D'après les résultats obtenus, on remarque que la solubilisation apparaît avec un grand pourcentage pour le prétraitement qui correspond au pH=3 et pH=5. Ceci nous permet de prévoir que la meilleure production en biogaz et en méthane sera pour le déchet d'artichaut prétraité à pH=3 et pH=5.

### IV.6 Résultat de la phase gazeuse des prétraitements acide après incubation (Phase mésophile)

#### IV.6.1 Variation du volume cumulé totale en biogaz (ml/g TVS)



**Figure IV.4 :** volume cumulatif du biogaz total produit des différents pH testés en phase mésophile.

Durant un temps de séjour de 54 jours, la quantité du biogaz comprise entre 1250ml/g TVS pour C3 (pH=4) et 1640ml/g TVS pour C2 (pH=3). La cinétique de production se divise en trois principales phases :

#### ➤ Phase de latence

Les tests de prétraitement effectués débutent par une phase latence très courte de l'ordre de 1 à 3 jours ou on remarque qu'il y a une faible production de 0 à 50 ml/g TVS cette phase correspond à l'étape d'adaptation des microorganismes aux conditions opératoires.

### ➤ Phase exponentielle

Deux phases exponentielle sont observé , la 1<sup>er</sup> étape est lente , s'étendant du 3eme jour jusqu'à 10eme jour , tandis que la deuxième étape commence à partir du 10eme jour jusqu'à 43 jour, dans cette étape on observe une croissance ce qui explique une très grande quantité de production de biogaz c'est la phase de croissance exponentielle jusqu'à l'apparition de la phase stationnaire les prétraitements à pH=2 et pH=5 atteignent le maximum en 43 jours entre (1007ml/g TVS) et (1078ml/g TVS) alors que pour les réacteurs C0 (B+S)(, pH=3), (pH=4) les valeurs sont **1191 ml/g TVS**, **795 ml/g TVS**, **1221 ml/g TVS** consécutivement cette phase est atteinte après 47 jour.

### ➤ Phase stationnaire

La production est devenu lente à partir de 47 jour, le substrat de digestion, qui est la source nutritive et énergétique de la flore microbologique et plus spécifiquement de la flore méthanogène, est épuisé, ce qui entraine directement la production du biogaz.

#### IV.6.2 Variation du volume cumulé en méthane

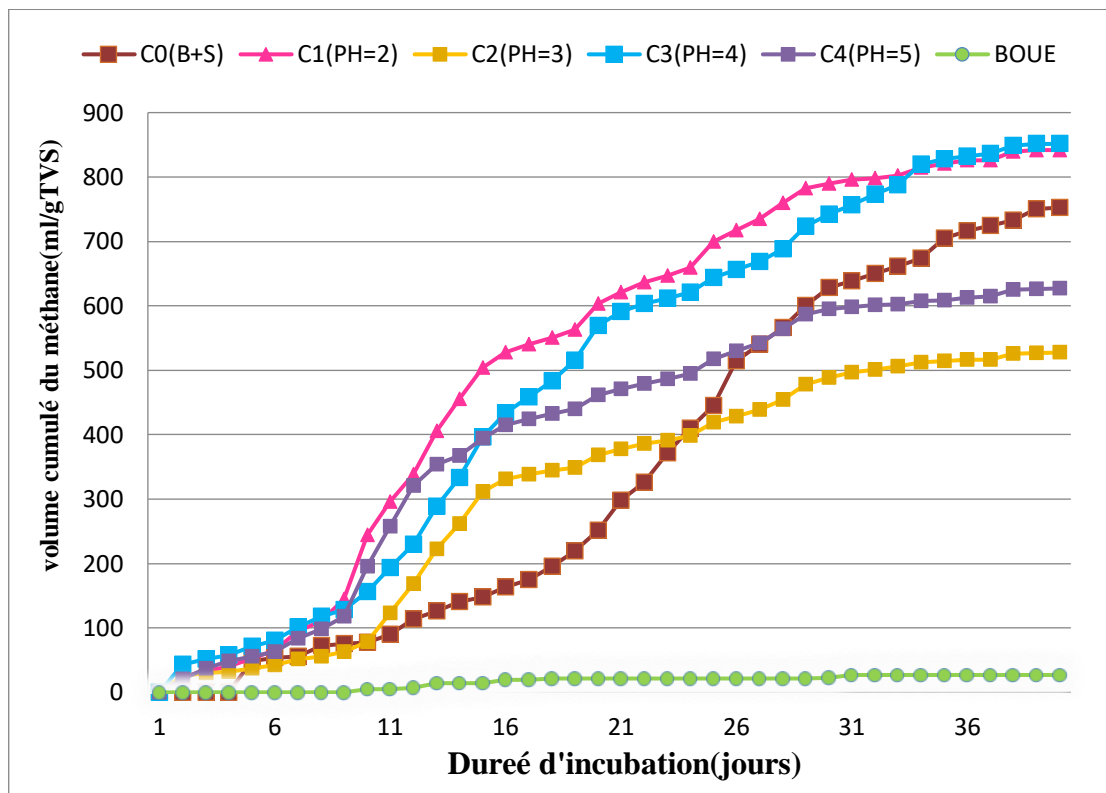


Figure IV.5 : volume cumulatif du méthane produit.

La courbe présentée montre la variation du volume cumulé de méthane (en ml/g TVS) en fonction de la durée d'incubation (en jours) pour différents traitements acides des déchets d'artichaut à différents pH.

Au début de l'incubation (jour 1 à 6), la production de méthane est faible pour tous les réacteurs testés. La courbe de C0 (B+S) montre une production initiale plus élevée que la boue seule (BOUE), mais nettement inférieure aux échantillons prétraités.

Entre le jour 6 et le jour 26, la production en méthane augmente rapidement pour les réacteurs prétraités comparée à la production en méthane du test sans prétraitement C0 (B+S). Les courbes de prétraitement acide (pH=2 et pH=5) montrent une augmentation plus rapide et significative de la production de méthane.

Vers la fin de la période d'incubation (après le jour 26), la courbe C0 (B+S) continue d'augmenter mais reste en dessous des courbes des tests prétraités. Les courbes des tests prétraités se stabilisent à un niveau plus élevé de production cumulative de méthane. C1 (pH=2) atteint le volume cumulé de méthane le plus élevé **750ml/g de TVS**, suivie par **C3 (pH=4) 650 ml/g de TVS**, **C4 (pH=5) 510ml/g de TVS**, **C2 (pH=3) 410ml/g de TVS** et enfin C0 (B+S). La boue (BOUE) reste significativement inférieure en termes de volume cumulé de méthane.

Le prétraitement acide des déchets d'artichaut améliore significativement la production cumulative de méthane par rapport à la production en méthane du test sans prétraitement (C0 (B+S)).

C1 (pH=2): Montre une meilleure amélioration de la production de méthane cumulée, atteignant le plus haut volume spécifique.

C3 (pH=4) : Est également efficace, avec une bonne production cumulative de méthane.

C2 (pH=3) et C4 (pH=5) : Ont des productions cumulatives inférieures comparées à C1 et C3, mais toujours meilleures que C0 (B+S) et (BOUE).

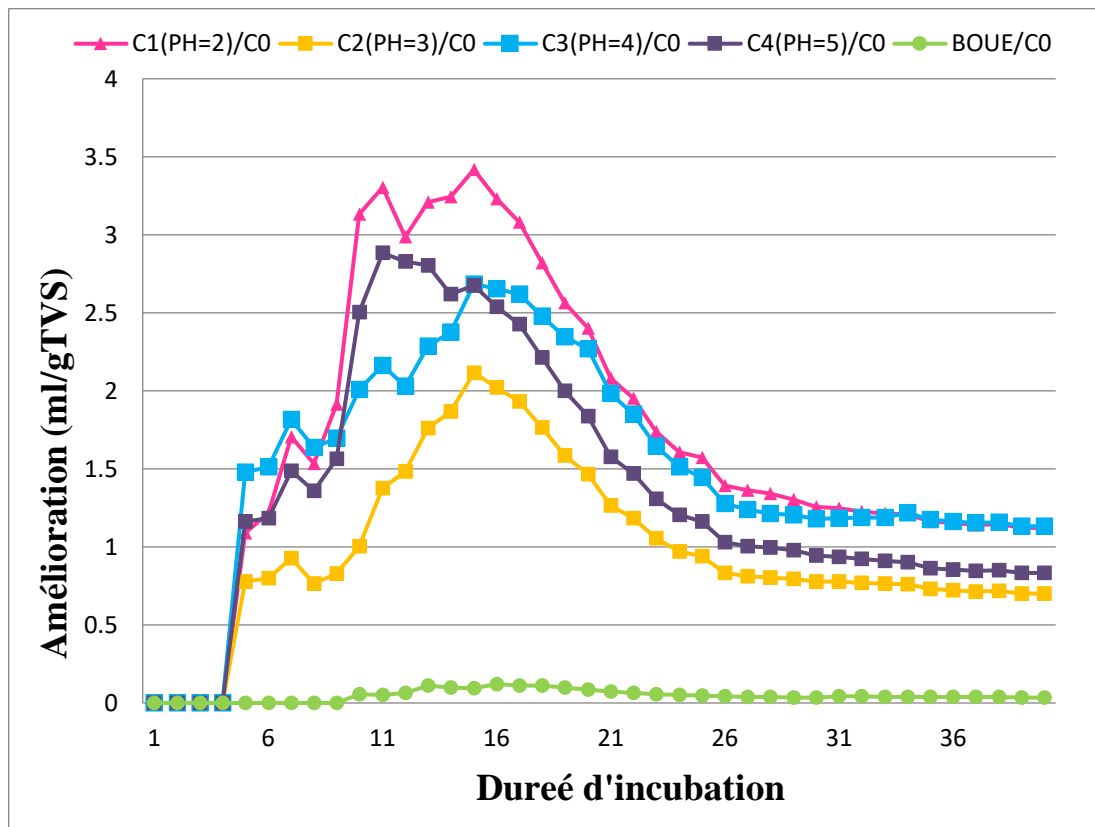
C0 (B+S) : Montre une amélioration par rapport à la boue seule (BOUE), mais reste inférieure aux tests ayant subi un prétraitement acide.

Ainsi, un pH =2 et pH = 3 semblent être optimal pour maximiser la production cumulative de méthane à partir des déchets d'artichaut.

#### **IV.7 Amélioration de la production en biogaz pour le prétraitement acide**

L'amélioration de la digestion anaérobie c'est le rapport entre les volumes de biogaz ou de méthane produit par les substrats prétraités et le substrat non traités.

$$\text{Amélioration} = \frac{\text{volume de méthane produit par le déchet d'artichaut prétraitée}}{\text{volume de méthane produit par le déchet d'artichaut non prétraitée}}$$



**Figure IV.6 :** Amélioration de la production en méthane traité par un acide.

La courbe présentée montre l'amélioration de la production de méthane (en ml/g TVS) en fonction de la durée d'incubation (en jours) pour différents traitements acides des déchets d'artichaut à différents pH (2, 3, 4,5) ainsi qu'un test sans prétraitement (B+S) (utilisé comme témoin).

- **Production initiale de méthane :** Au début de l'incubation (jour 1 à 6), on observe une montée rapide en amélioration de méthane pour tous les échantillons prétraités (C1, C2, C3, C4),
- **Période de production maximale :** l'amélioration atteint son maximum entre le jour 6 et le jour 16 pour les échantillons C1 (pH=2), C2 (pH=3), C3 (pH=4) et C4 (pH=5). C1 (pH=2) avec le test de pH=2 la production en méthane est de 3,5 fois la production du test sans prétraitement.
- **Diminution après le pic :** Après le pic de production, il y a une baisse progressive de l'amélioration de méthane pour tous les échantillons prétraités, se



stabilisant après le jour 21. C1 (pH=2) montre la baisse la plus rapide, mais se stabilise à un niveau plus élevé que les autres.

- **Niveau de production stabilisé** : À partir du jour 21 jusqu'au jour 36, l'amélioration du méthane se stabilise pour tous les échantillons prétraités. C1 (pH=2) maintient un niveau supérieur de production stabilisée, suivi par C3 (pH=4), C2 (pH=3), et enfin C4 (pH=5).

#### **IV.8 Conclusion de la biodégradabilité**

La cinétique de production en méthane est meilleur pour le prétraitement par (pH=4) et (pH=2).

### IV.9 Caractéristiques de la phase liquide après incubation (phase mésophile)

La phase liquide après incubation fournit des informations précieuses sur l'état du système de digestion anaérobie et la qualité du digeste produit. En mesurant divers paramètres tels que le pH, les TS, les TVS et la DCO, les résultats obtenus sont exposés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.4** : Effet du prétraitement acide avant et après incubation

<b>Contact des réacteurs avec différents pH pendant 30 min</b>					
<b>Avant Incubation</b>					
Paramètres	C0 (pH=ajusté)	C1 (PH=2)	C2 (PH=3)	C3 (PH=4)	C4 (PH=5)
PH	7	7	7	7	7
TA (ph=6) (mgCaco3/l)	0	0	0	0	0
TAC (ph=4) (mgCaco3/l)	3460	3700	4140	4640	4480
TS	32,69	22,03	28,36	29,34	27,9
TVS	10,61	9,06	15,65	10,21	11,9
TVS%	32,47	41,15	55,17	34,8	42,64
MES	0,03	0,026	0,025	0,026	0,028
MVS	0,024	0,019	0,017	0,018	0,021
DCO t (g/l)	79478,4	57660,8	59219,2	59219,2	59219,2
DCO s (g/l)	46752	35843,2	37401,6	38960	42076,8
DCO s/DCO t (g/l)	58	62	63	66	71
<b>Après incubation</b>					
PH	7,29	8,35	8,58	8,23	8,62
TA (ph=6)	2800	1480	2100	3560	2240
TAC (ph=4)	4500	2060	3040	2780	4360
TS	20,42	19,128	22,648	20,108	16,792
TVS	9,348	8,216	10,264	8,816	7,428
TVS%	45,78	42,95	45,32	43,84	44,24
DCO t (g/l)	37240	43120	37240	41160	34300
DCO s (g/l)	46736	41656	35560	37592	35560

### IV.9.1 pH après incubation

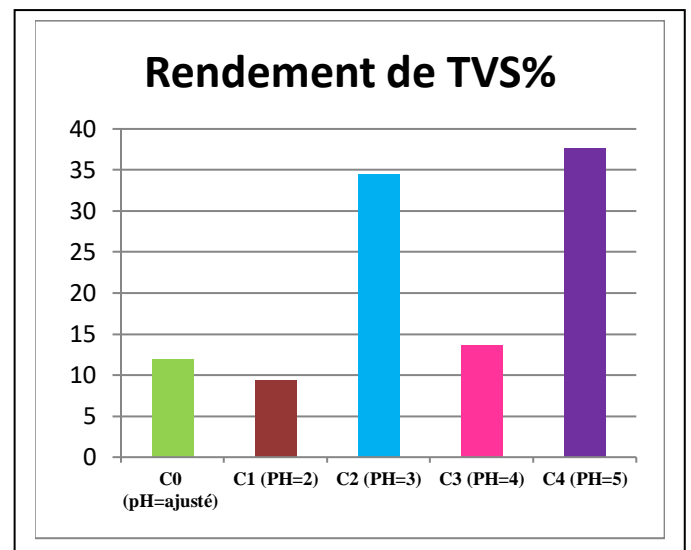
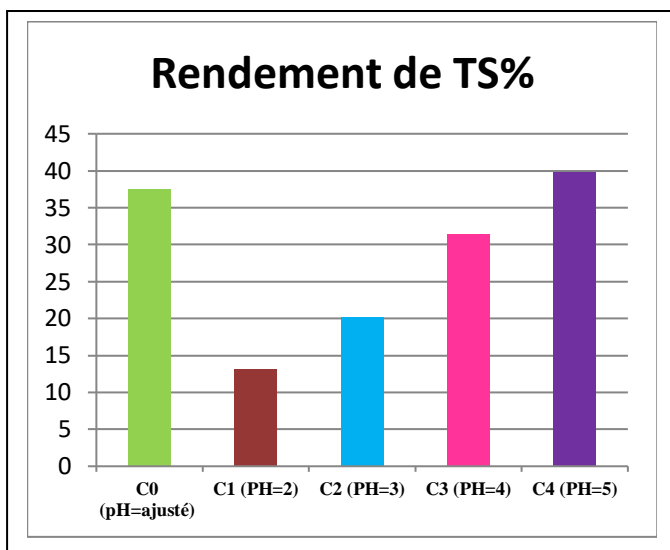
Selon le tableau, le pH obtenu après la durée d'incubation dans tous les réacteurs varie de 7.29 à 8.62 (qui sont légèrement basique). Étant donné que le bon fonctionnement de la digestion anaérobie est obtenu pour des valeurs de pH autour de la neutralité, ces valeurs indiquent une stabilité dans certains réacteurs et une légère instabilité dans d'autre.

### IV.10 Pourcentage d'élimination de quelques paramètres après la phase d'incubation dans les réacteurs

**Tableau IV.5:** Rendement d'élimination des TS et TVS

Paramètres	C0 (pH=ajusté)	C1 (pH=2)	C2 (pH=3)	C3 (pH=4)	C4 (pH=5)
Rendement d'élimination de TS%	38	13	20	31	40
Rendement d'élimination de TVS%	12	9	34	14	38

#### ➤ Pourcentage d'élimination des TS et TVS



**Figure IV.7 :** Rendement d'élimination en TS et TVS en fonction du prétraitement acide.

Les graphiques fournis montrent le rendement d'élimination des solides totaux (TS) et des solides volatils totaux (TVS) en fonction du prétraitement acide à différents pH.

- **Analyse des Résultats**

Rendement de TS% : Le rendement le plus élevé est obtenu pour l'échantillon C4 (pH=5), avec environ 40%, pour les autres tests le rendement d'élimination sont très rapproché et variant entre (20% et 38%).

Par contre le Rendement d'élimination en TVS% est élevé pour l'échantillon C4 (pH=5), et l'échantillon C2 (pH=3) avec environ (37% et 35%) respectivement, pour les autres tests le rendement d'élimination sont très proche et variant entre (9% et 15%)

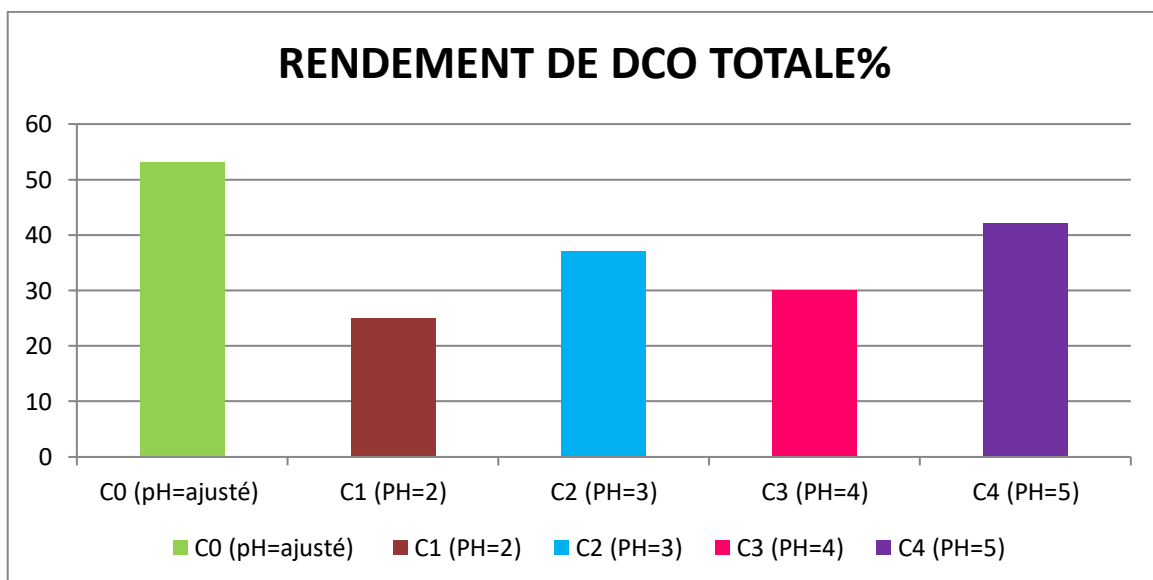
Ces résultats suggèrent que le prétraitement acide à un pH =5 est le plus efficace pour l'élimination des solides totaux et volatils, tandis que les traitements à pH 2 sont les moins efficaces.

#### IV.11 Pourcentage d'élimination de DCOT après incubation

**Tableau IV.6:** Rendement d'élimination en DCO totale

Paramètres	C0 (B+S)	C1 (pH=2)	C2 (pH=3)	C3 (pH=4)	C4 (pH=5)
<b>RENDEMENT DE DCO TOTALE%</b>	53	25	37	30	42

➤ **Pourcentage d'élimination de DCO totale**



**FigureIV .8 :** Rendement d'élimination en DCO totale en fonction du prétraitement acide.

La figure IV.8 montre le rendement d'élimination de la DCO (Demande Chimique en Oxygène) totale en pourcentage, en fonction du prétraitement acide à différents niveaux de pH.

Voici l'interprétation des résultats pour chaque condition :

C0 (pH ajusté) : Cette condition présente le rendement d'élimination de la DCO le plus élevé, avec environ 50 %.

C1 (pH = 2) : Cette condition montre le rendement d'élimination de la DCO le plus bas, avec environ 15 %.

C2 (pH = 3) : Le rendement d'élimination de la DCO est d'environ 25 %.

C3 (pH = 4) : Le rendement d'élimination est d'environ 20 %.

C4 (pH = 5) : Cette condition a un rendement d'élimination de la DCO d'environ 35%.

Les résultats obtenus du rendement d'élimination en termes de DCO semblent être aléatoires vu que la production en méthane pour tous les tests est importante.

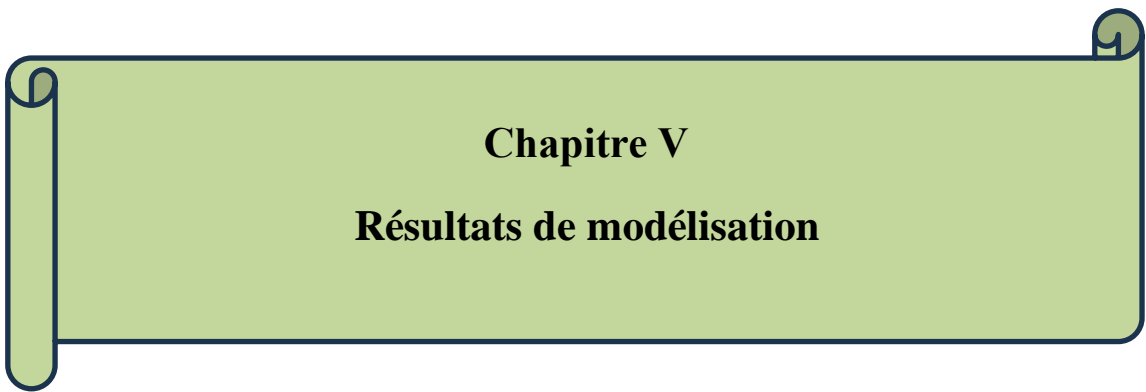
#### IV.12 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que Le prétraitement acide des déchets d'artichaut avant la digestion anaérobie améliore significativement la production de méthane et la solubilisation des matières organiques. Parmi les différentes conditions testées de prétraitement, le pH=2 (C1) s'avère être le plus efficace, suivi par le pH=4 (C3). Ces conditions optimales de prétraitement augmentent la biodégradabilité des substrats, conduisant à une production de méthane plus élevée et à une meilleure efficacité de la digestion anaérobie. Ces résultats suggèrent que le test du pH lors du prétraitement pourrait être une stratégie viable pour maximiser la production de de méthane à partir de déchets organiques, contribuant ainsi à une gestion plus efficace des déchets et une production d'énergie renouvelable accrue.

En termes d'élimination de DCO

$$DCO = \frac{DCO_I - DCO_F}{DCO_I}$$

Le rendement d'élimination de DCO est meilleur pour le pH = 5 et pH = 3 avec un 35% et 25% Successivement.



**Chapitre V**  
**Résultats de modélisation**

## V Introduction

La modélisation est le processus de création et d'utilisation de représentations simplifiées d'un système réel afin de comprendre, d'analyser, de prédire ou de contrôler son comportement. Ces modèles peuvent être mathématiques, physiques, informatiques ou conceptuels, et sont utilisés dans une grande variété de domaines, allant des sciences naturelles et de l'ingénierie aux sciences sociales et économiques. En essence, la modélisation permet de capturer les caractéristiques essentielles d'un système complexe pour en faciliter la compréhension et la manipulation [51].

Dans ce chapitre on va étudier et déterminer la production du méthane et la vitesse de la production en permet de mesurer la rapidité de la méthanisation.

### V.1 Cinétique de production cumulée de méthane

La quantité de méthane produite par les substrats est appelée productivité en méthane, elle est de plus en plus reconnue comme un facteur qui est nécessaire pour évaluer la productivité d'un substrat. La méthode de détermination connue sous le nom de potentiel biochimique du méthane (BMP) offre une variété donnée concernant le potentiel méthanogène [52].

La modélisation des courbes de production de méthane a été effectuée par l'utilisation de plusieurs modèles ces modèles fournissent des informations importantes sur la caractérisation de la productivité de substrat qui aident à déterminer le modèle le plus approprié [53]. Les courbes de production de biogaz sont modélisées en utilisant les équations de Gompertz

Modifiée (GM) et Logistic model (LM) pour décrire les courbes sigmoïdes.

Tous les paramètres des modèles cinétiques ont été déterminés en utilisant non linéaire régressions par IBM SPSS Statistics Software, 2007 [54].

**V(t)** : Production cumulée de méthane (mLCH<sub>4</sub>/g TVS).

**V max** : la production cumulée de méthane à la fin de l'expérience (mL.g/TVS).

**R max** : la vitesse maximale de production du méthane (mL.g/TVS.j).

**e** : Constante mathématique ( $\exp(1) = 2,718282$ ).

**λ**: Période de phase de latence ou temps minimum pour produire du méthane (jours).

### V.1.1 Modèle de Gompertz (1825)

Le modèle le plus courant pour calculer la cinétique de la production de méthane est l'équation de Gompertz, il peut expliquer et prédire avec précision la production cumulée de méthane de la digestion anaérobie et largement utilisée pour simuler la production de méthane par divers chercheurs [55].

Ce modèle est décrit par l'équation suivante :

$$V(t) = V_{max} e^{-e\left(\frac{R_{max}}{V_{max}}\right) (\lambda - t) + 1} \quad (eq1)$$

### V.1.2 Modèle Logistic (LM) :

C'est l'un des modèles les plus simples conçus pour fournir des prédictions fiables pour la consommation de matériaux organiques et la production de méthane. Le modèle a été conçu pour être aussi simple que possible afin d'éviter variables inconnues [56].

La formule suivante représente le modèle logistique1 [57].

$$V(t) = \frac{V_{max}}{1 + \exp\left(4R_{max}\left(\frac{\lambda - t}{V_{max}}\right) + 2\right)} \quad (eq2)$$

## V.2 Résultats de la modélisation du prétraitement chimique sur la production du méthane en phase mésophile

Les paramètres cinétique (la production de méthane, la vitesse maximale de production du biogaz ( $V_{max}$ ), taux de production maximum de méthane ( $R_{max}$ ) et phase de latence ( $\lambda$ ), ont été déterminé par identification aux équations données par l'origine de 2019 .ont été utilisées pour calculer ces paramètres en ajustant les équations de GM et LM à l'aide d'une régression non linéaire pour trouver le meilleur ajustement et d'examiner les réglages cinétiques.

Les Equations données par l'origine 2019 :

#### Modèle Logistic

$$y = a / (1 + \exp(-k(x - xc))) \quad (eq3)$$

#### Modèle Gompertz

$$y = a \cdot (-\exp(-k(x - xc))) \quad (eq4)$$

Les données expérimentales, ainsi que la simulation de l'équation de Gompertz et de l'équation logistique 1 en phase mésophile, sont représentée sur les figures.

Modèle de Gompertz GM et Modèle logistique LM.



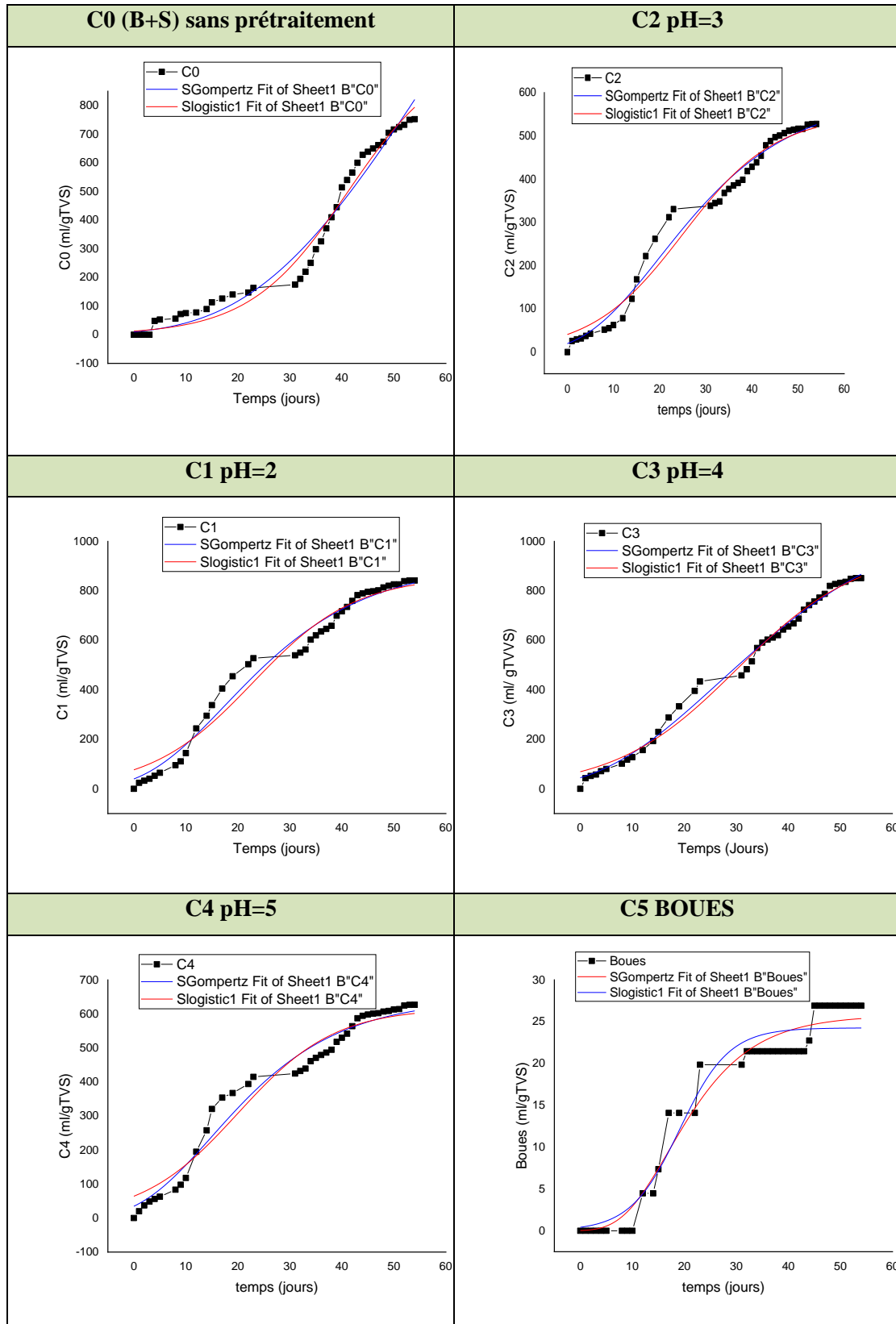


Figure V.1 :(C0, C1, C2, C3, C4, C5) : Production cumulée du méthane (ml/g TVS) et régression de GM, LM en fonction du temps pour différentes testes de prétraitements chimique (acide) en phase mésophile.

Les paramètres cinétiques de différents modèles obtenus sont présentés dans Les deux tableaux suivant :

**Tableau V.1 :** Estimation des paramètres cinétiques du modèle de GM ainsi que leurs valeurs R2 en Mésophile

Réacteurs	Estimation des paramètres de Gompertz modifiée				
	V max exp	V max	R max	$\lambda$	R
pH=2	841,85	912,66	62,34	0,76	0,97
pH=3	527,45	595,50	39,24	1,26	0,98
pH=4	851,38	1168,89	54,51	1,44	0,99
pH=5	626,96	646,35	49,29	0,35	0,97
B+S	752,47	767,10	25,10	8,00	0,97

**Tableau V.2 :** Estimation des paramètres cinétiques du modèle de LM ainsi que leurs valeurs R2 en phase Mésophile

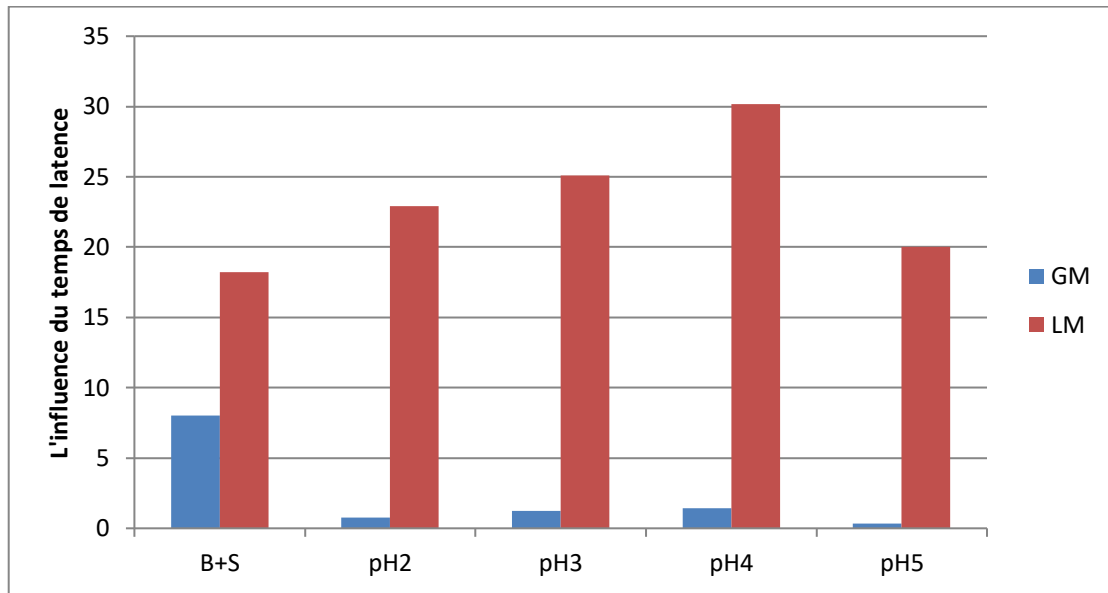
Réacteurs	Estimation des paramètres de Logistic				
	V max Exp	V max	R max	$\lambda$	R
pH=2	841,85	859,81	21,78	22,91	0,96
pH=3	527,45	548,13	13,76	25,10	0,97
pH=4	851,38	969,78	20,62	30,17	0,98
pH=5	626,96	617,18	16,57	20,04	0,97
B+S	752,47	793,06	11,02	18,20	0,97

D’après la Figure V.1 et les Tableaux V.1 et V.2 On remarque que :

Les courbes de production totale de méthane du test de traitement chimique selon la régression de GM et LM suivent les courbes sigmoïdales, qui sont proches des valeurs expérimentales.

D’après les figures il y a un bon accord entre le modèle de Gompertz et Logistic ,les deux modèles présentent de meilleurs résultats expérimentaux avec une corrélation compris entre [0.96-0.99] Le modèle Gompertz représente mieux les résultats expérimentaux du volume cumulé du méthane produit à partir de l’incubation de déchet d’artichaut en phase mésophile par contre on observe à partir du tableau une estimation légère des résultats expérimentaux pour le volume cumulé du méthane produit lors de l’incubation de déchet d’artichaut en phase mésophile .

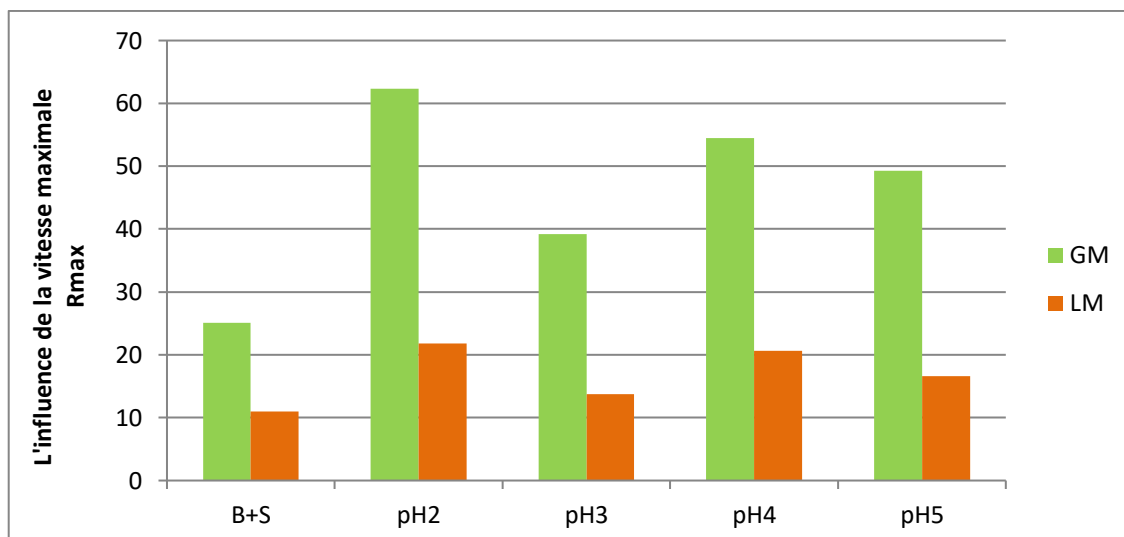
**V.3 Influence du temps de latence  $\lambda$  des deux modèles :**



**Figure V.2 :** l'influence du temps de latence  $\lambda$  en utilisant GM et LM (prétraitement Acide).

Le temps de latence est plus important dans le modèle Logistic ces résultats montrent que la phase de latence prend beaucoup de temps pour ce modèle et surtout le test B+S, le prétraitement était très efficace dans cette phase surtout pour le model GM.

**V.4 Influence de la vitesse maximale de production du méthane des deux modèles**



**FigureV.3 :** Influence de la vitesse maximale  $R_{max}$  de production du en méthane en utilisant LM et GM.

La vitesse de production maximale est plus rapide pour le modèle de Gompertz avec une valeur 62.34 ml/g TVS .j pour le test pH=2 cela veut dire que la cinétique de production de ce prétraitement est efficace.

### V.5 Conclusion

Les rendements journaliers de méthane cumulatifs ont été ajustés en utilisant les équations de GM et LM des tests de prétraitement chimique, subit sur les déchets d'artichaut ils suivent des courbes sigmoïdales correspondent presque aux valeurs expérimentales.

Du point de vue coefficient de corrélation pour le prétraitement chimique R2 varié [0.96-0.99]. Les valeurs expérimentales sont plus proches aux valeurs théoriques aussi bien pour Gompertz que pour Logistic avec une grande vitesse de production cumulée surtout pour le pH 2.



**Conclusion générale**

### Conclusion Générale

Dans le contexte de protection de l'environnement, la gestion des déchets joue un rôle essentiel dans la préservation de l'environnement. L'une des méthodes utilisées pour traiter ces déchets est la digestion anaérobie, qui permet d'une part de les stabiliser et d'autre part de générer une énergie renouvelable sous forme de biogaz et de contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour augmenter la production de biogaz à partir de la digestion anaérobie, tout en modifiant l'un des paramètres. Au sein de cette étude expérimentale nous avons examiné l'impact d'une de ses méthodes considérées comme étant parmi les plus efficaces à savoir le prétraitement chimique acide par le HCL, en utilisant les boues provenant de la STEP de l'ETHMANIA.

Après 54 jours d'étude les résultats ont démontré que le prétraitement acide a un effet bénéfique sur la plupart des paramètres de fonctionnement de la digestion anaérobie, ce qui reflète clairement la production cumulée importante en volume de biogaz et de méthane pour les cas prétraités. Parmi les différents tests de prétraitement

- Du point de vue solubilité :

La solubilisation apparaît avec un grand pourcentage pour le prétraitement qui correspond au pH=3 et pH=5. Ceci nous permet de prévoir que la meilleure production en biogaz et en méthane sera pour le déchet d'artichaut prétraité à pH=3 et pH=5.

- Du point de vue biodégradabilité :

Le pH=2 (C1) s'avère être le plus efficace, suivi par le pH=4 (C3). Ces conditions optimales de prétraitement augmentent la biodégradabilité des substrats, conduisant à une production de méthane plus élevée et à une meilleure efficacité de la digestion anaérobie.

- En termes de DCO :

Le rendement d'élimination de DCO est meilleur pour le pH = 5 et pH = 3 avec un 35% et 25% successivement.



**Références bibliographiques**

## Référence

---

### Référence

- [1] CultureSciences-Chimie  
<https://culturesciences.chimie.ens.fr> › chimie-organique
- [2] HAL Thèses  
<https://theses.hal.science> › file › these
- [3] Journal officiel n43 : Loi n 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de L'environnement dans le cadre du développement durable 08.
- [4] Ph.PICHA, la gestion des déchets, Evreux, Dominos Flammarion, 1995, p11.
- [5] G.Bertolini, Le marché des ordures, économie et gestion des déchets ménagers, Editions Harmattan, Paris, 1990, p 08.
- [6] Gestion des déchets, guide pour les établissements publics d'enseignement supérieur ou de recherche, 2000, p 08.
- [7] Article L541-1-1 créé par ordonnance n 2010-1579 du 17 décembre 2001 -art. 2.
- [8] Loi n 01-19 du 27 ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets « journal officiel de la république algérienne Article 03 journal n 77, p08 (publié le 15/12/2001) »
- [9] BILGO A., 1992. Contribution à la valorisation agricole des différentes sources de matière organique au Burkina Faso : Évaluation des potentialités et des caractéristiques des déchets agricoles, agro-industriels et urbains.
- [10] TONON F, contribution à l'étude de l'environnement en République Populaire du Bénin Espace urbain et gestion des déchets solides dans la ville de Cotonou. Thèse de doctorat de 3<sup>e</sup> cycle ; Université Cheik Anta Diop ; ISE. Dakar, 311 pages. Année 1987.
- [11] ADEME, . Campagne nationale de caractérisation des ordures ménagères, Résultats année 2007.
- [12] UNESCO <https://unesdoc.unesco.org> › ark: › [pf0000247667\\_fre](https://unesdoc.unesco.org/ark:/41834/ark:pf0000247667_fre)
- [13] Addou, A. (2009). Traitement des déchets. Valorisation, élimination. Édition technique, paris.
- [14] ResearchGate <https://www.researchgate.net> › ... › Methane.
- [15] Chen, S., Rotaru, A.-E., Shrestha, P.M., Malvankar, N.S., Liu, F., Fan, W., Nevin, K.P., Lovley, D.R.. Promoting interspecies electron transfer with biochar. Scientific reports, 4. année 2014.
- [16] Angelidaki I, Alves M, Bolzonella D, Borzacconi L, Campos JL, Guwy AJ, Kalyuzhnyi S, Jenicek P, van Lier JB. Defining the biomethane potential (BMP) of



## Référence

---

solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. Water Sci Technol. Année 2009.

[17] Pizzighello S, Uliana M, Michielotto M, Pellegrini A, Vascello MGF, Piccoli S, Martinuzzi M and Martinuzzi A Psychiatric symptoms in adult patients with cerebral palsy: A cohort study. Front. Neurol. 13:998922. doi: 10.3389/fneur.2022.998922. année 2022.

[18] JAZIRI.K <<Impact de la mise en oeuvre de prétraitements thermique, chimique (Ozone) et physique (ultrasons) sur la sensibilité au cadmium de boues secondaires lors de l'étape de stabilisation biologique>>, Université de Limoges école doctorale Science pour l'Environnement Gay-Lussac Janvier 2012.

[19] La co-digestion anaérobie des boues d'épuration et de déchets ... - Cairn

[20] La digestion anaérobie des boues : une solution d'avenir - La Revue EIN

[21] BOUGRIER.C << optimisation du procédé de méthanisation par mise en place d'un co-traitement physico-chimique : application au gisement de biogaz représenté par les boues épuration des eaux usées >>, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université Montpellier, Toulouse(2005)

[22] <http://www.methanisationvihiers.fr/la-methanisation-cest-quoi/>

[23] Julien Bollon, "Etude des mécanismes physiques et de leur influence sur la cinétique de méthanisation en voie sèche : essais expérimentaux et modélisation Ingénieur en Maîtrise des Risques Industriels," obtenir Le grade de docteur, Ecole doctorale de Chimie de Lyon (Chimie, Procédés, Environnement), Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Pour, 2012.

[24] The Scientific World Journal, "Retracted: Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The Key Players of Anaerobiosis," ScientificWorldJournal., vol. 2017, p. 3852369, 2017.

[25] P. Delfosse, "Microbiologie de la Digestion Anaérobie," Ecobiogaz. Journée Form. à la méthanisation., no. Figure 1, p. 61, 2014.

[26] J. V. Pierre BUFFIERE, Matthieu CARRERE, Olivier LEMAIRE, "Guide méthodologique pour l'exploitation d'unités de méthanisation de déchets solides," 2007.

[27] C. Tech, "La méthanisation de la matière organique Aspects généraux R. Moletta Moletta Méthanisation Méthane," pp. 1–12, 2002.

## Référence

---

- [28] J. Lacour, "Valorisation de résidus agricoles et autres déchets organiques par digestion anaérobie en Haïti," L'Institut Natl. Des Sci. Appliquées Lyon, p. 217, 2012.
- [29] A. Abdelhafid, "Impact du contenu phénolique extrait de margines issues de deux modes trituration sur la méthanogènes ruminale invito," diplôme de MAGISTER, Université DE TEBESSA Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie Département des Sciences de la Nature et de la Vie Ecole Doctorale Biologie Environnementale, 2012
- [30] BOUFLIGHA. H et MERABET N << Bfet du traitement thermique de l'inoculum sur le rendement en biogaz, de la digestion anaérobie des reiets laitiers >> mémoire fin d'étude master 2 (juin 2014).
- [31] <https://www.researchgate.net/publication/317888858> Cours de modelisation et simulation in French
- [32] Hangri Souheila Menai Ahlem, "Etude expérimentale et modélisation de la Co-digestion des épiluchures de pomme de terre mélangées avec déchets vert., " projet fin d'étude en sciences en génie de l'environnement, L'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie des Procédés, Option environnement, Ecole nationale polytechnique de Constantine, 2018.
- [33] Optimisation du traitement des boues par procédé dela digestion anaérobie au niveau de la station d'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech >>, Mémoire de fin d'études, Février 2013.
- [34] Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392. année 2014.
- [35] Delbès, C. (2000) Diversité et dynamique structurales et fonctionnelles de la communauté microbienne d'un digesteur anaérobie : Approche moléculaire.
- [36] La co-digestion anaérobie des boues d'épuration et de déchets ... - Cairn
- [37] La digestion anaérobie des boues : une solution d'avenir - La Revue EIN
- [38] Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., & Dawson, L. (2011). The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management*, 31(8), 1737-1744.

## Référence

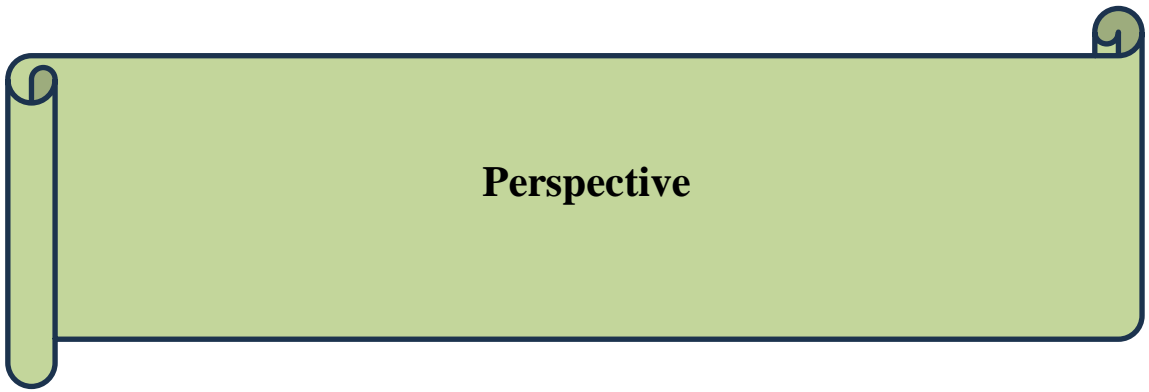
---

- [39] - Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392.
- [40] Appels, L., Baeyens, J., Degève, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34(6), 755-781.
- [41] Salsabil, M. R., Prorot, A., Casellas, M., & Dagot, C. (2010). Pre-treatment of activated sludge: Effect of sonication on aerobic and anaerobic digestibility. *Chemical Engineering Journal*, 148(2-3), 327-335.
- [42] [PDF] La méthanisation des boues issues du traitement des eaux usées
- [43] [PDF] Digestion anaérobie par voie sèche de résidus lignocellulosiques
- [44] **Mussoline**, W., Esposito, G., Lens, P. N., & Garuti, G. (2013). The effect of enzyme addition on anaerobic digestion of lignocellulosic materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 433-440.
- [45] Zhang, Y., Banks, C. J., & Heaven, S. (2012). Anaerobic digestion of the macroalga *Laminaria hyperborea*: Effect of thermal pretreatment on methane production. *Bioresource Technology*, 102(19), 7865-7866.
- [46] Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., & Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 412-427.
- [47] Carlsson, M., Lagerkvist, A., & Morgan-Sagastume, F. (2012). The effects of substrate pre-treatment on anaerobic digestion systems: A review. *Waste Management*, 32(9), 1634-1650.
- [48] Vavilin, V. A., Qu, X., & Mazumder, H. (2012). Impact of food waste particle size on methane production in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 126, 199-208.
- [49] Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 100(1), 10-18.
- [50] Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y. Y., Holtzapfle, M., & Ladisch, M. (2005). Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96(6), 673-686.
- [51] <https://www.researchgate.net/publication/317888858> Cours de modélisation et simulation in French

## Référence

---

- [52] M. A. Mohamed, D. Nourou, B. Boudy, and N. Mamoudou, “Theoretical models for prediction of methane production from anaerobic digestion: A critical review,” *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 13, no. 13, pp. 206–216, 2018.
- [53] Hangri Souheila Menai Ahlem, “Etude expérimentale et modélisation de la Co-digestion des épluchures de pomme de terre mélangées avec déchets vert .,” projet fin d’étude en sciences en génie de l’environnement, L’obtention du diplôme d’ingénieur d’état en Génie des Procédés, Option environnement, Ecole nationale polytechnique de Constantine, 2018.
- [54] M. M. Ali, B. Bilal, N. Dia, I. Youm, and M. Ndongu, “Anaerobic Digestion (AD), Methane production potential, Kinetic models, Ambient temperature, Slaughterhouse waste, *Salvinia molesta*; Anaerobic Digestion (AD), Methane production potential, Kinetic models, Ambient temperature, Slaughterhouse waste, *Salvini*,” *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 61–70, 2018
- [55] B. Kheiredine, “Digestion anaérobie des rejets d’une unité de production de lait,” These de doctorat, Université constantine 3, 2016.
- [56] Hangri Souheila Menai Ahlem, “Etude expérimentale et modélisation de la Co-digestion des épluchures de pomme de terre mélangées avec déchets vert .,” projet fin d’étude en sciences en génie de l’environnement, L’obtention du diplôme d’ingénieur d’état en Génie des Procédés, Option environnement, Ecole nationale polytechnique de Constantine, 2018.
- [57] M. A. Mohamed, D. Nourou, B. Boudy, and N. Mamoudou, “Theoretical models for prediction of methane production from anaerobic digestion: A critical review,” *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 13, no. 13, pp. 206–216, 2018



**Perspective**

## Perspectives

Les perspectives des travaux à venir visent à :

- Tester d'autre acide par exemple divalent ( $H_2SO_4$ )
- Optimisation du temps de contact en Testant plusieurs temps de contact avec l'acide toute en gardant le pH qui a donné la meilleure production
- aborder une comparaison avec d'autres substrats réalisés dans les mêmes conditions.
- Extrapoler le fonctionnement d'un digesteur en continu du point de vue solubilité.
- Modéliser la cinétique de la production de biogaz et du méthane à l'aide d'autres modèles déduite de la synthèse bibliographique.

## Résumé

Les déchets urbains constituent une préoccupation majeure en matière de propreté urbaine, tant dans les pays développés que dans les pays en développement tel que l'Algérie.

Les artichauts, en tant que biomasse lignocellulosique, présente une structure complexe qui limite la dégradation microbienne et, par conséquent la production de biogaz.

Le prétraitement acide vise à décomposer les structure lignocellulosique rendant les composéé organique plus accessibles au microorganisme de la digestion anaérobie et d'évaluer l'efficacité é du prétraitement acide pour augmenter le rendement en biogaz et de comprendre les mécanismes sous-jacents qui influencent cette augmentation.

Dans cette étude, des échantillons en été prétraité avec des concentrations différentes d'HCL qui correspondent à des pH variant de pH=2 a pH=5.

Les résultats montrent que le prétraitement acide améliore significativement la production de biogaz par rapport aux échantillons non prétraité Surtout pour le pH=2.

La modélisation a été entreprise en utilisant le logiciel Origin on choisissant deux modèles mathématiques Gompertz et Logistic contenus dans la base de données de ce logiciel Origin.

Les valeurs expérimentales sont plus proches aux valeurs théoriques aussi bien pour Gompertz que pour Logistic avec une corrélation de 0.98 pour le modèle Gompertz et 0.97 pour le modèle Logistic et une grande vitesse de production cumulée surtout pour le pH=2.

Mots Clés : Digestion Anaerobie - Artichaut – Pretraitement

## **Summary**

Urban waste is a major concern in urban cleanliness, both in developed countries and in developing countries such as Algeria.

Artichokes, as lignocellulosic biomass, have a complex structure that limits microbial degradation and, consequently, biogas production.

Acid pre-treatment aims to decompose the lignocellulosic structure, making organic compounds more accessible to anaerobic digestion microorganisms, and to evaluate the effectiveness of acid pre-treatment in increasing biogas yield and understanding the underlying mechanisms that influence this increase.

In this study, samples were pretreated with different concentrations of HCL corresponding to pH values ranging from pH=2 to pH=5 in summer.

The results show that acid pre-treatment significantly improves biogas production compared to non-pretreated samples, especially at pH=2.

**Key Words :** Anaerobic Digestion – Artichoke – Pretreatment



## المخلص

تشكل النفايات الحضرية مصدر قلق كبير فيما يتعلق بالنظافة الحضرية، سواء في البلدان المتقدمة أو في البلدان النامية مثل الجزائر. يمتلك الخرشوف، باعتباره كتلة حيوية من اللجنوسليلوز، بنية معقدة تحد من التحلل الميكروبي، وبالتالي إنتاج الغاز الحيوي. تهدف المعالجة الحمضية إلى تحلل البنية اللجنوسليلوزية مما يجعل المركبات العضوية أكثر سهولة في الوصول إلى الكائنات الحية الدقيقة الهضم اللاهوائي وتقييم فعالية المعالجة الحمضية لزيادة إنتاج الغاز الحيوي وفهم الآليات الأساسية التي تؤثر على هذه الزيادة.

في هذه الدراسة، تم معالجة العينات بتركيزات مختلفة من حمض الهيدروكلوريك والتي تتوافق مع درجة الحموضة التي تتراوح من درجة الحموضة = 2 إلى درجة الحموضة = 5. أظهرت النتائج أن المعالجة الحمضية تحسن بشكل كبير إنتاج الغاز الحيوي مقارنة بالعينات غير المعالجة، خاصة بالنسبة للأس الهيدروجيني = 2. تم إجراء النمذجة باستخدام برنامج Origin، واختيار نموذجين رياضيين Gompertz و Logistic الموجودين في قاعدة بيانات برنامج Origin هذا. وكانت القيم التجريبية أقرب إلى القيم النظرية لكل من جومبيرتز ولوجستيك مع ارتباط 0.98 لنموذج جومبيرتز و 0.97 للنموذج اللوجستي وسرعة إنتاج تراكمية عالية خاصة بالنسبة للأس الهيدروجيني = 2.

كلمات مفتاحية: الهضم اللاهوائي – الخرشوف – معالجة أولية