

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



**ECOLE DOCTORALE PHYSIQUE CHIMIE SCIENCES
DE LA TERRE DE L'UNIVERS ET DE L'INGENIEUR**

FACULTE des SCIENCES et TECHNIQUES

Année : 2019 N° d'ordre :

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : **Energie Solaire Matériaux et Systèmes**

Présentée et soutenue par :

Alioune SENGHOR

**Titre : « Production de biogaz à partir des cultures énergétiques :
un possible impact du changement climatique »**

Soutenue le **16 Février** devant le jury composé de :

Président : M. Joseph SARR, Professeur Titulaire FST / UCAD

Rapporteurs : M. Lat Grand NDIAYE, Maître de Conférences à l'UASZ

M. Saliou FALL, Maître de Recherches à l'ISRA

Examineurs : M. Bassirou BA, Professeur Titulaire FST / UCAD

M. Cheikh SENE, Professeur Titulaire FST / UCAD

Directeur de thèse : M. Issakha YOUM, Professeur Titulaire FST / UCAD

Dédicaces

Ce travail est dédié à :

Mes parents Babou et Rokhaya NDIAYE

Mon épouse Mariama NDOYE

Mes enfants Razakh et Aboubacr

Mes **F**rères et **S**œurs

Mon défunt oncle Senghane NDIAYE

Ma grand-mère Khady DIACK

Tous (tes) ceux (celles) qui, de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de mon cursus élémentaire jusqu'au cursus universitaire.

Remerciements

Au nom de DIEU le clément, l'omnipotent.

Mes remerciements à :

Monsieur **Bassirou BA**, Professeur titulaire à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD. Responsable du Laboratoire des Semi-conducteur et d'Energie Solaire (L.A.S.E.S), pour m'avoir fait l'honneur d'accepter mon insertion dans son laboratoire.

Monsieur **Issakha Youm**, Professeur titulaire à la Faculté des Sciences et Techniques de l'UCAD, Directeur du CERER. En plus d'être mon professeur encadreur, vous avez joué spontanément le rôle de père et de conseiller.

Monsieur **Joseph SARR**, Professeur titulaire à la Faculté des Sciences et Techniques de L'U.C.A.D d'avoir accepté de présider ce jury ainsi que le professeur **Cheikh SENE** d'avoir accepté d'être membre du jury, Je vous témoigne ma profonde gratitude.

Je suis très honoré par la présence, dans mon jury, des professeurs, **Lat Grand NDIAYE** et de **Saliou FALL**. Je les remercie d'avoir accepté la charge de rapporteur.

Nous associons à ces remerciements tous les collègues de la faculté des sciences ainsi que le personnel notamment **Mesdames NDIAYE Assa BARRY**, **DIBA Aminata** et **GUEYE Ndeye SAMB**.

Je remercie également mes amis et collègues du Laboratoire des Semi-conducteurs et d'Energie Solaire de L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (L.A.S.E.S) et ceux du CERER : les docteurs **Sérigne THIAO** et **Awa MAR**, les doctorants **Souleymane THIAM**, **Reine DIOH**, **Hawa NDIATT**, **Pierre TAVAREZ**, **Moustapha KANE**, **André NDECKY** et **Moustapha LO**.

Je tiens à remercier également tout le personnel du CERER et en particulier ma conseillère **Madame NDIAYE Déguène BADIANE**

Un grand merci au professeur **Christophe MULLER** de l'université THM d'Allemagne de par sa disponibilité et son sens de partage.

Nous remercions enfin, celle qui m'a toujours aimé et soutenu malgré les circonstances, notre amie et épouse **Mariamama NDOYE**. Je te serai toujours reconnaissant pour ta patience, ta compréhension et ton soutien.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I. Revue de la littérature.....	3
I-1 Techniques de production de biogaz.....	6
I-1-1 Introduction.....	6
I-1-2 Caractéristiques des différents composés du biogaz.....	7
I-1-2-1 Le méthane.....	7
I-1-2-2 Le dioxyde de carbone.....	8
I-1-2-3 Le dioxygène.....	8
I-1-2-4 Les composés azotés.....	9
I-1-2-5 La vapeur d'eau.....	9
I-1-2-6 Les composés soufrés.....	9
I-1-2-7 Les siloxanes.....	9
I-1-2-8 Le monoxyde de carbone.....	10
I-1-2-9 Le dioxygène.....	10
I-1-3 Produits aptes à la méthanisation.....	11
I-1-3-1 Les déjections animales.....	11
I-1-3-2 Les biodéchets municipaux.....	13
I-1-3-3 Les boues d'épuration.....	14
I-1-3-4 Les cultures et leurs résidus.....	15
I-1-3-5 La co-digestion.....	16
I-1-3-6 Choix du substrat.....	17
I-1-4 Types de digesteur.....	18
I-1-4-1 Présentation.....	18
I-1-4-2 Les digesteurs préfabriqués.....	22
I-1-4-3 Les digesteurs fabriqués sur site.....	25
I-1-5 Processus de la méthanisation.....	26

I-1-5-1	L'hydrolyse.....	27
I-1-5-2	L'acidogénèse.....	27
I-1-5-3	L'acétogénèse.....	27
I-1-5-4	La méthanogénèse.....	28
I-2	Cultures énergétiques.....	30
I-2-1	Introduction.....	30
I-2-2	Types de cultures.....	30
I-2-2-1	Cultures lignocellulosiques.....	28
I-2-2-2	Cultures sucrées ou amylacées.....	28
I-2-2-3	Cultures oléagineuses.....	28
I-2-3	Choix de la culture.....	29
I-2-3-1	Le potentiel méthanogène.....	29
I-2-3-2	La composition chimique.....	30
I-2-3-3	Le rendement.....	32
I-2-3-4	Le stade de la récolte.....	33
I-2-3-5	La variété.....	34
I-2-3-6	La saison de récolte.....	34
I-2-3-6	Stockage et prétraitement.....	35
I-2-4	Etat de l'art.....	38
I-2-5	Conclusion.....	39

Chapitre II. Effet du changement climatique sur les cultures énergétiques et la production de biogaz.....41

II-1.	Introduction.....	42
II-2.	Méthode.....	42
II-3.	Effet du CO ₂ sur la plante.....	42
II-3-1.	Effet du CO ₂ sur le rendement.....	42

II-3-2. Effet du CO ₂ sur la qualité de la plante.....	44
II-3-2-1. Effet du CO ₂ sur les protides.....	44
II-3-2-2. Effet du CO ₂ sur les lipides et les glucides.....	45
II-3-2-3. Effet du CO ₂ sur les macros et micro éléments.....	45
II-4. Effet de l'élévation de température sur la plante.....	47
II-4-1. Effet de l'élévation de température sur le rendement.....	47
II-4-2 Effet de l'élévation de température sur la qualité.....	49
II-5. Effet de la précipitation sur la plante.....	50
II-5-1. Effet de la précipitation sur le rendement.....	50
II-5-2. Effet de la précipitation sur la qualité.....	51
II-6. Effets combinés.....	52
II-6-1 Effets combinés de l'élévation de température et de CO ₂	52
II-6-2. Effets combinés de la précipitation avec le CO ₂ et la température.....	53
II-7. Rôle des différents éléments dans la production de biogaz.....	53
II-7-1 Rôle des protides.....	53
II-7-2 Rôle des glucides.....	53
II-7-3 Rôle des lipides.....	54
II-7-4 Rôle des nutriments.....	54
II-8. Effet du changement climatique sur la production de biogaz.....	55
II-9. Conclusion.....	57

Chapitre III. Etude expérimentale.....58

III-1. Introduction.....	60
III-2. Matériel et méthode.....	60
III-2-1. Les substrats	60
III-2-2. Dispositif expérimental.	60

III-2-2-1. Les séchoirs.....	60
III-2-2-2. Le moulin.....	62
III-2-2-3. Analyseur élémentaire CHNS.....	64
III-2-2-4. Les digesteurs.....	64
III-2-2-5. Le volumètre et le détecteur de gaz.....	67
III-3. Résultats et discussions.....	69
III-3-1. Présentation des résultats.....	69
III-3-1-1. Détermination de la matière sèche et de la matière organique.....	69
III-3-1-2. Composition centésimale de l'ensilage.....	71
III-3-1-3. Quantité de biogaz et de méthane.....	72
III-3-2. Discussion.....	80
III-3-2-1. Production de biogaz à partir de l'ensilage et la boue.....	80
III-3-2-2. Production de biogaz à partir des 3 substrats.....	81
III-4. Conclusion.....	81
Conclusion générale et perspectives.....	82
Bibliographie.....	83
Webographie.....	89
Annexes.....	91

Abréviation	Signification
A.G.V.	Acide Gras Volatile
A.G.L.C.	Acide Gras à Longue Chaîne
C/N	Carbone / Azote
C.C.	Control Chamber
C.E.A.	Control Environmental Approach
C.N.T.P.	Conditions Normales de Température et de Pression
C.T.C.	Control Top Chamber
D.C.O.	Demande Chimique Organique
D.M.C.	Digesteurs à Matériau Composé
F.A.C.E.	Free Air CO ₂ field Enrichment
F.A.O.	Fonds des nations pour l'Agriculture
G.C.	Greenhouse Chamber
I.A.A.	Industrie Agro-alimentaire
M.M.	Matière Minérale
M.O.	Matière Organique
M.O.S.	Matière Organique Sèche
M.S	Matière Sèche
M.S.V.	Matière Sèche Volatile
O.T.C.	Open Top Chamber
O.N.U.	Organisation des Nations Unies
P.C.S.	Pouvoir Calorifique Supérieur
P.E.	Polyéthylène
pH	Potentiel en hydrogène
P.M.P.O.A.	Programme pour la Maitrise des Produits d'Origines Agricoles
P.R.G.	Potentiel de Réchauffement Global

P.R.F.	Plastiques Renforcées par des Fibres
P.V.C.	Polychlorure de Vinyle
STEP	Station d'épuration
T.C.	Taux de Charge
T.C.O.	Taux de Charge Organique
T.R.H	Temps de Rétenion Hydraulique

Eléments	Noms	Molécules	Noms
Al	Aluminium	CO ₂	Dioxyde de Carbone
C	Carbone	CH ₄	Méthane
Ca	Calcium	CH ₃ COOH	Acide acétique
Co	Cobalt	H ₂	Dihydrogène
Cr	Crome	H ₂ O	Eau
Cu	Cuivre	H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
Fe	Fer	N ₂	Diazote
H	Hydrogène	NO	Monoxyde d'azote
K	Potassium	NH ₃	Ammoniac
Mg	Magnésium	SiO ₂	Dioxyde de silicium
Mo	Molybdène		
Mn	Manganèse		
N	Azote		
Na	Sodium		
Ni	Nickel		
O	Oxygène		
P	Phosphore		
S	Soufre		
Se	Sélénium		
W	Tungstène		
Zn	Zinc		

Symbole	Signification	Unité
ΔH	Enthalpie	J
m_a	Masse du tube à vide	g
m_b	Masse du tube + substrat	g
m_c	Masse après séchage à 105°C	g
m_d	Masse après séchage à 505°C	g
P_{H_2O}	Pression de l'eau	Pa
P_b	Pression atmosphérique	Pa
P_{gaz}	Pression du gaz	Pa
T_{gaz}	Température du gaz	°C
V	Volume	N.L

Liste des figures

Figure I-1. Valeurs comparatives du méthane.....	8
Figure I-3. Types de digesteurs.....	19
Figure I-4. Digesteur de type ballon.....	21
Figure I-5. Digesteurs à matériau composé.....	22
Figure I-6. Digesteurs démontables.....	22
Figure I-7. Digesteur fabriqué sur site.....	24
Figure I-8. Etapes de la méthanisation.....	27
Figure I-9. Potentiel méthanogène des différentes cultures.....	31
Figure I-10. Variation de composition chimique au cours de la méthanisation.....	32
Figure I-11. Influence de la variété sur le potentiel méthanogène.....	34
Figure I-12. Influence du stade de la récolte sur le potentiel méthanogène.....	35
Figure I-13. Influence de l'ensilage sur la production de méthane.....	36
Figure I-14. Effet de différents prétraitements sur le potentiel méthanogène.....	37
Figure I-15. Différentes ressources et valorisations de la biomasse.....	39
Figure II-1. Effet minimum du CO ₂ sur la teneur en méthane.....	56
Figure II-2. Effet maximum du CO ₂ sur la teneur en méthane.....	57
Figure III-1. Séchoir de 105 °C.....	62
Figure III-2. Séchoir de 505 °C.....	62
Figure III-3. Vue interne du séchoir.....	63
Figure III-4 Broyeur ultra-centrifuge	64
Figure III-5. Vue interne du broyeur centrifuge.....	64
Figure III-6. Digesteurs.....	66
Figure III-7. Agitateur.....	66
Figure III-8. Thermomètre.....	67
Figure III-9. Récupération du biogaz.....	67

Figure III-10. Pourcentage des différents gaz.....	68
Figure III-11. Détermination du volume et de la composition.....	68
Figure III-12. Ensilage de maïs après séchage à 105 °C.....	69
Figure III-13. Ensilage de maïs moulu.....	71
Figure III-14. Production de biogaz en litre de l'ensilage de maïs.....	76
Figure III-15. Production de biogaz en litre de la mixture.....	76
Figure III-16. Production de biogaz en litre normal de l'ensilage de maïs.....	76
Figure III-17. Production de biogaz en litre normal de la mixture.....	77
Figure III-18. Comparatif des volumes de biogaz des deux substrats.....	77
Figure III-19. Comparatif des volumes de méthane des deux substrats.....	77
Figure III-20. Volume corrigé de biogaz de l'ensilage de maïs.....	78
Figure III-21. Volume corrigé de biogaz de la mixture.....	78
Figure III-22. Volume corrigé de méthane de l'ensilage de maïs.....	78
Figure III-23. Volume corrigé de méthane de la mixture.....	79
Figure III-24. Comparatif des volumes corrigés de biogaz des deux substrats.....	79
Figure III-25. Comparatif des volumes corrigés de méthane des deux substrats.....	79

Liste des tableaux

Tableau I-1. Proportionnalité des différents composés [Oub.09]	11
Tableau I-2. Production de biogaz des déjections animales.....	13
Tableau I-3. Comparatifs des types de digesteurs.....	20
Tableau I-4. Comparatifs entre DB et DMC.....	23
Tableau I-5. Comparatif entre digesteur fabriqué sur site et préfabriqué.....	25
Tableau I-6. Potentiels méthanogènes des différentes cultures (Nm ³ CH ₄ / kg MO) [get.bin]	31
Tableau I-7. Principaux constituants chimiques de diverses biomasses lignocellulosiques [God.10]	33
Tableau I-8. Rendement énergétique des différentes cultures.....	33
Tableau I-9. Influence du stade de maturité sur le potentiel méthanogène.....	34
Tableau I-10. Caractéristiques agronomiques des différentes cultures.....	38
Tableau II-1. Effet de l'élévation de CO ₂ sur les protides.....	44
Tableau II-2. Effet de l'élévation de CO ₂ sur les minéraux.....	46
Tableau II-3. Synthèse des variations minimales et maximales du rendement et de la qualité de la plante en sous élévation de CO ₂	47
Tableau II-4. Variation du rendement en fonction de la température.....	48
Tableau II-5. Variation des nutriments en fonction de la température.....	50
Tableau III-1. Masse en gramme des différents substrats.....	69
Tableau III-2. Pourcentage en matière sèche, minérale et organique des substrats.....	70
Tableau III-3. Pourcentage des différents éléments.....	71
Tableau III-4. Volume de biogaz et de méthane en litre du maïs.....	72
Tableau III-5. Volume de biogaz et de méthane en litre de la mixture.....	72
Tableau III-6. Variation de la composition du biogaz de l'ensilage de maïs.....	72
Tableau III-7. Variation de la composition du biogaz de la mixture.....	73
Tableau III-8. Table de pression d'eau en fonction de la température.....	73
Tableau III-9. Volume de biogaz et de méthane en normal litre de l'ensilage de maïs.....	74

Tableau III-10. Volume de biogaz et de méthane en normal litre de la mixture.....74

Tableau III-11. Volumecorrigé en normal litre de l'ensilage de maïs.....75

Tableau III-12. Volume corrigé en normal litre de la mixture.....75

INTRODUCTION GENERALE

Le biogaz est un des dérivés de la large gamme de la biomasse, il est obtenu par le biais de la décomposition de la matière organique dans un milieu anaérobique grâce à des bactéries fermentatives. Composé principalement de méthane, le biogaz est une source d'énergie renouvelable sûre, fiable et durable du fait de la diversité des substrats qui le génèrent, de ses domaines d'application multiples (chaleur, électricité, carburant, cuisson) et de ses intérêts divers notamment avec la réduction du taux de méthane dans l'atmosphère et le résidu ou digestat qui constitue un excellent fertilisant **[Olu.14]**.

La quantité de gaz recueilli lors d'une méthanisation varie largement en fonction des conditions expérimentales et du substrat utilisé donc de sa composition centésimale massique. Le substrat peut être utilisé seul ou combiné à d'autres. La mixture encore appelée co-digestion est une méthode efficace permettant de stabiliser le milieu et d'augmenter le rendement en méthane **[Fro.14]**.

Dans les pays développés, l'utilisation des cultures énergétiques qui sont des cultures dédiées à des fins énergétiques a connu une expansion. Le maïs est la culture la plus utilisée du fait de son potentiel méthanogène et de son rendement énergétique élevé. Il est pour la plupart utilisé sous forme ensilée et en co-digestion avec des substrats d'origine animale afin de faciliter la digestion et d'accroître le rendement.

Les cultures énergétiques sont exposées au milieu extérieur sous l'influence de plusieurs paramètres à savoir la température, la variation de la concentration atmosphérique en CO₂, les précipitations.... La concentration atmosphérique du CO₂ continue de s'accroître et est estimée à 2 ppm/an en moyenne durant la période 2002-2011. Cette augmentation pouvant atteindre 400 à 500 ppm en 2050 selon les projections de l'IPCC là où la normale c'est-à-dire la concentration ambiante tourne autour de 350 ppm **[IPCC.14]**.

La température globale a augmenté d'environ 0,74 °C entre 1906 et 2005 et est estimée à 1,5 °C en 2017. Dans les 30 à 50 prochaines années, les changements de température attendus devraient être dans la gamme de 2 à 3 °C et pourraient atteindre 6,4 °C à la fin de ce siècle influençant ainsi la température du sol dans les zones agricoles **[IPCC.18]**. C'est fort de ces constats que nous avons axé nos recherches sur le possible impact du changement climatique sur la production de biogaz à partir des cultures énergétiques. La plupart des études ont montré que l'élévation de CO₂ et de la température impacte négativement sur la productivité ainsi que sur la qualité de la plante. Les éléments clés à un bon rendement en biogaz et en méthane sont pour la plupart négativement affectés par le changement climatique **[Abe.16]**.

Quel est l'impact réel du changement climatique sur la production de biogaz ?

Quel est l'avenir de l'utilisation des cultures énergétiques pour la production de biogaz ?

Quelle solution adopter pour essayer de limiter les dégâts causés par le changement climatique au cas où les cultures énergétiques sont utilisées comme substrat ?

C'est ainsi que l'objectif de cette thèse est d'apporter des éléments de réponse aux questions posées ci-dessus. Si des travaux de recherche sur l'impact du changement climatique sur la plante ont été faits, ceux de l'impact de ce dernier sur la production de biogaz sont rares ou inexistantes.

Ce travail est le fruit d'un stage pratique effectué au CERER (Centre d'Etudes et de Recherche sur les Energies Renouvelables) et aussi au laboratoire de biomasse à l'Université d'application Technique THM de Giessen (Allemagne).

A la suite de cette introduction, la structure de la thèse se présente comme suit :

Le chapitre I sera consacré à une étude bibliographique qui sera en fait une cartographie de tout ce qui se fait ou qui s'est fait comme travaux ou réalisation dans le domaine du biogaz aussi bien au Sénégal qu'en dehors du pays. On parlera aussi du biogaz à savoir sa définition, ses composants, sa technique de production, ses processus. Une partie sera allouée aux cultures énergétiques en commençant par donner leur définition, ensuite leurs diversités, leurs catégories et enfin sur le choix de la culture.

Dans le chapitre II nous parlerons de l'effet du changement climatique sur la production de biogaz, notamment l'élévation de CO₂, de température et de précipitation. Nous montrerons d'abord leurs effets sur le rendement et qualité de la culture par le biais d'une méta-analyse qui est une exploitation des résultats obtenus dans la littérature avant de parler de son impact sur la production de biogaz.

Le chapitre III constitue la partie expérimentale effectuée en Allemagne, en commençant par la présentation des matériels, ensuite des résultats avant de passer aux discussions et perspectives. Les tests ont porté sur la co-digestion d'une culture énergétique qui est le maïs avec la bouse de vache et de la boue ceci dans le but de trouver une solution probable à l'utilisation des cultures face à la menace du changement climatique.

Chapitre I : Revue de la littérature

I-1	Techniques de production de biogaz	
I-1-1	Introduction.....	4
I-1-2	Caractéristiques des différents composés du biogaz.....	5
I-1-2-1	Le méthane.....	6
I-1-2-2	Le dioxyde de carbone.....	7
I-1-2-3	Le dioxygène.....	7
I-1-2-4	Les composés azotés.....	8
I-1-2-5	La vapeur d'eau.....	8
I-1-2-6	Les composés soufrés.....	8
I-1-2-7	Les siloxanes.....	9
I-1-2-8	Le monoxyde de carbone.....	9
I-1-2-9	Le dioxygène.....	9
I-1-3	Produits aptes à la méthanisation.....	10
I-1-3-1	Les déjections animales.....	10
I-1-3-2	Les biodéchets municipaux.....	12
I-1-3-3	Les boues d'épuration.....	13
I-1-3-4	Les cultures et leurs résidus.....	14
I-1-3-5	Laco-digestion.....	15
I-1-3-6	Choix du substrat.....	16
I-1-4	Types de digesteur.....	17
I-1-4-1	Présentation.....	17
I-1-4-2	Les digesteurs préfabriqués.....	19
I-1-4-3	Les digesteurs fabriqués sur site.....	22
I-1-5	Processus de la méthanisation.....	23
I-1-5-1	L'hydrolyse.....	24

I-1-5-2 L'acidogénèse.....	24
I-1-5-3 L'acétogénèse.....	24
I-1-5-4 La méthanogénèse.....	24
I-2 Cultures énergétiques.....	27
I-2-1 Introduction.....	28
I-2-2 Types de cultures.....	28
I-2-2-1 Cultures lignocellulosiques.....	28
I-2-2-2 Cultures sucrées ou amylacées.....	28
I-2-2-3 Cultures oléagineuses.....	28
I-2-3 Choix de la culture.....	29
I-2-3-1 Le potentiel méthanogène.0.....	29
I-2-3-2 La composition chimique.....	30
I-2-3-3 Le rendement.....	32
I-2-3-4 Le stade de la récolte.....	33
I-2-3-5 La variété.....	34
I-2-3-6 La saison de récolte.....	34
I-2-3-6 Stockage et prétraitement.....	35
I-2-4 Etat de l'art.....	38
I-2-5 Conclusion.....	39

I-1 Techniques de production de biogaz

I-1-1. Introduction

Le biogaz est le produit de la fermentation bactérienne de toute matière organique en l'absence d'oxygène. La matière organique (MO) est la matière carbonée produite en général par des êtres vivants végétaux, animaux, ou micro-organismes. Il s'agit par exemple des glucides, des protéides et lipides. En plus du carbone qui est le composant essentiel, la MO contient aussi l'hydrogène (H), l'oxygène (O), l'azote (N), le phosphore (P), le fer (Fe), le soufre (S)...

Au cours de sa production, le méthane est la plupart du temps mélangé à du gaz carbonique et d'autres gaz en petites quantités, ce mélange est appelé le biogaz. Le méthane est riche en énergie et il confère au biogaz son pouvoir calorifique qui est directement proportionnel à sa teneur.

Le pourcentage de méthane peut varier de 40 à plus de 80 % selon la nature du substrat et des conditions expérimentales, le reste étant principalement du CO₂ (dioxyde de carbone) (20 à 60 %), de l'H₂S (sulfure d'hydrogène) (env. 1 %) et de la vapeur d'eau. Ce processus se déroule naturellement dans des milieux anaérobies comme les marécages, les panses des bovins, les décharges d'ordures, les lagunes d'eaux usées suffisamment profondes (> 3 m). Dans ce cas le méthane et le gaz carbonique sont libérés et constituent des gaz à effet de serre. Par contre la méthanisation peut se passer dans des réacteurs encore appelés digesteurs où les gaz produits sont captés et utilisés à d'autres fins.

Les matières organiques fermentent grâce à des ensembles de bactéries en quatre étapes que sont l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse.

La digestion anaérobie se déroule à différentes températures (d'environ. 10 à 55 °C) avec toutefois deux optimums :

- la fermentation mésophile à 35 °C,
- la fermentation thermophile à 55 °C.

On parle de fermentation psychrophile pour les températures inférieures à environ 20 °C.

Tous les substrats ne sont pas méthanisables, le pH doit se maintenir (naturellement ou par l'ajout de neutralisants) entre 6,5 et 7,5 dans le digesteur.

Dans les procédés traditionnels (digesteur complètement mélangés), les substrats doivent séjourner assez longtemps dans le digesteur pour que les bactéries puissent se multiplier et digérer la matière organique.

Le biogaz est valorisé pour la production de chaleur, d'électricité et dans le gaz de réseau.

La comparaison du pouvoir calorifique du biogaz avec celui des combustibles usuels permet d'énoncer les équivalents approximatifs suivants :

- 1 m³ de biogaz équivaut, du point de vue énergétique, à 1,25 kWh (kilowattheure) ;
- Sa combustion produit une quantité d'énergie équivalente à celle de 0,7 L de pétrole ou 0,6 L de gasoil [Ali.11].

I-1-2. Les caractéristiques des différents composés du biogaz

Le biogaz est composé des 5 éléments de base C, H, O, N et S, provenant directement de la transformation de la matière organique dont il est issu.

Ces éléments se retrouvent principalement sous la forme d'un mélange de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂), dont le rapport varie avec le substrat. À ce mélange saturé en eau viennent s'ajouter des éléments à l'état de traces et en quantités variables selon les substrats. Il s'agit de l'azote, de l'hydrogène, de l'hydrogène sulfuré (H₂S), des mercaptans (R-SH), des composés organiques volatiles (alcanes, hydrocarbures aromatiques, composés organo-halogénés...). Ces derniers sont principalement présents dans le gaz de décharge.

I-1-2-1 Le méthane

Le méthane est le plus simple des hydrocarbures, et plus précisément du premier terme de la famille des alcanes. Il est assez abondant dans le milieu naturel, ce qui en fait un combustible à fort potentiel.

Cependant, le fait qu'il se présente à l'état gazeux aux CNTP nécessite de le liquéfier pour le transporter.

D'énormes quantités de méthane sont enfouies dans le sous-sol sous forme de gaz naturel, de grandes quantités difficiles à évaluer sont également présentes sur le plancher océanique sous forme d'hydrates de méthane, stables à basse température et haute pression. Du méthane est également produit de façon anaérobie par les archées dites méthanogènes.

Le méthane est naturellement présent dans l'atmosphère terrestre à des concentrations très faibles et présente une durée de vie assez brève (moins de dix ans).

C'est un gaz à effet de serre considérablement plus puissant que le CO₂, responsable, au niveau actuel de sa concentration, de quelques pourcents de l'effet de serre total à l'œuvre dans notre atmosphère. En effet, un kilogramme de méthane a un potentiel de réchauffement global (PRG) 23 fois supérieur à celui d'un kilogramme de gaz carbonique mais a une durée de plus faible. Le méthane est ainsi le seul hydrocarbure classique qui peut être obtenu rapidement et facilement grâce à un processus biologique naturel.

Voici quelques propriétés physico-chimiques du méthane :

- La combustion du méthane dans l'oxygène pur produit du dioxyde de carbone CO₂ et de l'eau H₂O avec une importante libération d'énergie :



- La température d'ignition du méthane à pression atmosphérique en présence d'une flamme ou étincelle est de 550°C, son auto inflammation n'est donc pas spontanée.
- 1 m³ de méthane à 15 °C (gaz naturel) libère une énergie de 9,89 kWh (35,6 MJ)[Ali.11].

- Le méthane brûle avec une flamme bleue lorsque sa combustion est complète.
- Seuls 3 cm^3 de méthane seront dissouts dans 100 cm^3 d'eau à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et à une pression de 10 kPa [Ali.11].
- A l'état pur le méthane est incolore et inodore.

La figure I-1 nous montre le potentiel d'un mètre cube de méthane du point de vue énergétique et sa comparaison aux autres sources énergétiques notamment le gaz naturel qui est très utilisé au Sénégal.

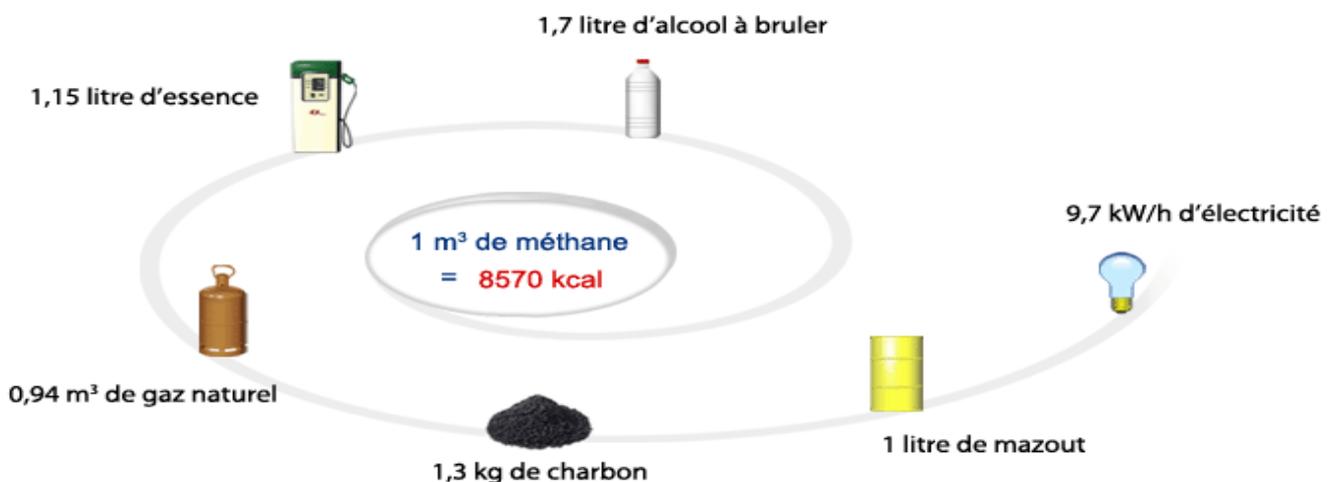


Figure I-1 : Valeurs comparatives du méthane [Ali.11].

I-1-2-2. Le dioxyde de carbone : CO_2

La présence de CO_2 est inhérente aux gaz de biogaz, actuellement cité parmi les gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique mais est beaucoup moins puissant que le méthane. Il ne participe pas au processus de combustion mais fait accroître l'indice de méthane lorsque son pourcentage dans la composition du biogaz n'est pas trop important ; on parlera d'enrichissement du biogaz, une méthode qui consiste à enlever le gaz carbonique du biogaz afin de lui conférer une qualité de gaz comparable à celui du gaz naturel qui est d'une qualité légèrement supérieure comme le montre la figure comparative du biogaz ci-dessus.

I-1-2-3. Le dihydrogène : H_2

L'hydrogène contribue à la réduction significative de l'indice méthane. L'hydrogène est un combustible dont la vitesse de propagation de flamme est extrêmement élevée : 260 cm/s (dans les conditions standards), des précautions particulières d'emploi doivent être prises

pour sa valorisation. A titre de comparaison, celle du gaz naturel (assimilé à du méthane) est de 37 cm/s [Ali.11].

I-1-2-4. Les composés azotés

La présence de NH_3 dans le biogaz accélère et amplifie la combustion entraînant des contraintes thermiques pouvant entraîner la fonte des pistons et un échauffement des injecteurs, surtout à des valeurs de pH supérieures à 8,3. La solution souvent apportée est une meilleure conception de l'installation, le contrôle du pH dans le digesteur, le filtrage du gaz par du charbon actif. En refroidissant le biogaz, les condensats entraînent le NH_3 . Un effet du NH_3 est d'être totalement oxydé en NO lors de la combustion, ce qui peut impacter sensiblement les émissions polluantes.

I-1-2-5. La vapeur d'eau : H_2O

A la sortie, le biogaz est saturé de vapeur d'eau et la quantité d'eau augmente avec la température du gaz. Les problèmes prévisibles sont : la vapeur d'eau réagit avec le H_2S pour former les acides sulfureux (nuisibles pour les vannes), la formation des poches d'eau dans les conduites de gaz, l'augmentation des pertes de charge au niveau du filtre, une baisse du rendement du moteur due à la compression de l'eau contenue dans le biogaz. Il y a également une possibilité de condensation de l'eau, dans le cas d'un moteur, dans la conduite après la suralimentation. Cela entraîne le passage en phase liquide de différents composés traces et provoque de la corrosion.

I-1-2-6. Les composés soufrés

Le biogaz contient toujours du sulfure d'hydrogène (H_2S) dont la proportion peut atteindre en fonction du substrat les valeurs de 20 000 ppm [Ali.11]. La production de H_2S n'est pas continue. De nombreux problèmes sont liés à la présence d' H_2S dans le biogaz. Cela provoque notamment la corrosion des conduites, des équipements de valorisation (moteurs, turbine..) et des échangeurs de chaleur sur les fumées. Cette corrosion dépend de plusieurs facteurs : la teneur en H_2S , l'humidité, le type de matériau, le temps et le mode d'exposition (gazeux ou aqueux). Les solutions consistent à désulfurer le gaz par voie biologique, réaction avec l'hydroxyde de fer, ou encore par filtration sur du charbon actif. On conseille aussi d'agiter continuellement le substrat dans le digesteur et de disposer les conduites de gaz en série entre le digesteur et le local de post-digestion. Il faut aussi noter que c'est ce produit qui confère au biogaz son odeur « d'œuf pourri »

I-1-2-7. Le silicium et ses composés : les siloxanes.

Les siloxanes volatiles sont composés de plusieurs constituants chimiques sous forme gazeuse silicium, oxygène, chaîne carbonée. Communément utilisés pour la fabrication de cosmétiques, d'huiles et de peintures, ils se retrouvent principalement dans le gaz de décharge et dans une moindre mesure dans les gaz de digesteurs.

Quand le biogaz est brûlé pour produire de l'électricité, les siloxanes se transforment en dioxyde de silicium (SiO_2), qui peut se déposer sur les différents équipements en contact avec le gaz brûlé, sous forme de dépôt blanchâtre apparenté à de la céramique. Il existe une grande variété de siloxanes. La concentration de siloxanes est généralement plus haute dans les gaz de digesteur que dans les gaz de décharge. De ce fait, il est parfois plus facile de quantifier les siloxanes dans les gaz de digesteur. Depuis plusieurs années, on remarque que la présence de siloxanes dans le biogaz provoque des dégâts considérables sur les équipements de production d'électricité (moteurs, micro turbines, piles à combustible...) et ainsi une augmentation de la maintenance et une baisse de performance. Les constructeurs préconisent donc un seuil limite de concentration de siloxanes dans le biogaz pour l'utilisation de leurs équipements.

I-1-2-8. Le monoxyde de carbone : CO

La teneur importante en monoxyde de carbone (gaz inodore et incolore) entraîne une toxicité des gaz de gazogènes. Même en faible concentration, il peut remplacer l'oxygène dans le processus de respiration et provoquer l'asphyxie.

I-1-2-9. Le dioxygène : O₂

La présence d'oxygène est essentiellement liée au mode opératoire de production du gaz de biomasse. Pour le biogaz, la présence d'oxygène révèle un défaut d'étanchéité (introduction d'air) dans le procédé d'extraction du gaz produit. On en retrouve principalement dans le gaz de décharge, qui est un mélange de biogaz et d'air.

La proportion de ces deux gaz dépend des conditions d'exploitation de la décharge, principalement de la mise en dépression du réseau de captage. Le biogaz de digesteur ne contient en principe pas d'oxygène étant donné ses conditions de formation et de transport vers l'utilisateur.

Les sources différentes de production conduisent à des compositions spécifiques, étant donné la variabilité et la diversité des gaz de biomasse il s'avère délicat d'afficher une composition moyenne du biogaz car elle est spécifique pour chaque type de substrat. Le tableau I-1 donne la variation en pourcentage des différents constituants du biogaz et en ppm pour le sulfure d'hydrogène. Le méthane demeure toujours le composé dominant quel que soit le produit utilisé, il est suivi du gaz carbonique ensuite vient la vapeur d'eau et le sulfure d'hydrogène.

Les autres gaz comme le monoxyde de carbone, le dioxygène, le dihydrogène et les composés du silicium sont présents en faible quantité ou sous forme de trace.

Tableau I-1 : Proportionnalité des différents composés [Oub.09]

Composants	Valeurs
% CH ₄	50-75
% CO ₂	25-45
% H ₂ O	2-7
% H ₂	<1
H ₂ S (ppm)	20-20000
% O ₂	<2
% N ₂	<2

I-1-3. Produits aptes à la méthanisation

Toute installation pour la production de biogaz est alimentée par différents substrats organiques et fermentescibles dont l'état peut être liquide, pâteux ou solide. Ces substrats peuvent être classés suivant la large gamme de biomasse citée précédemment.

I-1-3-1. Les déjections animales

C'est le substrat le plus souvent utilisé en milieu rural où la collecte est aisée surtout quand les animaux sont en stabulation.

Les effluents (lisiers, fumier) sont disponibles jusqu'à une durée supérieure à 4 mois, ce temps de stockage peut être mis à profit pour la méthanisation des effluents. Le lisier est un mélange de déjections d'animaux (urines, excréments) dans lequel domine l'élément liquide ce qui facilite sa manipulation et qui permet de diluer les autres substrats.

Les déchets d'origine agricole et animale constituent une grande proportion de la biomasse et leur utilisation et recyclage est important pour les aspects économique et environnemental. La digestion anaérobie est l'un des procédés les plus largement utilisés

pour traiter ces déchets et constituent une méthode attractive pour le traitement des déchets organiques pour la production de biogaz comme source d'énergie alternative **[Mas.01]**. Lorsqu'il est traité ou mal géré, le fumier animal devient une source importante de pollution de l'air et de l'eau.

Les principales menaces sont le lessivage des éléments comme l'azote et le phosphore, l'évaporation de l'ammoniac et la contamination de l'agent pathogène. Le secteur de la production animale est responsable de 18 % des émissions des gaz à effet de serre globales, mesurées en équivalent CO₂, et de 37 % du méthane d'origine anthropique. En outre 65 % de protoxyde d'azote est d'origine anthropique et 64 % des émissions anthropiques d'ammoniac provient du secteur de la production animale dans le monde entier **[Hol.09]**.

En Allemagne, seulement 12 % des résidus d'origine animale sont utilisés pour la digestion anaérobique. L'application du fumier liquide est la technologie la plus pratique. La conversion de grosses particules fibreuses causent des problèmes de procédure comme le colmatage des pompes et des tuyaux. La bio-dégradabilité de ces substrats est également limitée sur la base du récalcitrant des bio-fibres et la forte proportion des matières non-dégradables. Pour cette raison, seul un faible pourcentage de fumier solide est utilisé dans les installations de biogaz classiques. Une large fraction environ 40-50 % de la matière sèche (MS) chez les bovins est composée de fibres, raison pour laquelle la quantité de méthane obtenue diffère de celle de la théorie. Des travaux sur la production de biogaz à partir du fumier de bovins avec un TRH (temps de rétention hydraulique) de 15-30 jours ont montré que seule une partie des fibres est dégradée fournissant en moyenne en méthane 0,2-0,25 m³/kg MM (matière minérale) comparé à la quantité de méthane théorique de 0,4-0,45 m³/kg MM pour le fumier de vache **[Boe.09]**.

Le fumier de porc et les fientes de volaille donnent un meilleur rendement en biogaz alors que le biogaz obtenu à partir des fumiers de caprins et d'ovins est largement en dessous. La production en biogaz est beaucoup plus importante chez le fumier de porc que celle de la vache avec respectivement 385 L/kg MM contre 182 L/kg MM, et en méthane avec 253.8 L/kg MM et 139.8 L/kg MM mais le pourcentage en méthane obtenu avec la bouse de vache est supérieur à celui du porc (76.8 % et 65.9 %) respectivement **[Qiao.11]**.

La bouse de vache produit une quantité de 191 L/kg MM contre 211 L/kg MM pour la fiente de volaille **[Alfa.14]**. Pour un TRH de 40 jours le fumier de mouton produit une quantité de 62 L/kg de gaz contre une quantité de 58 L/kg pour le fumier de caprins **[Mas.01]**. La quantité de biogaz obtenue à partir du crottin de cheval est estimée à 224 L/kg MM **[Teg.14]**. Malgré un faible potentiel méthanogène, le lisier est indispensable car il apporte des bactéries fraîches, il a un fort pouvoir tampon (stabilise le pH) : ce qui facilite les réactions bactériennes et assure une stabilité du milieu. Il peut également contenir des résidus de litière (paille) en faible quantité.

Il est produit principalement par les élevages de porcs de bovins et de volailles. Le taux de MSV, qui est la substance qui sert à la fermentation est d'environ 82 %, le pH du lisier est plutôt basique et est approprié à la fermentation.

Une quantité de 0,34-0,42 m³ de biogaz par personne est nécessaire pour la cuisson des aliments et 1 kg de bouse de vache a un potentiel de production de 0,04 m³ environ. De ce fait la production de 1 m³ de gaz requiert une quantité de 25 kg de substrat pouvant être fournis par 2 à 3 bovins [ONAS.13].

Le tableau I-2 est une méta-analyse de la production de biogaz à partir des déjections animales.

Au Sénégal, la méthanisation de fumier a constitué une alternative crédible et durable pour le monde rural du fait du potentiel important en biogaz qu'il renferme et qui est estimé à 61946500 m³ soit 16.187091 MJ ou 393 ktep (kilotonne équivalent pétrole)[ONAS.13]. Ce potentiel est réparti comme suit : 560271.10³ m³ pour les bovins, 47150.10³ m³ (caprins), 11202.10³ m³ (équins), 55000.10³ m³ (ovins), 9500.10³ m³ (porcins) et 54.10³ m³ (volailles).

La bouse de vache est le substrat le plus utilisé, la quantité de fumier rejetée annuellement est estimée à 20319.10³ tonnes/an soit un potentiel de 7483 ktep qui est plus du double de la consommation totale énergétique du Sénégal[ONAS.13].

Tableau I-2 : Production de biogaz des déjections animales

Catégories	Volume de gaz (l/kg MM)
Bovins	182 ; 191 [Qiao.11], [Alfa.14]
Caprins	58 [Mas.01]
Porcins	385 [Qiao.11]
Ovins	62 [Mas.01]
Equins	224 [Teg.14]
Volailles	221 [Alfa.14]

I-1-3-2. Biodéchets municipaux

Les biodéchets sont définis comme une matière hétérogène dans laquelle la composition varie largement. La composition des biodéchets municipaux est affectée par des facteurs divers, y compris des différences régionales, le climat, la mesure de recyclage, la fréquence de collecte (ramassage), la saison, les pratiques culturelles. Les qualités des biodéchets municipaux sont influencées non seulement par le système de tri, mais aussi par des méthodes diverses utilisées pour le quantifier. Ils représentent les déchets verts, déchets de cuisine, papier-carton des collectivités locales.

Avec le développement de l'économie mondiale et la croissance de la population, les déchets alimentaires sont de plus en plus produits principalement par les hôtels, les restaurants, les foyers, les cantines et les entreprises. La quantité des déchets alimentaires était estimée à 90 millions de tonnes en Chine en 2010 [Zha.14].

Les déchets alimentaires comptent pour une grande partie des déchets solides municipaux à la fois des pays développés et en développement. Selon les différentes habitudes alimentaires, la composition des déchets alimentaires est variée : riz, légumes, viande, œuf et d'autres composants principaux. La teneur en MO et en MS des déchets alimentaires est

rangée entre 18-30 % et 17-26 % respectivement ce qui indique que l'eau représente 70 à 80 %. En raison de cette forte teneur en humidité, les déchets alimentaires sont des substrats organiques facilement biodégradables.

La production en méthane dans un digesteur dont la température est maintenue à 35 °C s'étend de 0,39 à 0,43 kg/m³ de solide volatile trié manuellement contre une production comprise entre 0,11 et 0,16 kg/m³ de solide volatile mécaniquement trié [Nal.97].

Le seul problème des déchets alimentaires réside au niveau de la collecte du fait de leur utilisation au profit de l'alimentation des animaux domestiques. Les restes alimentaires, en raison de leur teneur énergétique très importante, sont un excellent substrat pour produire du biogaz mais requièrent cependant, à cause de leur composition chimique, beaucoup d'attention pour l'acheminement et le stockage dans l'installation.

Actuellement la digestion anaérobie des déchets alimentaires est devenue un domaine de recherche intense depuis que sa matière organique est favorable pour la croissance des microbes anaérobies. Avec un ratio C/N comprise entre 13 et 24, ces déchets sont une ressource riche en lipides dans laquelle la concentration est environ 5 g/L (acides gras à longues chaînes). En théorie, la productivité en méthane des lipides est de 1014 L/kg de SV, une valeur supérieure à celle des glucides (370 L/kg de glucose /SV). Cependant, quand les déchets alimentaires sont fermentés seuls dans une opération à long-terme on peut noter une inhibition du fait que les éléments nutritifs sont toujours en déséquilibres dans le digesteur tandis que les oligo-éléments (Zn, Fe) ne sont pas suffisants, les macronutriments (K, Na) sont en excès et le rapport C/N est hors de l'intervalle requis [Zha.14]. Le potentiel en méthane des biodéchets est estimé à 250 m³/t MOS et 100 m³ de biogaz/m³ t de biodéchets[Olu.14].

I-1-3-3. Les boues d'épuration

Le procédé de digestion anaérobie (procédé de traitement et stabilisation des boues) s'applique sur les boues concentrées après le traitement primaire ou secondaire des eaux usées. Le traitement anaérobie des boues s'avère être une technique efficace pour réduire les charges en polluants et les concentrations en germes pathogènes. Et contrairement au traitement aérobie, il permet à la fois de digérer et de stabiliser rapidement les boues tout en réduisant leur volume et de fournir d'importantes quantités d'énergie.

Dans de nombreuses stations d'épuration, les bassins de décantation anaérobies ou les lagunes profondes produisent d'abondantes quantités de biogaz qui s'échappent dans l'atmosphère, contribuant ainsi aux émissions de gaz à effet de serre.

Les productions de biogaz atteignent 15 à 25 m³ par 1000 habitants et par jour. S'il n'est pas utilisé, le biogaz est malodorant et polluant mais il est très riche en énergie (> 7 kWh/m³) et peut être exploité pour produire différentes formes d'énergie (électricité, chaleur) tout en éliminant les odeurs et la pollution de l'air.

Le traitement anaérobie des boues peut s'effectuer soit dans de simples bassins ou lagunes de décantation (de plus de trois mètres de profondeur), soit dans des digesteurs

spécialement conçus. Les eaux usées peuvent être fermentées dans des digesteurs spéciaux, tels que le filtre anaérobie, les lits fluidisés et l'UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket).

Ces méthaniseurs ont pour principe de piéger les bactéries qui se fixent sur les particules ou les supports (plastique, polyuréthane, « soufflé » ou en anneaux à grande surface spécifique) ajoutés dans le digesteur. Le contact bactéries-matière à fermenter est optimisé par la répartition des liquides et des supports.

La vitesse de fermentation est beaucoup plus élevée et le temps de séjour peut être réduit à quelques heures au lieu de plusieurs semaines. Les productions atteignent de 4 à 10 m³ de biogaz par m³ de digesteur au lieu de 1 m³/m³ dans les digesteurs classiques. Les volumes des digesteurs sont réduits.

Le biogaz produit par les boues est particulièrement riche en méthane et le pourcentage volumique atteint généralement 75 à 80 %. Au début des années 90, on comptait dans le monde plus de 1000 digesteurs alimentés par des boues de stations d'épuration. Le potentiel de la production en biogaz est estimé à 50 Mtep/an.

Au Sénégal de 1950 à 2007 une quarantaine d'installations a été réalisée dont les plus grandes sont celles de Cambérène (POYAUD) ; deux vastes installations de (2000 et 3000 m³), la quantité de biogaz produite est de 1500 à 2000 m³/j permettant la production d'électricité (200 kW) et de l'eau chaude. Installée en 1989 pour un coût de 446.000.000 Fcfa, la STEP de Cambérène a subi quelques améliorations pour l'extension et la réhabilitation de ses capacités de traitement en eau en 2001, 2004 et 2008.

I-1-3-4 Les cultures et leurs résidus

Les matières végétales sont des produits aptes à la méthanisation, elles sont facilement digérable par les bactéries. Ce sont principalement les pulpes et les fanes de betteraves ou de pommes de terre, les drêches d'orges de brasserie, les déchets verts issus par exemple de la tonte des pelouses, les ensilages de maïs pâteux, les résidus de séchage de maïs, les résidus de légumes, de céréales, de fruits ou de thé, les résidus de silos ou de cultures. Les issues de céréales possèdent l'un des pouvoirs méthanogènes les plus élevés comme leur taux d'humidité est trop faible pour être méthanisées seules, elles sont incorporées à une base plus liquide, en volumes importants, du type lisiers ou déchets des IAA (Industrie Agro-alimentaires) qui eux n'ont pas toujours un pouvoir méthanogène satisfaisant.

En parallèle au maïs qui est la culture la plus utilisée dans les pays développés, d'autres cultures annuelles s'avèrent intéressantes pour la méthanisation. C'est le cas de la betterave fourragère, la culture annuelle la plus productive concernant la quantité de biogaz produite par hectare après le maïs. De son côté, le sorgho grain sucrier peut atteindre jusqu'à 20 tonnes de matière sèche/ha, une production massive de biomasse.

Certaines variétés de sorgho sont actuellement développées en France et en Allemagne pour produire de l'ensilage à la ferme.

La tige de ces sorghos est riche en sucre et contient peu de lignine, ce qui le rend sensible à la verse mais facilite sa digestibilité. Ces variétés peuvent produire de l'ensilage mais aussi de l'énergie par méthanisation ou production de biocarburant de seconde génération.

C'est une plante peu gourmande en eau et en intrants particulièrement recherchée par les pays d'Europe du nord qui l'utilisent pour approvisionner les usines de méthanisation. Leur lignification est différente, ce qui améliore leur digestibilité et permet des valeurs énergétiques comparables à celle du maïs ensilage.

Cette partie sera plus développée dans le chapitre II où nous parlerons des cultures énergétiques qui sont des plantes cultivées à des fins de production d'énergie.

I-1-3-5 La co-digestion

Plusieurs études ont démontré que la combinaison de différents substrats organiques pour la co-digestion anaérobie résulte d'une meilleure et efficace dégradabilité conduisant à une augmentation significative de la production de biogaz.

La co-digestion a de nombreux avantages : dilution de la substance toxique provenant de l'un des substrats impliqués, un meilleur équilibre des éléments nutritifs, des effets synergiques sur micro-organisme, un taux de digestion élevé et une possible désintoxication basée sur le procédé de co-métabolisme. Les déchets d'origine animale, particulièrement la bouse de vache a en moyenne un rapport C/N d'environ 24, les plantes comme les pailles des céréales contiennent un pourcentage de carbone élevé donc le ratio C/N l'est aussi.

Les matières avec un rapport C/N élevé peuvent être mélangées avec ceux de faible rapport C/N afin de ramener le ratio du mélange à un rapport C/N souhaitable [Cha.12]. Afin de maximiser le rendement du méthane, certains nutriments nécessaires doivent être présents dans le réacteur, ce qui va permettre d'utiliser un taux de charge organique important, un TRH inférieur et d'obtenir une production élevée d'énergie.

Un manque de trace des éléments nutritifs a été démontré comme étant généralement le problème dans les installations de biogaz qui utilisent uniquement les cultures énergétiques ou d'autres substrats fermentés seuls tels que les déchets organiques. La co-digestion des déchets alimentaires avec la bouse de vache pourrait améliorer le processus de biodégradation résultant en un rendement meilleur en méthane du fait du cumul des longues chaînes d'acide gras chez les lipides [Zha.14].

Le déséquilibre nutritif des déchets alimentaires peut être surmonté par la co-digestion avec d'autres déchets de la biomasse résultant à un ratio C/N plus approprié et à une concentration des éléments métaux. De la même façon, en faisant varier la proportion de chaque substrat, on remarque que plus le rapport fumier + maïs / maïs est élevé, plus la quantité de gaz et la teneur en méthane sont importantes. 221L, 234L et 259 L de gaz sont obtenus avec une teneur respective de 48 %, 51 %, et 52 % en méthane pour des rapports de 40/60, 50/50 et 60/40 [Fro.14].

Le maïs contient moins d'oligo-éléments que le fumier, la concentration de l'élément de trace dans le produit de digestion de diminue lorsque la part de maïs dans la charge d'alimentation augmente.

Le fumier animal mélangé avec de la matière végétale doit séjourner 50 à 80 jours dans le digesteur pour une digestion mésophilie.

Dans le cas d'une installation de 170 kWe, on pourra donc placer dans la cuve 9 % d'issues de céréales et 16 % de déchets de fruits (pour 71 % de lisier et 4 % de graisses). Soit moins de 20 % de produits végétaux qui seront à l'origine de plus de 50 % de l'énergie produite **[Olu.14]**.

I-1-3-6 Choix du substrat

Le choix des matières organiques est fondamental, dans la mesure où il détermine la production de biogaz, le dimensionnement des équipements techniques et la rentabilité du site.

Ainsi, pour obtenir le meilleur potentiel méthanogène dans un mélange, il faut y inclure des substrats ayant les caractéristiques suivantes : une teneur en matière organique élevée (plus le taux de matière organique est élevée, plus le volume de biogaz produit sera important) et une matière organique riche en graisses (les graisses sont plus méthanogènes que les protéines ou les hydrates de carbone).

Chaque substrat présente donc des qualités et des contraintes. Les matières végétales telles que les résidus de récolte, les déchets de silos et de céréales, les déchets de fruits et légumes, ont souvent de hauts potentiels méthanogènes et sont facilement assimilables par les bactéries. De leur côté, les déjections animales ont un potentiel méthanogène relativement faible, mais apportent des bactéries fraîches et stabilisent le mélange.

D'une manière générale, tous les types de biomasse peuvent être utilisés comme substrats à condition qu'ils contiennent des glucides, des protéines, des matières grasses en tant que composants principaux. Toutes les matières organiques biodégradables peuvent être utilisées en tant qu'entrée pour le processus de biométhanisation. Cependant, pour des raisons technico-économique, certains matériaux sont préférés à d'autres. Le rendement en biogaz et sa composition sont grandement affectés par la composition des matières premières à l'égard des glucides, des lipides et des protéines contenues. La digestion anaérobie des glucides donne 886 L de biogaz (avec une teneur en méthane d'environ 50 %) par kg de MM détruits.

De même, la digestion anaérobie des graisses donne 1535 L de biogaz (le contenu en méthane est de l'ordre de 70 %) par kg de MM et que des protéines cède 587 L de biogaz (avec 84 % de méthane) par kg de MM détruit **[Cha.12]**.

La teneur en eau dans le substrat doit être d'environ 90 % de la masse totale des matières. Avec trop d'eau, le taux de production de biogaz par unité de volume du digesteur diminue, empêchant une utilisation optimale du digesteur.

Si la teneur en eau dans le substrat est trop faible il y'a accumulation de l'acide acétique : ce qui inhibe le processus de fermentation et donc la production de biogaz et aussi de l'écume épaisse est formée à la surface. La teneur en eau varie en fonction de la matière première utilisée pour la fermentation.

Dans le cas des bovins, la bouse fraîche doit être mélangée avec de l'eau sur la base du volume unitaire (i.e. même volume d'eau pour un volume donné de fumier) avant l'alimentation dans le digesteur.

Toutefois, si le fumier est sous forme sèche, la quantité d'eau doit être augmentée en conséquence pour parvenir à la proportion souhaitée (par exemple, le rapport peut varier de 1: 1,25 à même 1: 2). La dilution doit être maintenue pour maintenir les solides totaux de 7 % à 10 %.

Si le fumier est trop dilué, les particules solides se déposent vers le bas dans le lessiveur, et s'il est trop épais, les particules empêchent l'écoulement du gaz formé à la partie inférieure du digesteur. Dans les deux cas, la production de gaz sera inférieure à sa valeur optimale.

I-1-4. Types de digesteurs

I-1-4-1. Présentation

Le digesteur est une sorte de « boîte noire » dans laquelle la génération de méthane a lieu dans un processus microbien complexe se déroulant en plusieurs étapes. Les trois types majeurs de digesteurs en développement dans le monde sont : les digesteurs à dôme fixe, digesteurs à tambour flottant et les digesteurs à écoulement piston comme le montre la figure I-2 [Che.14].

En Asie du sud, Inde et Chine, le digesteur à dôme fixe est le modèle le plus populaire avec plus de 45 millions d'unités implantées. Il est reconnu comme une robuste technologie et pour sa construction, brique, ciment, fer et sable ont besoin d'être transportés au lieu d'implantation. Ainsi un maçon qualifié est nécessaire pour une bonne construction du dôme pour éviter les fuites.

Cette technologie pourrait être adéquate pour les systèmes installés près des villes ou zones rurales avec faibles coûts de transport, pas pour des communautés rurales dispersées ou isolées. Les mêmes remarques ont été faites pour le modèle à tambour flottant.

Ces modèles sont célèbres en raison de leurs longues durées de vie qui peut dépasser 20 ans, justifiant l'investissement élevé. Ils peuvent être importants pour les bovins laitiers ou porcins ayant un horizon à long terme (+ de 5 ans).

Toutefois il ne semble pas adéquat pour les paysans pauvres dont l'investissement à l'horizon est de moins de 2 ans et qui changent souvent les activités agricoles pour d'autres comme : la vente de bétail et de terres agricoles/ou de migrer vers les villes [Mar.14].

Contrairement au digesteur à dôme fixe, le digesteur à écoulement piston a une durée de vie plus courte et est plus exposé à une destruction rapide bien qu'ayant un coût plus bas du fait de la construction moins sophistiquée.

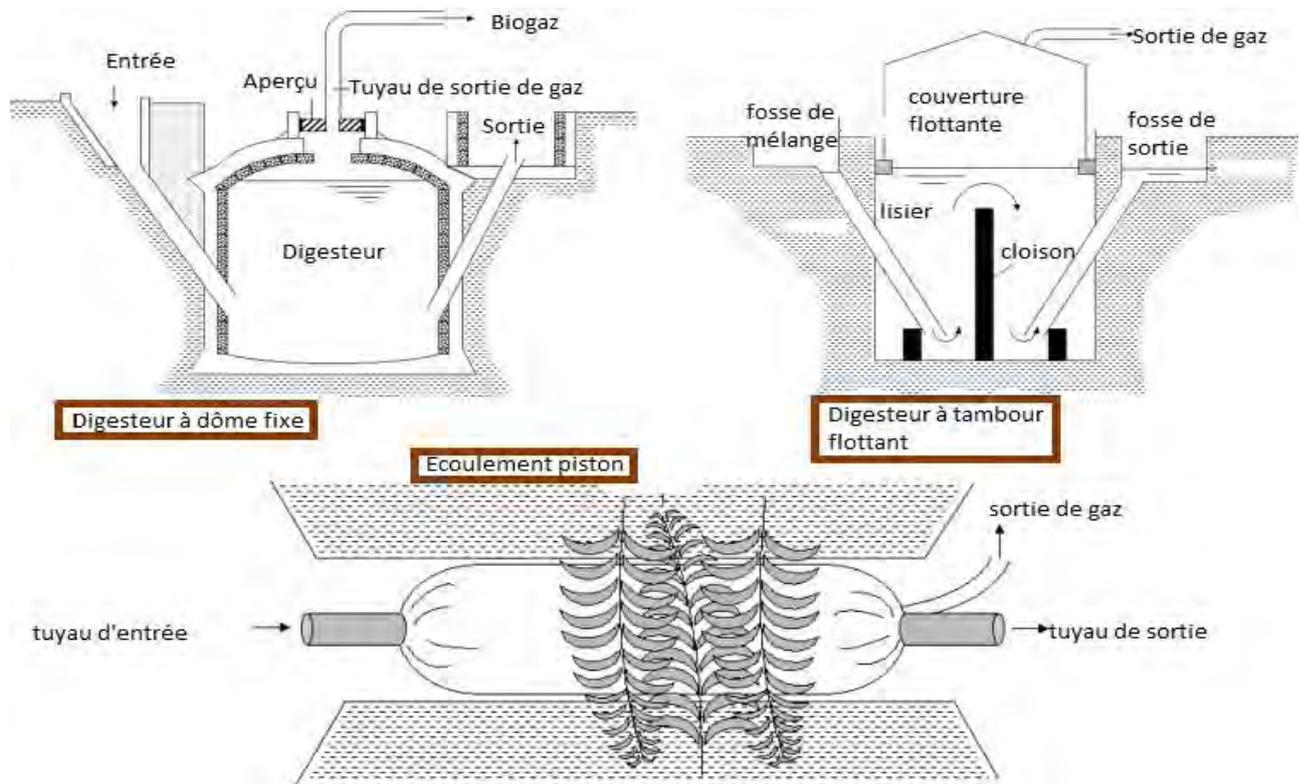


Figure I-2 : Types de digesteurs

Il faut aussi savoir que les digesteurs peuvent être préfabriqués et sont transportables vers le lieu d'implantation ou fabriqués sur place. La technologie de digestion anaérobie est reconnue mondialement comme l'une des technologies les plus économes en énergie et respectueuses de l'environnement pour la production de bioénergie.

Avec la manipulation correcte, le biogaz : pour l'approvisionnement en énergie en milieu rural est durable, abordable, et n'a aucun effet négatif sur la santé humaine et l'environnement. Cependant, la construction complexe, coûts d'investissement et d'entretien élevés, et l'exploitation difficile des digesteurs mécaniquement équipés ont encouragé à adopter des systèmes anaérobies simples et moins coûteux. Le tableau I-3 nous renseigne sur les avantages et les inconvénients des trois principaux types de digesteurs afin de savoir lequel opter. Le développement de systèmes de production de biogaz des ménages ruraux est une stratégie importante pour promouvoir l'ajustement structurel agricole car elle réduit simultanément les émissions de gaz à effet de serre, augmente les revenus ruraux, améliore l'assainissement, améliore l'écologie dans les zones rurales, optimise la structure de la consommation d'énergie en milieu rural, et améliore la qualité à la fois rurale vie et des produits agricoles.

Tableau I-3 : Comparaison des types de digesteurs

Types de digesteurs	Avantages	Inconvénients
Digesteurs à dôme fixe	<ul style="list-style-type: none"> -faible coût initial -longue durée de vie -aucun mouvement ou parties rouillées -moins de surface requise s'il est enfoui -peu de maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> -nécessite des compétences élevées pour la construction de l'étanchéité -difficile de réparer en cas de fuite -exige des matériaux de construction lourds -la quantité de gaz produite n'est pas immédiatement connue
Digesteurs à tambour flottant	<ul style="list-style-type: none"> -opération simple et facile à comprendre -volume de gaz stocké visible -pression de gaz constant -construction relativement facile 	<ul style="list-style-type: none"> -matériau cher du fait du tambour -acier supplémentaire -durée de vie courte du fait de la corrosion du tambour -haut entretien du fait de la peinture régulière du tambour
Digesteurs à écoulement piston	<ul style="list-style-type: none"> -coût bas -transport facile -construction à faible sophistication -maintenance pas compliquée 	<ul style="list-style-type: none"> -durée de vie courte -probabilité de destruction élevée -pression de gaz faible -impact majeur sur l'environnement

Les digesteurs de biogaz domestiques ont été effectivement mis en œuvre dans le monde entier. Les gouvernements et les institutions se sont engagés dans des programmes de subventions, la planification, la conception, la construction, le fonctionnement et l'entretien des installations de biogaz.

En effet voici quelques exemples d'initiatives concrètes de développement du biogaz en Afrique :

- Le Rwanda par exemple a mis au point un système d'autosuffisance énergétique qui équipe la moitié de ses prisons. La cuisine et l'éclairage se fait au biogaz issue de la fermentation anaérobie des excréments produits directement par les détenus.

- Au Burkina Faso, dans la région du Plateau central, la technologie du bio digesteur s'installe dans les habitudes de consommation des populations. Par le biais de la bouse de bovins et des déjections de porcs, elle procure de l'énergie pour la consommation domestique et de la fumure organique de qualité pour les champs.

Cette technologie est vulgarisée par le Programme National de Bio digesteur au Burkina Faso (PNB-BF) qui subventionne plusieurs installations. Ce programme, s'il est mené à bien, protégera la faune et la flore du Burkina Faso.

-Au Sénégal, "la bouse fait bouillir la marmite". Grâce à un programme-pilote mis en place par le Programme National de Biogaz au Sénégal (PNB-SN) des familles rurales bénéficient de biodigesteurs. Elles utilisent ainsi le gaz pour la cuisson des aliments et les effluents pour les cultures de maïs.

- Le centre Songhaï au Bénin (Porto-Novo) est un centre agrobiologique expérimental, dont la méthodologie est basée sur l'exploitation des ressources propres des zones cultivées. Il vise à élever le niveau de vie des populations en Afrique pour un développement social et économique durable, en utilisant les ressources locales, les méthodes traditionnelles et modernes, en les rationalisant, en pratiquant une gestion rigoureuse, en stimulant la prise de responsabilité et d'initiative par la concertation et l'écoute de tous pour la création d'entreprises agricoles viables. Ainsi plusieurs biodigesteurs y ont été construits et le gaz produit fait fonctionner plusieurs activités du centre. De plus, indépendamment de Songhaï quelques projets de mise en place d'unités de production de biogaz sont en cours d'élaboration (ex : programme des volontaires des Nations Unies en collaborations avec l'ONG Africavenir).

-Au Mali, l'AMCFE (Association Malienne pour la Conservation de la Faune et de l'Environnement) est une ONG formée par des biologistes, environnementalistes et autres professionnels du développement rural. Cette ONG est particulièrement active dans la région de Kayes où les ressources ligneuses se font rares et où la demande en énergie est largement supérieure à l'offre. Ainsi en exploitant l'abondance de déjections animales et de points d'eau, l'AMCFE expérimente un projet pilote sur le biogaz qui sera par la suite étendu à la région entière.

-Plusieurs hôpitaux du Cameroun allègent déjà leur facture de gaz en utilisant leur propre méthanisateur pour s'alimenter en gaz (ex: L'hôpital baptiste de Bango, centre de santé du Nord-ouest du Cameroun). De plus des études ont montré l'intérêt économique d'installer des méthaniseurs pour le traitement des déchets dans les villes de Douala et de Yaoundé. Mais l'État hésite encore à franchir le pas.

-Au Togo la Coopération sino-togolaise a réalisé un projet pilote de biogaz à Avétonou et à Namiélé (Nord d Togo). Cependant les résultats ne furent pas concluants. L'hôpital CHU de Tokoin à Lomé à été équipé d'un bio digesteur qui alimentait son bloc opératoire en électricité pendant une période. Cependant une mauvaise utilisation de celui-ci et le manque de main d'œuvre qualifiée dans cette nouvelle technologie a entraîné l'abandon de l'initiative auto-suffisance en énergie propre de l'hôpital.

Plus récemment, en 2012 dans le village de Kebo-Kpeta un projet communautaire (Projet Kebo-Kpeta) a été mis en place dans le dispensaire du village. Une fois de plus, ce n'est pas un échec, mais les résultats ne sont pas ceux escomptés. Différentes contraintes sont à l'origine de ces déceptions.

I-1-4-2. Les digesteurs préfabriqués

Les digesteurs préfabriqués peuvent être divisés en trois catégories :

a) Digesteurs à ballon ou tube :

Ce sont les plus populaires. Ils ont été largement appliqués avec succès en raison de leur faible coût et la mise en œuvre facile et la manipulation. Ce sont des structures tubulaires étanches en matière plastique souple qui peuvent varier en taille et en épaisseur.

Un digesteur à ballon est constitué d'un long cylindre en polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), ou de la boue rouge plastique. Ils ont été développés pour résoudre les problèmes rencontrés avec les digesteurs de briques et de métal. La figure I-3 est un exemple de digesteur de type ballon utilisé au niveau de la SOGAS (Société de Gestion des Abattoirs du Sénégal).

L'utilisation de digesteurs PVC tubulaires qui sont plus résistants devrait augmenter la durée de vie des matériaux PE mais à un coût plus élevé. D'abord après avoir testé un sac digesteur PVC au Népal à partir de Avril 1986 à Juin 1986 les études ont montré que le digesteur à ballon(DB) plastique peut être utilisé avec succès que si la pression à l'intérieur du digesteur est suffisamment élevée et si des sacs en PVC et des installations de soudage sont facilement disponibles.



Figure I-3 : Digesteur de type ballon (SOGAS)

b) Digesteurs à matériau composé (DMC)

Le DMC est originaire de la Chine et le pays en a développé de nombreux types depuis les années 1980. Un nombre croissant de gens ont commencé à utiliser les DMC dans les différentes régions.

Ce nouveau type de digesteur offre de nombreux avantages tels que la mobilité facile, la durabilité à long terme, et une productivité élevée.

Un DMC est léger et peut donc être facilement transporté et évacué. Un DMC a également une bonne résistance à la corrosion de tous les types d'acides organiques.

La productivité élevée de DMC vient de son étanchéité absolue et la capacité de résister en haute pression. La figure I-4 illustrent deux exemples de DMC dont l'un se trouve au CERER est utilisé comme prototype. Moins de temps et d'efforts sont nécessaires pour installer le système.

En fait, la plupart du temps requis est consacré à l'excavation de terre si le DMC doit être enterré.

Le digesteur PRF (plastique renforcée par des fibres) est un représentant commun de DMC. La matière première des digesteurs PRF comprend le polyester insaturé, une résine revêtue d'un gel, de mat à fils coupés, et un tissu de fibres de verre de haute qualité. La surface interne de l'autoclave PRF est peinte avec une résine revêtue d'un gel pour assurer l'étanchéité. Outre les digesteurs PRF, d'autres digesteurs en plastique modifiés sont également disponibles. La figure I-5 montre des digesteurs démontables conçus par un certain nombre de fabricants; ces digesteurs permettent un transport facile et le tableau I-4 est une comparaison entre le DB et le DMC.

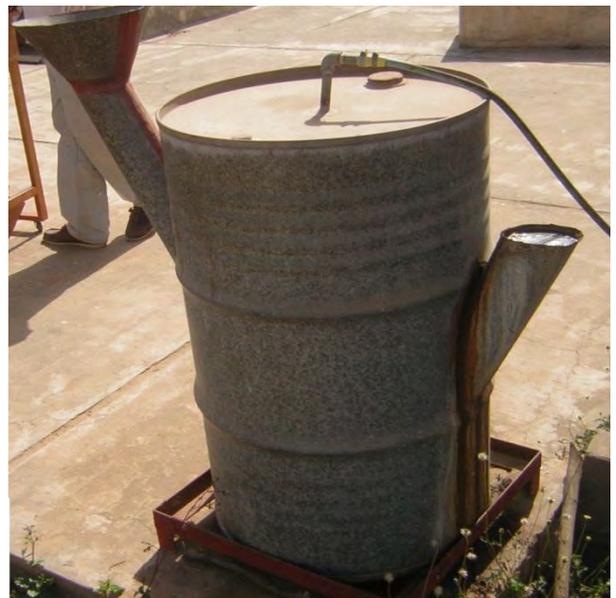


Figure I-4 : Digesteurs à matériau composé (CERER à droite)

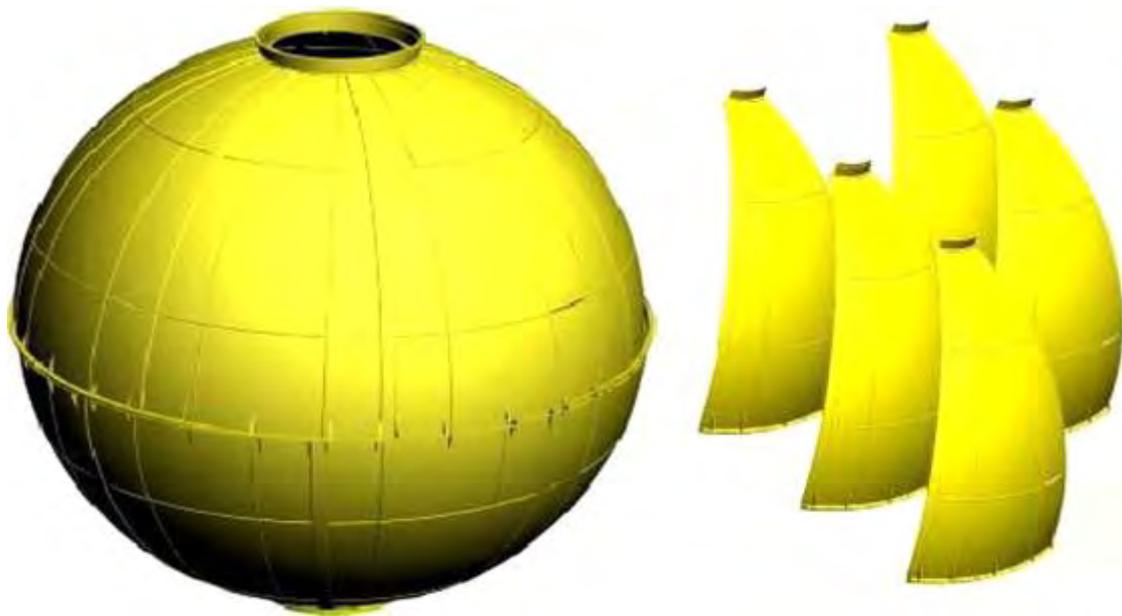


Figure I-5 : Digesteurs démontables

Tableau I-4 : Comparaison entre DB et DMC

Types de digesteurs préfabriqués	Avantages	Inconvénients
Digesteur à bâche	<ul style="list-style-type: none"> -prix bas, facile à accepter pour les fumiers -facile à transporter et à installer -les matières flottantes peuvent être facilement agitées par le mouvement du corps -convient pour les lieux avec les nappes phréatiques 	<ul style="list-style-type: none"> -la membrane est sensible aux rayons solaires, aux chutes des objets, des gens et des animaux -durée de vie courte et facilement endommageable -ne peut pas maintenir la température, fonctionne mal pendant l'hiver -les sédiments qui peuvent être accumulés en grande quantité à l'intérieur du digesteur sont difficiles à enlever
Digesteurs à matériau composé	<ul style="list-style-type: none"> -étanche au gaz, à l'eau et à une pression élevée de gaz -plus d'espace s'il est enfoui -fonctionnement et entretien simple -gains de temps d'installation Peut-être déplaçable 	<ul style="list-style-type: none"> -investissement initial élevé -tendance à couler si le terrain n'est pas assez fort -disponible seulement dans des petits volumes de digesteur donc, utilisateurs ont des choix limités

I-1-4-3. Digesteurs fabriqués sur site

Contrairement aux digesteurs préfabriqués, les digesteurs conçus sur site sont pour la plupart utilisés pour la production de biogaz à grande échelle comme pour la production de biogaz à injection réseau. Ces digesteurs ont des volumes allant jusqu'à 10 m^3 ou plus, ce qui rend la construction plus longue que ceux préfabriqués. Ils sont résistants, ont une durée de vie pouvant dépasser 20 ans et nécessitent une bonne construction du fait de la pression élevée de gaz à l'intérieur. La figure I-6 est un exemple de digesteur fabriqué sur site se trouvant au CERER d'une capacité de 8 m^3 .

Le choix du type de digesteur dépend des facteurs opérationnels inclus la nature du déchet à traiter c'est-à-dire sa teneur en matières solides. Un digesteur de la lagune couverte est utilisé pour les fumiers liquides de moins de 2 % de matières solides, un digesteur à mélange intégral est favorable pour le fumier de 2-10 % de solides, les digesteurs à écoulement piston sont adaptés pour les excréments de ruminants ayant des concentrations solides de 11-13 % [Hil.07].

Tous les digesteurs anaérobies sont des combinaisons de deux réacteurs modèles limites : le réacteur parfaitement agité et le réacteur piston.

Dans le réacteur parfaitement agité, les particules ont toutes des concentrations identiques en tous points du réacteur. Dans le réacteur piston, les particules entrant au même moment avancent à la même vitesse dans le réacteur et sortent simultanément.



Figure I-6 : Digesteur fabriqué sur site (CERER)

Les trois digesteurs que sont à bâche, matériau composé et sur site diffèrent de par leurs couts, la durée de construction, la maintenance, la durée de vie, leurs besoins en eau, les propriétés mécaniques, l'étanchéité et l'isolation. Le tableau I-5 résume les caractéristiques de chaque digesteur.

Tableau I-5 : Comparatif entre digesteur fabriqué sur site et préfabriqué.

Paramètres	Digesteur construit sur site	Digesteurs à bâche	Digesteur à matériau composée
Coût	300-800 USD	20-200 USD moins cher que sur site	100-300 USD même ou plus que sur site
Cycle de construction	Plus de 20 jours	Moins d'un jour	1 à 2 jours
Service	Plus de 10 ans avec une maintenance adéquate	Variés, dépendant du matériel, moins de 10 ans généralement	Plus de 25 ans même plus avec les types enfouis
Maintenance	Fréquent, une fois tous les deux ans	Presque aucun	Presque aucun
Transport	Matériaux de construction très lourds	Entre 10 kg et 100 kg très facile à transporter	50-200 kg, facile à transporter
Propriétés mécaniques	Bon	Facile à détériorer	Bon
Isolation	Normale, facilement influencé par la température ambiante	Normale, facilement influencé par la température ambiante	Bonne, avec un faible coefficient de conductivité thermique
Etanchéité	Mauvais, exige une fabrication qualifiée pour l'étanchéité	Dépend des propriétés du matériau	Résistant à la corrosion acide
Taux d'absorption d'eau	Elevé, corrode facilement à des hauts niveaux d'eau souterraine	Faible, approprié à des régions avec des sols ameublés et niveau d'eau souterrain élevé	Faible, approprié à des régions avec des niveaux d'eau souterrain élevé

I-1-5. Processus de la méthanisation

La méthanisation comporte une diversité de réactions biochimiques assurées par des microorganismes qui vivent en symbiose étroite les uns par rapport aux autres, ce qui rend plus difficile leur étude.).

Le processus se déroule en quatre phases distinctes comme le montre la figure I-7, chacune réalisée par une classe de micro-organismes spécialisés, qui se développe en absence d'oxygène (facultative ou stricte) :

- L'hydrolyse
- L'acidogénèse
- L'acétogénèse
- La méthanogénèse

I-1-5-1. Hydrolyse :

L'étape d'hydrolyse est une étape dans laquelle les macromolécules issues de l'étape de désagrégation sont réduites en monomères. Ce sont les bactéries fermentatives ou hydrolytiques qui transforment la matière organique complexe en composés plus simples. L'hydrolyse ou dépolymérisation détermine la durée du processus de méthanisation. L'accumulation d'acide organique peut avoir une action inhibitrice sur la production de biogaz, pouvant aller jusqu'à l'arrêt de la digestion anaérobie.

I-1-5-2. L'acidogénèse :

Lors de l'acidogénèse, les produits de l'hydrolyse sont absorbés par les bactéries fermentaires qui métabolisent les monomères pour produire des acides gras volatiles (AGV) (acétate, butyrate), des alcools, du sulfure de dihydrogène (H_2S), responsable de l'odeur, caractéristiques des méthaniseurs, du dioxyde de carbone (CO_2), et de l'hydrogène (H_2). La concentration relative de ces composés détermine soit le rôle de nutriment, soit le rôle d'inhibiteur.

Ainsi, on obtient des produits fermentés simplifiés. Cette étape est très rapide et les bactéries y participant ont un temps de duplication très court par rapport aux autres étapes et un taux de duplication plus important par rapport à celui des autres populations de bactéries.

I-1-5-3. L'acétogénèse :

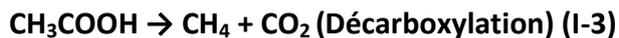
Lors de cette étape, les produits issus de l'acidogénèse sauf l'acétate sont transformés par les bactéries acétogènes en acétate, en dioxyde de carbone et en hydrogène. Le temps de déroulement de ces bactéries est beaucoup plus long que ceux de l'acidogénèse. L'activité de ces bactéries dépend des bactéries hydrogénotrophes de la méthanogénèse consommatrices d'hydrogène. En outre on trouve aussi un autre type de bactéries appelées homoacétogènes transformant le gaz carbonique et l'hydrogène en acétate qui viennent s'ajouter à ceux déjà produits.

I-1-5-4. La méthanogénèse

Dans cette étape, les produits des réactions précédents, principalement l'acétate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène, sont convertis en méthane par les bactéries dites méthanogènes. Leur temps de dédoublement est très long (entre 5 et 10 jours) qui est très supérieur à celui des bactéries acidogènes (quelques heures).

C'est une étape limitante car elle est très sensible aux variations des conditions d'environnement (pH, température, agents toxiques, variation de concentration d'effluents...). C'est en principe cette phase qui est contrôlée. C'est l'étape de la gazéification du substrat fermenté. La méthanogénèse est assurée par des micro-organismes anaérobies stricts qui appartiennent au domaine des Archées. Elle est réalisée par deux voies possibles : l'une à partir de l'hydrogène et du dioxyde de carbone par les espèces dites **hydrogénotrophes** qui produisent 30 % du méthane final, et l'autre à partir de l'acétate par les espèces **acétotrophes** constituant 70 % du méthane final.

Ces deux étapes se déroulent selon les réactions suivantes :



La toute première étape, la désagrégation est une étape physico-chimique principalement non biologique. Les bactéries réductrices de CO_2 et les sulfatoréductrices en compétition avec les méthanogènes assurent le maintien de la pression partielle en H_2 dont l'accumulation serait toxique. La seconde réaction joue un rôle essentiel dans le processus en éliminant l'hydrogène gazeux, régulant la production de l'AGV, contrôlant la vitesse du processus. Ce sont des bactéries anaérobies strictes, très sensibles aux polluants toxiques et aux traces d'oxygène. De plus cette étape est la plus lente du processus. En cas de dysfonctionnement (surcharge, variation de température ou de pH), la réponse se traduit par une accumulation des AGV dans le milieu et une inhibition de la méthanogénèse.

Les déchets de cette réaction sont des particules inertes qui ne sont donc pas biodégradables et donc non traitables par la digestion anaérobie. Il faut aussi noter que si les phases préalables peuvent se dérouler de façon aérobie la phase de méthanogénèse quant à elle ne peut s'effectuer que dans des conditions anaérobies et il faut savoir aussi que toutes les phases citées précédemment se déroulent de façon simultanée rendant ainsi plus compliquées leurs études.

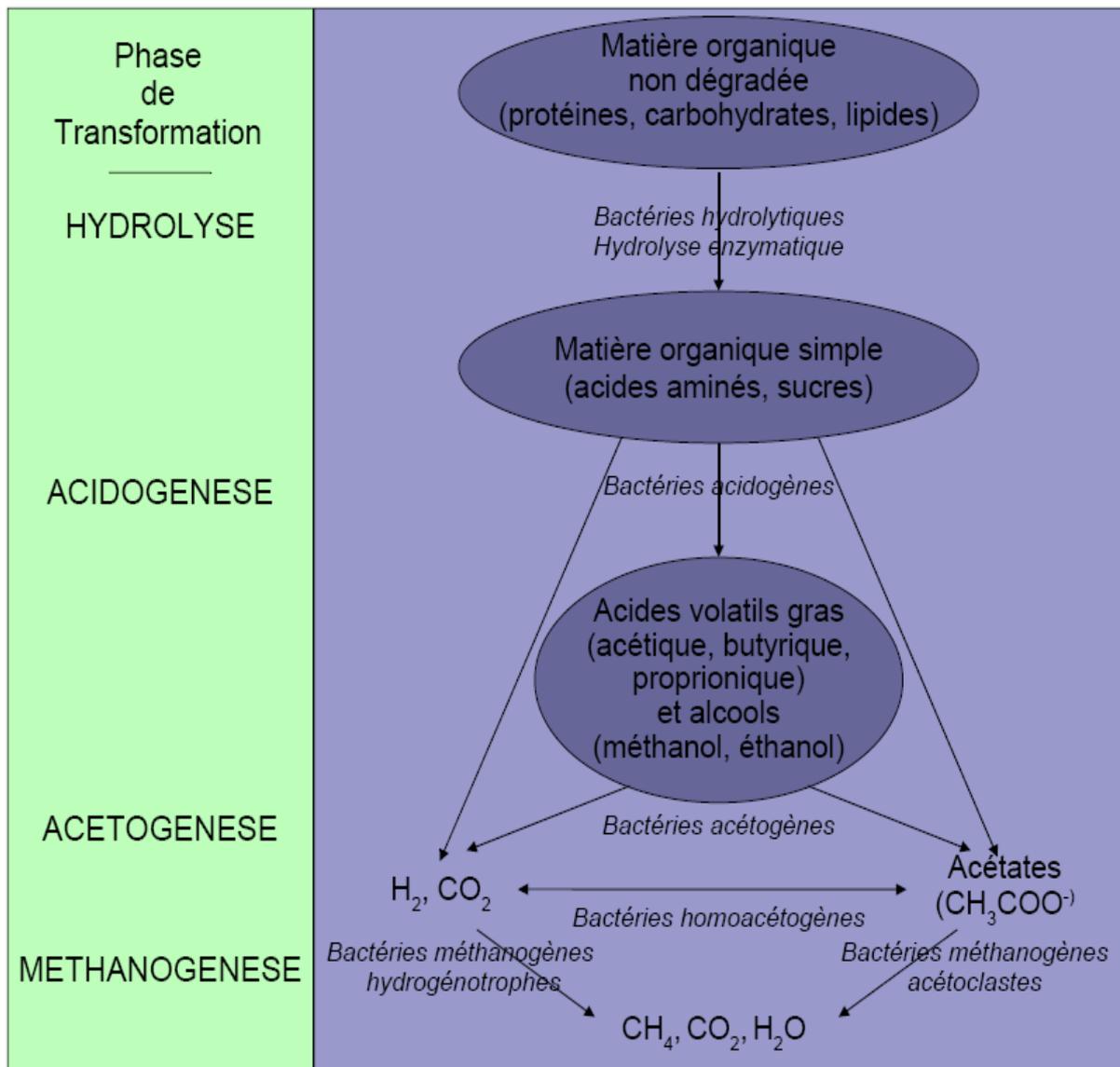


Figure I-7: Etapes de la méthanisation.

I-2. LES CULTURES ÉNERGÉTIQUES

I-2-1 INTRODUCTION

Les cultures énergétiques sont des plantes cultivées à des fins de production d'énergie. Plus connues sous le nom de la méthanisation agricole combinant parfois les déchets d'origine animale, les cultures énergétiques ont un bon potentiel méthanogène favorable à l'utilisation du biogaz. La biomasse de ces cultures peut être utilisée directement comme combustible sous forme brute (balles, copeaux) ou densifiée (granules ou bûches) pour produire de la chaleur (combustion directe) ou encore servir d'intrant dans la production d'une autre source d'énergie comme l'éthanol, le biodiésel ou le biogaz. Les différentes filières de production de bioénergie se trouvent donc potentiellement « en concurrence » pour l'utilisation des cultures énergétiques et des superficies et d'autres ressources nécessaires à leurs cultures. Les matières organiques ligneuses issues de la filière bois (branchage, copeaux, sciure...) ne peuvent pas être digérées par les bactéries.

I-2-2. TYPES DE CULTURES

On classe généralement les types de cultures énergétiques de la manière suivante

I-2-2-1. Cultures lignocellulosiques

Ces cultures sont recherchées pour leurs productions très importantes de biomasse par unité de surface nécessitant peu d'intrants et d'entretien. Il s'agit essentiellement du sorgho, chanvre et miscanthus. Elles peuvent être utilisées comme biocombustible, dans la production de biogaz ou d'éthanol.

I-2-2-2. Cultures sucrées ou amylacées

Ce sont des cultures recherchées pour leurs compositions élevées en sucres ou en amidon facilement fermentescibles pour produire de l'éthanol. Parmi ces cultures nous pouvons citer le maïs, le blé et la betterave.

I-2-2-3. Cultures oléagineuses

Ces cultures sont recherchées pour leurs compositions élevées en huiles pour la production de biodiésel et de biogaz. Ce sont des plantes comme le soja, tournesol.

Quelle que soit sa valorisation, la biomasse est une forme de stockage chimique de l'énergie solaire. Dans le cas de la biocombustion, la biomasse est valorisée directement en énergie thermique alors que dans le cas de la digestion anaérobie ou bioéthanol, le contenu énergétique de la biomasse passe sous une forme chimique intermédiaire. De larges quantités de résidus de récoltes sont produites annuellement. Ceux sont : la paille des céréales, la balle de riz, l'épi de maïs.

Les quatre cultures majeures dans le monde sont le maïs, le blé, le riz et la canne à sucre respectivement en termes de surface cultivée et de production. La quantité de biomasse sèche de ces 4 cultures est estimée à 5358 millions de tonnes dont 25 % pour le riz et 40 millions de tonnes pour la canne à sucre.

I-2-3. CHOIX DE LA CULTURE

Le choix d'une culture dépend de plusieurs paramètres dont : son potentiel méthanogène, son rendement, sa composition chimique, le stade de la récolte, la saison de récolte, la variété et son mode de stockage.

I-2-3-1. Le potentiel méthanogène

Dans un premier temps le choix d'une culture énergétique va se porter sur la valeur de son potentiel méthanogène. Plus il est élevé, plus la production énergétique sera importante. Le maïs présente le potentiel méthanogène le plus élevé. C'est la culture énergétique qui a le plus grand nombre de publications. On constate des écarts importants dans les valeurs données dans la littérature qui vont du simple au double, Le tableau I-6 nous donne le potentiel méthanogène de certaines cultures à savoir le maïs, le sorgho, blé et l'orge en précisant le minimum et le maximum de production. La figure I-7 par contre nous donne le potentiel de production en méthane de la large gamme des cultures énergétiques. Le sorgho est une espèce intéressante pour la production de méthane. La valeur médiane des données trouvées est même supérieure à celle du maïs. Son utilisation en méthanisation semble être limitée malgré les avantages (fort tonnage de matière sèche à l'hectare, faibles intrants, pas d'irrigation). Les céréales à paille se prêtent aussi à la méthanisation avec un potentiel méthanogène élevé. Le seul inconvénient réside au niveau de la lignine qui occupe une part importante. Les oléagineux comme le tournesol sont rarement cités mais présentent un potentiel intéressant. Pour les résidus de culture, le potentiel diminue à cause des fibres. La citronnelle produit 125 L/ kg MO avec une teneur de 71 % en CH₄ [Alf.14]. Les tourteaux de graine de jatropha ont une production de 170 L/ kg MO dont 65-68 % de méthane [Rah.12]. L'ensilage d'herbe produit plus de gaz que celui de maïs (361 L/ kg MO) du fait qu'il est plus facilement digérable par les bactéries mais le maïs dispose d'un meilleur rendement en méthane du fait de sa teneur élevée en MS.

Tableau I-6 : Potentiels méthanogènes des différentes cultures (Nm³ CH₄/ kg MO) [get.bin].

Type de cultures	Minimum	Maximum
Maïs frais	225	422
Ensilage de maïs	289	330
Canne de maïs	173	173
Sorgho grain	372	372
Sorgho biomasse	311	352
Sorgho fourrage	295	295
Blé	245	384
Paille de blé	245	245
Orge	356	356

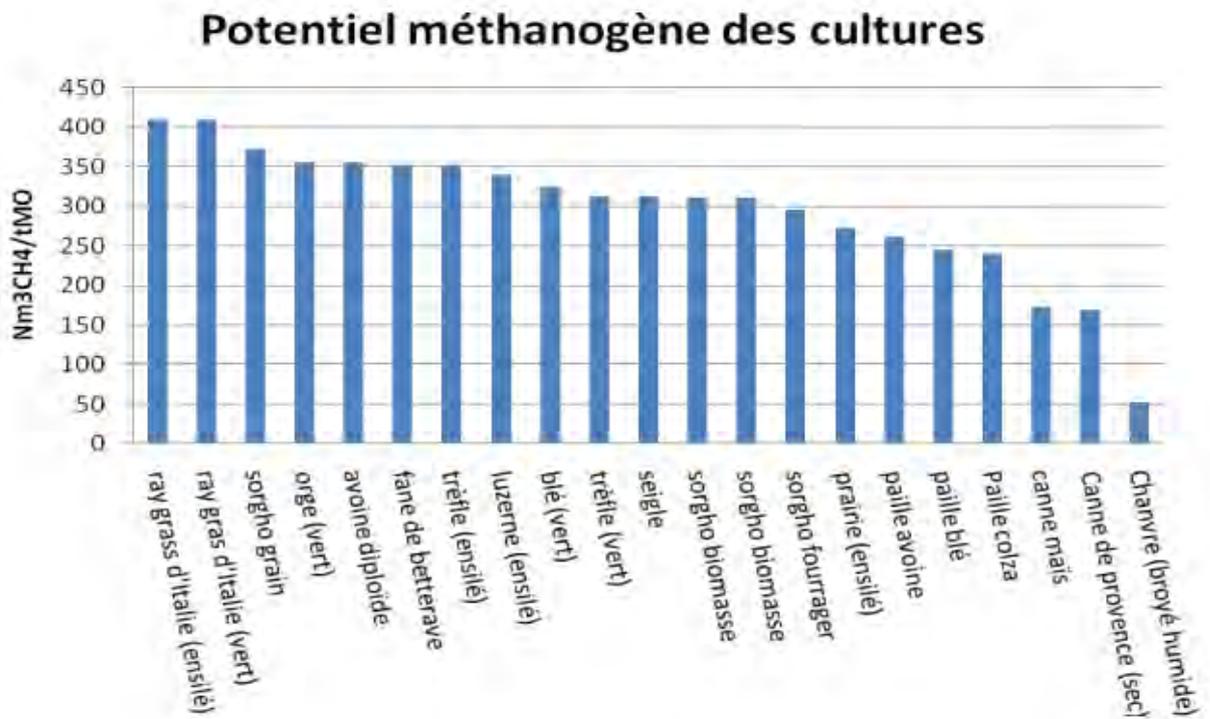


Figure I-7 : Potentiel méthanogène des différentes cultures [get.bin].

I-2-3-2. La composition chimique

L'âge de la plante est un facteur important. En effet plus une plante ne vieillit, plus ses tissus élaborent des éléments biochimiques complexes et difficilement biodégradables comme le cas de la lignine. De même plus une plante est riche en lignine plus elle sera difficilement biodégradable. Le choix d'une espèce pour la production de biogaz devra tenir compte de la teneur en lignine. La connaissance de la composition chimique permet de prévoir le potentiel de la production en méthane. La figure I-8 présente la variation de la composition chimique notamment la MO au cours de la méthanisation.

Le taux de fraction biodégradable est régi par la formule :

$$\text{Fraction biodégradable} = -0,028 \times \text{teneur en lignine} + 0,83 \quad (\text{II-1})$$

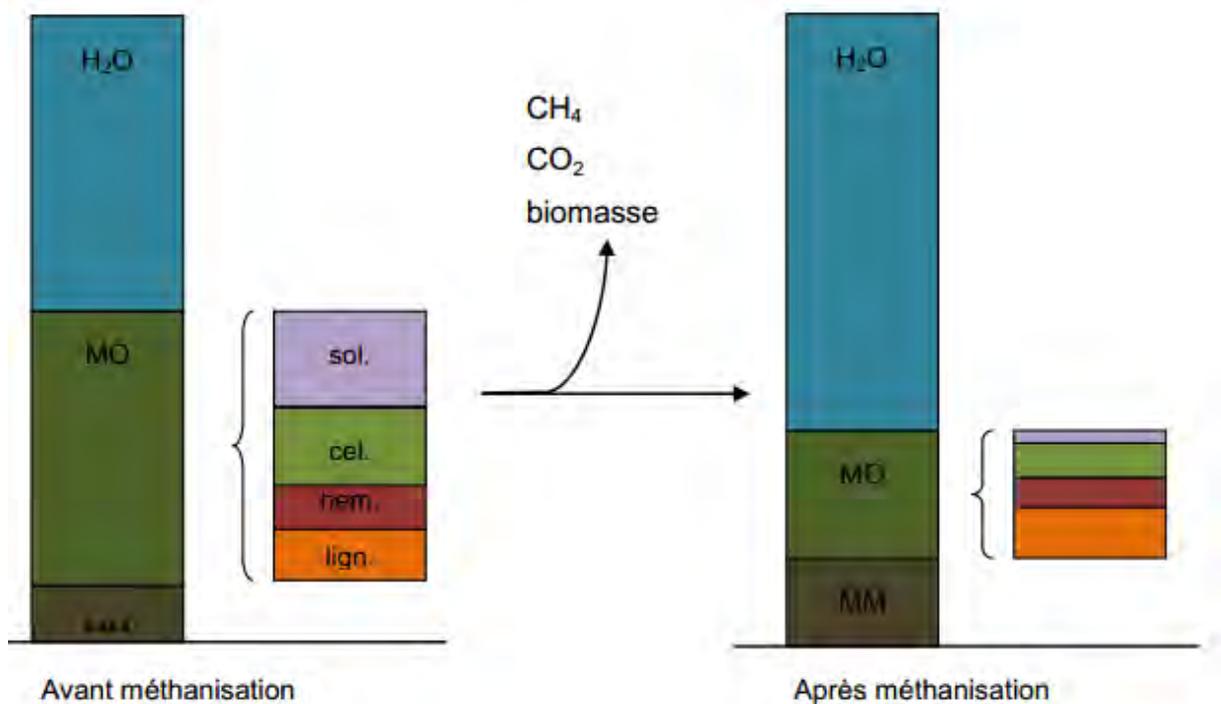
D'autres s'appuient sur les coefficients de digestibilité des végétaux destinés à l'alimentation animale puisqu'on suppose que le mécanisme de la digestion de la MO dans les aliments chez les animaux (ruminants) est proche de celui qui permet dans un digesteur d'où :

$$B_o = MO \times MO_d \times 500 \quad (\text{II-2})$$

B_o = production de méthane.

MO_d = coefficient de digestibilité (voir table d'alimentation des ruminants).

Il existe des modèles plus perfectionnés notamment en Autriche avec le MEVM (methanenergy value model).



MM= matière minérale, sol= MO soluble, cel= cellulose, hem= hémicellulose, lign= lignine.

Figure I-8 : Variation de composition chimique au cours de la méthanisation.

Lors de la méthanisation, c'est la MO qui disparaît et précisément la matière organique soluble et la cellulose comme le montre la figure I-8 tandis que l'hémicellulose varie peu et que la lignine reste intacte. Le tableau I-7 montre le pourcentage des principaux constituants chimiques de plusieurs plantes lignocellulosiques. Il est conseillé de tenir en compte la teneur en cellulose et en lignine dans le choix du type de culture énergétique. On constate que le maïs fibre ainsi que le sorgho possèdent une faible teneur en lignine expliquant d'une part leurs capacités de production en méthane.

Tableau I-7 : Pourcentage des principaux constituants chimiques de diverses biomasses lignocellulosiques [God.10]

Cultures	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Nombre d'étude
Canne à sucre	40,1	26,3	17,9	10
Fibre de maïs	38	27,4	7,3	6
Paille de maïs	37,3	25,4	15,8	1
Paille d'orge	40,4	25,6	12,7	17
Paille de riz	35,3	26,7	9,8	32
Fibre de sorgho	42,3	26,2	8	7
Sorgho fourrager	28,3	22,8	8,7	18

I-2-3-3. Le rendement

L'ensilage de maïs est la matière première la plus utilisée dans de nombreuses installations. Pourquoi un tel engouement ? Parce que le maïs dispose d'un très bon rendement énergétique.

En effet, un hectare de maïs ensilé produit l'équivalent de 20.000 à 25.000 kWh contre 10.000 à 15.000 kWh pour l'ensilage d'herbe et 12.000 à 15.000 kWh pour les céréales. A côté du maïs, d'autres cultures comme le sorgho, l'orge, le miscanthus et le chanvre se distinguent aussi de par leurs rendements énergétiques dont la teneur en matière sèche par hectare. Ces plantes font l'objet d'étude et constituent une alternative bien que certaines comme l'orge et le sorgho donnent des rendements supérieurs à celui du maïs comme le montre le tableau I-8.

Tableau I-8 : Rendement énergétique en MS t/ha des différentes cultures.

Cultures	Rendement (MS t/ha)	CH ₄ (Nm ³ /ha)	CH ₄ (Nm ³ /ha)
Maïs	7,7	2140	282
Sorgho	10,8	3361	313
Orge	10,3	3172	308

I-2-3-4. Le stade de la récolte

Le stade de la récolte va influencer le niveau de biodégradabilité et le niveau de production de biogaz.

Pour les céréales à pailles le potentiel de production de méthane a tendance à diminuer fortement avec l'avancement du stade de maturité du végétal. Le tableau I-9 nous montre l'influence du stade de maturité de la plante sur le potentiel méthanogène. Le blé perd 10 % de son potentiel de production entre la floraison et le stade pâteux alors que le maïs accuse une baisse de 15 % de son potentiel.

Pour une espèce donnée, le stade de la végétation est l'un des principaux facteurs affectant la composition et la structure. Si la plupart des éléments indésirables comme l'azote, le soufre, le potassium, le chlore diminuent significativement avec l'âge de la végétation, la teneur en lignine quant à elle augmente [Pro.09b]. La figure I-9 présente pour trois variétés de maïs, l'importance du stade de la récolte sur le teneur en méthane.

Tableau I-9 : Influence du stade de maturité sur le potentiel méthanogène.

Culture	Stade végétal	Potentiel méthanogène (Nm ³ CH ₄ / kg MO)
Blé	Floraison	420
	Laiteux	390
	Pâteux	380
Orge	Floraison	440
	Laiteux	500
	Pâteux	350
Maïs	Floraison	334
	Laiteux	283
	Vitreux	280

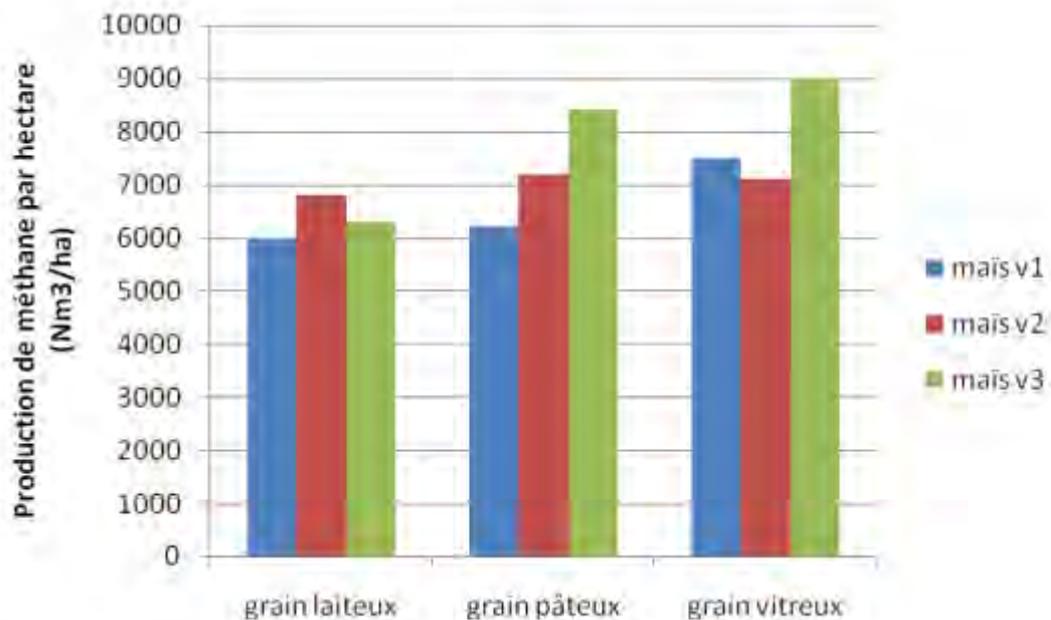


Figure I-9 : Influence du stade de la récolte sur le potentiel méthanogène.

I-2-3-5. La variété

Le choix de la culture dépend aussi de la variété. Certains semenciers proposent des variétés spécifiques biogaz essentiellement en maïs (maïs biomasse ou maïs énergie) mais aussi en sorgho grain sucrier ou sorgho biomasse. Plusieurs publications montrent que pour le maïs, il existe une relation directe entre la production de méthane et la variété [Amo.07].

La figure I-10 présente les rendements en biomasse et la production en méthane ramenée à l'hectare pour différentes variétés de maïs. On note un écart assez important (390 à 422 Nm³ CH₄/ kg MO).

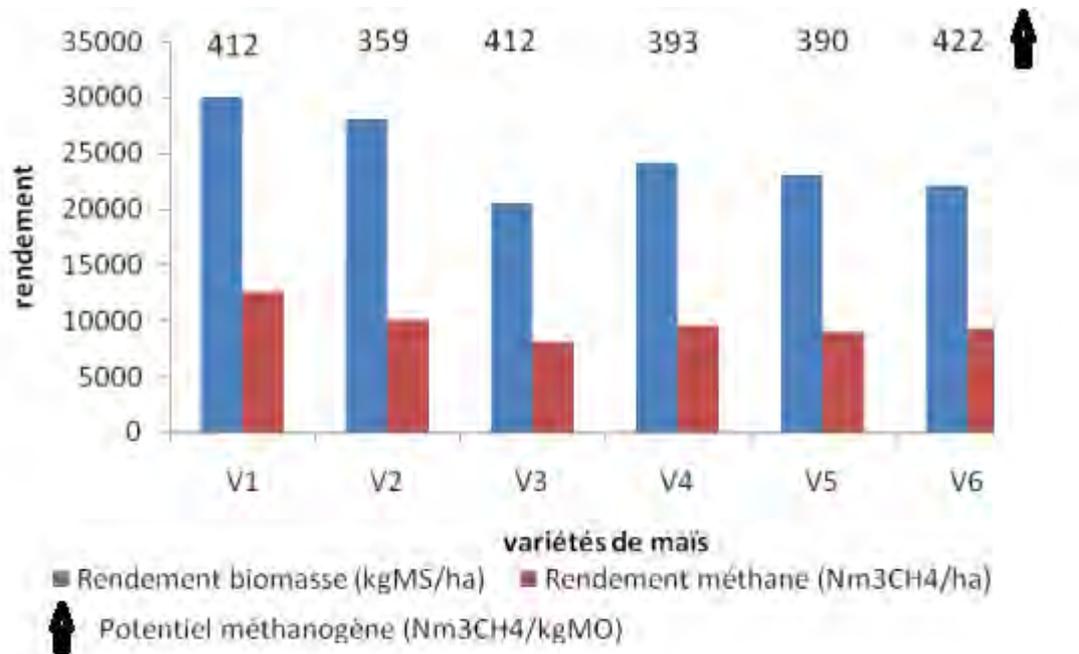


Figure I-10 : Influence de la variété sur le potentiel méthanogène.

I-2-3-6. La saison de récolte

La récolte est un autre élément important du potentiel énergétique d'une culture, les techniques de récolte (ensilage ou et/fanage) sont connues et aisées avec des machines agricoles conventionnelles ; ce qui n'est pas le cas pour certaines cultures dédiées. L'efficacité et le pourcentage de pertes peuvent s'en ressentir [Pro.09b].

La saison de récolte est toute aussi importante que le stade de la végétation. Si une récolte hivernale modifie les caractéristiques de la culture telles que l'humidité ou la concentration des éléments indésirables par des phénomènes de lessivage ou de translocation, elle peut s'accompagner de pertes de matières sèches importantes de l'ordre de 70 % pour des prairies et 30 % pour le miscanthus [Pro.09a].

I-2-3-7. Stockage et prétraitement

La plupart du temps le mode de stockage envisagé est la voie humide par ensilage, cela demande un broyage et tassage du végétal pour permettre les conditions d'anaérobiose afin que les fermentations puissent se réaliser.

Durant l'ensilage, les formes solubles carbonées sont transformées en acides (lactique et acétique) majoritairement. Le milieu n'étant pas tamponné, il y'a rapidement une baisse du pH (inférieur à 4) ce qui arrête l'évolution fermentaire et permet la conservation du produit. Cette méthode existe depuis des décennies pour conserver les fourrages en agriculture.

La figure I-11 montre l'influence de l'ensilage sur la production de méthane pour différentes cultures. La plupart des auteurs s'accordent pour dire que l'ensilage ne provoque pas de pertes importantes pouvant impacter sur le potentiel méthanogène de la culture [Leh.06]. On constate que les produits ensilés ont un potentiel plus élevé (300 Nm³ CH₄ / Kg MO produit par le maïs frais contre 500 pour le maïs ensilé). Cela est dû à une accessibilité accrue de la MO liée aux actions d'hydrolyses qui se sont déroulées au cours de l'ensilage. Il est considéré comme un prétraitement de la biomasse dans la mesure où il consiste à une fermentation partielle de la MO.

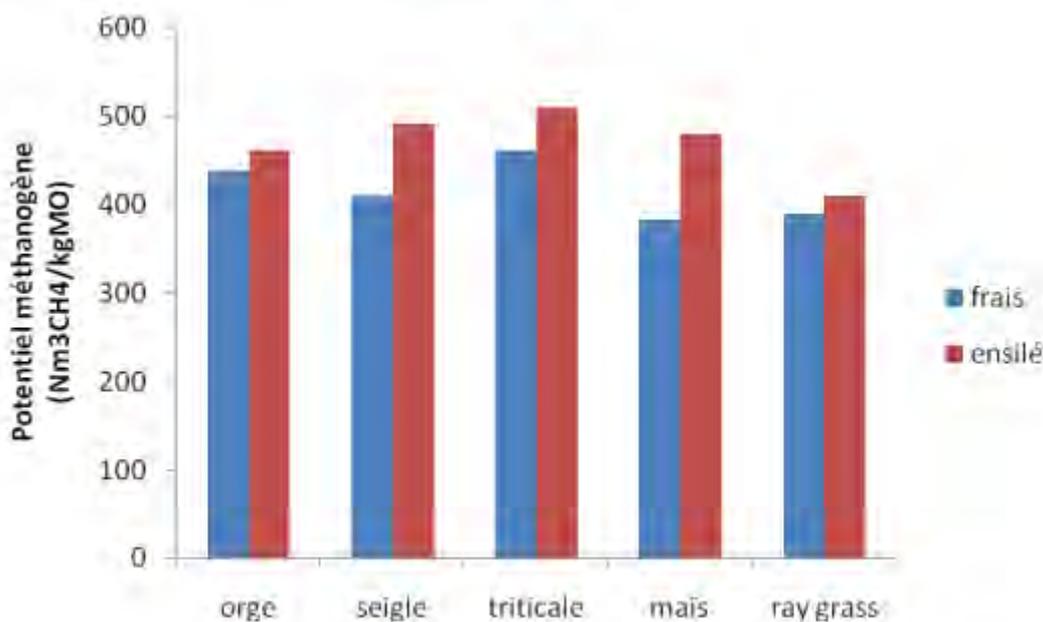


Figure I-11 : Influence de l'ensilage sur la production de méthane [Leh.06].

Le prétraitement de la biomasse végétale a pour objectif d'améliorer l'accessibilité des bactéries à la matière organique. Le broyage constitue le prétraitement physique le plus important. Il est pratiqué généralement au moment de la récolte pour permettre l'augmentation de la surface de végétal accessible aux bactéries. La figure I-12 présente l'effet du mode de prétraitement sur le potentiel méthanogène. On constate que les prétraitements alcalins et enzymatiques sont les plus rentables.

Cela joue sur l'augmentation du potentiel méthanogène et l'amélioration de la vitesse de dégradation. Un broyage de l'ordre de 10 à 20 mm correspond à un optimum en termes de production de méthane. L'ensilage permet un début de fermentation des composés carbonés, l'accessibilité des bactéries à la MO et la vitesse de biodégradation et de production de biogaz.

La voie sèche présente 2 inconvénients pour la méthanisation :

-La perte généralement en carbone

-L'obtention d'un produit sec qu'il faudra humidifier ou mélanger avec d'autres produits très humides pour permettre la biodégradation anaérobie. Il existe d'autres types de prétraitement comme par vapeur, enzymatique ou alcalin.

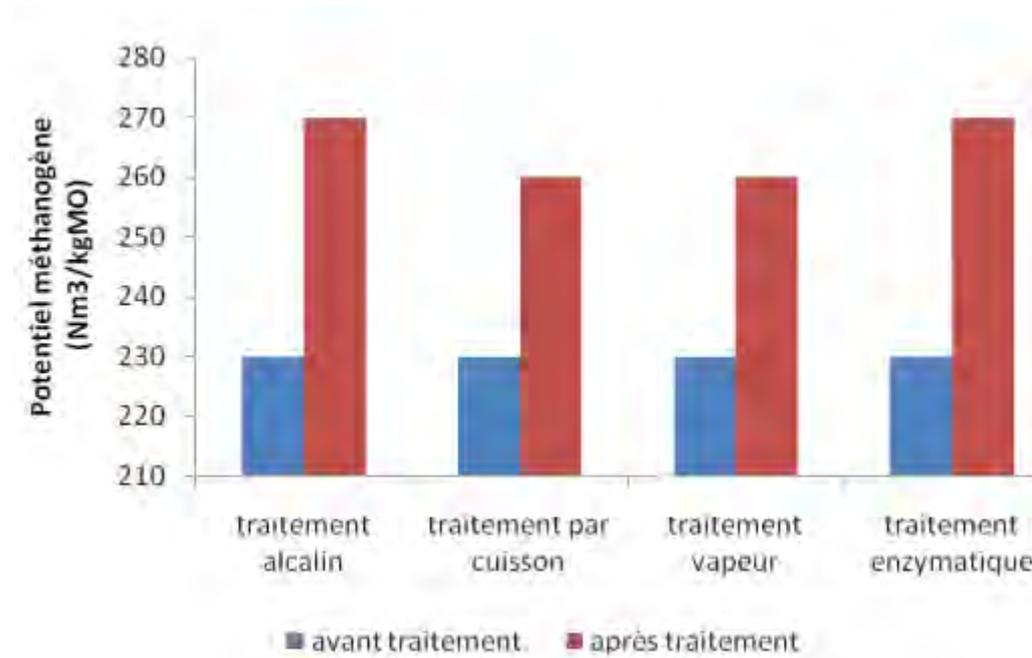


Figure I-12 : Effet de différents prétraitements sur le potentiel méthanogène [Leh.04].

Hormis ces paramètres cités ci-dessus on peut ajouter aux critères de sélection l'exigence en eau, en produits phytosanitaires, en engrais et sa capacité d'adaptation au milieu. Ces paramètres supplémentaires sont résumés dans le tableau I-10.

Tableau I-10 : Caractéristiques agronomiques des différentes cultures.

	Adaptation au milieu	Exigence en engrais	Exigence en produits phytosanitaires	Exigence en eau	Production de MS à l'hectare	Notes
Maïs	+	+++	++	+++	+++	
Sorgho grain	++	+	++	+	+++	Exigeant en chaleur mais plus résistant que le maïs
Blé, Orge	+++	++	+++	+	++	Image de la plante nourricière
Tournesol	++	+	+	+	++	Rustique, résistant à la sécheresse
Pomme de terre	++	++	+++	++	+ (fane) ++ (fane et tubercule)	Diversification des rotations
Miscanthus	++	0 à la 1 ^{ère} année puis ++	+ au début puis 0	++	+++ après 3 ans	Très peu développée

I-2-4. PLACE DES CULTURES ÉNERGÉTIQUES

Les cultures énergétiques commencent à occuper une place importante dans la production de biogaz. L'Allemagne a alloué 16 % de ses terres cultivées aux cultures énergétiques dont 40 % des cultures à la production de biogaz. Parmi les cultures énergétiques le maïs, le sorgho et le blé occupent une part importante. Néanmoins d'autres cultures font l'objet de recherche [Amo.07].

Pour valoriser la biomasse par fermentation anaérobie, certaines espèces s'avèrent plus performantes que d'autres. L'ensilage de maïs est la matière première la plus utilisée dans de nombreuses installations. En témoignent ces données allemandes : en 2007, 240.000 ha de maïs ont été absorbés par la filière biogaz. 78 % des cultures est de l'ensilage de maïs, 11 % d'ensilage d'herbe et 4 % de grain de céréales [DBFZ].

En parallèle, d'autres cultures annuelles s'avèrent intéressantes pour la méthanisation. C'est le cas de la betterave fourragère, la culture annuelle la plus productive concernant la quantité de biogaz produite par hectare après le maïs. De son côté, le sorgho grain sucrier peut atteindre jusqu'à 20 tonnes de matière sèche/ha, une production massive de biomasse. Certaines variétés de sorgho sucrier sont actuellement développées pour produire de l'ensilage à la ferme. Leur tige est riche en sucre et contient peu de lignine, ce qui le rend sensible à la verse mais facilite sa digestibilité.

C'est une plante peu gourmande en eau et en intrants, particulièrement recherchée par les pays d'Europe du nord qui l'utilisent pour approvisionner les usines de méthanisation. Leur lignification est différente, ce qui améliore leur digestibilité et permet d'obtenir des valeurs énergétiques comparables à celle du maïs ensilage.

A l'heure actuelle, certains semenciers mènent également des essais sur le tournesol, le triticale et le seigle, afin d'améliorer leur potentiel de biomasse et d'accroître leur développement végétatif. La figure I-13 donne les différentes ressources de la biomasse ainsi que leurs valorisations en électricité, chaleur ou carburant.

Au Sénégal les principales cultures sont le mil, le maïs, le riz et le sorgho. Le potentiel est estimé à 730.000.000 m³ de biogaz soit 214500 ktep. Les résidus sont estimés à 1.000.000 T pour le mil (tige + feuille) ; 600.000 T de paille de riz ; 590.000 T de maïs et 300.000 T de sorgho, ce qui a un potentiel de 17.10⁹ MJ [ONAS.13]. Malgré ce fort potentiel, la bouse de vache reste le principal substrat utilisé, les cultures et leurs résidus étant destinés à la nourriture et à l'alimentation des bétails.

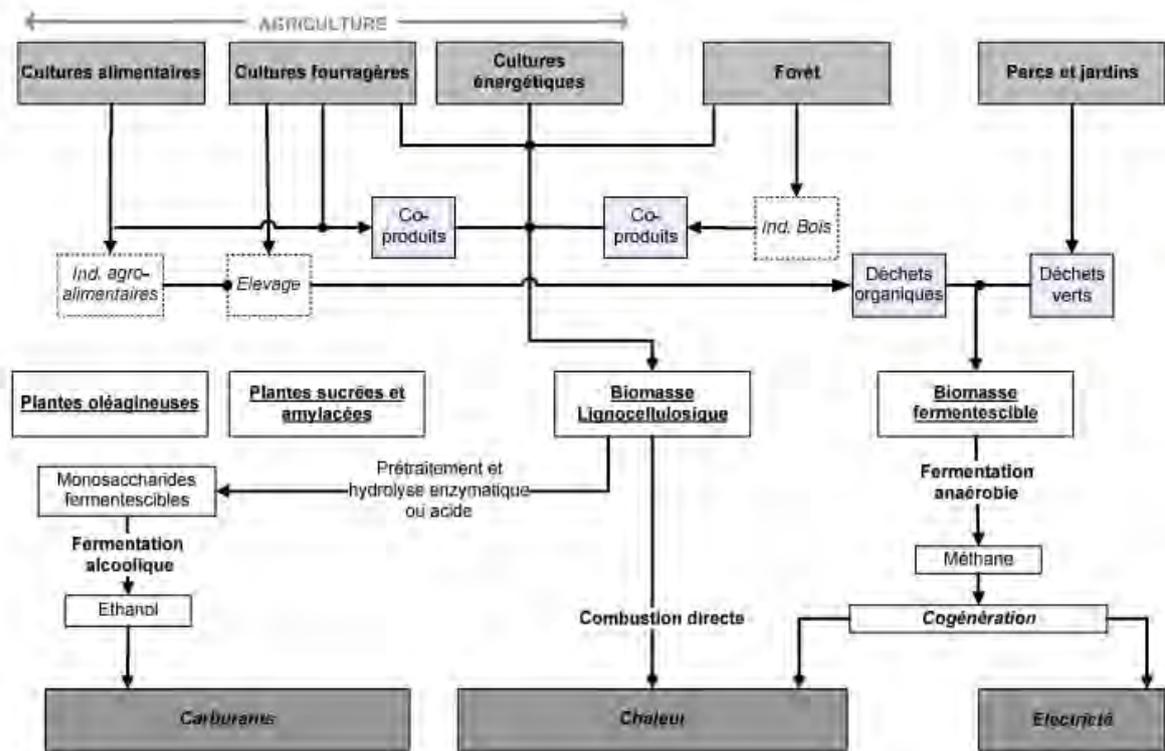


Figure I-13 : Différentes ressources et valorisations de la biomasse.

I-2-5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons revu la large gamme de biomasse ainsi que sa place et ses nombreux domaines d'application. Nous nous sommes ensuite intéressés à une branche de la biomasse qui est le biogaz dont le principal composant est le méthane qui lui confère son pouvoir calorifique et qui peut être obtenu par le biais de plusieurs substrats selon leur disponibilité, les activités et la position géographique (déjections animales, cultures, déchets municipaux...). Cette étude a aussi montré la diversité des digesteurs et le choix porté sur chacun d'eux selon le type de substrats et sa teneur en matière sèche.

Les étapes de la méthanisation qui résument la technique de production de biogaz grâce à différentes bactéries fermentatives montrent la sensibilité de cette technique.

L'utilisation des cultures énergétiques pour la production de biogaz est en nette progression et constitue une alternative dans certains pays où les autres substrats (déjections animales, déchets municipaux, boues....) se font rares.

Le maïs est la culture la plus utilisée car regroupant en général les caractéristiques suivantes : un fort développement végétatif (maximiser le rendement de matière sèche par ha), un taux de matière sèche de 30 % à la récolte, une bonne résistance à la verse, un stay-green très marqué (limite la part des tissus lignifiés « non méthanisables ») et un excellent état sanitaire (pour éviter d'incorporer massivement des plantes colonisées par des champignons pouvant perturber la flore bactérienne des digesteurs). A côté du maïs le sorgho figure en bonne position et peut être une alternative. Cette méthode est surtout utilisée dans les pays développés, en ce qui concerne les pays en développement l'utilisation des cultures énergétiques fait face à l'autosuffisance alimentaire et à l'alimentation du bétail à travers les résidus.

Chapitre II

Effet du changement climatique sur les cultures énergétiques et la production de biogaz

II-1.	Introduction.....	42
II-2.	Méthode.....	42
II-3.	Effet du CO ₂ sur la plante.....	42
II-3-1.	Effet du CO ₂ sur le rendement.....	42
II-3-2.	Effet du CO ₂ sur la qualité de la plante.....	44
II-3-2-1.	Effet du CO ₂ sur les protides.....	44
II-3-2-2.	Effet du CO ₂ sur les lipides et les glucides.....	45
II-3-2-3.	Effet du CO ₂ sur les macros et micro éléments.....	45
II-4.	Effet de l'élévation de température sur la plante.....	47
II-4-1.	Effet de l'élévation de température sur le rendement.....	47
II-4-2.	Effet de l'élévation de température sur la qualité de la plante.....	49
II-5.	Effet de la précipitation sur la plante.....	50
II-5-1.	Effet de la précipitation sur le rendement.....	50
II-5-2.	Effet de la précipitation sur la qualité de la plante.....	51
II-6.	Effets combinés.....	52
II-6-1.	Effets combinés de l'élévation de température et de CO ₂	52
II-6-2.	Effets combinés de la précipitation avec le CO ₂ et la température.....	53
II-7.	Rôle des différents éléments dans la production de biogaz.....	53
II-7-1.	Rôle des protides.....	53
II-7-2.	Rôle des glucides.....	53
II-7-3.	Rôle des lipides.....	54
II-7-4.	Rôle des nutriments.....	54
II-8.	Effet du changement climatique sur la production de biogaz.....	55
II-9.	Conclusion.....	57

II-1 : INTRODUCTION

L'utilisation des cultures énergétiques pour la production de biogaz occupe de plus en plus une place importante parmi les substrats méthanisables et fait l'objet de plusieurs recherches surtout dans les pays développés. Cependant la plante en tant que telle est exposée au milieu extérieur et, sous l'influence de paramètres, elle peut subir des transformations aussi bien au niveau du rendement qu'au niveau de sa qualité. Ces paramètres extérieurs que sont principalement la température, la concentration atmosphérique en CO₂ et les précipitations influent beaucoup sur la phase de développement de la plante ainsi que sur sa composition finale à savoir sa teneur en protide, lipides, glucides, sels minéraux. Ces paramètres énumérés précédemment constituent les éléments du changement climatique qui est défini comme étant le changement abiotique atmosphérique de la terre incluant les changements de température, de vent, de précipitation, spécialement l'augmentation de la température de l'atmosphère terrestre causée par des gaz particuliers tels que le CO₂, CH₄ et le N₂O (monoxyde d'azote) qui continuent d'accroître.

II-2 : MÉTHODE.

De nombreuses études sur l'effet du changement sur le rendement et la qualité de la plante ont été faites avec des méthodes diverses. Ce sont des expériences difficiles à réaliser car les paramètres comme la concentration en CO₂, et surtout la précipitation, sont difficilement contrôlables. Néanmoins on trouve un nombre important de publications avec des résultats pouvant aller du simple au double.

C'est ainsi qu'on a opté comme méthode la méta-analyse qui est une collecte de données à partir des études ainsi réalisées dans un domaine afin d'avoir un large aperçu sur la variation d'un paramètre considéré et de pouvoir tirer une conclusion générale. C'est ainsi qu'on commencera par une collecte de données sur l'effet de l'augmentation du CO₂ sur le rendement et la qualité de la plante par différentes méthodes, ensuite on fera de même pour la température et la précipitation. Des études sur la combinaison de ces paramètres seront aussi consultées avant de tirer une conclusion générale de leurs effets sur la plante. Ceci nous permettra d'avoir une idée sur le futur de l'utilisation des cultures énergétiques pour la production de biogaz.

II-3 : EFFET DU CO₂ SUR LA PLANTE

II-3-1. Effet du CO₂ sur le rendement.

La concentration atmosphérique du CO₂ continue de s'accroître et est estimée à 2 ppm/an en moyenne durant la période 2002-2011.

Cette augmentation pouvant atteindre 400 à 500 ppm en 2050 selon les projections de l'IPCC là où la normale c'est-à-dire la concentration ambiante tourne autour de 350 ppm.

Le CO₂ est le gaz à effet de serre anthropique le plus important, son émission annuelle a atteint 80 % entre 1970 et en 2004 elle est estimée entre 21 et 38 Gt et représente 77 % des gaz à effet de serre **[IPCC.14]**.

Différentes approches ont été employées pour évaluer l'impact du changement climatique sur le rendement et la qualité de la plante.

Les méthodes les plus utilisées sont : le FACE (free air CO₂ field enrichment), OTC (open top field chamber), CTC (control top field chamber), GC (green chamber), CEA (control environmental approach). La plupart des études examinant le futur impact de l'élévation du CO₂ sur la plante utilisent des simulations (crop models ou climate change scenarios) **[Wil.14]**.

Le tableau **II-1** montre les résultats d'une méta-analyse des réponses de différentes plantes soumises à une élévation de CO₂. Considérée comme un "fertilisant", l'élévation de CO₂ entraîne une augmentation potentielle du rendement de la plante. Les plantes de types C₄ (maïs, sorgho, mil, canne à sucre) ne bénéficient pas trop de l'élévation du CO₂, néanmoins un effet positif est noté sur le rendement de la plante et cet effet varie en fonction de la méthode utilisée.

En utilisant la méthode de simulation et en doublant la concentration atmosphérique le rendement des plantes de type C₃ (riz, blé, orge) augmente de 34 % contre 14 % pour les plantes de type C₄ **[Dha.97]**.

Pour une augmentation de 200 et 300 ppm de la concentration atmosphérique et en utilisant une méthode autre que FACE le surplus de la biomasse est comprise entre 20 et 30 %. Une méta-analyse portant sur 79 espèces a montré une augmentation de la biomasse comprise entre 28 et 35 %, de même qu'un accroissement négligeable pour les plantes C₄ (8 %) contre (26 %) pour les plantes C₃ **[Jab.02]**. On note une variation significative entre les différentes cultures ; (42 % du nombre de graine) pour le riz, (15 %) pour le blé et 5 % pour le maïs.

Sous condition contrôlée, la biomasse du blé et la productivité peuvent atteindre un surplus de 7 à 11 % par 100 ppm de CO₂ au-dessus de l'ambiante et pouvant atteindre un maximum de 30 % à 750 ppm. Au contraire, sous FACE le grain de blé est seulement amélioré de 10 à 16 % pour une concentration de 550 ppm **[Hogy.08]**.

Sous différentes méthodes (FACE, mini FACE et simulation), à des concentrations respectives de 550, 537 et 700 ppm le rendement obtenu pour le blé a augmenté de 12 %, 10,5 % et 28,5 % respectivement. Fort de ces résultats, les chercheurs ont soutenu que l'élévation de CO₂ joue le rôle de fertilisant pour les plantes **[Hogy.10]**.

Le riz exhibe une réponse similaire à celle du blé, sous OTC à 550 ppm, le rendement du blé et du riz tourne autour de 30 %. Pour une même concentration et en utilisant FACE le rendement de ces deux plantes est compris entre 13 et 17 %. On obtient un rendement de 13 % sous FACE pour une concentration variant de 560 à 584 ppm contre 56 % pour la biomasse en utilisant la méthode de simulation à 700 ppm **[Kri.07]**, **[Ter.05]**.

Dans un phytotron, en doublant la concentration c'est-à-dire à 700 ppm, le rendement du maïs augmente de 14 % alors que sous OTC à 550 ppm la graine de maïs augmente de 53,7 % et l'indice de récolte de 2,9 % [Dha.97], [Abe.16].

La biomasse du sorgho connaît aussi une réponse positive, exposée à 795 ppm elle augmente de 49 % dont 59 % pour le grain, 28 % pour la feuille et 60 % pour la tige. Par contre en augmentant la concentration de 550 ppm seul un surplus de 8 % est noté par la méthode de simulation [Sri.10].

Tableau II-1 : Effet de l'élévation de CO₂ sur les plantes.

Plantes	Méthodes	Concentration (ppm)	Rendement en %
Blé	FACE	550	12
	Mini FACE	537	10,5
	Simulation	700	28,5
	OTC	550	30
Riz	FACE	550	13 à 17
	Simulation	700	30 et 56
	OTC	550	22,5
	GC	700	27
	FACE	560-584	13
Maïs	OTC	700	14
	Simulation	550	53,7
Sorgho	Simulation	700	30
	OTC	550	8

II-3-2. Effet du CO₂ sur la qualité de la plante.

La qualité d'une plante représente les éléments constitutifs lui donnant sa valeur, ce sont principalement les protides, les lipides, les glucides, les micros et macroéléments.

II-3-2-1. Effet du CO₂ sur les protides

La diminution de la concentration en protéines est l'effet le plus négatif noté lorsque la plante est exposée à l'élévation de CO₂. Le tableau II-2 nous montre la réponse de différentes céréales sous différentes méthodes et à différentes concentrations.

Les résultats obtenus par OTC, FACE et chambre d'études ont montré que l'élévation de CO₂ fait décroître significativement la concentration en protéines pour toutes les céréales excepté le sorgho dans certaines conditions. En combinant FACE et chambre d'expérience, on note une diminution de -7,2 % pour le blé, -8 % pour le riz, -4,6 % pour le maïs et -5,6 % pour le sorgho. En considérant uniquement la méthode FACE, les pourcentages en nutriment sont diminués de -6,3 %, -7,8 %, -4,6 % et 0 % pour le blé, riz maïs et sorgho respectivement, résultats obtenus par méta-analyse portée sur 143 espèces [Mye.14].

Pour une concentration de 550ppm et sous différentes conditions (CTC, OTC et FACE), la concentration en protéine du blé diminue respectivement de -4,2 %, -3,9 % et -2,3 %.

Le blé et le riz, exposés à différentes concentrations (315-400) à (540-950) donnent une réponse négative comprise entre -10 % et -15 % [Hog.10].

Pour 14 variétés de riz étudiées, la concentration en protéines diminue en moyenne de -10 % lorsque la concentration varie de 540 à 950 ppm [Tau.08].

Pour des concentrations de l'ordre de 700 ppm, une importante diminution de la teneur en protéine (-28 %) est notée en phytotron [Sen.11]. Pour le blé et le riz, la réduction est comprise entre -10 % et -15 % pour une concentration variant de 315 à 400 ppm.

Le maïs semble appartenir à cette fourchette car pour une concentration de 550 ppm, on note une diminution de -11 %. Par contre d'autres auteurs reportent une petite ou presque pas de diminution en concentration en protéines [Rog.98], [Hav.84], [Dji.99].

Tableau II-2 : Effet de l'élévation de CO₂ sur les protéines.

Plantes	Méthodes	Concentration en CO ₂ (ppm)	Variation de protéine en pourcentage
Blé	CTC, OTC, FACE	550	-4,2%, -3,9%, -2,3%
	FACE	550	-4% to -13%
	FACE	546-586	-6,5%
	FACE and chambre	546-586	-7.2%
	Meta-analyse	(315-400) to (540-950) Elevated CO ₂	-10 to -15%
	-----		-6,3%
Orge	FACE	550	-11 to -13%
	FACE et chambre	546-586	-15%
	Meta-analyse	(315-400) to (540-950) 546-586	-10 to -15%
	FACE		-11,9%
Riz	FACE and chambre	546-586	-8%
	Meta-analyse	(315-400) to (540-950) 546-586	-10%
	FACE	Elevated CO ₂	-8%
	GC	700	-7,8% -28%
Sorgho	FACE et chambre	546-586	-5,6%
	FACE	546-586	0.0%
	-----	Elevated CO ₂	0.0%
Maïs	FACE et chambre	546-586	-4,6%
	FACE	546-586	-4,6%
		Elevated CO ₂	-4,6%
	OTC	550	-11%

II-3-2-2. Effet du CO₂ sur les lipides et les glucides

L'accumulation des glucides sur les feuilles est la réponse la plus observée et la plus universelle pour les plantes de type C₃ sous l'élévation de CO₂. Ceci est dû à la diminution de l'azote de -13 % à -26 %. Si l'amidon et l'hémicellulose observent une légère augmentation, ceci n'altère pas la concentration de la lignine et de la cellulose. L'élévation de CO₂ n'a aucun effet global sur les fractions totales de lipides **[Por.09]**.

La concentration totale de lipides et d'amidon non lipidique décroissent de -7 % à -11 % respectivement alors que les amidons lipidiques croissent sous GH pour le blé. Pour d'autres au contraire les lipides et l'amidon lipidique ne sont pas affectés par l'enrichissement en CO₂.

II-3-2-3. Effet du CO₂ sur les macros et micro éléments

La diminution en concentration des micros et macroéléments est observée pour toutes les plantes à part quelques exceptions. Le tableau II-3 montre la variation des macros et micros éléments de différentes sous haute concentration.

Avec plusieurs méthodes d'études et à 550 ppm, les éléments comme le calcium, le magnésium et le manganèse diminuent respectivement de -9,7 %, -4,2 % et -4,9 % alors qu'on note une augmentation des éléments potassium, phosphore et fer de +3,9 %, +1,1 % et +1,2 % respectivement sous CTC. Sous OTC et GC toujours à 500 ppm on note une diminution pour tous les éléments (-12,4 %, -19,5 %, -14,5 %, -7,2 %, -12,3 %, -18,3 % et -13,1 %) respectivement pour les éléments (K, P, Ca, Mg, S, Fe et Zn) **[Hog.10]**.

A 550 ppm, l'azote et le phosphore diminuent respectivement de 11 % et 19 % alors que le potassium augmente de 5 % pour le maïs **[Abe.16]**.

Tableau II-3 : Effet de l'élévation de CO₂ sur les minéraux.

Céréales	Méthode	Concentration du CO ₂ (ppm)	Effet sur les macroéléments	Effet sur les micro-éléments
Blé	CTC	550	+3,9(K), +1,1(P), -9,7(Ca), -4,2 (Mg)	+1,2(Fe), -4,9(Mn)
	GC	550	-12,1(K), -19,5(P)	-17,4(Zn)
	OTC	550	-14,5(Ca), -7,2(Mg), -12,3(S)	-18,3(Fe), -13,1(Zn), -3,3(Mn)
	FACE	546-586	-----	-5,5(Fe), -8,8(Zn)
	FACE et chambre	546-586	-----	-9,1(Zn), -5,9(Fe)
Riz	GC	Double	-6(P), +32(Ca)	-15(Zn), -60(Fe), -28(Cu)
	OTC	+300	K et P ne changent pas	
	FACE	546-586	-----	-3,1(Zn), -4,9(Fe)
	FACE et chambre	546-586	-----	-3,1(Zn), -4,9(Fe)
	FACE	560-584	-0,9(Mg), +2(Ca), -7,8(S), +1,1(K), -1(P) -7 (N)	
Sorgho	FACE	546-586	-----	-5,2(Mn), -5,8(Fe)
	FACE et chambre	546-586	-----	-5,2(Mn), -5,8(Fe)
	Moyenne	-----	+11,2(Ca), -0,2(Mg), +0,3(P), +3(K), -0,2(S)	2,9(Cu), +1,7(Mn), +1,6(Fe), -1,3(Zn)
Mais	FACE	546-586	-----	-5,2(Mn), -5,8(Fe)
	FACE et chambre	546-586	-----	-5,2(Mn), -5,8(Fe)
	-----	-----	-5,7(Mg), -2,7(Ca), +2,1(S), -2,7(K), -7,1(P)	-4,2(Mn), -9,9(Cu), -5,2(Zn)
	OTC	550	-11(N), -19(P), +5(K)	

La diminution des éléments Na, Ca, Mg et S est consistante chez le blé alors que les éléments comme P et K répondent différemment. L'élévation de CO₂ conduit à une baisse de la concentration des microéléments de -3,7 % à -18,3 % à l'exception du fer. Par contre, sous FACE une diminution de -5,1 % du Fe a été notée [Mye.14].

Pour le riz, dans la plupart des cas, les nutriments ne changent pas ou diminuent. Sous GC en doublant la concentration, des éléments comme P, Zn, Fe et Cu baissent respectivement de -6 %, -15 %, -60 % et -28 % par contre Ca augmente de 32 %. Sous OTC en augmentant la concentration de 300 ppm K et Ca demeurent inchangés.

Les nutriments contenus dans le maïs répondent négativement à l'élévation du CO₂. Seul le soufre répond favorablement. Le sorgho au contraire constitue l'exception en répondant positivement pour les macro et microéléments.

La concentration en fer a atteint +33 % sous FACE. Dans sa méta-analyse, Myers observe qu'en moyenne tous les macros et micros-éléments diminuent excepté K et Ca pour le riz, le

maïs et le blé. L'azote décroît de -2,9 % chez le blé, ceci va directement affecter le ratio C/N. Sous OTC à 750 ppm le ratio C/N augmente de +31 % chez le sorgho.

II-4 EFFET DE L'ÉLEVATION DE LA TEMPÉRATURE SUR LA PLANTE

II-4-1. Effet de la température sur le rendement

La température globale a augmenté d'environ 0,74 °C entre 1906 et 2005. Dans les 30 à 50 prochaines années, les changements de température attendus devraient être dans la gamme de 2 à 3 °C et pourraient atteindre 6,4 °C à la fin de ce siècle influençant ainsi la température du sol dans les zones agricoles [IPCC.14].

Sous l'influence de l'élévation de la température, le rendement des cultures peut être affecté à n'importe quel moment, du semis à la maturité du grain mais c'est pendant la floraison lorsque le nombre de grains est établi et pendant l'étape de remplissage que l'élévation de température impacte plus sur la récolte. La chaleur affecte à la fois la croissance et le développement des plantes.

Le facteur le plus significatif de la perte de rendement dans les céréales est la diminution de la phase développement entraînant une baisse de la perception de la lumière au cours du cycle de vies raccourcies et une perturbation des processus liée à l'assimilation du carbone [Mer.06]. Le tableau II-4 nous donne la variation du rendement de certaines plantes sous l'influence de la température.

En moyenne, la floraison peut être partiellement déclenchée par les températures élevées tandis que la basse température peut réduire la consommation d'énergie et augmenter le stockage du sucre [Bar.08]. Dans les zones tempérées les températures moyennes optimales pour un rendement maximal des grains se situent entre 14 et 18 °C.

En revanche, comme les processus de maturation des céréales sont liés à des valeurs de températures spécifiques, des augmentations modérées de la température moyenne de 1 à 2 °C entraînent des périodes de remplissage plus courtes affectant négativement les composantes du rendement.

Des études ont montré que le rendement grainier des céréales a diminué de 4 à 10 % en raison de l'augmentation de la température moyenne saisonnière de 1 °C [Hog.13].

La perte de rendement associée au réchauffement climatique pour les plantes de type C₃ peut atteindre 6 % par °C contre 8 % pour les plantes C₄ [Lob.08].

Par une méthode de simulation, le rendement des céréales en Afrique en 2050 est condamné à diminuer (-17 % pour le blé, -15 % pour le sorgho et -5 % pour le maïs) [Kno.12].

Par contre, en Afrique australe, la production de maïs devrait diminuer environ de 30 % contre 2 % pour le sorgho en 2030 [Lob.08].

Tableau II-4 : Variation du rendement en fonction de la température

Céréales	Température (°C)	Méthode	Baisse en rendement (%)
Blé	18-25°	CCG	1,1→34
	+1	Panel dataset	5,6→20
	+1	Simulation	5
	+2	Simulation	7
	+3	Simulation	25
	+2,3	Méta-analyse	50
Maïs	+1	Simulation	2→9
	+1	Simulation	10
	35	CC	15→38
	+1	Simulation	10
	+2	Simulation	14
	+3	Simulation	21
	+1,5	OTC	4,9
Riz	+1→+2	FATI	0,9→6,1
	+1→+5	Simulation	+2,68→-42
	+1	Simulation	5→8
	+2	Simulation	10→16
	+3	Simulation	21→30
Sorgho	+1	Simulation	7
	+2	Simulation	12
	+1	Simulation	2→3
	+2	Simulation	5→8
	+3	Simulation	7→11
	+4	Simulation	8→14
	+5	Simulation	6→37

La période de croissance maximale devrait être de 20 jours pour le blé, 2 à 3 jours pour le riz et 2 à 4 jours pour le maïs avec des variations de production respectives de 2,5 % à 20 %, 2,1 % à 9,5 % et 5,7 % à 19,1 %. Les résultats indiquent que le potentiel de production a diminué de 2,5 % à 12,5 % dans toutes les études du fait de l'élévation de température [Goh.13].

La température adéquate au développement du blé est de 18 °C là où la teneur en matière sèche la plus importante a été trouvée. Lorsque la température croît jusqu'à 25 °C on note une baisse de 11 % de la matière sèche de la graine [Spi.06].

Une augmentation de 1 °C équivaut à 5,6-20 % de changement relatif soit une baisse de 3-10 % du rendement [You.09]. Une variation de 1,5 °C entraîne une réduction de la période de croissance de 10 jours [Tia.12].

Les céréales en zones tempérées et subtropicales poussent de façon optimale entre 20 et 30 °C. Le blé est sensible à des températures supérieures à cette plage pouvant entraîner des pertes de 10 à 15 % en rendement pour une élévation de 5 °C [Thi.12]. Une hausse de 1 °C, 2 °C et 3 °C au-dessus de la température ambiante a causé une réduction respectivement de 5 %, 7 % et 25 % [Kha.09].

Le rendement en maïs augmente jusqu'à ce que la température atteigne 29 °C et diminue continuellement au-delà de cette température.

Un réchauffement de 1 °C à des températures maximales fait décroître le rendement de 2 à 9 %. La température optimale pour le développement de la graine de maïs se situe entre 27 et 32 °C [Lu.13].

En Afrique subsaharienne et au sud-est, les rendements sont négativement affectés par la température qui dépasse généralement 30 °C, une perte de 10 % par 1 °C de réchauffement est estimée [Wah.13]. Une élévation respective de 1 °C, 2 °C et 3 °C réduit le rendement de 10 %, 14 % et 21 % [Kha.09]. En OTC, avec une hausse de 1,5 °C de la température ambiante le grain de maïs diminue de 4,9 % [Abe.16].

Le riz devient stérile s'il est exposé à une température supérieure à 35 °C pendant plus d'une heure lors de la floraison et ne produit donc aucune graine.

Les effets négatifs sur le rendement ont été observés pour une variation de 2 °C, 3 °C, 4 °C et 5 °C au-dessus de la température ambiante entraînant respectivement une baisse de 18 %, 28 %, 36,5 % et 42 % [Kri.07]. Une augmentation de 1 °C entraîne une diminution de 5 à 8 %, une baisse de 10 à 16 % pour 2 °C tandis qu'à 4 °C on observe une diminution de 21 à 30 % du riz [Kha.09].

La température optimale moyenne pour le développement du sorgho est située entre 21 et 30 °C pour la germination des graines, 26-34 °C pour la croissance et le développement végétatif et 25-28 °C pour la croissance de la reproduction. Une augmentation supplémentaire de la température jusqu'à 5 °C devrait accélérer la perte de rendement de la graine de 6 à 37 %. Un surplus de 1 °C entraîne une nette vulnérabilité de 2 à 3 %, 5 à 8 % pour 2 °C, 7 à 11 % pour 3 °C, 8 à 14 % pour 4 °C et 12 à 17 % pour 5 °C [Sri.10]. Par une autre méthode, une élévation de 1°C et 2°C entraîne respectivement une baisse de 7 % et 12 % [Kha.09].

II-4-2. Effet de l'élévation de la température sur la qualité des céréales

Une élévation de température pendant le remplissage du grain diminue son poids, ce qui entraîne une réduction du rendement du grain dû à la réduction de la biosynthèse de l'amidon.

Une augmentation de la teneur en protéine des grains a été constatée pour 4 variétés de maïs. L'augmentation est plus importante qu'au stade de remplissage du grain qu'au début de la phase de remplissage.

La chaleur affecte aussi bien la croissance de la plante que la qualité du grain de blé. La teneur en protéine, l'indicateur majeur de la qualité du blé, est altérée par une température élevée qui peut avoir plus d'effet sur la composition du blé que l'élévation de CO₂. Une simple variation de 2 à 4 °C a un effet double comparé à l'élévation de CO₂. La teneur en amidon, le nombre de grain et la taille sont affectés par la température. Le tableau II-5 présente la variation en nutriments de l'orge exposée à haute température.

Les expériences ont montré que les changements dans la composition des fractions protéiques sous l'effet de la chaleur sont dus à la quantité altérée de l'azote accumulée pendant le remplissage [Bar.08].

Sur 37 études, 25 ont présenté une diminution de la synthèse à haute température. La concentration lipidique diminue significativement avec la température. Les acides gras

diminuent considérablement pour le blé jusqu'à 777 mg à 4 °C au-dessus de la température ambiante contre 1322 mg [Wil.95].

L'amidon représente un des indices majeurs de la qualité des céréales. La chaleur diminue la teneur en amidon du riz, du maïs et du blé [Lu.13]. Les céréales en zones tempérées et subtropicales croissent de façon optimale entre 20 et 30 °C, entre 30 et 40 °C la teneur en amidon est réduite de 2 à 33 %. Par contre, en zone tropicale, l'amidon est diminué de 2 à 6 % pour le riz [Thi.12].

Une légère hausse et baisse a été observée en macro et microélément pour certains éléments comme le potassium (+1,7 %), calcium (+1,9 %), soufre (+1,8 %), zinc (+2,5 %), alors que d'autres subissent une baisse ; c'est le cas du phosphore (-2,2 %), magnésium (-0,8 %), manganèse (-2,6 %), fer (-0,6 %), aluminium (-15 %), et cobalt (-22,5 %). Le rapport C/N reste inchangé sous l'effet de la température alors que la concentration des lipides diminue de 7,1 % et celle de l'amidon de 5 % pour l'orge [Hog.13], [Bar.08].

Tableau II-5 : Variation des nutriments en fonction de la température

Culture	Méthode	Température	Macroéléments	Micro éléments	Eléments de trace
Orge	HoCC	+ 2,5 °C	K +1,7	Fe -0,6	Al -15
			S +1,8	Mn -2,6	Co -22,6
			Ca +1,9	Mo -10,6	Si +0,1
			Mg -0,8	Se -43,5	
			P -2,2	Zn +2,5	
				Ni +19,5	

II-5. EFFET DE LA PRÉCIPITATION SUR LA PLANTE

II-5-1. Effet de la précipitation sur le rendement

Le changement en matière de précipitation peut avoir à la fois un effet positif et négatif. En général de fortes précipitations correspondent à un accroissement de la production. La variabilité de fortes pluies entraîne une augmentation de la variabilité de l'humidité du sol qui altère la productivité du pâturage.

La production agricole est aussi négativement impactée par l'inondation. Un excès de précipitation entraîne l'humidité du sol.

La sécheresse ou manque d'eau est considéré comme étant le plus grand facteur limitant la croissance des plantes ainsi que sa production. Le non disponibilité de l'eau entraîne une baisse de l'évapotranspiration saisonnière, de la matière sèche totale, du rendement du grain et de l'indice de récolte.

L'aridité peut réduire le rendement final du grain en influençant le développement du blé en ses différentes phases de développement.

Le rendement du maïs augmente avec la précipitation. Le meilleur rendement correspond à un pourcentage de 150 % alors qu'avec 25 % de pluie on obtient le plus faible rendement **[Mer.06]**.

Le rendement du grain de sorgho répond positivement avec la saison des pluies et la réponse est beaucoup plus importante lorsque la précipitation coïncide avec la phase végétative **[Ung.86]**. Le sorgho est reconnu pour être une plante tolérante à la sécheresse et typiquement croissante sous certaines conditions dans des régions où l'eau est le principal facteur limitant la productivité.

Le diagramme pluvial varie largement de région en région. Le sorgho est plus performant dans les surfaces sèches que le maïs et produit le meilleur rendement lorsque la saison des pluies est limitée **[Rur.14]**.

Pour l'orge, la variation de la biomasse totale, du rendement du grain en réponse du changement du taux de précipitation n'est pas significative. Par contre on note pendant la phase de développement des effets néfastes de l'aridité. Le manque d'eau à la dernière phase de croissance supprime la graine. Pendant le développement de l'épi il entraîne une baisse du rendement dû à une réduction du nombre de grain tandis que pendant le début du développement du grain il réduit sa taille.

III-5-2. Effet de la précipitation sur la qualité de la plante.

Il est prédit une croissance de la variabilité des précipitations intra-annuelle à cause du réchauffement global entraînant de longues périodes de sécheresse et des pluies intenses avec d'énormes impacts sur l'agriculture. La productivité est altérée directement par le changement climatique et indirectement par la variation des nutriments.

Une longue et extrême sécheresse entraîne un déplacement des protéines, de l'azote et les glucides solubles de la feuille vers la racine réduisant ainsi la valeur nutritive de la plante. L'aridité affecte aussi la nutrition en azote de la partie superficielle de la plante à cause de l'utilisation de l'azote par le sol. Néanmoins, la teneur en protéine est tenue de croître sous aridité. Une augmentation de précipitation coïncide avec une légère diminution de 0,1 % d'azote, alors que lorsque la précipitation diminue de 0,7 % en dessous de la normale la concentration d'azote diminue aussi même si la précipitation passe de 25 à 75 % pour le maïs.

Une augmentation de la précipitation intra-annuelle diminue le rendement total du fourrage de 19 % et entraîne une hausse de sa qualité indiquée par une haute teneur en protéine et peu de fibre alors qu'on note une réduction de la teneur en azote et en protéine du fait de la sécheresse **[Gra.14]**.

Le ratio C/N n'est pas affecté par la précipitation de même que la concentration totale en protéine et la concentration en fibre brut. La réduction de précipitation réduit la

concentration en sodium et en cuivre de 20 % et 10,3 % respectivement alors que les autres nutriments ne sont pas affectés significativement pour l'orge [Hog.13].

II-6. EFFETS COMBINÉS

II-6-1. Effets combinés de l'élévation de température et de CO₂ sur la plante.

Si certaines évidences indiquent que l'élévation de CO₂ peut compenser l'effet négatif de la chaleur sur la photosynthèse et le développement de la plante, certains auteurs affirment le contraire [Fre.11].

Néanmoins il faut souligner que l'effet de l'élévation de CO₂ et de la température sur la plante n'est pas additif, ce qui implique que combiner les effets de ces deux paramètres ne peut pas être prédits à partir de la connaissance de leurs effets individuels [Dam.10]. Une élévation de CO₂ à une température particulière simule une hausse du rendement alors qu'une élévation de température à une concentration particulière de CO₂ entraîne une baisse du rendement.

Une hausse d'1 °C combinée à une élévation de 100 ppm entraîne un gain en rendement passant de -13 % à +7 % pour le riz. Lorsque la température est élevée de 3 °C et le CO₂ haussé de 100 ppm, on note une baisse de -15 à -39 % du rendement du grain. Par contre un gain de 4 à 10 % est obtenu si la concentration atteint 300 ppm [Sat.14.].

En doublant la concentration de CO₂ jusqu'à 700 ppm on observe une baisse respective de -10,5, -23,6, et -34 % du rendement pour des températures élevées de 3, 4 et 5 °C [Kri.07].

En élevant la température de 2 °C sous une concentration de 550 ppm sous chambre de contrôle (CC), le rendement du grain croit et équivaut au meilleur niveau correspondant à 84.5 % bien que la hausse de température ait entraîné une baisse de 3 % [Roy.12].

Le taux de développement du maïs est situé aux alentours de 32 °C sous une concentration ambiante ou élevée de CO₂ et 34 °C comme température optimale pour la plante en présence de CO₂. A 700 ppm, le taux de MS est respectivement de 159, 108, 104, 107 et 75 g/plant pour des températures de 19, 25, 31, 35 et 38 °C [Kim.07].

Lorsque la concentration en CO₂ est de 550 ppm et la température élevée de 1,5 °C, la biomasse totale augmente ainsi que la masse des échantillons alors que pour une même concentration et une température de 3 °C au-dessus de l'ambiante on note une baisse de la masse des échantillons et de la biomasse totale [Abe.16].

Pour le blé, aucun effet de la température n'a été noté sous une concentration ambiante, par contre sous une élévation de CO₂ on note une hausse du rendement à ambiante et température élevée. La hausse est beaucoup plus importante à température ambiante (700 ppm et +3 °C) [Ben.14].

II-6-2. Effets combinés de la précipitation avec le CO₂ et la température.

L'étude de l'effet combiné de la précipitation et du CO₂ ou avec la température a été peu effectué. Ceci est dû au fait que l'étude de l'impact de la précipitation est un peu délicat car ce paramètre est difficile à maîtriser. Néanmoins de rares études ont montré que les plantes sont plus sensibles à l'élévation de température qu'à la précipitation comme le cas de l'orge **[Hog.13]**.

La perte en rendement observée chez le sorgho due à l'élévation de température peut être compensée par la précipitation. Une hausse de 20 % et de 40 % de pluie peut compenser une perte causée par une élévation respective de 2 °C et 5 °C **[Sri.10]**.

En raison des différents climatiques, géographiques et culturels, on note une incohérence dans les résultats obtenus. Par exemple pour une hausse de 1,5 °C et de 30 % de précipitation, le rendement en maïs diminue de 7 % aux Etats-Unis et augmente de 23 % en Chine, alors que pour une même température et une baisse de 30 % de précipitation, la productivité augmente de 41 % aux Etats-Unis et de 11 % en Chine **[Li.11]**.

Cependant certains auteurs soutiennent qu'une baisse de précipitation de 40 % entraîne la baisse du rendement même si la concentration de CO₂ augmente et que la température croît de 2 °C **[Wilc.14]**.

II-7. RÔLE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS DANS LA PRODUCTION DE BIOGAZ

II-7-1. Rôle des protides

Les protides sont un élément important dans la production de biogaz. Certains auteurs soutiennent que la production de biogaz dépend de sa teneur en protides après avoir testé 15 variétés de maïs **[Osl.10]**.

L'utilisation de composés riches en protéines en tant que co-substrat a entraîné une forte production de méthane après avoir testé plusieurs substrats et trouvé le rendement en méthane le plus élevé pour les protéines **[Wag.13]**.

Les principales entreprises de biotechnologie tentent d'augmenter la teneur en protéines dans les cultures pour augmenter le rendement en méthane. La digestion anaérobie des protides produit 587 L de biogaz avec une teneur de 84 % en méthane par kg de SV détruit **[Cha.12]**.

II-7-2. Rôle des glucides

Les glucides sont connus pour être facilement et rapidement transformés par hydrolyse en sucres simples et ensuite fermentés en acides gras volatiles (AGV).

L'amidon a un effet positif sur le biogaz en raison de sa digestibilité. À son contenu élevé en amidon, l'épi est la partie la plus importante de la plante. L'épi de maïs due à la teneur élevée en amidon se caractérise par une production plus élevée de biogaz (7960 m³ / ha) par rapport à l'ensilage de l'ensemble de la plante (10200 m³ / ha). Les glucides fournissent 885 L/kg SV de biogaz avec une teneur de 50 % en méthane **[Cha.12]**.

II-7-3. Rôle des lipides

Les lipides présentent un potentiel beaucoup plus élevé que les hydrates de carbone, les protéines et l'amidon [Wag.13]. Les lipides sont caractérisés soit par les huiles et les graisses. Cependant dans la pratique, la digestion anaérobie des lipides n'atteint pas facilement les niveaux théoriques de production de méthane en raison de l'accumulation d'acides gras à longue chaîne (AGLC). Les graisses ont un potentiel de méthane élevé et sont généralement dégradées en acide gras volatil (AGV), (AGLC) et glycérol. Les substrats contenant des lipides ont les valeurs plus élevées de rendement en biogaz et en méthane comme les graisses d'abattoir, STEP, huile de cuisine. En combinaison avec les boues d'épuration, les lipides augmentent le taux habituellement faible de C / N dans les digesteurs de la station d'épuration (traitement des eaux usées) et introduisent une source supplémentaire de matière organique qui aide à augmenter la production de biogaz de digesteurs surdimensionnés. La digestion anaérobie des graisses donne 1535 l / kg VS avec environ 70 % de teneur en méthane.

II-7-4. Rôle des nutriments

Le rapport C / N optimal pour la digestion anaérobie se situe dans la fourchette de 20 à 30 car le microorganisme consomme 30 fois plus C que N et l'azote n'entre pas dans la composition du biogaz mais apparaît dans le digestat dans lequel il est le principal élément avec le phosphore P.

N est l'élément le plus important après C, à un rapport C / N élevé, une faible quantité de gaz est obtenue. Le processus pourrait échouer en raison d'une baisse du pH du système et de la capacité de tampon abaissée; Les méthanogènes consommeront rapidement le N pour satisfaire leurs besoins en protéines et ne réagiront plus avec la teneur en carbone sur le matériau. D'autre part, sous un faible rapport C / N, N sera libéré et accumulé sous forme d'ion ammonium qui inhibe la fermentation du méthane [Jia.13].

Outre les éléments nutritifs (C, H, O, N), des éléments métalliques, y compris des ions de métaux légers (Na, K, Mg, Ca, Al) et des ions de métaux lourds (Cr, Co, Cu, Zn, Ni, etc.) également requis par les bactéries anaérobies parce que ces cations jouent un rôle important dans la synthèse enzymatique ainsi que le maintien des activités enzymatiques [Wil.95].

En plus du carbone et de l'azote, le phosphore et le soufre sont également des nutriments essentiels. Un déficit en micronutriments est très fréquent dans les cultures énergétiques à fermentation unique. Les éléments dont les archées méthanogènes ont besoin sont le cobalt (Co), le nickel (Ni), le molybdène (Mo) et le sélénium (Se) et parfois aussi le tungstène (W). Le nickel, le cobalt et le molybdène sont nécessaires dans les cofacteurs pour les réactions essentielles au métabolisme.

Le magnésium (Mg), le fer (Fe) et le manganèse (Mn) sont également des micronutriments importants pour le transport d'électrons et la fonction de certaines enzymes. L'amélioration

de la production de biogaz mésophilique à partir de l'herbe de 40 % a été obtenue par addition quotidienne de Ni, Co, Mo et Se avec une diminution d'AGV. Il montre que l'addition de Fe, Co et Ni a fourni 35 % de production de biogaz. Les macronutriments principalement Co, Cu, Fe, Mo, Ni, Se et Zn pendant la digestion thermophile de l'OFMSW (fraction organique des déchets solides municipaux) ont contribué à augmenter le taux de production de gaz de 30 % et à augmenter la stabilité du digesteur [Dem.11].

II-8. EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA PRODUCTION DE BIOGAZ

Les études précédentes ont montré que les cultures énergétiques seront affectées à l'avenir en raison de la concentration élevée du CO₂ en termes de rendement et de qualité comme nous le montre le tableau II-6. Cette menace touche indirectement la production de biogaz à partir de cultures énergétiques qui seront également affectées en raison principalement de l'impact du CO₂ élevé sur la qualité de la culture.

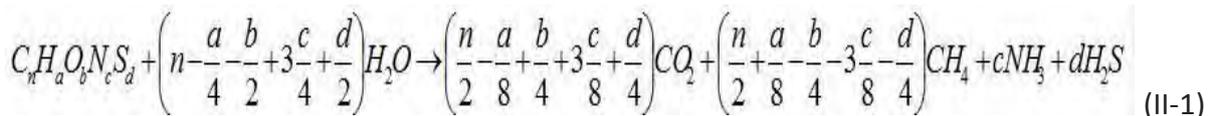
Tableau II-6 : Synthèse des variations minimales et maximales du rendement et de la qualité de la plante en sous élévation de CO₂

Plantes	Rendement	Protides	Macroéléments	Micros-éléments
Blé	+10 to +28 %	-15 to -2 %	-19 to +4 %	-18,5 to +1,5 %
Riz	+13 to +56 %	-10 to -28 %	-14 to +32 %	-60 to -3 %
Orge	+14%	-15 to -12 %	-19 to -6 %	-14 to -10 %
Sorgho	+8 to 30 %	-6 to 0%	-0,5 to +11.2 %	-3 to +34 %
Maïs	+14 %	-4,6 to -11 %	-7 to +2 %	-10 to -4 %

Les effets secondaires de la concentration élevée du CO₂ sur la culture sont la diminution de la protéine brute, macro et microélément.

Les protéines, un élément essentiel de la production de biogaz, sont affectées négativement et la diminution des cinq cultures que sont le riz, le blé, le sorgho l'orge et le maïs varie entre -2 % et -28 %, seulement le sorgho présente des réponses différentes.

En se basant sur l'équation théorique de Buswell (équation II-1) qui stipule que les protéines produisent 60 % du méthane, la concentration de méthane diminuera entre -58 % et -45 % pour le blé, -52 % à -50 % pour le riz, -48 % à -45 % pour l'orge, -60 % à -54 % Pour le sorgho et -55 % à -49 % pour le maïs. Ces variations sont représentées par les figures II-1 et II-2.



Outre les protéines brutes, les éléments nutritifs comme les micros, les macroéléments et les oligo-éléments, nécessaires à la production de biogaz, sont également affectés négativement. Le soufre qui est un composant des acides aminés a diminué pour toutes les

cultures de -7 % à -19 %, même remarque pour le phosphore qui a diminué de -1 à -19,5 % pour toutes les cultures à l'exception du sorgho (+ 0,3 %).

Ces deux éléments, en plus de la diminution de la concentration de N, affecteront non seulement le rapport C / N en l'augmentant et une faible quantité de gaz sera obtenue, mais affectera également le rapport C / N / P / S.

Magnésium et manganèse, deux éléments essentiels pour le transport d'électrons ont diminué pour toutes les cultures (-0,2 à -4,2 % pour Mg), (-3,3 à -7,5 % pour Mn) sauf dans le sorgho où nous avons noté une légère augmentation de Mn (+ 1,7 %) ainsi, les activités de transport d'électrons seront réduites.

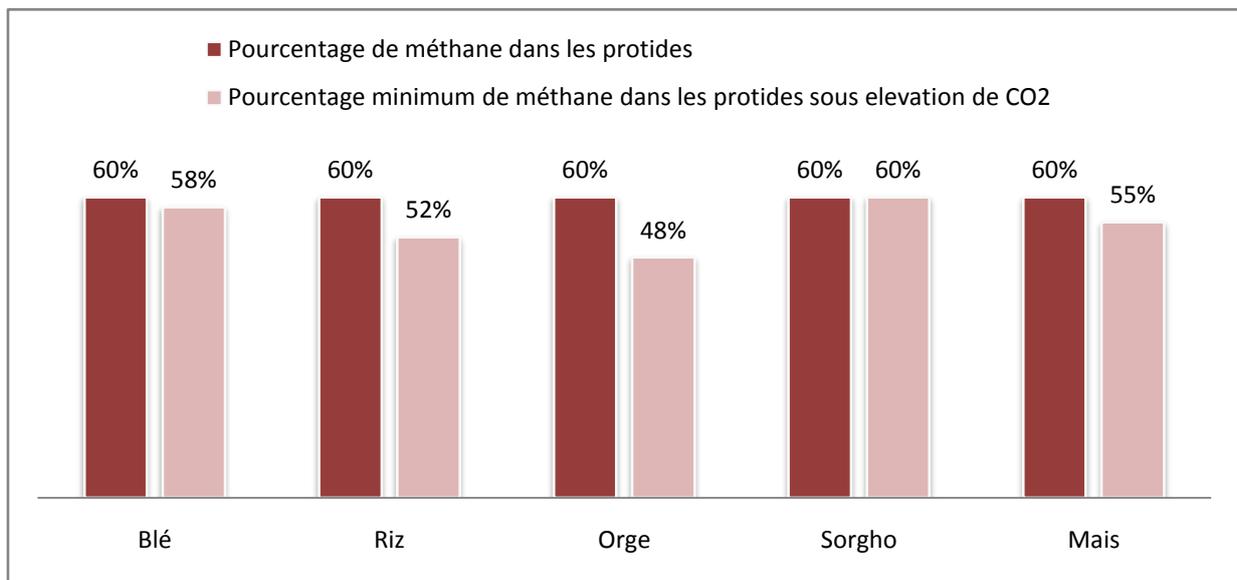


Figure II-1 : Effet minimum du CO₂ sur la teneur en méthane

Un autre élément affecté négativement et dont les archées méthanogènes ont besoin est le fer qui a diminué de -5 à -60 % pour le maïs, le blé, l'orge et le riz, mais nous avons noté une augmentation importante du sorgho (+1,6 à + 33,8 %). A l'exception du rendement en sorgho du méthane les 4 autres cultures devraient diminuer.

Une élévation de température de 1 à 2 °C fait baisser le rendement en biomasse de -5 à -7 % pour le blé, -5 à -16 % pour le riz, -7 à -12 % pour le sorgho, -10 à -14 % pour le maïs et -4 % pour l'orge. De l'autre côté, les éléments de base qui déterminent la qualité de la plante et dont les microorganismes ont besoin pour la production de biogaz sont affectés à l'exception des protides. Ainsi la diminution de la graine est due à sa faible teneur en amidon qui décroît sous l'effet de la température de -13 à -33 %, -2 à -33 % et -2 à -6 % pour l'orge, le blé et le riz respectivement.

Les lipides aussi connaissent une baisse de même que certains éléments comme le sélénium, le cobalt et l'aluminium qui diminuent respectivement de -43 %, -15 % et -23 %.

En plus de ces résultats s'y ajoutent ceux des effets combinés qui montrent que le non compensation des effets néfastes causés par les paramètres entre eux. Fort de ces résultats et constats on peut dire sans risque de nous tromper que la production de biogaz par le biais des cultures énergétiques est menacée par le changement climatique et que le recours à d'autres substrats s'impose ou la recherche de moyens d'enrichissement de la plante.

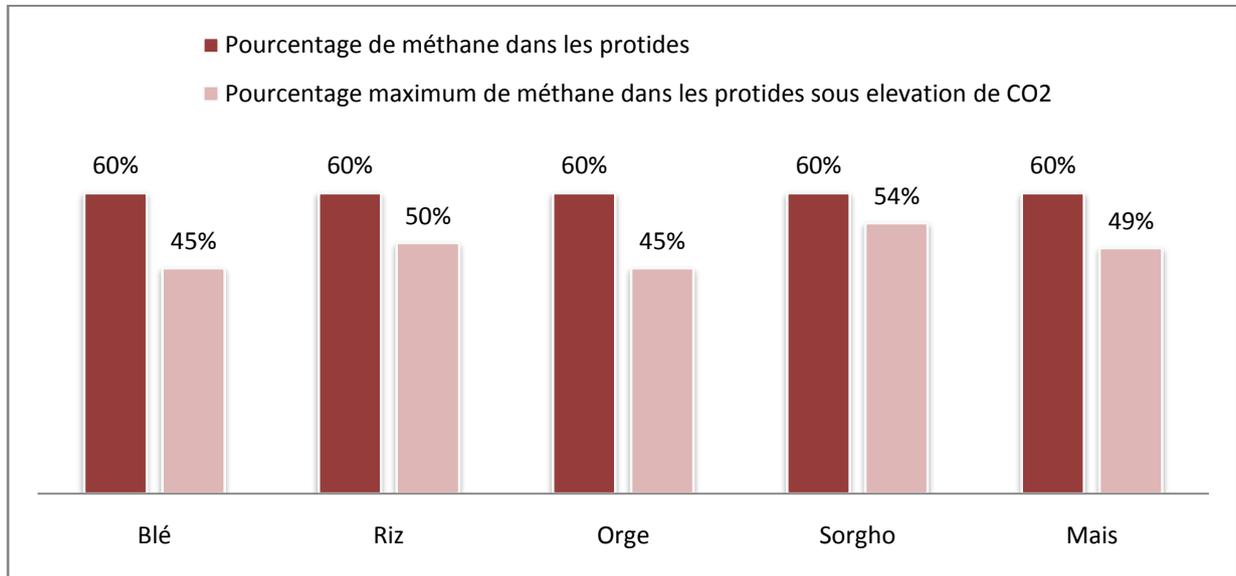


Figure II-2 : Effet maximum du CO₂ sur la teneur en méthane.

II-9. CONCLUSION

L'utilisation des cultures énergétiques pour la production de biogaz est menacée et peut être freinée par les effets néfastes du changement climatique comme l'élévation de température

et la forte concentration de CO₂. Ces effets qui touchent aussi bien le rendement (élévation de température) que la qualité de la plante (élévation de la concentration de CO₂ et de température). La teneur en protides qui est fondamentale à la production de biogaz est négativement affectée par le CO₂ de même que les nutriments ; ce qui se reflète sur la production de biogaz.

Les effets combinés montrent un non complémentarité entre les paramètres. L'étude de l'effet de la précipitation est un peu délicate et rare du fait que c'est un paramètre difficile à étudier et à maîtriser.

Fort de ces résultats et de ces constats, le recours à d'autres formes de substrats doit être un sujet de réflexion ou un moyen d'enrichir les plantes avant utilisation en substrats car les prévisions annoncent une hausse continue de température et de la concentration en CO₂. Néanmoins, les plantes répondent de manières différentes et certaines s'avèrent moins sensibles aux changements climatiques et peuvent être considérées comme les cultures énergétiques du futur. Parmi ces plantes, le sorgho figure en bonne position du fait de sa résistance, sa capacité d'adaptation et elle est peu influencée par l'élévation de CO₂. Elle est aussi l'une des rares plantes à répondre positivement en connaissant une hausse en teneur en nutriments (-3 à +34 %) +0,3 % en soufre, +1,7 % en manganèse, +1,6 à 34 % en fer et en protides qui reste inchangée ou baisse seulement de -6 %.

Chapitre III : Partie expérimentale

III-1.	Introduction.....	60
III-2.	Matériel et méthode.....	60
III-2-1.	Les substrats	60
III-2-2.	Dispositif expérimental.	60
III-2-2-1.	Les étuves.....	60
III-2-2-2.	Le broyeur ultra-centrifuge.....	62
III-2-2-3.	Analyseur de CHNS/O ou ultimate analyser.....	64
III-2-2-4.	Les digesteurs.....	64
III-2-2-5.	Le volumètre et le détecteur de gaz.....	67
III-3.	Résultats et discussions.....	69
III-3-1.	Présentation des résultats.....	69
III-3-1-1.	Détermination de la matière sèche et de la matière organique.....	69
III-3-1-2.	Composition centésimale de l'ensilage.....	71
III-3-1-3.	Quantité de biogaz et de méthane.....	72
III-3-2.	Discussion.....	80
III-3-2-1.	Production de biogaz à partir de l'ensilage et la boue.....	80
III-3-2-2.	Production de biogaz à partir des 3 substrats.....	81
III-4.	Conclusion.....	81

III-1. INTRODUCTION

Cette partie expérimentale a été effectuée au laboratoire de biomasse de l'Université d'Application Technique THM de Giessen en Allemagne. Les tests portent sur la co-digestion d'une culture énergétique qui est l'ensilage de maïs avec de la bouse de vache et de la boue. L'objectif de ce test est d'essayer de trouver une solution probable à l'utilisation des cultures énergétiques face à la menace du changement climatique.

III-2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

III-2-1. Les substrats

Le principal substrat utilisé est l'ensilage de maïs qui est le substrat le plus utilisé dans ce pays donc nous pouvons l'obtenir facilement sur place à l'état naturel ou ensilé. L'ensilage est une méthode de conservation par voie humide passant par la fermentation anaérobie. Le fourrage est d'abord haché en particules dont la longueur avoisine le cm, puis compacté à l'aide de tracteur afin d'expulser le maximum d'air interstitiel et enfin mis en anaérobiose définitive par recouvrement à l'aide d'une bâche de polyéthylène. La bouse de vache est prélevée d'une ferme de la région d'Aachen et la boue d'une station d'épuration dans la même région. Nous avons utilisé la boue à la place de l'eau afin d'espérer un meilleur rendement car cette dernière est connue pour être un bon substrat du fait de sa production élevée en biogaz et en méthane.

III-2-2. Dispositif expérimental et protocole.

Avant de commencer la digestion, certains paramètres ont besoin d'être déterminés comme la teneur en matière sèche, en matière organique, en matière minérale, la composition chimique. Ces paramètres sont fondamentaux car ils déterminent la quantité de chaque substrat à mettre dans le digesteur. Les appareils utilisés dans cette partie expérimentale sont les suivants :

III-2-2-1. Les étuves

Pour la détermination de la matière sèche, une étuve de type Memmert UNB 500 (figure III-1) dont la température varie de 5 à 220 °C et dont le volume est de 108 L est utilisée, le substrat est mis dans un tube à essai dont la masse de l'ensemble a été déterminée auparavant avant d'être introduit dans l'étuve et porté à la température de 105 °C. 24 h après le tube est retiré et pesé à nouveau, la différence de masse correspond à la masse d'eau évaporée.

De même une autre étuve de type Memmert UF 260 (figure III-2) à convection ventilée, de volume 256 L et dont la température est portée à 505 °C est utilisée pour afin de connaître la teneur en matière organique et en matière minérale. La figure III-3 est une vue interne de l'étuve.

Le substrat obtenu après séchage à 105 °C est moulu avant d'être pesé et mis dans l'étuve où il restera 2 à 3 jours, on récupère une partie sous forme de cendre encore appelée matière minérale et la partie évaporée constitue la matière organique dont la masse est déterminée par pesée.



Figure III-1 : Etuve Memmert UNB 500 (105 °C)



Figure III-2 : Etuve Memmert UF 260 (505 °C)



Figure III-3 : Vue interne de l'étuve UF 260

III-2-2-2. Le broyeur ultra-centrifuge

Pour la détermination de la teneur en cendre et en matière organique, le substrat après avoir été séché à 105 °C est transformé en poudre. La transformation se fait à l'aide d'un broyeur ultra-centrifuge Retsch ZM 200 comme nous le montre les figures III-4 et III-5. Cet appareil a la capacité de transformer l'ensilage de maïs sec en poudre. Grâce à cette transformation, le produit obtenu est plus facilement utilisable du point de vue transformation en cendre mais aussi plus facile à analyser lorsqu'on prélève des échantillons. Le maïs sec en poudre obtenu est introduit dans l'étuve et porté à la température de 505 °C afin de déterminer sa teneur en MM.



Figure III-4 : Le broyeur centrifuge.



Figure III-5 : Vue interne du broyeur centrifuge.

III-2-2-3. Analyseur élémentaire CHNS/O

Pour la détermination de la composition centésimale massique des différents éléments que renferme le maïs, un analyseur élémentaire CHNS/O thermo recherche était utilisé. Les proportions de carbone, d'hydrogène, de soufre et d'azote ont été déterminées, tandis que celle de l'oxygène a été obtenue par différence. Environ 5 mg de maïs broyé ont été placés dans une capsule d'étain qui contenait un oxydant avant la combustion dans une réaction à 1000 °C. Cela a conduit à une réaction violente créant une condition où toutes les substances résistantes sont devenues complètement oxydées. Les produits obtenus ont été fait passer un cuivre de haute pureté à 500 °C afin de débarrasser le processus de tout oxygène qui n'était pas complètement consommé pendant le processus de combustion. Il est nécessaire d'utiliser des substances de haute pureté pendant l'analyse CHNS/O à des fins d'oxydation et d'éliminer les matériaux indésirables qui peuvent interférer avec les résultats des analyses. L'oxydation complète a été assurée en utilisant du trioxyde de tungstène et du cuivre en aval de la chambre de combustion. Les produits de combustion tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le dioxyde de soufre (SO₂) et le dioxyde d'azote (NO₂) obtenus après analyse ont tous été séparés par chromatographie en phase gazeuse et les éléments mesurés avec un détecteur de conductivité thermique.

III-2-2-4. Les digesteurs

Les digesteurs sont des prototypes de petite dimension d'environ 1000 cm³ munis d'un thermomètre afin de contrôler la température et aussi d'un agitateur pour homogénéiser le mélange. La digestion est de type mésophile car la température varie entre 25 et 27 °C. Les figures III-6, III-7 et III-8 montrent respectivement les digesteurs, l'agitateur et le thermomètre. Dans l'optique de mettre en relief l'effet de la co-digestion, dans l'un des digesteurs on introduit de l'ensilage et de la boue et dans l'autre la bouse de vache est ajoutée au mélange précédent. Le biogaz obtenu est récupéré dans des sacs isolés (figure III-9) qui seront acheminés vers le volumètre et le détecteur de gaz pour en déduire sa composition et le volume de gaz produit par l'ensilage et la mixture.



Figure III-6 : Digesteurs.



Figure III-7 : Agitateur.



Figure III-8 : Thermomètre.



Figure III-9 : Récupération du biogaz.

III-2-2-5. Le volumètre et l'analyseur de gaz.

Le biogaz obtenu est acheminé vers le volumètre tous les 3 jours afin de connaître son volume et aussi sa composition. L'analyseur de gaz et de biogaz multicanal ADOS est l'appareil utilisé pour la détermination de la composition en pourcentage de tous les gaz présents dans le biogaz. La figure III-10 illustre l'appareil donnant les pourcentages en CH₄, CO₂, H₂, O₂ et H₂S. De même l'appareil fournit le volume de biogaz contenu dans le ballon (figure III-11).



Figure III-10 : Mesure de la composition des différents gaz.



Figure III-11 : Détermination du volume et de la composition.

III-3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III-3-1. Présentation des résultats.

III-3-1-1. Détermination de la matière sèche et de la matière organique

La teneur en matière sèche et le pourcentage en matière organique des différents substrats ont été déterminés tandis que la composition centésimale massique a été obtenue uniquement pour l'ensilage de maïs. Par mesure de précaution une double mesure a été effectuée pour chaque substrat en utilisant deux tubes à essai. Le tableau III-1 présente les résultats obtenus avant et après séchages de tous les substrats.

Soit m_a la masse du tube à vide, m_b celle du tube contenant le substrat, m_c celle de l'ensemble après séchage à 105 °C et m_d celle de l'ensemble après calcination à 505 °C. La figure III-12 montre l'ensilage de maïs obtenu après séchage à 105 °C.

Tableau III-1 : Masse en gramme des différents substrats.

Substrat	m_a	m_b	m_c	m_d
Maïs	63,71	94,99	74,99	64,23
Maïs	61,07	94,54	72,97	61,63
Boue	68,17	83,34	73,27	68,74
Boue	63,81	80,43	69,11	64,41
Bouse	60,95	149,81	65,25	62,20
Bouse	58,26	125,80	62,56	59,33



Figure III-12 : Ensilage de maïs après séchage à 105 °C.

Le pourcentage en matière sèche (% MS) est donné par la formule suivante :

$$\% \text{ MS} = \frac{mc - ma}{mb - ma} \times 100 \quad (\text{III-1})$$

Le pourcentage en cendre ou matière minérale (% MM) se calcule de la manière suivante :

$$\% \text{ MM} = \frac{mc - md}{mc - ma} \times 100 \quad (\text{III-2})$$

Le pourcentage en matière organique sèche (% MOS) se déduit des autres pourcentages par la formule ci-dessous :

$$\% \text{ MOS} = \% \text{ MS} - \% \text{ MM} \times 0,01 \quad (\text{III-3})$$

Le tableau III-2 nous donne les résultats en MS, MM et MOS obtenus à l'issue du séchage et par application de leurs formules de détermination. La figure III-13 nous montre l'ensilage de maïs après broyage.

Tableau III-2 : Pourcentage en matière sèche, minérale et organique des substrats.

Substrat	% MS	Moyenne	% MM	Moyenne	% MOS	Moyenne
Maïs	36,06	35,8	95,39	95,3	34,40	34,1
	35,55		95,29		33,86	
Boue	33,62	32,8	88,82	88,7	29,86	29,1
	31,89		88,68		28,28	
Bouse	4,84	5,6	70,93	73	3,43	4,1
	6,37		75,12		4,79	



Figure III-13 : Ensilage de maïs moulu.

III-3-1-1. Composition centésimale de l'ensilage de maïs

La détermination de la composition centésimale a été décrite à la partie III-2-2-3. Pour plus de précisions, trois échantillons de maïs moulu de 5 mg chacun ont été analysés et les résultats obtenus sont révisés dans le tableau III-3. On note la forte présence de l'élément carbone sans doute due à l'effet de l'ensilage, suivie de l'élément oxygène et de l'hydrogène. L'azote et le soufre sont présents sous forme de trace et la présence de ces derniers projette l'apparition de sulfure d'hydrogène et d'ammoniac dans le biogaz comme le montre l'équation de Buswell.

Tableau III-3 : Pourcentage des différents éléments.

	% C	% O	% H	% N	% S
Echantillon 1	91,7	6,5	1,4	0,3	0,1
Echantillon 2	89,3	9,5	0,8	0,3	0,1
Echantillon3	89,5	9	1,1	0,3	0,1
Moyenne	90,2	8,3	1,1	0,3	0,1

III-3-1-3. Détermination de la quantité de biogaz et de méthane

Les tests de la digestion anaérobie se sont déroulés du 18 juin au 10 juillet 2014. Dans le digesteur 1 0,8 L de boue ont été introduit avec 150 g d'ensilage de maïs soit 51,15 g de MOS et dans le digesteur 2 le même volume de boue avec 129 g de maïs et 166 g de bouse soit 44 g de MOS en maïs et 6,8 g de bouse.

Des relevés sont effectués constamment afin d'avoir une idée sur la quantité de biogaz produite et la variation de la composition en fonction du temps. Les volumes en litre de biogaz, de méthane et la variation de température pour chaque digesteur sont consignés respectivement dans les tableaux III-4 et III-5. Les tableaux III-6 et III-7 donnent respectivement la variation de des différents composés du biogaz en fonction du temps pour les digesteurs 1 et 2.

Tableau III-4 : Volume de biogaz et de méthane en litre dans le digesteur 1

Date	Température °C	Volume de biogaz	Volume de méthane
18/06	25	0	0
23/06	26	37	20
26/06	26	40,5	24,7
30/06	26	42,8	25,7
10/07	27	49,5	29,7

Tableau III-5 : Volume de biogaz et de méthane en litre dans le digesteur 2.

Date	Température °C	Volume de biogaz	Volume de méthane
18/06	25	0	0
23/06	26	25,7	13,4
26/06	26	29,3	21,1
30/06	26	34,6	22,1
10/07	27	39,9	23,9

Tableau III-6 : Variation de la composition du biogaz dans le digesteur 1

Date	% CH ₄	% CO ₂	% O ₂	% H ₂	% H ₂ S
18/06	0	0	0	0	0
23/06	54	35	1,3	0,01	0
26/06	61	25	1,8	0	0
30/06	60	23	0	0	0
10/07	60	23	0	0	0

Tableau III-7 : Variation de la composition du biogaz dans le digesteur 2

Date	% CH ₄	% CO ₂	% O ₂	% H ₂	% H ₂ S
18/06	0	0	0	0	0
23/06	52	20	1,4	0,06	0,05
26/06	72	18	0	0	0
30/06	64	22	2,6	0	0
10/07	60	26	0,5	0	0

- Volume en litre normal

Dans les normes internationales le volume de biogaz est exprimé en litre normal ou normal liter qui est le volume ramené aux conditions normales de température et de pression CNTP. Pour obtenir le volume en litre normal on utilise la formule suivante :

$$NL=V(L) \frac{(P_b - P_{H_2O} + P_{gaz})}{1013(T_{gaz} + 273)} \quad (III-4)$$

NI: Volume en normal litre.

P_b: Pression atmosphérique.

P_{H₂O}: Pression d'eau donnée par la table de pression (tableau III-8)

P_{gaz}: Pression du gaz.

T_{gaz}: Température du gaz.

V(l) : Volume du gaz en litre.

Tableau III-8 : Table de pression d'eau en fonction de la température.

Température °C	Pression (hPa)	Température °C	Pression (hPa)	Température °C	Pression (hPa)
5	8,72	15	17,04	25	31,67
6	9,35	16	18,17	26	33,60
7	10,01	17	19,36	27	35,64
8	10,72	18	20,62	28	37,78
9	11,47	19	21,96	29	40,04
10	12,27	20	23,37	30	42,41
11	13,12	21	24,85	31	44,91
12	14,01	22	26,42	32	47,53
13	15,00	23	28,08	33	50,29
14	15,97	24	29,82	34	53,18

Les tableaux III-9 et III-10 donnent les volumes de biogaz et de méthane en normal litre dans respectivement les digesteurs 1 et 2.

Tableau III-9 : Volume de biogaz et de méthane en normal litre dans le digesteur 1.

Date	Température °C	Volume de biogaz	Volume de méthane
18/06	25	0	0
23/06	26	35.1	19
26/06	26	38.6	23.5
30/06	26	40.4	24.3
10/07	27	46.9	28.2

Tableau III-10 : Volume de biogaz et de méthane en normal litre dans le digesteur 2.

Date	Température °C	Volume de biogaz	Volume de méthane
18/06	25	0	0
23/06	26	24.4	12.7
26/06	26	28	20.1
30/06	26	32.7	21.7
10/07	27	37.8	23.4

- Volume de gaz corrigé

Le biogaz est constitué de plusieurs gaz dont les principaux sont le méthane et le dioxyde de carbone. Certains gaz y sont présents sous forme de trace c'est le cas du dihydrogène et du sulfure d'hydrogène qui est responsable de son odeur, d'autres n'étant pas considérés comme des gaz d'égout y sont présents par défaillance comme le diazote et le dioxygène. Ces gaz ne doivent pas en principe figurer dans la composition finale ils doivent donc être retirés du pourcentage final. Les tableaux III-11 et III-12 nous donne les volumes corrigés de méthane et de biogaz pour les deux digesteurs.

Soit

$$A = \%H_2 + \%CO_2 + \%CH_4 + \%H_2S$$

$$N_2 = 100 - (A + \%O_2)$$

$$\%CH_4 \text{ corrigé} = \frac{\%CH_4}{A} \times 100$$

$$\%CO_2 \text{ corrigé} = \frac{\%CO_2}{A} \times 100$$

$$\%H_2 \text{ corrigé} = \frac{\%H_2}{A} \times 100$$

=

$$\%H_2S_{\text{corrigé}} = \frac{\%H_2S}{A} \times 100$$

Tableau III-11 : Volume corrigé en normal litre de l'ensilage de maïs.

Date	Température °C	Volume de biogaz	Volume de méthane
18/06	25	0	0
23/06	26	34,64	21
26/06	26	37,9	26,3
30/06	26	40,4	29,5
10/07	27	46,4	33,9

Tableau III-12 : Volume corrigé en normal litre de la mixture.

Date	Température °C	Volume de biogaz	Volume de méthane
18/06	25	0	0
23/06	26	24	17,8
26/06	26	28	22,4
30/06	26	31,8	23,6
10/07	27	37,6	26,1

La production de biogaz à partir de l'ensilage de maïs fournit selon la littérature un volume de 21,4 L de méthane [Ver.10]. La figure III-14 donne la production de biogaz et de méthane en litre dans le digesteur 1 contenant essentiellement de l'ensilage de maïs et de boue. On note un volume de 49,5 L de biogaz et de 29,7 L de méthane. On constate que ce volume est supérieur à celui trouvé dans la littérature. Dans le digesteur 2 où on a ajouté au mélange précédent de la bouse de vache, on note un volume 39,9 L en biogaz et de 23,9 L en méthane comme illustré par la figure III-15.

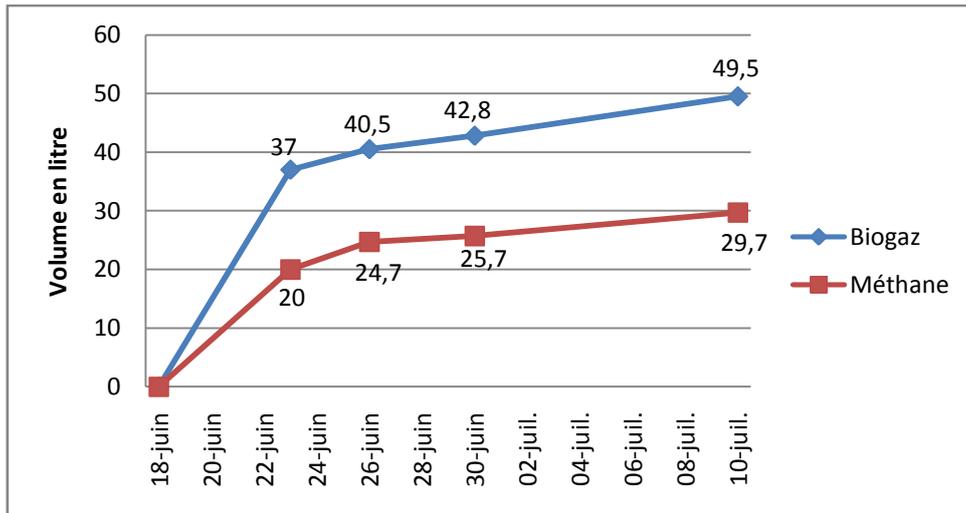


Figure III-14 : Production de biogaz en litre dans le digesteur 1.

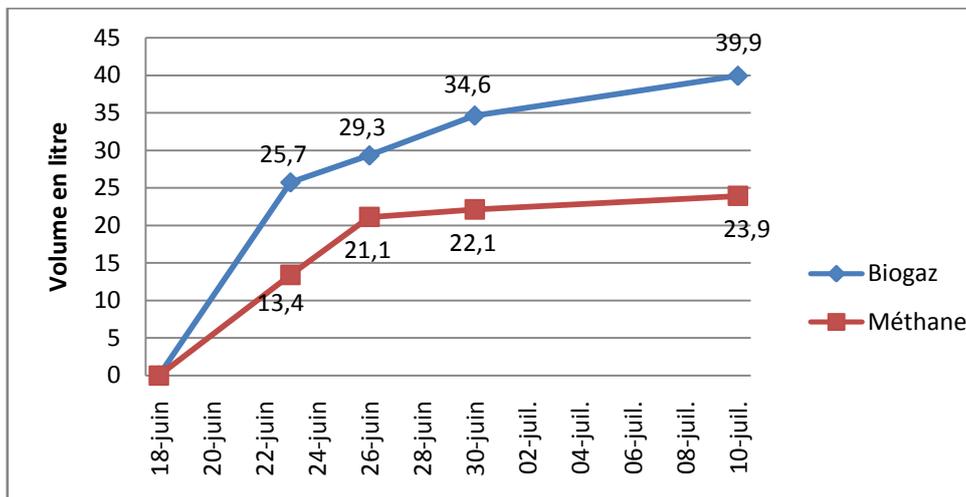


Figure III-15 : Production de biogaz en litre dans le digesteur 2.

Dans la même lancée, les figures III-16 et III-17 donnent les volumes de biogaz et méthane en litre normal dans respectivement les digesteurs 1 et 2. Les volumes ramenés en NL dans le digesteur 1 sont de 46,9 en biogaz et 28,2 en méthane pour 37,8 et 23,4 dans le digesteur 2.

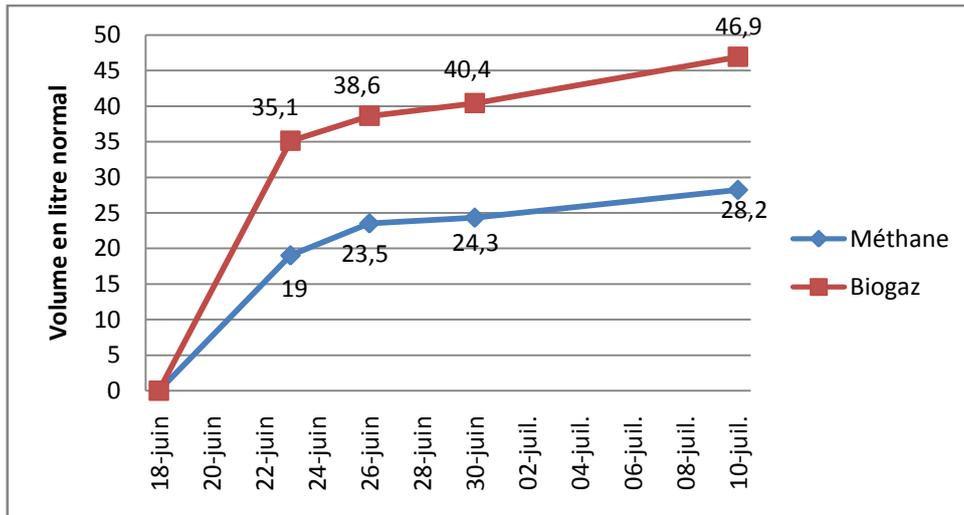


Figure III-16 : Production de biogaz en litre normal dans le digesteur 1.

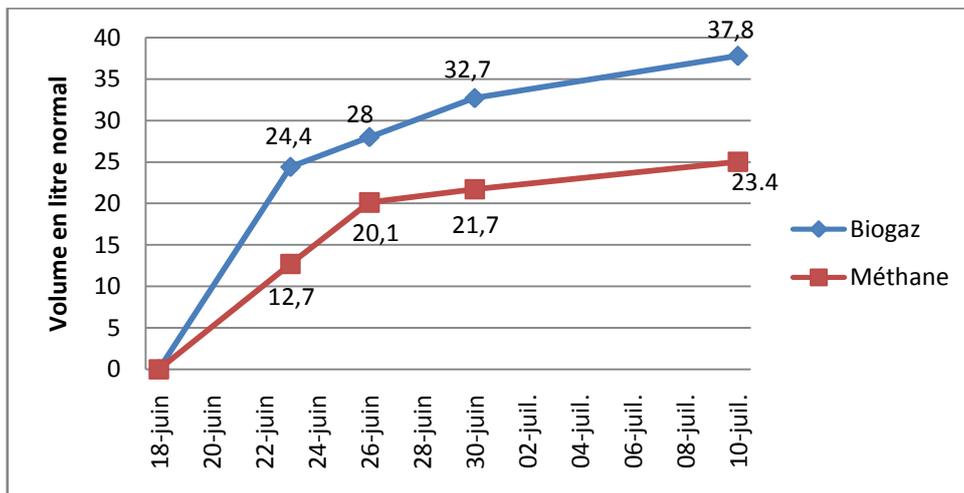


Figure III-17 : Production de biogaz en litre normal dans le digesteur 2.

On constate que les volumes de gaz sont plus importants dans le digesteur 1 que dans 2. Les figures III-18 et III-19 donnent des comparatifs entre respectivement les volumes de biogaz et de méthane en NL. On note un écart beaucoup plus important dans le cas du biogaz (46,9 contre 37,8) soit un volume de 9,1 NL. Par contre l'écart entre les volumes de méthane est de 4,8 NL. Ceci montre que le digesteur 1 fournit plus de gaz mais le pourcentage en méthane est plus important dans le digesteur 2.

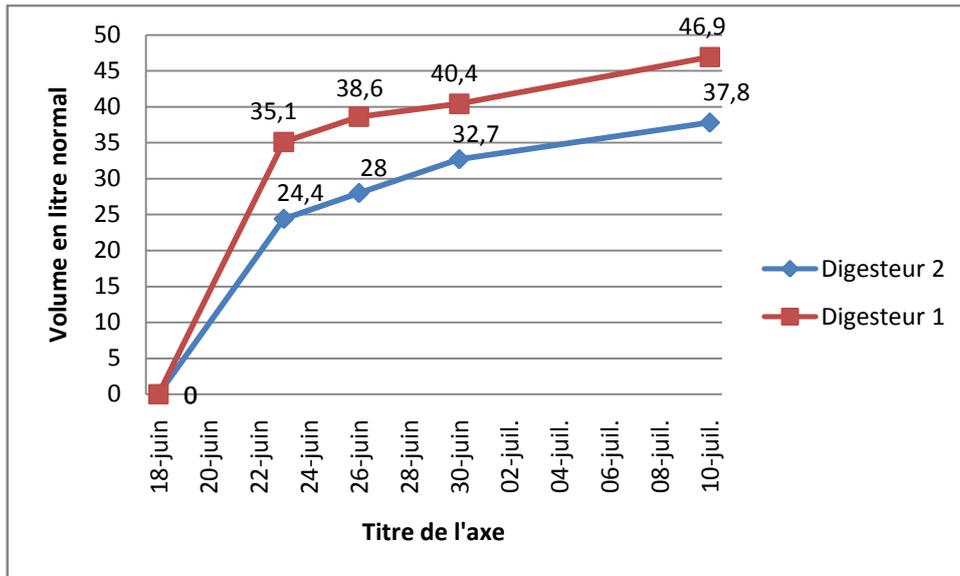


Figure III-18 : Comparatif des volumes de biogaz des deux substrats.

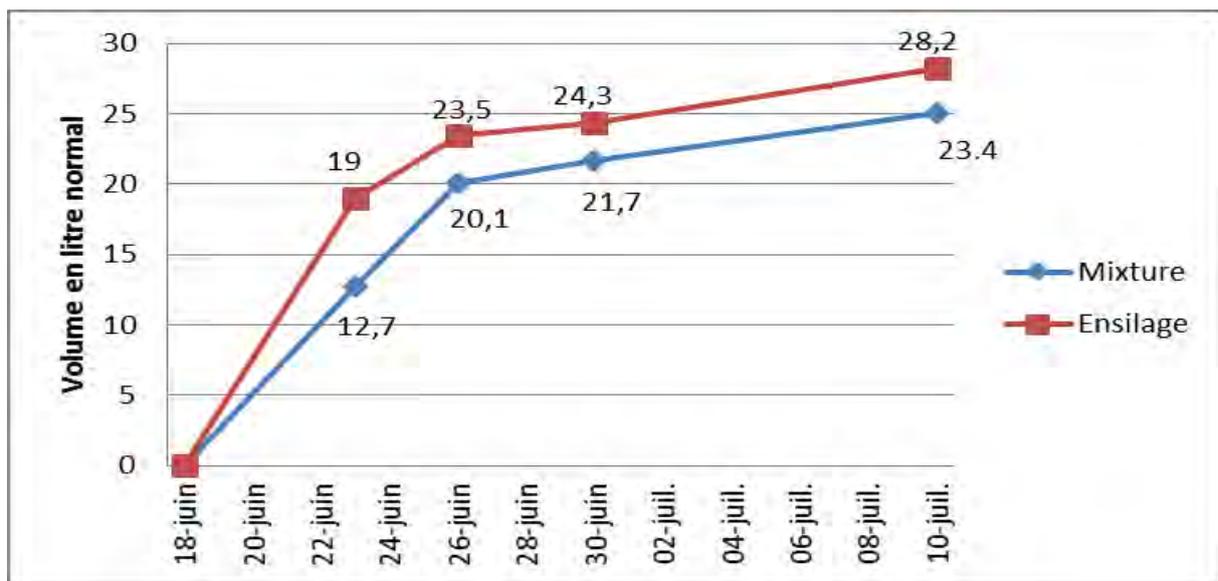


Figure III-19 : Comparatif des volumes de méthane des deux substrats.

En supprimant les éléments de traces (N_2 et O_2) on obtient le volume corrigé de biogaz. La figure III-20 donne le volume corrigé de méthane obtenu dans le digesteur où l'écart est plus grand dans le digesteur 2 (figure III-21). Ceci s'explique par le fait que les éléments de trace sont plus présents dans le digesteur 2 que dans 1.

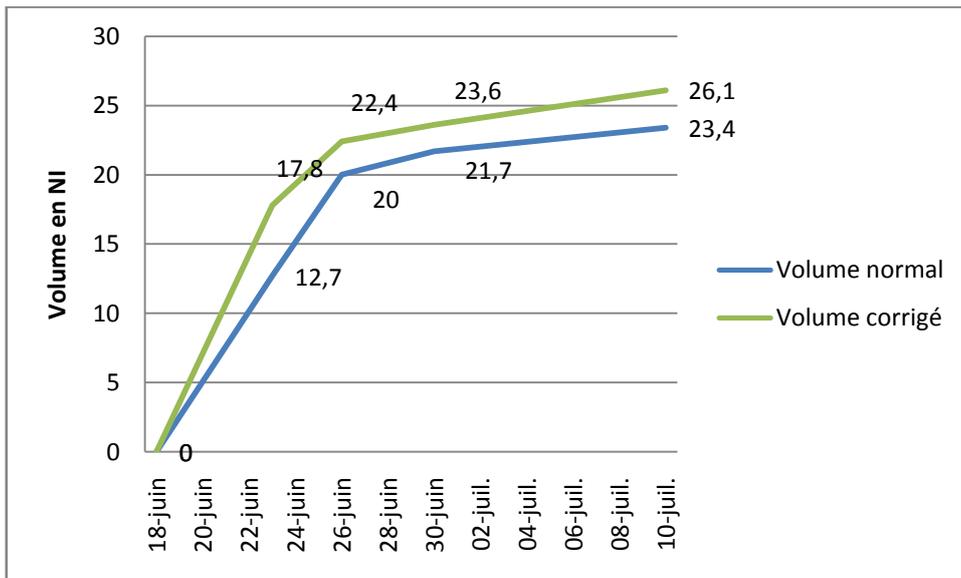


Figure III-20 : Volume corrigé de méthane dans le digesteur 1.

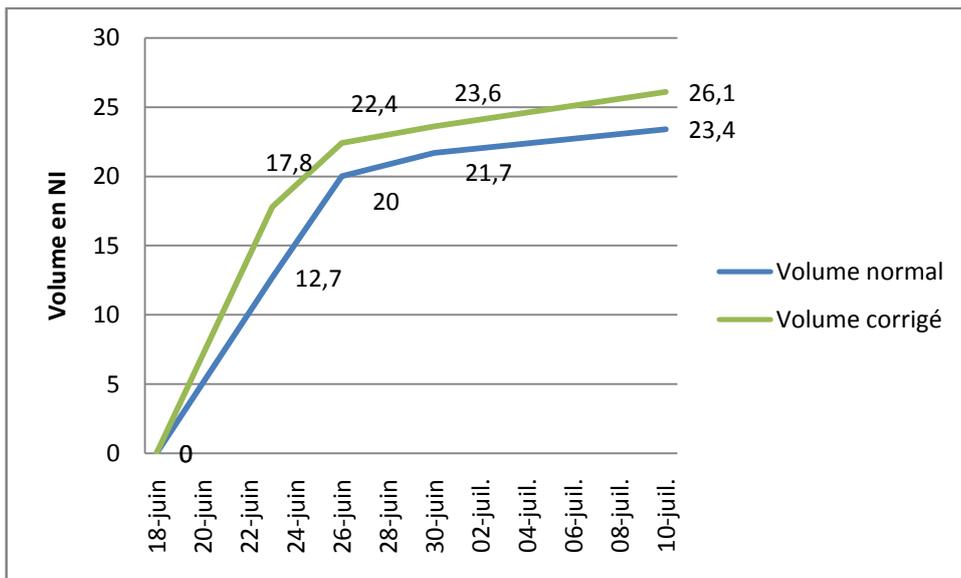


Figure III-21 : Volume corrigé de méthane dans le digesteur 2.

La comparaison des volumes de méthane par contre donne un volume de 6,8 NL ce qui consolide toujours une teneur en méthane plus élevée dans le digesteur 2 que dans 1.

III-3-2. Discussions

III-3-2-1. Production de biogaz à partir de l'ensilage de maïs et la boue.

Le **tableau III-4** et la **figure III-14** montrent les volumes de biogaz et de méthane en litre obtenus l'issu des 3 semaines de test. L'ensilage de maïs a produit 49,5 l de biogaz dont 29,7 l de méthane avec une teneur de 59 % en CH₄. Quant aux valeurs ramenées aux normes internationales c'est-à-dire en litre normal les résultats sont donnés par le **tableau III-9** et la **figure III-16** où la production est de 46,9 NI en biogaz et 28,2 NI en méthane. Les volumes corrigés de biogaz ont fourni une quantité plus importante en méthane car on ne prend pas en compte certains gaz qui ne sont pas considérés comme devant figurer dans la composition finale du biogaz ainsi on obtient 46,4 NI de biogaz et 33,9 NI de méthane. Pour un temps de rétention de 22 jours, le pourcentage en méthane varie de 54 % à 61 % les 3 premiers jours avant de se stabiliser à 60 % pour le reste des tests. Les caractéristiques des deux substrats que sont le pourcentage en matière sèche, en matière organique sèche et en composition centésimale massique sont présentées par les tableaux **III-2** et **III-3**. Le maïs a une teneur en MS de 36 %, 34 % en MOS et contient 90,2 % en carbone. Le carbone est le principal constituant du méthane et représente 75 % de sa masse, sa forte présence dans le substrat de départ permet d'obtenir un bon rendement en biogaz et en méthane en particulier. La MOS ou solide volatile représente la quantité de matière dégradable du substrat composée essentiellement de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. La haute teneur en MOS d'un substrat végétal dépourvu de lignine donne une production élevée de méthane. Les résultats sur les caractéristiques expliquent le bon rendement en biogaz et en méthane d'une part. Le maïs est le substrat le plus utilisé dans la large gamme des cultures énergétiques donc celui qui a le plus de publications. On note des écarts importants entre les résultats obtenus qui vont du simple au double. Ces différents résultats peuvent s'expliquer par le fait que ce dernier dispose de plusieurs variétés, du stade de la récolte, du mode de traitement et des conditions expérimentales. 80 % des produits méthanisables en Allemagne sont constitués par le maïs du fait son rendement élevé en biogaz par tonne de matière fraîche et par hectare. Pour son utilisation, le maïs est souvent ensilé avant d'être introduit dans le digesteur car il permet d'augmenter le rendement. Selon Chandra [**Cha.12**], la plante de maïs a un potentiel de 338 l/kg MOS soit un volume de 17,2 l de gaz. Cette quantité peut être améliorée par le biais de l'ensilage avant la méthanisation. L'ensilage a un effet positif sur la production de maïs car elle peut améliorer le rendement jusqu'à 11 % [**Her.11**]. D'après Herrmann, la production de méthane par le maïs est comprise entre 342 et 378 NI/kg MOS. Asam [**Asam.11**] a montré que l'ensilage de maïs produit une quantité de méthane de 680 l/kg de substrat soit 236 l/kg MOS. Il a prouvé que l'ensilage fournit 289 NI/kg MOS en CH₄ correspondant à un volume de 14,7 NI pour 51,15 g de MOS contre 225 NI/kg MOS pour le maïs vert non traité soit une baisse de 25 %.

D'après Vervaeren [Ver.10] le potentiel en méthane varie de 280 à 420 l/kg MOS pour le maïs et le sorgho soit un maximum de 21,4 l pour une quantité de 51,15 g de MOS et de 230 à 380 l/kg MOS pour les autres céréales ensilées. Selon Amon, la quantité de méthane produite par le maïs au stade de lait varie de 312 à 365 NI/kg MOS contre 268-286 NI pour le maïs en pleine maturité. Il soutient que l'ensilage permet d'augmenter la quantité de méthane de 25%. Nos valeurs obtenues lors de notre expérience sont au-dessus de celles trouvées dans la littérature. La valeur maximale trouvée dans la littérature pour une quantité en MOS équivalente à celle introduite dans notre digesteur est de 21,4 l en méthane, nous avons pu obtenir un volume de 29,7 l. La seule explication possible à cet écart observé s'avère être l'utilisation de la boue à la place de l'eau. La boue est connue pour être un bon substrat et d'avoir un bon potentiel méthanogène atteignant parfois 70 à 80 %.

Le **tableau III.2** nous montre les résultats de l'analyse de ce substrat où on constate qu'elle a des valeurs proches de l'ensilage de maïs en MS (31,8) et en MOS (28,28) ainsi son utilisation à la place de l'eau peut permettre d'obtenir une valeur élevée de biogaz et de méthane. C'est un substrat riche en protéides et en lipides représentant 30 à 40 % de la matière sèche. Eva a trouvé une quantité de méthane de 310 Ncm³/g SV à partir de la boue dans les conditions mésophiliques, valeur qui avoisine celle de l'ensilage de maïs [Eva.17]. Si certains soutiennent que l'eau est fondamentale dans une digestion anaérobique, nos expériences ont prouvé le contraire en se passant d'elle au profit de la boue ce qui nous a valu un meilleur rendement en biogaz et en méthane.

III-3-2-2. Production de biogaz par co-digestion

Dans le digesteur 2 où la bouse est mélangée à l'ensilage de maïs, les volumes de biogaz et de méthane obtenus sont régis dans les **tableaux III.5, III.10 et III.12** où on trouve respectivement les volumes en litre (39,9 et 23,9), en normaux litres (37,8 et 23,4) et corrigés (37,6 et 26,1).

Même schéma pour les **figures III.15, III.17, III.21 et III.23**, le pourcentage en méthane a atteint 52 % puis est passé à 72 % en 3 jours avant de se stabiliser à 60 % d'où une valeur moyenne de 62 %. La bouse de vache utilisée dans nos expériences a une teneur de 4,1 % en MOS et 5,6 % en MS. Plusieurs études ont montré que la co-digestion permet un meilleur rendement en stabilisant le milieu. Un avantage de la co-digestion peut être la possibilité d'obtenir un meilleur rapport C / N, un meilleur équilibre des nutriments, une rapide dégradation des substrats permettant ainsi une augmentation significative du biogaz produit.

La co-digestion anaérobique déchets avec le fumier de vache pourrait améliorer le processus de biodégradation résultant d'un rendement en méthane supérieur du fait de la cumulation des longues chaînes d'acide gras chez les lipides.

Le déséquilibre nutritif des D.A. est surmonté par la co-digestion avec d'autres déchets de la biomasse (bouse de vache, eaux usées municipales) permettant d'obtenir un ratio C/N plus appropriée et une concentration appropriée des métaux [Zha14]. La bouse de vache dans les conditions mésophiles (38° C) a fourni 166,3 NI de méthane/kg MOS selon Amon. Braun a trouvé que la fourchette de méthane est comprise entre 140 et 266 NI/kg MOS pour la bouse. Les matières avec un rapport C/N élevé peuvent être mélangées avec ceux de faible rapport C/N afin de ramener le ratio du mélange à un rapport C/N souhaitable [Cha.12]. De la même façon en faisant varier la proportion de chaque substrat, on trouve un niveau plus élevé de gaz avec les rapports fumier + maïs / maïs 40/60, 50/50 et 60/40 respectivement (221, 234 et 259 l/kg MOS) et (48, 52, et 51 % de méthane) soit une quantité maximale de 13 L pour 50 g MOS [Fro.14]. Eva a trouvé une quantité de méthane de 318 Ncm³/g MOS en combinant la boue aux algues contre 310 Ncm³/g pour la boue utilisée elle seule comme substrat soit une hausse de 8 % en méthane. Nos résultats obtenus dans le domaine de la co-digestion que sont 39,9 l de biogaz et 23,9 l de méthane sont aussi supérieurs à ceux trouvés dans la littérature. La quantité de maïs introduite est de 44 g de MOS contre 6,8 g pour la bouse soit un ratio 80/20. En jouant sur ce ratio c'est-à-dire en augmentant la quantité de bouse on peut s'attendre à de meilleurs résultats comme l'a montré Froseth. On constate qu'en remplaçant l'eau par la boue la quantité de méthane peut être améliorée de 10 L et la teneur en méthane de 3 %. Par contre, en confrontant les résultats de la co-digestion et ceux de la digestion normale. Il en ressort une conformité du fait que la co-digestion fournit moins de gaz que l'utilisation d'un seul substrat comme le montre les figures comparatives III.18, III.19, III.24 et III.25 mais permet d'augmenter la teneur en méthane qui est de 62 % pour la co-digestion contre 59 % pour l'ensilage de maïs.

III-4. CONCLUSION

Cette étude expérimentale montre la possibilité d'augmenter le rendement en biogaz et en méthane par le biais de la co-digestion et la substitution de l'eau au profit de la boue. Grâce à cette méthode nous sommes parvenus à obtenir des résultats satisfaisants qui dépassent ceux trouvés dans la littérature de 8,5 l. Nous avons aussi pu confirmer la thèse soutenue par plusieurs auteurs à savoir l'effet de la co-digestion sur l'augmentation du rendement en méthane. Nous avons aussi vu l'intérêt de l'utilisation de l'ensilage qui permet une meilleure dégradation et donc d'accélérer un peu le processus. On a pu obtenir de bons résultats en se passant de l'eau dans la digestion anaérobie, une substance que certains auteurs jugeaient comme étant fondamentale.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La production de biogaz a suscité ces dernières années un regain d'intérêt du fait de la possibilité d'utiliser des sources d'énergies renouvelables. Ainsi les travaux présentés dans cette thèse font l'objet de l'impact du changement climatique sur la production de biogaz en utilisant les cultures énergétiques comme substrat. Nous avons vu l'utilisation des cultures énergétiques pour la production de biogaz qui, de nos jours, est l'un des domaines d'utilisation les plus répandus surtout dans les pays développés où une grande partie des terres cultivables est allouée à cette filière. Nous avons montré principalement les critères de choix pour ces cultures que sont essentiellement le potentiel méthanogène, la variété, le stade de la récolte et le prétraitement. Nous avons montré par la suite l'impact du changement climatique sur ces cultures énergétiques à savoir la concentration de CO₂ et l'élévation de température. Force est de constater que les valeurs de ces paramètres ne cessent de croître surtout celles du CO₂ qui sont projetées à doubler. Si l'élévation de CO₂ peut être considérée comme bénéfique à la croissance de la plante elle diminue par contre la concentration des éléments de bases fondamentaux notamment la teneur en protéines et en minéraux. L'élévation de température par contre est néfaste à la croissance de la plante et cause aussi une baisse de la teneur de certains éléments nutritifs comme les minéraux. Leurs effets combinés n'entraînent pas une compensation des pertes occasionnés individuellement. Ainsi l'utilisation des cultures énergétiques pour produire du biogaz est dans l'avenir menacée du fait que les éléments clés dont les microorganismes ont besoin pour produire ce dernier sont négativement atteints par l'effet du changement climatique notamment. C'est le cas des minéraux et des protides dont certains soutiennent qu'ils sont responsables de la production de méthane. Face à cette menace qui pèse sur l'avenir des cultures énergétiques, des solutions pour faire face à ce qui peut être un frein à leur utilisation font l'objet de recherche.

Si certains proposent la rotation des cultures, d'autres l'utilisation de fertilisation, nous nous sommes orientés sur la co-digestion qui est déjà connue pour être une méthode d'amélioration de la teneur en méthane. Nous avons essayé de remplacer l'eau qui est considérée comme un élément clé de la digestion par la boue, un substrat doté d'un bon potentiel méthanogène et ceci a conduit à d'excellents résultats aussi bien en volume de biogaz qu'en teneur de méthane.

Là où la littérature fournit 420 l/kg MOS soit un volume de 21.4 l en méthane nous avons pu atteindre 29 l avec l'ensilage de maïs. De même avec la co-digestion on a pu atteindre un pourcentage en méthane de 62 % soit une hausse de 3 %. Ainsi l'utilisation de cette méthode peut aider à diminuer les dégâts que peut causer l'effet néfaste du changement climatique.

Le sorgho figure parmi les céréales les moins menacées par le changement climatique, il peut apparaître à l'avenir comme le substrat adéquat de la famille des cultures énergétiques.

Dans cette partie s'ouvrent des perspectives de recherches à savoir :

→ L'étude pratique de la production de biogaz d'une culture énergétique ayant subi l'effet de l'élévation de température afin de consolider nos conclusions sur l'effet de la température sur la production de biogaz à partir des cultures.

→ L'étude pratique de la production de biogaz d'une culture énergétique ayant subi l'effet de l'élévation de CO₂ pour confirmer la baisse effective du volume de biogaz avancée par nos recherches.

→ L'étude pratique de la production de biogaz d'une culture énergétique ayant subi les effets combinés de l'élévation de température et de CO₂.

→ L'étude pratique de la production de biogaz d'une culture énergétique ayant subi la technique de rotation de culture ou de fertilisant comparer les résultats obtenus avec les nôtres afin de voir la méthode la plus efficace.

→ Reprendre notre partie expérimentale en faisant varier les rapports des différents substrats.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BIBLIOGRAPHIE

[Abe.16] Abebe, A., Pathak, H., Singh, S.D., Bhatia, A., Harit, R.C. et Vinod, K. (2016). Growth, yield and quality of maize with elevated atmospheric carbon dioxide and temperature in north-west India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 218, 66–72.

[Alfa.14] Alfa, I. M., Dahunsi, S. O., Iorhemen, O. T., Okafor, C. C. et Ajayi S. A. (2014). Comparative evaluation of biogas production from poultry droppings, cow dung and Lemon grass. *Bioresource Technology*, 157, 270-277.

[Ali.11] Alioune Senghor 2011. Techniques de production de biogas: Mémoire de master UCAD.

[Amo.07] Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Karl, M. et Gruber, L. (2007). Biogas production from maize and dairy cattle manure: Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 173-182.

[Asa.11] Asam, Z., Poulsen, T. G., Nizami, A., Rafique, R., Kiely, G. et Murphy J. D. (2011). How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plant. *Applied Energy*, 88, 2013-2018.

[Bar.08] Barnabas, B., Jager, K. et Feher, A. (2008). The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell and Environment*, 31, 11–38.

[Ben.14] Benloch-Gonzalaz, M., Bochicchio, R., Berger, Y., Bramley, H. et Palta, J. A. (2014). High temperature reduces the positive effect of elevated CO₂ on wheat root system growth. *Field Crops Research*.

[Boe.09] Boe, K. Et Angelidieki, I. (2009). Serial CSTR digester configuration for improving biogas production from manure. *Water Research*, 43, 166-172.

[Cha.12] Chandra, R., Takeuchi, H. et Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 1462-1476.

[Che.14] Cheng, S., Li, Z., Mang, H., Huba, E., Gao, R. et Wang, X. (2014). Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 387-400.

[Dam.10] Damatta, F. M., Grandis, A., Arenque, B. C. et Buckeridge, M. S. (2010). Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, 43, 1814-1823.

[Dem.11] Demirel, B. et Scherer, P. (2011). Trace element requirements of agricultural biogas digesters during biological conversion of renewable biomass to methane. *Biomass and Bioenergy*, 35, 992-998.

- [Dha.97]** Dhakhwa, G., Campbell, C. L., Leduk S. K. et Cooter S. G. (1997). Maize growth: assessing the effects of global warming and CO₂ fertilization with crop models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87, 253-272.
- [Dji.99]** Dijkstra, P., Schapendonk, A.H.C.M., Groenwald, K.O., Jansen, M. et Geijn, S.C. (1999). Seasonal changes in the response of winter wheat to elevated atmospheric CO₂ concentration grown in open-top chambers and field tracking chambers. *Global Change Biology*, 5, 563–576.
- [Eva.17]** Eva, T., Jesper, O., Sebastian, S., et Emma, N. (2017). Biogas from Co-digestion of Sewage Sludge and Microalgae. *Energy Procedia*, 105, 1037 – 1042.
- [Fre.11]** Frenck, G., et Linden, L., Mikkelsen, T. N., Brix, H. et Jorgensen, R. B. (2011). Increase CO₂ not compensate negative effects on yield caused by higher temperature and O₃ in Brassica napus L. *European Journal of Agronomy*, 35, 127-134.
- [Fro.14]** Froseth, R. B., Bakken, A. K., Bleken, A. K., Riley, H., Pommeresche, H., Kristensen, K. T. et Hansen, S. (2014). Effect of green manure herbage management and its digestate from biogas production on barley yield, N recovery, soil structure and earthworm populations. *European Journal of Agronomy*, 52, 90-102.
- [Goh.13]** Gohari, A., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Bavani, A. M., Wang, D. et Madani, K. (2013). Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*, 442, 405-419.
- [Gra.14]** Grant, K., Kreyling, J., Dienstbach, L. F. H., Beierkuhnlein, C. et Jentsch, A. (2014). Water stress due to increased intra-annual precipitation variability reduced forage yield but raised forage quality of temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 186, 11-22.
- [Hav.84]** Havelka, U.D., Wittenbach, V. A. et Boyle, M. G. (1984). CO₂ enrichment effects on wheat yield and physiology. *Crop Science*, 24, 1163–1168.
- [Her.11]** Herrman, C., Heiermann, M. et Idler, C. (2011). Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. *Bioresource Technology*, 102, 5153–5161.
- [Hil.07]** Igoni, A. H., Ayotamuno, M. J., Eze, C. L., Ogazi, S. O. T. et Probert, S. T. (2007). Designs of anaerobic digester for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy*, 8, 430-438.
- [Hog.08]** Högy, P. et Fangmeier, A. (2008). Effects of elevated atmospheric CO₂ on grain quality of wheat. *Journal of Cereal Science*, 48, 580-591.

[Hog.10] Högy, P., Matthias, K., Niehaus, K., Franzaring, J. et Fangmeier, A. (2010). Effect of atmospheric CO₂ enrichment on biomass, yield and low molecular weight metabolites in wheat grain. *Journal of Cereal Science*, 52, 215-220.

[Hol.09] Holm-Nielsen, J. B., Seadi, T. A. et Popiel, P. O. (2009). The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresource Technology*, 100, 5478-5484.

[Jab.02] Jablonski, L. M., Wang, X. et Peter S. C. (2002). Plant reproduction under elevated CO₂ conditions: a meta-analysis of reports on 79 crop and wild species. *New Phytologist*, 156, 9–26.

[Jia.13] Jiang, X., Hayashi, J., Sun, Z. Y., Yang, L., Tang, Y. Q., Oshibe, H., Osaka, N. et Kida, K. (2013). Improving biogas production from protein-rich distillery wastewater by decreasing ammonia inhibition. *Process Biochemistry*, 48, 1778-1784.

[Kha.09] Khan, S. A., Kumar, S., Hussain, M. Z. et Kalra, N. (2009). Climate Change, Climate Variability and Indian Agriculture: Impacts Vulnerability and Adaptation Strategies. *Climate Change and Crops, Environmental Science and Engineering*, DOI 10.1007/978-3-540-88246-62, C Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[Kim.07] Kim, S., Gitz, D. S., Sisher, R. C., Baker, J. T., Timlin, D. J. et Reddy, V. R. (2007). Temperature dependence of growth, development, and photosynthesis in maize under elevated CO₂. *Environmental and Experimental Botany*, 61, 224-236.

[Kno.12] Knox, J., Hess, T., Daccache, A. et Wheeler, T. (2012). Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia. *Environmental Research Letters* 7, 034032 (8pp). <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/7/3/034032>.

[Kri.07] Krishnan, P., Swain, D. K., Bhaskar, B. C., Nayak, S. K. et Dash, R. N. (2007). Impact of elevated CO₂ and temperature on rice yield and methods of adaptation as evaluated by crop simulation studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 122, 233-242.

[Li.11] Li, X., Takahashi, T., Suzuki, N. et Kaiser, H. M. (2011). The impact of climate change on maize yields in the United States and China. *Agricultural Systems*, 104, 348-353.

[Lu.13] Lu, D., Sun, X., Yan, F., Wang, X., Xu, R. et Lu, W. (2013). Effects of high temperature during grain filling under control conditions on the physicochemical properties of waxy maize flour. *Carbohydrate Polymers*, 98, 302-310.

[Lob.08] Lobell, D. B., Burke, M. B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M. D., Falcon, W. D. et Naylor, R. N. (2008). Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science*, 319, 607–610.

[Mar.14] Marti-Herrero, J., Chipana, M., Cuevas, C., Paco, G., Serrano, V., Zymla, B., Heising, K., Sologuren, J. et Gamarra, A. (2014). Low cost tubular digester as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. *Renewable Energy*, 71, 156-165.

[Mas.01] Masri, M. R. A. (2001). Changes in biogas production due to different ratios of some animal and agricultural wastes. *Bioresource Technology*, 77, 97-100.

[Mer.06] Mera, R. J., Niyogi, D., Buol, G. S., Wilkerson, G. G. et Semazzi, F. H. M. (2006). Potential individual versus simultaneous climate change effects on soybean (C3) and maize (C4) crops: An agrotechnology model based study. *Global and Planetary Change*, 54, 163-182.

[Mye.14] Myers, S. S., Zanobetti, A., ItaiKloog, Huybers, P., Leakey, A. D. B., Bloom, A. J., Carlisle, E., Dietterich, L. H., Fitzgerald, G., Hasegawa, T., Holbrook, N. M., Nelson, R. L., Ottman, M. J., Raboy, V., Sakai, H., Sartor, K. A., Schwartz, J., Seneweera, S., Tausz, M. et Usui, Y. (2014). Macmillan Publishers Limited. All rights reserved.

[Nal.97] Gunaseelan, V. N. (1997). Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. *Biomass and Bioenergy*, 13, 83-114.

[Olu.14] Olugasa, T. T., Odesola, I. F. et Oyewola, M. O. (2014). Energy production from biogas: A conceptual review for use in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 770-776.

[ONAS.13] Rapport final biogaz 2013.

[Osl.10] Oslaj M., Mursec, B. et Vindis, P. (2010). Biogas production from maize hybrids. *Biomass and Bioenergy*, 34, 1538-1545.

[Oub.09] Oubeid Abdullah, 2009. Production de biogaz: étude théorique et expérimentale. Mémoire de Master UCAD.

[Por.09] Porteous, F., Hill, J., Ball, A. S., Pinter, P. J., Kimball, B. A., Wall, G. W., Adamsen, F. J., Hunsaker, D. J., Lamorte, R. L., Leavitt, S. W., Thompson, T. L., Matthias, A. D., Brooks, T. J. et Morris, C. F. (2009). Effect of Free Air Carbon dioxide Enrichment(FACE) on the chemical composition and nutritive value of wheat grain and straw. *Animal Feed Science and Technology*, 149, 322-332.

[Pro.09a] Prochnow, A., Heiermann, M., Plochl, M., Linke, B., Idler, C., Amon, T. et Hoobs, P. J. (2009). Bioenergy from permanent grassland. A review: 1. Biogas. *Bioresource Technology*, 21, 4931.

[Pro.09b] Prochnow, A., Heiermann, M., Plochl, M., Linke, B., Idler, C., Amon, T. et Hoobs, P. J. (2009). Bioenergy from permanent grassland. A review: 2. Combustion. *Bioresource Technology*, 21, 4935.

- [Qiao.11]** Qiao, W., Yan, X., Ye, J., Sun, Y., Wang, W. et Zhang, Z. (2011). Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. *Renewable Energy*, 36, 3313-3318.
- [Rah.12]** Raheman, H. et Mondal, S. (2012). Biogas production potential of jatropha seed cake. *Biomass and Bioenergy*, 37, 25-30.
- [Rog.98]** Rogers, G. S., Gras, P. W., Batey, I. L., Milham, P. J., Payne, L. et Conroy, J. P. (1998). The influence of atmospheric CO₂ concentration on the protein, starch and mixing properties of wheat flour. *Australian Journal of Plant Physiology*, 25, 387-393.
- [Roy.12]** Roy, K. S., Bhattacharyya, P., Neogi, S., Rao, K. S. et Adhya, T. K. (2012). Combined effect of elevated CO₂ and temperature on dry production, net assimilation rate, C and N allocations in tropical rice. *Field Crops Research*, 139, 71-79.
- [Rur.14]** Rurinda, J., Mapfumo, P., Wijk, M. T., Mtambanengwe, F., Rufino, M. C., Chikowo, R. et Giller, K. E. (2014). Comparative assessment of maize, finger millet and sorghum for household food security in the face of increasing climatic risk. *European Journal of Agronomy*, 55, 29-41.
- [Sat.14]** Satapathy, S. S., Swain, D. K. et Herath, S. (2014). Field experiments and simulation to evaluate rice cultivar adaptation to elevated carbon dioxide and temperature in sub-tropical India. *European journal of Agronomy*, 54, 21-33.
- [Sen.11]** Seneweera, S., Blakeney, A., Milham, P., Basra, A. S., Barlow, E. W. R. et Conroy, J. (1996). Influence of rising atmospheric CO₂ and phosphorus nutrition on the grain yield and quality of rice (*Oryzasativacv. Jarrah*). *Cereal Chemistry*, 73, 239-243.
- [Spi.06]** Spiertz, J. H. J., Hamer, R. J., Xu, H., Primo-Martin, C., Don, C. et Putten, P. E. L. (2006). Heat stress in wheat (*Triticum aestivum* L.): Effects on grain growth and quality traits. *European Journal of Agronomy*, 25, 89-95.
- [Sri.10]** Srivastava, A., Kumar, S. N. et Aggarwal, P. K. (2010). Assessment on vulnerability of sorghum to climate change in India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138, 160-169.
- [Tau.08]** Taub, D. R., Miller, B. et Allen, H. (2008). Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 14, 565-575.
- [Teg.14]** Tegeder, M., Lemmer, A. et Oechsner, H. (2014). Enhancement of methane production with horse manure supplement and pretreatment in a full-scale biogas process. *Energy*, 73, 523-530.
- [Ter.05]** Terao, T., Miura, S., Yanagihara, T., Hirose, T., Nagata, K., Tabuchi, H., Kim, H. Y., Lieffering, M., Okada, M. et Kobayashi, K. (2005). Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 1861-1868.

- [Thi.12]** Thitisaksaku, M., Jiménez, R. C., Arias, M. C. et Beckles, D. M. (2012). Effects of environmental factors on cereal starch biosynthesis and composition. *Journal of Cereal Science*, 56, 67-80.
- [Tia.12]** Tian, Y., Chen, J., Chen, C., Deng, A., Song, Z., Zheng, C., Hoogmoed, W. et Zhang, W. (2012). Warming impacts on winter wheat phenophase and grain yield under field conditions in Yangtze Delta Plain, China. *Field Crops Research*, 134, 193-199.
- [Ung.86]** Unger, P. W., Steiner, J. L. et Jones, O. R. (1986). Response of conservation tillage sorghum to growing season precipitation. *Soil and Tillage Research*, 7, 291-300.
- [Ver.10]** Vervaeren, H., Hostyn, K., Ghekiere, G. et Willems, B. (2010). Biological ensilage additives as pretreatment for maize to increase the biogas production. *Renewable energy*, 35, 2089-2093.
- [Voi.01]** Voivontas, D. (2012). Assessment of biomass potential for power production: a GIS based method. *Biomass and Bioenergy*, 20, 101-112.
- [Wag.13]** Wagner, A. O., Lins, P., Malin, C., Reitschuler, C. et Illmer, P. (2013). Impact of protein, lipid and cellulose-containing complex substrates on biogas production and microbial communities in batch experiments. *Science of the Total Environment*, 458-460, 256-266.
- [Wah.13]** Waha, K., Müller, C. et Rolinski, S. (2013). Separate and combined effects of temperature and precipitation change on maize yields in sub-Saharan Africa for mid- to late-21st century. *Global and Planetary Change*, 106, 1-12.
- [Wilc.14]** Wilcox, J. et Makowski, D. (2014). A meta-analysis of the predicted effects of climate change on wheat yields using simulation studies. *Field Crops Research*, 156, 180-190.
- [Wil.95]** Williams, M., Shewry, P. R., Lawlor, D. W. et Harwood, J. L. (1995). The effects of elevated temperature and atmospheric carbon dioxide concentration on the quality of grain lipids in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown at two levels of nitrogen application. *Plant, Cell and Environment*, 18, 999-1009.
- [You.09]** You, L., Rosegrant, M., Wood, S. et Sun, D. (2009). Impact of growing season temperature on wheat productivity in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1009-1014.
- [Zha.14]** Zhang, C., Su, H. Baeyens, J. et Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383-392.

WEBOGRAPHIE

Wébographie

[DBFZ]DBFZ:http://www.serevue.fr/sites/default/files/archives/Production_de_biogaz_par_les_exploitations_agricoles_en_Allemagne.pdf.

[FAO] : <http://www.fao.org/3/a-l4256E#page=6>.

[IPCC.14].

http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.

[Ren21] Ren21: GSR2014_full report_low res.pdf, GSR2013_lowres.pdf, GSR2012_low res_FINAL.pdf.

[http://www.ren21.net/Portals/O/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full_report_low res.pdf](http://www.ren21.net/Portals/O/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full_report_low_res.pdf)

http://www.ren21.net/Portals/O/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf

[http://www.ren21.net/Portals/O/documents/activities/gsr/GSR2012_low res_FINAL.pdf](http://www.ren21.net/Portals/O/documents/activities/gsr/GSR2012_low_res_FINAL.pdf).

[http:// fr.wikipedia.org/wiki/Méthane](http://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thane).

ANNEXES

ANNEXE I :

FACTEURS INFLUENÇANT LA MÉTHANISATION

Les facteurs théoriques influençant la digestion peuvent être divisés en trois grandes parties.

1) Les paramètres physico-chimiques

a) La température

Il existe différentes techniques de fermentation appliquées qui se distinguent principalement sur la base de la température de fonctionnement.

Trois régimes de température peuvent être utilisés dans des digesteurs anaérobies: psychrophile, mésophile et thermophile et à diverses plages de températures optimales pour la domination de différentes souches de bactéries productrices de méthane formant. Les fermenteurs psychrophiles fonctionnent à environ 25 °C, les mésophiles à environ 35 °C et thermophile-autour de 55 °C. En règle générale, une augmentation de la température a un effet positif sur le taux métabolique des micro-organismes et le processus est plus rapide, néanmoins le processus thermophile est plus difficile à contrôler et a besoin de plus d'énergie pour maintenir le fermenteur à la température fixe. La dégradation des acides gras est plus rapide à 55 °C qu'à 38 °C de même le temps de rétention est plus court et que 95 % du rendement en méthane a été obtenue au bout de 11 jours dans des conditions thermophiles, par rapport à 27 jours dans des conditions mésophiliques. Le taux de production de biogaz peut être réduit en raison de moindres changements de température. Le processus peut échouer à des fluctuations de même 1 °C par jour de température. Une augmentation de 54-61 % du rendement CH₄ peut être obtenue à partir des restes d'algues lorsque la température du processus a été portée de 25 à 35 °C.

Les bactéries productrices de méthane ont leurs conditions optimales de croissance rangées dans la plage de température 37-42 °C. La thermophilie est d'habitude utilisée pour accélérer la production, réduire la viscosité, détruire les germes nocifs par hygiénisation du substrat ou des déchets dont la température intrinsèque est élevée (eau de traitement).

b) Le pH

En règle générale, la gamme la plus favorable de pH pour obtenir un rendement maximal de biogaz à la digestion anaérobie est 6,8-7,2. Les bactéries méthanogènes sont extrêmement sensibles aux variations de pH et préfèrent un pH d'environ 7,0 comme le taux de croissance des bactéries méthanogènes est considérablement réduit en dessous de 6,6. Les bactéries formant de l'acide sont moins sensibles et tolèrent un pH dans la plage de 4,0 à 8,5, mais le pH optimal pour l'hydrolyse acidogénèse est comprise entre 5,5 et 6,5. Par conséquent, certains concepteurs préfèrent l'isolement de l'hydrolyse / acidification et procédés acétogénèse / de méthanogénèse en deux étapes distinctes.

Au début de la fermentation, agents acidogènes acétogènes produisent des acides et des émissions de CO_2 et, par conséquent, le pH diminue. Par la suite, les bactéries productrices de méthane consomment les acides, le pH de l'autoclave augmente puis se stabilise.

Ce facteur est également important car il influe sur la proportion des formes ionisées et non-ionisées d'inhibiteurs de méthanisation. Les acides gras excessifs, le sulfure d'hydrogène et l'ammoniac ne sont toxiques que dans leur forme non-ionisée (FA et H_2S -dessous de $\text{pH}= 7$, NH_3 en dessus de $\text{pH}= 7$).

2) Facteurs inhibiteurs

Les facteurs inhibiteurs provoquent un déplacement indésirable de la population microbienne ou la limitation de la croissance bactérienne. L'inhibition est souvent indiquée par une réduction du taux de production et l'accumulation d'acides organiques. Dans l'un des rapports, les plus anciens auteurs mentionnent que la quantité de matières volatiles détruits et du gaz produits à partir d'algues étaient toujours inférieure à celle obtenue à partir de la fermentation brute des boues d'épuration. L'efficacité de la conversion du méthane de la biomasse de microalgues et des boues d'épuration atteint respectivement 36,4 à 44,3 % et 57 à 60 % en cas de fermentation mésophile. Certains facteurs d'inhibition pourraient être réduits par diverses opérations, par exemple prétraitement du substrat ou co-digestion avec d'autres matières.

a) L'ammoniac

L'ammoniac est une importante source d'azote pour les bactéries et les faibles concentrations d'ammoniac (en dessous de 200 mg/L) sont bénéfiques pour le processus. Cependant, il a été trouvé que l'activité spécifique des bactéries méthanogènes diminue avec des concentrations croissantes de l'ammoniac. Il existe plusieurs mécanismes responsables de l'inhibition de l'ammoniac: la variation de pH intracellulaire, une augmentation du besoin en énergie de la maintenance ainsi que l'inhibition d'une réaction enzymatique spécifique. En outre, une concentration élevée en ammoniac dans l'autoclave diminue l'activité de désamination de bactéries protéolytiques. L'ammoniac libre semble être la cause principale de l'inhibition car elle provoque un déséquilibre des protons et / ou une carence en potassium. Une augmentation de pH dans le changement de la forme ionisée (NH_4^+) en ammoniac libre et une toxicité accrue. Le procédé d'instabilité dû à l'ammoniac se traduit souvent par accumulation des acides gras volatiles, ce qui conduit à une diminution du pH et la diminution de ce fait la concentration de l'ammoniac libre. Cette interaction peut conduire à un «état stable inhibé», une condition où le processus est en cours, mais de façon stable avec un rendement de biométhane réduite. Une température plus élevée du processus se traduit également par une excrétion élevée d'ammoniac libre.

Cependant, les méthanogènes peuvent s'adapter à des concentrations d'ammoniac de 1700 mg L⁻¹ sans l'apparition d'un décalage de phase si la concentration d'ammonium et d'azote augmente lentement.

Une fermentation répétée par lots a été appliquée en tant que procédé d'adaptation à haute méthanogènes protéique de la biomasse d'algues. Le taux de production de méthane a été augmenté de 17 mL CH₄ /jour à 28 mL CH₄/jour, mais d'autre part, de l'ammoniac a été accumulée dans la cuve de fermentation et réduit légèrement le rendement en méthane lors de chaque cycle ultérieur. Une composition élevée protéique des algues contribue également à la formation d'une boue digérée avec un très faible rapport C / N de 5.

b) Le soufre :

Le soufre est un élément nécessaire pour les bactéries méthanogènes, et d'ailleurs les cellules des bactéries méthanogènes contiennent plus de soufre que les autres groupes d'organismes anaérobie bien que, le soufre sous forme de sulfate ou de sulfure peut devenir un inhibiteur dans le processus de la digestion anaérobie. Le sulfate est obtenu par des bactéries réductrices de sulfate, la compétition pour les substrats entre les bactéries réductrices de sulfate et les bactéries méthanogènes peut constituer une inhibition. H₂S est toxique car il se diffuse dans le cytoplasme par la membrane cellulaire et peut former des liaisons croisées disulfure entre les chaînes polypeptidiques et dénaturer les protéines. On a également observé que la toxicité augmente avec le sulfure. La teneur en soufre de cellules de microalgues est relativement faible et se situe entre 1,5 µg et 16 mg de poids sec, ce qui correspond à 0,15 à 1,96 % en poids sec.

c) Macroéléments, microéléments, métaux lourds.

La supplémentation de certains métaux augmente la production de biogaz. Du fait que certains métaux sont utilisés comme une partie de la structure des enzymes des bactéries. D'autre part, certains macroéléments, microéléments et les métaux lourds peuvent avoir un effet toxique sur la microflore anaérobie dans un digesteur. Des concentrations élevées de métaux alcalins essentiels tels que le magnésium, le calcium, le sodium et le potassium peuvent être toxiques pour les bactéries anaérobies. Des quantités excessives de calcium en raison de la précipitation du carbonate et de phosphate sont la cause de mise à l'échelle des réacteurs ainsi que des cellules bactériennes. Une quantité importante de Potassium conduit à un flux passif d'ions K et neutralise le potentiel de la membrane. Dans le cas d'algues marines en particulier, une forte concentration de sodium dans la biomasse peut être un inhibiteur de la digestion anaérobie due à un stress osmotique et de déshydratation. Cependant, il s'est avéré que l'élément inhibiteur de fermentation des espèces marines pourrait être le chlorure de sodium. Les auteurs mentionnent que sur la biomasse lyophilisée de cette espèce, les sels sur la surface de la biomasse ont été visibles.

Cependant, la microflore anaérobie est capable de s'adapter à un environnement salin et un effet inhibiteur ne peut pas se produire.

L'acclimatation des bactéries méthanogènes à sodium peut réduire le temps de latence avant que la production de biogaz ne commence. Des digesteurs de traitement des eaux usées municipales ont échoué parce que parfois le cuivre, le zinc, le chrome et le nickel sont présents dans le substrat. La toxicité provoquée par des métaux lourds montre que ces derniers ne sont pas biodégradables, donc peut s'accumuler à des concentrations toxiques et nuire à la fonction enzyme. De l'aluminium dans les algues récoltées par floculation n'a pas eu d'effet inhibiteur sur l'activité apparente du lessiveur.

Les oligo-éléments dont les archées méthanogènes ont besoin sont : Co, Ni, Se, Mo, et le W. Les éléments comme le Fe, Mn, Mg sont également importants pour le transport des électrons et la fonction de certains enzymes. Le tableau A.I.1 nous donne la plage de concentration de quelques oligo-éléments pour un bon déroulement d'une méthanisation.

Tableau A.I.1 : Concentration des oligo-éléments en mg/L

Oligo-éléments	Plage de concentration (mg/l)
Co	0.003-0.12
Ni	0.005-0.5
Se	0.008-0.2
Mo	0.005-0.2
Mn	0.005-50

d) Les acides gras

Des acides à chaîne courte volatile gras eux-mêmes ne sont pas toxiques. Ils sont produits et utilisés comme éléments nutritifs normalement dans un digesteur actif. Toutefois, leurs effets inhibiteurs pourraient être indirects comme ils peuvent abaisser le pH à un niveau indésirable. Les méthanogènes ne seront pas capables de métaboliser l'acétate produit par les organismes acétogènes jusqu'à ce que le nombre d'organismes méthanogènes ait suffisamment augmenté. Cela est particulièrement vrai dans les matières premières qui sont rapidement hydrolysées. L'augmentation de la teneur en AGV peut être causée par une activité accrue des bactéries acidogènes couplés à une inhibition de méthanogènes. Diverses concentrations d'acides sont de bons indicateurs de l'état de digestion. Il a été démontré qu'une teneur en acide acétique > 800 mg/L est un signal de défaillance de l'autoclave. Le taux d'alcalinité de VFA caractérise de manière adéquate le processus de la digestion: le rapport inférieur, le rendement en méthane est élevé. Le tableau A.I.2 donne le seuil de concentration en mg/L de quelques éléments inhibiteurs.

Des acides gras à longue chaîne peuvent également constituer une inhibition de processus de digestion anaérobie. Des acides gras à longue chaîne retardent l'activité des bactéries dont les méthanogènes.

La toxicité de longues chaînes d'acides gras résulte de l'adsorption sur la paroi cellulaire ou la membrane, ce qui provoque la désorientation des groupes essentiels sur la membrane cellulaire et donc le transport et la fonction de protection optimale. Ce facteur doit être pris en considération que la biomasse de micro algues peut atteindre une teneur élevée en lipides si les cellules sont cultivées dans des conditions de stress.

Tableau A.I.2 : Seuil de concentration des éléments inhibiteurs

Inhibiteurs	Concentration inhibitrice	Remarques
Oxygène	> 0,1 mg/L	Inhibition des archées méthanogènes anaérobie obligatoires
Sulfure d'oxygène	> 50 mg/L H ₂ S	L'effet inhibiteur augmente lorsque la valeur du pH diminue
Acide gras volatile	> 2 000 mg/L HAc (pH = 7,0)	L'effet inhibiteur augmente lorsque la valeur du pH diminue. Forte adaptabilité des bactéries
Azote ammoniacal	> 3 500 mg/L NH ₄ ⁺ (pH = 7,0)	L'effet inhibiteur augmente lorsque la valeur du pH et la température augmentent. Forte adaptabilité des bactéries.
Métaux lourds	Cu > 50 mg/L Zn > 150 mg/L Cr > 100 mg/L	Seuls les métaux dissouts ont un effet inhibiteur. Détoxification par précipitation des sulfures

e) L'humidité:

Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité minimale est de 60 à 70 % d'eau. L'humidité des déchets doit être suffisante pour que l'hydrolyse puisse se dérouler normalement. Si au contraire l'humidité est insuffisante, l'acidification se fait trop vite au détriment de la méthanisation, de ce fait le substrat organique doit être très dilué : 70 à 75 % d'eau avec 25 à 30 % de matière sèche. Les plantes anaérobies peuvent aussi être classées sur la base de la teneur en eau du lot. Les systèmes fonctionnant à sec avec 30 à 40 % de matière sèche dans la charge d'alimentation et les systèmes humides fonctionnent avec 10 à 25 % de matière sèche.

Il a été rapporté que les taux les plus élevés de production de méthane se produisent à 60-80 % d'humidité. Cependant, des sources de biomasse contenant beaucoup d'eau (même contenant moins de 40 % de matière sèche) peuvent être traitées sans aucun prétraitement.

f) La qualité du substrat

Certains paramètres ont été cités précédemment comme les inhibiteurs contenus dans le substrat et le rapport C/N cependant il faut ajouter l'âge du produit qui contribue également à diminuer le potentiel méthanogène mais aussi la teneur en lignine pour les produits agricoles peut aussi être un frein à la dégradation de la cellulose. Un favorable C/ N semble être un facteur très important pour un processus de digestion anaérobie succès.

Il a été rapporté que l'optimum du rapport C/N de la digestion anaérobie est dans la gamme de 20 à 30, car les micro-organismes consomment 30 fois plus de carbone que d'azote et ce dernier n'entre dans la composition du biogaz, mais apparaît dans le produit de digestion dans laquelle il est l'élément principal avec le phosphore. À un plus haut rapport C/N une faible quantité est obtenue, le digesteur peut échouer en raison d'une baisse du pH du système et la capacité de mise en mémoire tampon réduit; les méthanogènes vont rapidement consommer l'azote pour répondre à leurs besoins en protéines et ne seront plus en mesure de réagir avec le carbone qui reste de la matière. D'autre part, pour un faible rapport C/N, N sera libéré et s'accumule sous la forme d'ion ammonium (NH_4^+). Une forte concentration de NH_3 est libérée lors de système anaérobie qui inhibe la méthanisation.

3) Les paramètres technologiques

a) Temps de séjour du substrat

Le temps de séjour (ou temps de rétention hydraulique TRH) est la durée théorique pendant laquelle le volume de boues fraîches séjourne dans le digesteur. Il s'obtient en divisant le débit de boue entrant en digestion par le volume du digesteur. Il en découle une diminution du temps de séjour nécessaire à la stabilisation et une augmentation de la production de gaz. Cette durée est variable selon la technologie retenue et la température de fermentation.

Le temps de rétention est le temps nécessaire pour dégrader complètement les matières organiques et il est relié avec le taux de croissance microbienne. Le temps de séjour dépend de la température et de la composition de traitement par lots. Le temps de séjour moyen de déchets traités dans une usine mésophile est de 15-30 jours et un peu plus court pour plantes thermophiles. Il existe deux types importants de temps de rétention :

- le temps de rétention solide (TRS) ; la durée moyenne où les bactéries (solides) sont dans le digesteur anaérobie.

-le temps de rétention hydraulique (TRH) défini par l'équation suivante:

$$\text{TRH} = \frac{V}{Q} \quad (\text{A.I-1})$$

V est le volume du réacteur biologique et Q le débit de l'effluent dans le temps

Le temps de digestion est l'un des principaux facteurs qui influent sur le rendement de CH₄. Le temps effectif de rétention hydraulique dépend du type de substrat et du taux de chargement, et atteint jusqu'à deux semaines.

Un TRH court se traduit généralement par une accumulation de VFA, tandis qu'un temps plus long que le TRH optimal, les composants de l'autoclave ne sont pas utilisés efficacement. Si le TRH est court et que la perte bactérienne dépasse le taux de croissance des bactéries le processus peut échouer. Les productions de méthane provenant de microalgues en fonction du temps peuvent être en forme en courbe exponentielle inverse, caractérisée par une augmentation de TRH entre 10 et 30 jours et atteindre un niveau stable après 30 jours. En résumé, lorsque le procédé est réalisé à faible vitesse de chargement et temps de rétention hydraulique, le rendement en méthane est constant et maximal.

b) L'agitation:

Une bonne agitation permet d'homogénéiser la solution, d'associer les bactéries avec leurs nourriture, d'éviter la production de croûtes et la décantation de particules denses. Elle facilite en particulier la dégazéification des boues en accélérant la coalescence des bulles produites à la surface du floc. Pour obtenir des niveaux élevés de production de biogaz, il faut un contact étroit entre les bactéries et le substrat, ce qu'on obtient généralement avec un mélange efficace dans la cuve de digestion.

À défaut d'un bon mélange dans le digesteur, au bout d'un certain temps on constate une démixtion du contenu accompagnée d'une formation de couches. Cela tient aux différences de densité des divers constituants du substrat ainsi qu'à la poussée verticale due à la formation de gaz.

Dans ce cas, en raison de sa plus forte densité, la majeure partie de la masse bactérienne s'accumule dans la couche inférieure alors que le substrat à décomposer s'accumule souvent dans la couche supérieure. La zone de contact se situe alors dans la zone intermédiaire entre ces deux couches et le phénomène de dégradation est alors très limité. Par ailleurs, des solides remontent à la surface pour former une couche de mousse qui ralentit le dégagement de gaz.

Il est donc important de favoriser le contact entre les microorganismes et le substrat en mélangeant le contenu de la cuve de digestion. Il faut toutefois éviter tout mélange excessif.

b) La charge

Le taux de charge organique (TCO) est la quantité de matières volatiles pour être introduit dans le digesteur chaque jour en continu. Il peut aussi être défini comme la quantité de solides volatiles ou la demande chimique en oxygène (DCO) des composants alimentant par jour par unité de volume du digesteur.

Des taux plus élevés de charge organique peuvent réduire à la fois la taille de l'autoclave et le coût. Cependant, un temps de rétention suffisant devrait être autorisé pour les micro-organismes pour décomposer la matière organique et le convertir en gaz.

Les méthanogènes varient considérablement ce qui concerne les exigences de carbone spécifiques et la réponse de croissance comme les matières organiques haussent le taux de chargement, le rendement de biogaz augmente dans une certaine mesure, mais au-dessus du TCO optimale le rendement en biogaz diminue en raison de la surcharge. Durant les premiers jours de la fermentation, l'ajout d'une grande quantité de nouveau matériel chaque jour peut entraîner un changement significatif dans l'environnement du digesteur et inhiber temporairement l'activité bactérienne. Il se produit en raison du fait que des bactéries d'hydrolyse / acidification peuvent produire beaucoup trop d'acides gras volatils en un temps court. En conséquence, il abaisse le pH du digesteur et les bactéries méthanogènes ne sont pas capables de convertir les acides en méthane. Le taux le plus efficace de la charge organique est de 5 g VS/L. A des taux de charge supérieurs une augmentation de la teneur en acides butyrique et valérique a eu lieu, ce qui a entraîné une inhibition. Lorsque le taux de chargement est plus faible (0,6 g VS/L de boues) on obtient une quantité plus élevée en biogaz. En outre, il a également été constaté que dans le cas des produits laitiers frais comme le fumier, une charge d'alimentation contenant des solides totaux entre 13 % et 15 % apparaît le plus idéal.

Dans les conditions thermophiles (55 °C), la biométhanisation du sorgho et du mélange de sorgho / cellulose contenant plus de 25 % de solides totaux à un taux de charge organique (TCO) de 18 et 24 g / kg / jour a été trouvé pour donner des taux d'équilibre de 5,7 et 7,5 L / kg / jour, la production de méthane, respectivement. Une teneur élevée en SV pour la digestion anaérobie (25-30 % du total des effluents solides) a montré la nécessité de traiter la toxicité de l'ammoniac. La supplémentation et le contrôle des éléments nutritifs de la charge comme le ratio C / N permet un fonctionnement stable de digesteurs à des taux de charge en SV jusqu'à 24 kg de masse humide par jour (SV / kg / j), avec un taux de 7,5 L de la production de méthane moyenne / kg / j.

Plus les solides volatiles sont introduits dans le digesteur, plus la quantité d'acides volatils formés dans le digesteur sera importante et il y'aura plus d'impact sur l'alcalinité et le pH du digesteur. Par conséquent, la boue qui a une teneur en matières volatiles élevée devrait être transférée lentement à un anaérobie digeste.

À cet égard, le taux de charge organique est un paramètre primordial d'exploitation. C'est lui qui indique combien de kilogrammes de solides volatiles (SV, ou matière organique sèche, MOS) on peut introduire dans le digesteur par m³ de volume utile par unité de temps [2-1]. Le taux de charge organique est exprimé en kg SV/m³j.

$$TC = \frac{m \cdot c}{V} \cdot 100 \quad (A.1-2)$$

Avec : m la quantité de substrat ajoutée par unité de temps (kg/j), c la concentration de matière organique (%SV), V le volume du réacteur.

Certains auteurs de manuels d'exploitation estiment que l'alimentation d'un digesteur devrait respecter constamment la proportion suivante : 20 fois plus de boues digérées que de boues fraîches (exprimé en kg de MV). De plus, toute variation importante de charge perturbe la digestion et peut entraîner son blocage.

ANNEXE II :

DOMAINES D'UTILISATION ET ÉTAT DE L'ART

Le produit de la fermentation méthanique encore appelé biogaz (90 %) constitue un combustible pratique pour toute une gamme d'applications de l'autre côté les résidus de la fermentation ou digestat peuvent être utilisés, directement ou en tant qu'agent de compostage, comme engrais organique pour améliorer la fertilité des sols, la technologie du biogaz produit ainsi du combustible sans diminuer la valeur fertilisante du fumier. Parmi les domaines d'utilisation on peut citer :

1) Electricité

Le biogaz a été utilisé avec succès pour des moteurs thermiques. Cette utilisation ne nécessite pas d'épuration, contrairement à l'usage de carburation. Cela pourrait permettre son développement en motorisation agricole. La figure A.II.1 illustre un moteur à biogaz pouvant fournir une puissance de 700 W. La conversion en électricité est meilleure avec des appareils dual-fuel qui fonctionnent toujours à leur régime nominal (rendement 30 %) alors que les moteurs à essence ont un rendement de 20 %, variable suivant les conditions de fonctionnement. En moyenne un moteur dual fuel/biogaz consomme environ 0,45 m³ de biogaz par cheval vapeur et par heure. En 2010, la production de 15000 GWh d'électricité par l'Allemagne représentait plus de la moitié du biogaz valorisé en Europe et cette production a atteint 18 milliards de KWh couvrant une partie de la consommation électrique. La production d'électricité à partir du biogaz en Europe est en progression entre 2009 et 2012, la plupart du biogaz produit est utilisé sur place. L'utilisation à la ferme la plus commune et populaire du biogaz est d'alimenter un moteur-générateur pour produire de l'électricité.



Figure A.II.1 : Moteur à biogaz de 700 W (CERER)

2) La cuisson

Le biogaz est couramment utilisé pour la cuisson des aliments avec la mise sur pied de cuiseur à biogaz (figure A.II.2) ; les brûleurs utilisés sont en céramique ou en métal. Dans certains cas, les familles utilisent des brûleurs de propane ou de butane après les avoir modifiés (augmentation du diamètre de l'injecteur) pour les adapter au biogaz. Une pression de 7 à 10 kPa est généralement satisfaisante. Généralement, les brûleurs consomment 250 à 400 L/ nécessitant 800 à 1000 L de biogaz par jour pour une famille de 4 à 5 personnes. Il faut en général 0,2 à 0,3 m³ de biogaz par personne pour les besoins domestiques en énergie. Il est adapté pour la cogénération (CHP), des applications telles que l'alimentation des chaudières et des brûleurs.



Figure A.II.2 : Cuiseur à biogaz (CERER).

3) L'éclairage

L'utilisation du biogaz en éclairage se rencontre dans les pays en développement où le réseau d'électrification rurale est presque inexistant. La pression du gaz exigée est de 20 cm de colonne d'eau en deçà (7 à 10 cm de colonne d'eau délivrée par les cloches flottantes) l'éclairage est de faible intensité et la portée restreinte. Au-dessus de 20 cm de colonne d'eau, la portée d'éclairage est voisine de celle d'une lampe électrique de 60 W.

La consommation d'une lampe à biogaz est environ estimée entre 0,12 et 0,15 m³ de biogaz et par heure

4) La carburation

Le biogaz peut être utilisé comme carburant pour des moteurs mobile mais nécessite une forte épuration car le volume énergétique du méthane impose une compression à 200 bar pour disposer d'une autonomie suffisante.

L'épuration est onéreuse et rend souvent rédhibitoire ce type d'utilisation, en tout cas pour un particulier. Toutefois cette filière peut être envisagée pour de grandes unités (station urbaine ou industrie agro-alimentaire). On note plusieurs applications de ce genre notamment en Europe où des bus de ville fonctionnant à partir du biogaz ont vu le jour. C'est le cas de ville de Lille (France) qui abrite le plus grand digesteur d'Europe (108000 tonnes de déchets verts par an). L'autre grande innovation vient de la Suède qui hormis les bus de ville, taxis et particuliers a mis sur pied un train à biogaz reliant deux villes du sud-est comme le montre la figure A.II.3.



Figure A.II.3 : Train à biogaz (Ali.11)

5) Chaudière

Elle est surtout répandue dans les pays occidentaux pour le chauffage domestique ou le chauffage des bâtiments d'élevage à condition d'avoir un excès d'air pour une combustion hygiénique. Les brûleurs atmosphériques se corrodent rapidement par suite de la déposition de soufre provenant du sulfure d'hydrogène contenu dans le gaz. Cependant les brûleurs à air soufflé sur chaudière en fonte ne souffrent pas de la présence d' H_2S dans le biogaz, en quantité toujours plus faible que dans le fuel lourd. Ainsi les rendements obtenus sont supérieurs à 85 % pour des brûleurs bien réglés.

6) Réfrigération

L'utilisation du biogaz pour faire fonctionner des armoires frigorifiques a également été appliquée avec succès. Pour faire fonctionner un réfrigérateur, il faut en moyenne 0,5 m³ de biogaz par jour et par hectolitre de capacité.

Dans la majorité des cas, le biogaz est valorisé sous la forme d'électricité livrée en quasi-totalité au réseau. Les valorisations thermiques existent en proportion non négligeable, mais sont limitées par les débouchés locaux souvent peu compatibles avec la production.

Actuellement le volume de biogaz produit n'est pas connu. A la fin de l'année 2012, plus de 13800 implantations de biogaz ont été recensées en Europe avec une capacité totale de 7.5G W. L'Angleterre a vu son nombre doubler passant de 54 à 112 entre 2011 et 2012, l'Italie a fait mieux en un an de 521 à 1264 bio-digesteurs.

L'Allemagne est le premier producteur européen avec 7100 installations en 2011 avec une puissance globale de 2700 MW installée équivalente à environ 2 centrales nucléaires.

Dans les pays en développement, le biogaz produit dans les grands digesteurs est généralement utilisé pour la production d'électricité. En chine, en fin 2009, 2000 digesteurs de biogaz de grande et moyenne dimension ont été installés dans les entreprises industrielles. En plus de 22500 dans les fermes, 630 pour les déchets municipaux et boues de traitement. A la fin de 2010 la capacité de production était estimée à 800 MW. La Chine et l'Inde ont le plus grand nombre de digesteurs domestiques avec 43 millions pour la Chine bénéfique à 160 millions de personnes dans le monde rural et 4.4 millions en Inde. En 2013, le Brésil comptait 24 implantations de biogaz produisant 84 MW. En Afrique aussi le nombre de bio-digesteurs domestiques reste méconnu mais la plupart ont été installés en Tanzanie avec plus de 4000 digesteurs, Rwanda et Kenya.

Au Sénégal de 1950 à 2007 une quarantaine d'installations a été réalisée dont les plus grandes sont celles de Cambérène (POYAUD) ; deux installations primaires de 3000 m³ et une secondaire de 2000 m³, la quantité de biogaz produite est de 1500 à 2000 m³/j permettant la production d'électricité (200 kW) et de l'eau chaude.

D'autres types de digesteurs de type « transpaille », installation faite entièrement en tôle et connectée à un double moteur thermique pour la production d'électricité (80 % de biogaz et 20 % de diesel), ont été réalisés notamment une grande installation à Thiès pour le traitement des déchets d'un abattoir de Thiès.

On note aussi le secteur industriel avec la SOGAS de Dakar dont le biodigesteur est fait dans une bache conçue pour la digestion anaérobie avec une capacité de 4000 m³ brut soit 1000 m³ de gaz produit. Quant à la SOGAS de Saint Louis, elle comprend 5 digesteurs d'une capacité de 10 m³ chacun approvisionnés par la bouse, les panses et les déchets liquides d'origine animale.

Mais la plupart des digesteurs installés sont de type à fût flottant ceci pour produire un engrais organique de bonne qualité. Cependant la plupart de ces installations ne fonctionnent pas actuellement du fait d'une mauvaise conception ou d'un manque de suivi.

Seuls 600 digesteurs sur les 8000 prévus par le programme national de biogaz (PNB) durant la période 2009-2013 ont été réalisés en partenariat avec les Néerlandais et 30 % ne sont pas fonctionnels. Le PNB utilise la technologie du digesteur à dôme fixe dont les dimensions

varient de 4 à 18 m³ avec une production journalière de 4.5 m³. Le principal substrat utilisé est la bouse de vache.

ANNEXE III :
QUELQUES MÉTHODES D'ÉPURATION

Le biogaz a beaucoup d'applications à la fois à la ferme et hors ferme. A l'état brut, le biogaz a une faible densité énergétique de seulement 22,3 MJ/m³, et il est également très corrosif dans la nature (en raison de la présence de H₂S et de l'eau). Cela réduit le potentiel de hors ferme. Le biogaz pourrait également être utilisé comme carburant pour les pompes d'irrigation entraînée par le moteur compresseur frigorifique.

Cependant, le biogaz enrichi a une capacité thermique d'environ 36,2 MJ/m³ et devient proche de celle du gaz naturel (37,45 MJ/m³). En raison de cette forte teneur en énergie, il pourrait être vendu aux utilisateurs industriels ou commerciaux, pour l'injection dans un pipeline de gaz naturel, ou carburant des véhicules.

Malgré ses domaines d'application multiples le biogaz se heurte à certaines limites, celles ci sont dues à la présence de quelques composés gazeux nuisibles dans certains domaines d'application. L'épuration consiste à éliminer du biogaz les substances indésirables et les traces de polluants comme : l'ammoniac, les sulphides, les minéraux,... Une fois le biogaz épuré et enrichi avec un pouvoir calorifique équivalent à celui du méthane il est appelé biométhane.

Pour rappel, les substances critiques présentes dans le biogaz sont selon le domaine d'application résumées dans le tableau A.III.1.

Tableau A.III.1 : Composant à enlever selon le mode de valorisation

Valorisation	Substances critiques	Substances éventuelles
Chaleur	Eau	Soufre (H ₂ S)
Electricité, cogénération	Eau, Soufre (H ₂ S)	Organo-halogénés
Carburant	Eau, Soufre (H ₂ S), CO ₂	Organo-halogénés, métaux
Réseau gaz	Eau, Soufre (H ₂ S), CO ₂	Organo-halogénés, métaux, oxygène

Les méthodes d'épuration du biogaz sont nombreuses nous nous abstenons d'en citer quelques unes selon leurs coûts et leurs accessibilités.

1) Adsorption sur tamis moléculaire

Composés concernés : Selon le tamis moléculaire, il est possible d'éliminer différents composés : l'eau, l'H₂S, les composés halogénés, les siloxanes.

- Principe

Les tamis moléculaires sont des matériaux cristallins (structure cristalline d'alumino-silicates ou zéolithes, tamis moléculaire au carbone) présentant une grande porosité. Si la plupart des cristaux contenant de l'eau se détruisent lorsque cette eau est éliminée, par chauffage par exemple, les tamis moléculaires au contraire se maintiennent.

Les « trous » ainsi formés confèrent des forces d'attraction envers d'autres molécules notamment les molécules polaires (H₂S, H₂O, mercaptans et à un degré moindre, le CO₂) qui

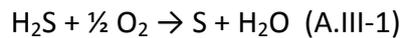
sont adsorbées. L'eau est adsorbée en priorité, il est donc nécessaire d'abaisser la teneur en eau afin de ne pas surdimensionner les quantités de tamis. Différents tamis moléculaires sont utilisés en fonction des impuretés à enlever dans le biogaz. Ce type de traitement est très performant, il permet d'obtenir une déshydratation très poussée, qui ne se justifie que rarement pour la valorisation électrique du biogaz. Avec cette technique, la teneur en H₂S peut être réduite jusqu'à moins de 1 ppmV.

2) Techniques biologiques internes : ajout d'air ou d'oxygène

Composés concernés : L'H₂S

Principe

Cette technique est basée sur la transformation de l'hydrogène sulfuré en soufre élémentaire par les bactéries autotrophes capables d'oxyder les composés soufrés. Ces micro-organismes à pH neutre, ont besoin d'oxygène, d'un substrat organique, de nutriments (N, P, K) et d'éléments traces (Fe, Co, Ni). Tous ces éléments, excepté l'oxygène, se retrouvent dans le substrat de la méthanisation (digestat) ou dans les jus de déshydratation. Une quantité suffisante d'oxygène pur ou d'air permettra l'épuration de l'hydrogène sulfuré selon la réaction suivante :



L'ajout d'air ou d'oxygène directement dans le digesteur est la plus simple des techniques de désulfuration. Deux sous-produits résultent de la réaction : l'hydrogène et des dépôts de soufre sur la surface du digestat. On peut extraire le soufre pour ensuite l'utiliser en agriculture. La quantité d'air nécessaire dépend de la stœchiométrie des réactions de digestion. En pratique, l'apport d'air correspondant à 3 à 8 % en volume de la production journalière du biogaz permet d'éliminer 95 à 99 % d' H₂S du biogaz. Plusieurs facteurs peuvent modifier le taux de réduction, comme la température, la quantité d'air ajouter, le temps de réaction... Par ailleurs, lorsque l'on ajoute de l'air dans le biogaz, il faut réaliser des mesures de sécurité pour éviter le surdosage d'air.

En effet, ce procédé peut provoquer la formation d'un mélange de gaz explosif (limites d'explosion : 5-15 % de méthane dans l'air) Il s'agit de la technique la plus utilisée car elle est la moins coûteuse et la plus simple à mettre en place, mais elle ne peut être mise en place que sur des digesteurs.

On peut noter que 91,5 % des installations de méthanisation à la ferme en Allemagne sont équipées de technologies d'ajout d'air interne. Les conditions optimales sont : une quantité d'air nécessaire (de 3 à 5 % de la quantité de biogaz produite), et une surface spécifique nécessaire de 1 m² pour un débit biogaz de 20 m³ / j. Avec cette technique, une réduction de 2000-3000 ppm à 50-100 ppm est réalisable.

3) Réfrigération à -25 °C

Composés concernés : Les vapeurs d'eau, les siloxanes, les composés halogénés et l' H₂S.

- Principe :

Le gaz est refroidi à $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les particules de contaminants se dissolvent avec l'eau. Le système de réfrigération permet d'éliminer 95 % des siloxanes et l' H_2S dissout dans l'eau.

On peut ajouter en option une unité d'adsorption par charbon actif pour éliminer le reste des contaminants, la durée de vie du charbon actif est allongée puisqu'il y reste peu de contaminants à traiter.

4) Condensation le long des conduites

Composés concernés :

Cette technique permet de séparer la vapeur d'eau, mais aussi les particules et l' H_2S piégés dans les condensats.

Principe

Il s'agit de la technique d'élimination de l'eau la plus simple : l'eau se condense lors du transport du biogaz dans les tuyaux avec une pente de 1 %. Des séparateurs diphasiques (pots à condensats) doivent être placés en chaque point bas de la tuyauterie pour récupérer les condensats. Les vidanges et l'entretien des conduites et des séparateurs doivent être faits régulièrement. Cette méthode, ne nécessitant pas de technologie sophistiquée, est donc très utilisée.

5) Le lavage à l'eau

Il concerne tous les produits présents. Un système à colonne d'absorption, qui est basé sur les différences de solubilité dans l'eau des différents composés du biogaz. Une petite partie du méthane (de l'ordre de 8 %) se dissout dans l'eau, mais le pouvoir séparateur est néanmoins important car les solubilités du H_2S et du CO_2 sont respectivement 85 et 30 fois supérieures à celle du méthane.

6) La filtration membranaire

Cette technique permet de séparer les différents contaminants du biogaz. Il s'agit de membranes non poreuses, avec des perméabilités sélectives. Les composants du biogaz ayant différentes perméabilités, ils sont donc séparés par ce biais. Le processus est accéléré par des niveaux de pressions différentes.

7) Adsorption sous pression alternante

L'élimination du CO_2 est aussi appelée enrichissement en méthane. Il existe différentes méthodes. Cependant nous retiendrons la plus efficace qui est l'adsorption sous pression

alternante. C'est un procédé à sec, sans eau, il est donc nécessaire d'effectuer une déshumidification auparavant.

Le biogaz passe dans un compresseur pour être envoyé vers un absorbeur avec une pression de 8 à 10 bars. Le CO₂ y est alors absorbé par des charbons actifs ou par des tamis moléculaires de carbone. Il est possible d'atteindre des concentrations de plus de 96 % de gaz pur par cette méthode.

ANNEXE IV :

AVANTAGES DE LA MÉTHANISATION

La technologie de production de biogaz présente de nombreux avantages qui peuvent être classés en trois catégories :

1) Avantages environnementaux

a) Réduction de gaz à effet de serre

En valorisant 1 tonne de CH₄ (méthane) sur une unité de cogénération ou sur une chaudière, on évite le rejet d'environ 2,54 tonnes de CO₂ ! Le CO₂ est un gaz à effet de serre dont les émissions polluantes aggravent le réchauffement climatique. Le méthane du Biogaz contrôlé (produit volontairement) n'agit pas dans les problèmes d'effet de serre comme le gaz dit "naturel" ou le butane ou le propane qui correspondent à un déstockage gigantesque de carbone fossile car il sera utilisé. Le Biogaz comporte aussi de l'hydrogène en proportion importante, gaz noble et particulièrement énergétique qui ne produit que de l'eau pure lors de sa combustion.

Effet cumulatif favorable pour lutter contre le changement climatique car le biogaz produit volontairement correspond à autant de biogaz non dégagé dans l'atmosphère qui aurait été produit "ailleurs" par la nature.

b) Réduction de la déforestation

Le biogaz produit se substituera à l'utilisation de bois de chauffage dans les foyers domestiques du fait que la combustion d'1 m³ de biogaz est équivalente à 1.3 kg de charbon brûlé

c) Dépollution

Traitement intelligent, valorisant, peu coûteux en milieu tropical de toutes les matières organiques (fermentescibles) comparé à leur incinération, mise en décharge (illégale), compostage (déchets verts...). Pour rappel, ce sont les fermentescibles dans nos ordures ménagères qui génèrent ces odeurs désagréables connues de tous.

d) Désodorisation

Quels que soient les déchets (déjections de toutes natures, déchets d'abattage...), pendant la méthanisation il n'y a plus d'odeurs car cela s'effectue en anaérobiose (absence d'air), où sont détruites les molécules responsables des odeurs en fin de cycle.

-Grande économie d'énergie fossile, bilan carbone amélioré

-Haute valorisation du digestat avec possibilité d'hygiénisation du substrat

-Aucune émanation d'odeurs, de fumées ou d'émissions nocives

-Respect du programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole (PMPOA)

2) Avantages économiques :

a) La valorisation des déchets organiques :

Par la production de gaz qui, bien que relativement pauvre en contenu énergétique, peut être substitué à un vecteur énergétique plus noble.

b) Consommation électrique

La méthanisation se déroule en absence d'oxygène on économise donc une grande quantité d'énergie électrique par rapport aux traitements aérobies. La consommation en énergie électrique de la méthanisation par rapport à l'aérobie peut-être de 4 à 10 fois inférieure à celle d'un prétraitement aérobie.

c) Production d'énergie

Le bilan énergétique de la méthanisation est positive car l'énergie est captée et est prête à être utilisée.

d) Domaines d'utilisation divers :

L'énergie peut être valorisée sous plusieurs formes: électricité, chaleur, combustible ou carburant.

e) Valorisation du digestat :

La valorisation de ce digestat qui peut être utilisé comme fertilisant, permettra de réduire le coût des engrais chimiques pour les agriculteurs donc une économie d'engrais minéraux

- Stabilisation et diversification de vos revenus par la vente d'énergie à un tarif avantageux
- Diversification des débouchés pour certaines cultures
- création d'emploi

3) Avantages agronomiques**a) Conservation de la qualité du substrat**

Maintien d'une valeur amendement organique après méthanisation. La teneur en azote n'étant pas affectée sensiblement, le résidu méthanisé conserve toute sa valeur fertilisante, et l'abaissement de son rapport C/N évite le phénomène de faim d'azote bien connu lors des apports de fumier au sol.

b) Amélioration de la qualité et de la quantité des produits agricoles

Ceci grâce à l'utilisation de l'engrais organique augmentant ainsi le rendement et la qualité.

c) Valorisation des produits et des déchets agricoles

Comme on l'a vu précédemment les produits d'origine agricole ainsi que leurs déchets se prêtent parfaitement à la production de biogaz. La valorisation des lisiers et fumiers en un digestat plus assimilable par les plantes, avec une diminution des pathogènes et des adventices.

La figure A.IV.1 nous résume les avantages de la méthanisation sous forme d'un cycle.

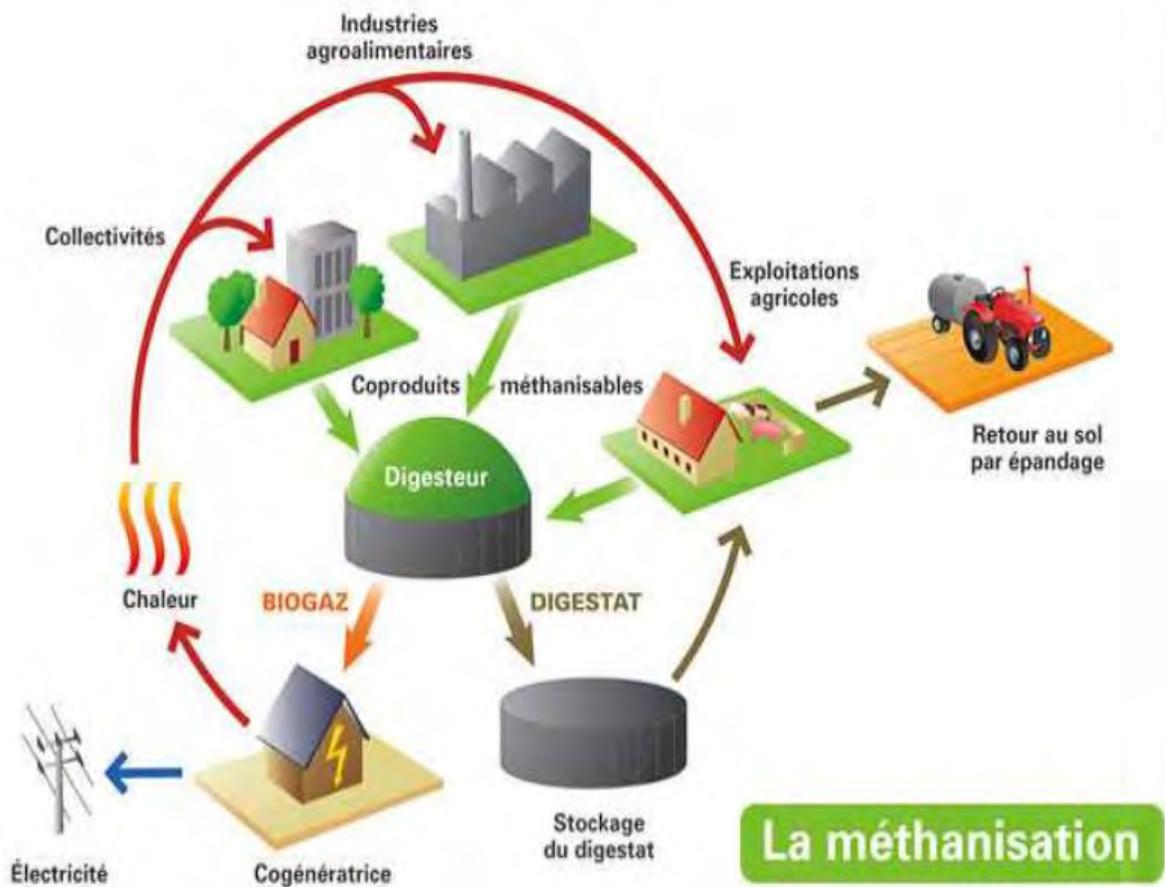


Figure A.IV.1 : Avantages de la méthanisation (Ali.11)

ANNEXE V :
PUBLICATION

Nom et prénom : ALIOUNE SENGHOR

Titre de la thèse « PRODUCTION DE BIOGAZ A PARTIR DES CULTURES ENERGETIQUES : UN POSSIBLE IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE »

Résumé : La production de biogaz est de nos jours un des secteurs les plus convoités car en plus d'être une source d'énergie renouvelable, le biogaz se distingue de par ses nombreux domaines d'utilisations et ces divers avantages notamment agronomiques et environnementaux. Sa large gamme de substrats utilisables pour sa production qui peut être d'origine animale, agricole, municipale fait de lui une source fiable et durable. L'utilisation des cultures énergétiques pour la production de biogaz est en expansion notamment dans les pays développés où la majeure partie des terres cultivables sont allouées à cette fin. Mais vue que la plante est exposée au milieu extérieur, que plusieurs paramètres comme la température et le CO₂ sont susceptibles d'influer sur son rendement et sa qualité et que les valeurs de ces dernières continuent de croître, on a jugé nécessaire de mener une étude sur l'impact du changement climatique sur les cultures énergétiques et les céréales en particulier afin de conclure sur l'avenir de l'utilisation de ces cultures pour la production de biogaz. On a pu montrer à travers ce travail que les changements climatiques impactent négativement sur le rendement et la qualité des cultures et donc leur utilisation comme substrat pour la production de biogaz est hypothéquée dans l'avenir. Néanmoins le sorgho semble être l'espèce la moins menacée et présente le meilleur profil pour l'avenir. L'utilisation de la co-digestion peut servir à limiter les pertes causées par l'impact négatif du changement climatique.

Mots clefs : Biomasse, Biogaz, Cultures énergétiques, Changement climatique, Co-digestion.

Name and first name: ALIOUNE SENGHOR

Title of thesis "PRODUCTION OF BIOGAS FROM ENERGY CROPS: A POSSIBLE IMPACT OF CLIMATE CHANGE"

Summary: The production of biogas is nowadays one of the most coveted sectors because in addition to being a source of renewable energy, biogas is distinguished by these fields of numerous uses and these various advantages in particular agronomic and environmental. Its wide range of usable substrates for its production that can be of animal, agricultural, municipal origin makes it a reliable and sustainable source. The use of energy crops for biogas production is expanding especially in developed countries where most of the cultivable land is allocated for this purpose. However, since the plant is exposed to the external environment, since several parameters such as temperature and CO₂ are likely to influence its performance and quality, and the values of the latter continue to increase, it was considered necessary to carry out a study on the impact of climate change on energy crops and cereals in particular in order to conclude on the future of the use of these crops for the production of biogas. It has been shown through this thesis that climate change has a negative impact on the yield and quality of crops and therefore their use as a substrate for biogas production is mortgaged in the future. Nevertheless sorghum seems to be the least threatened species and has the best profile for the future. The use of co-digestion can be used to limit the losses caused by the negative impact of climate change.

Key words: Biomass, Biogas, Energy crops, Climate change, Co-digestion.