UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE DOCTORALE : SCIENCE DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE L'ENVIRONNEMENT

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

Année : **2015** N° d'ordre :

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Biotechnologies Végétale et Microbienne et Amélioration des Plantes

Présentée par : **Mme Halima Adamou MAIGUIZO DIAGNE**

CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION DE DECHETS ORGANIQUES POUR LA PRODUCTION DE BIOGAZ ET BIOFERTILISANTS DANS DES ZONES PERIURBAINES ET URBAINES DE DAKAR-SENEGAL

Soutenue le 2016 devant le jury composé de :

Président	**M. Karamoko DIARRA,**	Prof. Titulaire UCAD
Rapporteurs	**M. Diégane DIOUF,**	Maitre de conférences UCAD
	M. Mbaye DIOP,	Maitre de recherches ISRA
	M. Abdoulaye Tahir DIOP,	Prof. Titulaire UCAD
Examinateurs	**Mme Diéynaba SY SALL,**	Maitre de recherches ISRA
Directeur de thèse	**M. Ibrahima NDOYE,**	Prof. Titulaire des Universités
CoDirecteur de thèse	**M. Saliou FALL**	Maitre de Recherches ISRA

THS 2020-0050

2,5818

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ECOLE DOCTORALE: SCIENCE DE LA VIE, DE LA SANTE ET DE L'ENVIRONNEMENT

FACULTE (OU ECOLE) : DES SCIENCES ET TECHNIQUES

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Biotechnologies Végétales et Microbiennes et Amélioration des Plantes

Résumé de thèse

Nom et Prénom du candidat : Mme Halima Adamou MAIGUIZO DIAGNE

Titre de la thèse : Contribution à la caractérisation de déchets organiques pour la production de biogaz et biofertilisant dans des zones périurbaines et urbaines de Dakar (Sénégal).

Date et lieu de soutenance :

Résumé :

Le Sénégal, contrairement à certains pays d'Afrique de l'Ouest, ne dispose pas de réserves forestières, pétrolière ou de biomasse issue de résidus agricoles ; alors qu'aujourd'hui ces sources couvrent respectivement ~ 53, 34 et 1% de la demande énergétique domestique. De nombreuses solutions (énergie solaire, énergie éolienne) à cette demande énergétique croissante qui est accentuée par l'urbanisation galopante, sont proposées aux populations. Cependant, elles restent financièrement inaccessibles et sophistiquées. Pourtant, le processus microbiologique de conversion des composés organiques (déchets) en méthane (biogaz) et en fertilisant (digestat), est traditionnellement utilisé dans les pays en développement. Toutefois, au Sénégal, peu d'études scientifiques dans ce domaine ont été entreprises. Ainsi la présente étude avait pour objectifs : i) de quantifier des types de déchets organiques méthanisables dans la zone périurbaine de Dakar ; ii) de déterminer leurs caractéristiques biochimiques et leur potentiel méthanogène ; et iii) de déterminer le pouvoir fertilisant de leurs digestats sur des cultures maraichères et céréalières. Les zones ciblées par l'étude sont principalement la Baie de Hann polluée par une prolifération cyclique de macroalgues et la zone périurbaine de Sangalkam où se développent un élevage semi-intensif et une activité maraichère intense. Les résultats de caractérisations biochimiques des macroalgues et des fientes ont démontré que ces substrats ont un potentiel méthanogène plus important que ceux du tourteau de *Jatropha curcas*, des restes alimentaires et de la bouse de vache qui est prioritairement utilisée pour la production de biogaz au Sénégal. En effet, le potentiel méthanogène atteint par les macroalgues est trois fois supérieure à celui de la bouse de vache. Cependant, la grande digestibilité et la faible teneur en carbone des macroalgues font que sa valorisation reste plus intéressante notamment en co-digestion avec des substrats riches en carbone. Par ailleurs, les résultats des tests de fertilisation par les digestats liquides sur la laitue et trois variétés de menthe, ont montré que ces bioengrais peuvent substituer les solutions nutritives utilisées en microjardin. Cependant, une standardisation du protocole de recherches est nécessaire pour améliorer son efficacité. En outre, les tests avec les digestats des fientes sur le sorgho et le maïs cultivés en serre ont donné des biomasses significativement supérieures à celles de la fertilisation chimique ; bien que les plus importantes fussent obtenues avec les fientes brutes. Ainsi tous les résultats obtenus confirment notre hypothèse de travail sur l'existence de gisement de déchets organiques à fort pouvoir méthanogène dans les zones périurbaines de Dakar. Enfin, la technologie de méthanisation pourrait être une alternative à la problématique de la sécurité énergétique, du réchauffement climatique, de la gestion des déchets avec une plus-value sur la gestion de la fertilité des sols et donc de la sécurité alimentaire.

Mots clés : Biogaz, Biofertilisant, Digestat, Macroalgues, Microjardin, Sangalkam.

322-1800387/1286

Title of the thesis : Contribution to the characterization of organic waste for the production of biogas and biofertilizers from periurban areas of Dakar (Senegal).

Last name and First name : Mrs Halima Adamou MAIGUIZO DIAGNE

Abstract :

Senegal, unless some countries in West Africa, has no forest reserves, no oil and no biomass from agricultural residues; while today these sources cover respectively ~ 53, 34 and 1% of domestic energy. Although, many energetic solutions (solar, wind) are proposed to population. However, they remain inaccessible and advanced. However, the microbiological process converting organic compounds (waste) to methane (biogas) and fertilizer (digestate) is traditionally used in developing countries. Furthermore, in Senegal, few scientific studies in this process have been undertaken. Thus, the aims of this study were to: i) quantify organic waste able to produce methane in the suburban area of Dakar; ii) determine their biochemical characteristics and their methanogenic potential; and iii) evaluate the effect of their digestat to fertilize vegetable crops and local cereals. The areas targeted by the study are mainly Hann Bay polluted by cyclic proliferation of macroalgae and the suburban area of Sangalkam where develop a semi-intensive farming and vegetable culture. The results of biochemical characterizations of macroalgae and droppings showed a greater methanogenic potential than the oilcake of *Jatropha curcas*, food residues and cow dung which is used mostly in Senegal for biogas production. Indeed, the potential reached by methanogenic macroalgae is about three fold greater than that of cow dung. However, the high digestibility and low carbon content in macroalgae make it more attractive specifically in co-digestion with other substrates rich in carbon. Furthermore, the results of fertilization tests by liquid digestate on lettuce and three varieties of mint, showed that these biofertilizer can replace the nutritive solutions used in microjardin. However, standardization of the research protocol is necessary to improve its effectiveness. Furthermore, tests with digestate droppings on sorghum and maize grown cultivated in greenhouse conditions gave higher biomass than those of the chemical fertilizer; although the most important were obtained with gross droppings. Our results confirm our hypothesis about the existence of deposits organic waste with high methanogenic potential in sub urban areas in Dakar. Finally, biogas technology could be an interesting alternative for energetic security, global warming and waste management with a beneficial effect on soil fertility management and food security.

Key words : Biogas, Fertilizer, , BMPs, Macroalgae, Micro-garden, Sangalkam,

Dédicaces

Je dédie ce travail à tous ceux dont les prières m'ont toujours accompagnée :

Mes parents,

Mon époux,

Mes frères et sœurs, cousins et cousines, oncles et tantes,

Ma belle-famille,

Mes enfants, neveux et nièces,

Ma Grand-mère maternelle,

Mes amis,

Mes défunts oncles Hassane MAIGUIZO et Ahmed Lamine DIOP

Remerciements

Au nom d'Allah le Très Miséricordieux, le Tout Miséricordieux.

Alhamdoulillahi rabbil a'lamine

Nous voilà au terme de ce parcours passionnant même que escarpé, ayant regroupé une multitude de personnes aux qualités exceptionnelles. Il m'est trop agréable aujourd'hui d'adresser mes sincères remerciements aux hommes et femmes qui se sont beaucoup investis dans la réalisation de ce mémoire.

Je veux commencer par exprimer ma gratitude au Dr Macoumba DIOUF, Directeur National de l'Horticulture et ancien Directeur Général de l'ISRA. Dr DIOUF a été le Premier à avoir cru à ce projet de thèse et s'être engagé à mener à bien les travaux qui s'y dérouleront. Dans le souci d'avoir un spécialiste du Biogaz à l'ISRA, Dr DIOUF m'a accordé un contrat à durée indéterminée au sein de l'Institut et m'a soutenue dans mes démarches de recherches de financement. Je lui en suis profondément reconnaissante.

J'adresse mes sincères remerciements au Pr Ibrahima NDOYE, qui m'a accordé sa confiance et a accepté d'être le Directeur de cette thèse en dépit de ses charges déjà énormes. Il n'a ménagé aucun effort dans la recherche des fonds nécessaires pour la réalisation de ce travail. Ses réponses de façon spontanée à mes sollicitations, ses encouragements, son soutien et sa simplicité dans la vie m'ont été d'une grande aide.

Il m'est très Précieux de saisir cette occasion pour exprimer toute ma reconnaissance sincère et profonde à l'encontre du Dr Saliou FALL, Co-directeur de cette thèse. Aux premières heures de notre rencontre, le Dr FALL a fait de cette thèse une priorité majeure et s'est investi au maximum pour la mener à bien. Durant tout le parcours, Dr FALL s'est tenu à mes côtés avec ses encouragements, son enseignement, ses investigations pour la recherche des financements et des meilleurs collaborateurs. Ses qualités humaines, son amour pour un travail bien fait et sa grande générosité sans limite, font de lui un Grand Maitre apprécié de tous ses étudiants.

Nos remerciements vives au Dr Alioune FALL, Directeur Général de l'ISRA ainsi que tout son staff pour la confiance qu'ils ont toujours continué à nous porter en nous encourageant et nous mettant dans de bonnes conditions de travail pour mener à bien cette thèse.

Un grand merci particulier au Dr Ndeye Yacine BADIANE NDOUR, directrice du LNRPV, laboratoire dont je suis employée, pour m'avoir accordé, avec beaucoup de patience, le temps nécessaire pour la réalisation de cet ouvrage. Dr NDOUR, est pour nous jeunes femmes, une idole dans le domaine scientifique, nous ne cesserons de la remercier de l'honneur qu'elle nous fait.

Je ne saurai tarir de remerciements vis-à-vis de mes collègues-amis-frères personnels du LNRPV. Ils ont suivi cette thèse avec beaucoup d'intérêt et ont tous à leur niveau contribué à mener à bon port nos travaux. C'est un grand honneur et une grande fierté de vous avoir comme collègue. Merci à toute l'équipe.

Nos remerciements vont également à un Valeureux Homme, qui est toujours à l'écoute des êtres humains, toujours à la recherche de meilleures solutions à tous les problèmes qu'on lui pose, un homme dont les valeurs scientifiques et humaines ont séduit plus d'un ; Dr Ndiaga CISSE, Directeur du CERAAS-ISRA. Merci pour les contributions financières et morales à l'encontre de cette thèse.

J'adresse aussi mes sincères remerciements au Dr Diègane DIOUF, la joie fut pour moi de vous compter parmi les membres du jury. Amical et très ouvert, le Dr DIOUF a toujours rendu son approche facile et répondu favorablement à nos sollicitations. Merci de m'avoir accueillie au LCM, laboratoire dont vous êtes Directeur et m'avoir mis dans les meilleures conditions de travail suivi de vos encouragements.

Mes remerciements vont aussi à l'encontre du personnel du LCM pour m'avoir acceptée spontanément dans leur grande famille où règne une humeur de travail dans la gaieté.

Mes remerciements s'adressent aussi aux personnels du LBE qui m'ont accueilli, encadrée, formée et accompagnée durant toute cette thèse ; je pense au Dr Jérôme HAMELIN, Michel TORRIJOS, Philippe SOUSBIE et tout leur staff pour tout enseignement et services rendus lors de mon séjour en France et même après.

Dr Mbaye DIOP, a été pour nous l'homme qui a instauré dans le LNRPV le travail dans un esprit d'équipe familiale et le respect de son prochain. Ses qualités scientifiques, son

ouverture d'esprit, son approche facile et sa simplicité de vie font de lui un homme de marque dont on parle toujours avec joie et respect. Un Grand merci pour avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire.

Nous sommes reconnaissants et adressons tous nos remerciements au Pr DIARRA pour avoir accepté de présider ce jury de thèse malgré les charges qui lui sont escomptées. Un scientifique très pragmatique dans sa pratique, il nous a séduits par sa volonté de vouloir transmettre le savoir tout en formant des professionnels de haut niveau. Nous en profitons aussi pour remercier Prof. Tahir DIOP, Dr Diéynaba SY SALL d'avoir accepté à la dernière minute de participer à ce jury et de juger ce travail.

Evidemment, cette thèse ne serait-ce qu'elle est sans l'aide des étudiants qui nous ont accompagnés et aidés pour l'obtention des résultats ; nous pouvons citer Babacar KEBE, Ndèye Aïda NDIAYE, Ousseynou CISSE, Christian Valentin NADIELINE, recevez mes remerciements sincères.

Nos remerciements à tous nos partenaires qui nous ont suivi durant ces années de thèse : - le centre de recherches sur les énergies renouvelables (CERER) en la personne de son directeur Pr Issakha YOUM, - le Programme National de Biogaz Domestique au Sénégal (PNB-SN) avec son coordinateur M. Matar SYLLA et son ex-coordinateur Mme CORREA Anne, - TECHOGAZ en la personne de son directeur Dr NDIAYE Lamine, - l'ONG ACRA et l'Université de MILAN représenté par M. Piétro DE MARINIS, Dr. Pape Abdoulaye FALL Biologiste environnementaliste-Spécialiste en Assainissement Ecologique-Consultant à GIZ ecosan ; les groupements de femmes « Bollo Takku Ligueye » de Dakar et « Jubalu Jarinu » de Bayakh.

Liste des Communications

Communications orales :

- Nationales :

1- INNODEV : Le salon de l'enseignement supérieur, de l'insertion professionnelle et de l'entreprenariat ; 8 et 9 février 2013 Bibliothèque Universitaire de l'UCAD

2- ISRA : Atelier de lancement du projet FIRST-BIOGAZ ; Mars 2013, CERER-Dakar

3- IRD : Semaine Nationale du Développement Dural/Energie et Changement Climatique ; Avril 2013, IRD-Bel Air-Dakar

4- UADB : Journée de formation en Biogaz-Master II-Energies Renouvelables ; 06 Mars 2014 ; Université Alioune DIOP Bambey

- Internationales :

1- LBE-INRA-France : Stage sur la méthanisation, Novembre 2012, Laboratoire de Biotechnologies de l'Environnement-INRA, Narbonne-FRANCE

2- ZEU-JLU-Allemagne : Conférence internationale SEPA du 3 et 4 Décembre 2013 à ZEU- Justus Liebig University Giessen-Allemagne

3- MIZZOU-USA : Biofuels days ; June 13-27, 2015 University of Mizzou Columbia, Missouri-USA

Posters :

1- Doctoriales UCAD-ED-SEV 2012

2- Doctoriales Institut Français 2013 (prix du 2ème meilleur poster)

3- Deuxièmes journées scientifiques du CAMES 2015 (Meilleur poster, sous-thème : Valorisation de la Biomasse en Energie)

Liste des Abréviations et Sigles

€ : Euro
°C : Degré Celsius
ADEME : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
ADF : Acid detergent fiber
ADL : Acide detergent lignin
AGRIFORCE : Entreprise de matériels agricoles
AMCFE : Association Malienne pour la Conservation de la Faune et de l'Environnement
ANCAR : Agence Nationale de Conseil Agricole et Rural
ANER : Agence Nationale des Énergies Renouvelables
ANEV : Agence Nationale des Eco-villages
ANOVA : Analysis of variance
APHA : American Public Health Association
ASER : Agence Sénégalaise d'Electrification Rurale
ASS : Afrique subsaharienne
ATP : Adénosine triphosphate
BIOECO : Revendeur exclusive de technologie biogaz et d'équipements
BMP : Biochemical Methane Potential
C : Carbone
Ca : Calcium
CAMES : Conseil Africain et Malgache pour l'Enseignement Supérieur
CARITAS : Confédération internationale d'organisations catholiques
CDH : Centre pour le Développement de l'Horticulture
CERAAS : Centre d'Etude Régional pour l'Amélioration de l'Adaptation à la Sécheresse
CERER : Centre d'Étude et de Recherche sur les Énergies Renouvelables
Cf. : Confer
CH_4 : Méthane
CHU : Centre Hospitalier Universitaire
CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
Cm/s : centimètre par seconde
cm^2 : Centimètre carré
CNCAS : Caisse Nationale du Crédit Agricole du Sénégal
CNCR : Conseil national de concertation et de coopération des ruraux
CO : Oxyde de carbone
CO_2 : Dioxyde de carbone
COV : composés organiques volatiles
CRA : Centre de Recherches Agricoles
CRAT : Centre Régional Africain de Technologies
Cwd =Cwm : Cow dung = Bouse de vache
D_ : Digestat
DBO : Demande Biochimique en Oxygène
DCO : Demande Chimique en Oxygène
DIB : Déchets Industriels Banals
DLs : Digestats liquides
ED-SEV : Ecole Doctorale « Sciences de la Vie, de la Santé et de l'Environnement»
EDTA : acide éthylène diamine tétraacétique
ENDA : Organisation internationale qui lutte contre la pauvreté par la promotion du développement durable du Tiers Monde
EnRs : Energies Renouvelables
F CFA : Franc des Colonies Françaises d'Afrique
FAO : Food and Agriculture Organization
FPP : Fientes de Poulets Pondeuses
GGC: modèle de digesteur
h : heure
H : Hydrogène
ha : Hectare
i.e. : « id est » = « c'est-à-dire »
IMAGO : Instrumentation, Moyens Analytiques, Observatoires en Géophysique et Océanographie
IRD : Institut de Recherches pour le Développement
ISD : Installation de stockage de déchets
ISO : International Organization for Standardization
ISRA : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
JAS : Jour Après Semis
Jcc : *Jatropha curcas* cake
K : Constante d'équilibre
K : Potassium
kg : Kilogrammes
kWh : kiloWatt Heure
LAMA : Laboratoire des Moyens Analytiques
LBE-INRA : Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement-Institut National de la Recherche Agronomique
LCM : Laboratoire Commun de Microbiologie
MAlg : Macroalgues
Max. : maximal
Mg : Magnésium
MGC : milligas-Counter
Min. : minimal
MIZZOU-USA :University of Missouri-United States of America
MJ : Méga Joule

MS : Matière sèche
MV : Matière Volatile
mV : MilliVolts
MW : MégaWatt
MWh : MégaWattHeure
N : Azote
Na : Sodium
NDF : Neutral Detergent Fiber
Nm^3 : Mètre cube normal de gaz (soit 0.00058 TEP (Tonne Equivalent Pétrole) pour le biogaz à 60% de méthane)
O : Oxygène
OM : Ordures Ménagères
ONAS : Office Nationale d'Assainissement du Sénégal
ONG : Organisation Non Gouvernementale
P : Phosphore
PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur
PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur
pH : Potentiel Hydrogène
pKa : Constante d'acidité
PM : Poids Humide
PNB-SN : Programme National de Biogaz domestique au Sénégal
ppm : partie par million
PS : Poids Sec
QSP : quantité suffisante pour
S : Soufre
SEDIMA : Sénégalaise de distribution de matériel avicole
SEN : Sénégal
SENELEC : Société Nationale d'Électricité
SERAS : Société d'Exploitation des Ressources Animales du Sénégal
Si : Silicium
SOGAS : Société de gestion des Abattoirs du Sénégal
STEP : Station d'épuration
t/an : tonne par an
T0 : Témoin négatif
TCP : Programme de Coopération Technique
TEP : Tomographie par émission de positrons
TRH : Temps de rétention hydraulique
TWh : TonneWattHeure
UASB : *UpflowAnaerobicSludgeBlanket*
UCAD : Université Cheikh Anta DIOP
W : Indice de Wobbe
WAAPP : West Africa Agricultural Productivity Program
XLSTAT : Logiciel de statistique pour Excel
ZEU-JLU : Zentrum für internationale Entwicklungs- und Umweltforschung-Justus Liebig University

Liste des figures

Figure 1: Représentation schématique des domaines d'intervention des études de cette thèse 4
Figure 2 : Le digesteur expérimental de type Transpaille (ISRA-CIRAD, Année 1984) 16
Figure 3: Le moteur transformateur du biogaz et le digesteur à bâche de THECOGAS (Année 2013) 16
Figure 4: Prototype GGC (PNB-SN, BIOECO, Année 2013) 17
Figure 5 : Plan type d'un biodigesteur à dôme fixe 17
Figure 6 : Applications courantes du biogaz au Sénégal (cuisson à gauche et éclairage à droite) 19
Figure 7 : Valorisation des déchets organiques par méthanisation 21
Figure 8 : Schéma de la chaîne trophique des étapes de la fermentation anaérobique 29
Figure 9: Correspondance énergétiques du biogaz et d'autres sources d'énergie 38
Figure 10 : Schéma de digesteur type Ducellier-Isman 48
Figure 11: Schéma de digesteur type CIEH 49
Figure 12: Schéma de digesteurs infiniment mélangés. 50
Figure 13 : Schéma de digesteur à contact. 51
Figure 14:Schéma de digesteur à lit fixe. 52
Figure 15 : Schéma de digesteur à deux étapes. 53
Figure 16 : Carte de la commune de Dakar 58
Figure 17 : La ville de Dakar et ses plages 59
Figure 18 : Vue satellitaire de la carte de pollution de la baie de Hann 59
Figure 19 : Vue aérienne du Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE-INRA) 60
Figure 20: Serre de LNRPV-ISRA Bel Air 61
Figure 21: agitateur pour l'incubation des mini-digesteurs 62
Figure 22: L'analyseur de gaz du LAMA 62
Figure 23: Fientes de poulet récolté dans une ferme à Sangalkam 63
Figure 24: Bouse de Vache récolté dans une ferme à Sangalkam 64
Figure 25 : Pollution de la baie de Hann par les macroalgues (vaste étendue et grande profondeur) 65
Figure 26 : Les deux espèces dominantes à la baie de Hann (Ulva lactuca et Codium tomentosum) 65
Figure 27: Reste alimentaire de restaurant 67
Figure 28 : Réacteurs en batchs de 6l du LBE 69
Figure 29: Schéma du débitmètre Ritter milligas-Counter MGC-1. 69
Figure 30: µChromatographie à phase gazeuse et Appareils de Dégazage sous hotte 71
Figure 31 : Dispositif Van Soest 72
Figure 32 : Schéma de l'extraction des fibres Van Soest 74
Figure 33 : Appareils de mesure de carbone total TOC-V 75
Figure 34 : Spectrophotomètre (A) ; Appareils de dosage d'Azote Total (B) 76
Figure 35 : Dispositif pour le dosage des lipides 77

Figure 36 : La Photométrie de flamme 78
Figure 37: Trois variétés de menthes utilisées sur support polystyrène en hydroponie 80
Figure 38: La laitue sur support solide 81
Figure 39: Table confectionnée avec substrat solide (source FAO) 84
Figure 40 : Production cumulative de méthane (CH_4) des trois substrats étudiés 95
Figure 41 : Composition de biogaz (%) des trois substrats 96
Figure 42: Comparaison de la dégradabilité des substrats à celle de l'éthanol dans des réacteurs en batchs 97
Figure 43: Biogaz et méthane(%) produits par les fientes de poulets pondeuses 104
Figure 44: Prototypes de digesteur expérimental : Mini-prototype de 500 ml et le Biodiambar de 10 l 105
Figure 45: Dispositif de microjardin de l'ONG ACRA installé dans le parc de Hann Bel-Air 111
Figure 46 : Poids aérien et racinaire de la laitue après 2 mois de croissance 112
Figure 47 : Poids sec racinaire et aérien de la laitue après 2 mois de croissance 113
Figure 48: Réponses des tests de digestats sur les poids humides des différentes variétés de menthes 114
Figure 49: Poids sec des différentes variétés de menthes après deux mois de croissance 115
Figure 50 : Boites à moustache des poids humides des plants en microjardinage 118
Figure 51: Vue d'ensemble des plants de maïs selon les différents traitements appliqués (A); comparaison entre les traitements digestats et témoins(B) 120
Figure 52 : Poids moyen des parties aériennes en fonction des traitements organiques ou minéral. 121
Figure 53 : Poids moyen des parties racinaires en fonction des traitements organiques ou minéral 122
Figure 54: courbe de corrélation biomasse racinaire /biomasse aérienne 123
Figure 55: Poids moyen des parties aériennes du sorgho en fonction des traitements organiques ou minéral ... 125
Figure 56: Poids moyen des parties racinaires du sorgho en fonction des traitements organiques ou minéral ... 126
Figure 57: courbe de corrélation biomasse racinaire et aérienne 127
Figure 58 : Comment interpréter une courbe de volume de biogaz produit au cours d'un batch 12

Liste des tableaux

Tableau 1: Réaction de l'acidogénèse du glucose 27
Tableau 2 : Réaction de l'acétogenèse du glucose 27
Tableau 3: Réaction de méthanogénèse du glucose 28
Tableau 4 : Principaux gaz qui composent le biogaz 37
Tableau 5: Caractéristiques et Composition moyenne des gaz du biogaz 39
Tableau 6 : Caractéristiques physiques des principaux composés des gaz de biomasse 42
Tableau 7 : Classification des espèces utilisées comme substrats 67
Tableau 8 : Quelques caractérisations physico-chimiques des substrats organiques étudiés 93
Tableau 9 : Composition biochimique des substrats organiques étudiés en g / kg MS. 94
Tableau 10 : Valeur énergétique des substrats organiques étudiés 96
Tableau 11 : Résultats d'enquêtes sur Sangalkam et alentours (gros producteurs de déchets) 102
Tableau 12 : Résultats d'enquêtes à Sangalkam et environs (producteurs domestiques) 103
Tableau 13: Caractéristique biochimique des principaux substrats méthanisables à Sangalkam 103
Tableau 14: ANOVA sur le cumul de biomasse humide de la production de menthe 116
Tableau 15 : Hauteur des plants de maïs à JAS 75 121
Tableau 16 : biomasse sèches des parties aériennes et racinaires du maïs en fonction des traitements 123
Tableau 17: hauteur et diamètre du collet des plantes de sorgho avec différents types de bio-fertilisation 124
Tableau 18 : Biomasse sèche aérienne et racinaire du sorgho en fonction des traitements 126
Tableau 19: Comparaison entre C, N et C/N des substrats étudiés 130

Sommaire

RESUME : **2**

INTRODUCTION GENERALE **2**

I. Contexte et objectifs de l'étude *2*

II. Domaines d'intervention *3*

III. Plan de la thèse *4*

CHAP. I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: METHANISATION ET VALORISATION DE SES DERIVES **6**

I. Les Bioénergies de la biomasse *7*

1. Définition 7
2. Les différents types d'énergies de la biomasse 7
3. Une filière polymorphe 8
   a. Les transformations thermochimiques 8
   Combustion 9
   Pyrolyse et gazéification 9
   b. Les transformations physicochimiques 10
   Fermentation et extraction d'huile végétale 10
   Méthanisation 10

II. Etat des lieux de la méthanisation dans certains pays Européens et Africains *10*

III. Le secteur de l'énergie au Sénégal *12*

1. Sous-secteurs des énergies renouvelables au Sénégal 14
2. Le Biogaz au Sénégal 15
   a. Les acteurs 15
   b. Les technologies utilisées 15
   c. Les activités 17
   d. Les coûts d'investissement 17
   e. Les coûts d'exploitation 18
   f. Les substrats utilisés 18
   g. Les teneurs en méthane 18
   h. Les formes de valorisation du biogaz 18
   i. Les effets et impacts socioéconomiques et environnementaux 19
   j. Les résultats 19

IV. La méthanisation *20*

1. Définition 20
2. Principales dates clés du développement de la méthanisation 22
3. La méthanisation domestiquée : biogaz 23
   a. Biogaz et STEP : 23
   b. Méthanisation des déchets municipaux 24
   c. Méthanisation agricole 25
4. Les processus élémentaires de la méthanisation 25
5. Biochimie de la méthanisation 26
   a. L'hydrolyse 26
   b. L'acidogénèse 26
   c. L'acétogenèse 27
   d. La méthanogénèse 28
6. Les facteurs théoriques ou conditions physico-chimiques influençant la méthanisation 30
   e. Le pH 30
   f. La température 30
   g. Le temps de séjour 31
   h. Le potentiel d'oxydo-réduction 31

i. La charge ... 31
j. Les substances toxiques ... 32
7. Besoins nutritionnels ... 32
a. Les macro-éléments ... 32
b. Les oligo-éléments ... 33
8. Les substrats méthanisés dans le monde ... 33
a. Méthanisation des biodéchets municipaux ... 33
b. Méthanisation d'effluents d'élevage ... 33
c. Stations d'épuration urbaines ... 34
d. Méthanisation des effluents industriels ... 34
e. Installation de stockage de déchets (ISD) : méthanisation en décharge ... 35
f. Co-digestion ... 35

V. Le Biogaz ... 36
1. Définition ... 36
2. La composition du biogaz ... 36
3. La valorisation du biogaz ... 37
a. Production de chaleur : les chaudières ... 37
b. Production d'électricité : les moteurs ou les turbines à gaz ... 37
4. Le biogaz et les autres sources d'énergies ... 38
5. Les caractéristiques des gaz du biogaz ... 38
6. Les facteurs déterminant de la combustion et les caractéristiques du combustible ... 39
a. Caractérisation d'un combustible ... 39
b. Pouvoir calorifique ... 39
c. Pouvoir comburivore ... 40
d. Indice de Wobbe ... 40
e. Indice méthane ... 40
f. Limite d'auto-ignition ou auto-inflammabilité ou TC (température critique) ... 41
g. Volatilité ... 41
h. Coefficient de richesse Phi ou dosage de la combustion ... 41
i. Vitesse de propagation de flamme ... 41
7. Les caractéristiques des principaux composés et leurs problématiques pour la valorisation ... 42
a. Le méthane : CH_4 ... 42
b. L'oxygène : O2 ... 42
c. Le dioxyde de carbone : CO_2 ... 43
d. L'hydrogène : H_2 ... 43
e. Le monoxyde de carbone : CO ... 43
f. Les composés azotés ... 44
g. Le méthanol ... 44
h. L'eau : H_2O ... 44
i. Les composés soufrés ... 44
j. Les composés organiques volatiles (COV) ... 45
k. Le silicium et ses composés : les siloxanes ... 46

VI. Les digesteurs anaérobiques ... 46
1. Définition ... 46
2. Les différents types de digesteur ... 46
a. Les digesteurs discontinus ... 47
b. Les digesteurs de type continu ... 49

VII. Le Digestat ... 54
1. Définition ... 54
2. Propriétés du digestat ... 54
a. L'humus dans le digestat ... 54
b. Le pH du digestat ... 55
c. L'évolution du rapport C/N ... 55
d. La diminution des odeurs ... 55
e. La préhygiénisation lors de la méthanisation ... 55
f. Séparation de phase ... 56
g. Effet sur l'azote ... 56

CHAP. II : MATERIELS ET METHODES ... 57

I. Sites d'études ... *58*
1. Sites d'échantillonnages ... 58
2. Sites d'analyses ... 60

II. Substrats exploités ... *63*
1. Les fientes de volaille : ... 63
2. Bouse de vaches ... 63
3. Les algues ... 64
4. Tourteau de Jatropha ... 66
5. Les déchets ménagers : ... 67

III. Détermination du potentiel méthane des substrats ... *68*
1. Mesure de la Matière Sèche (MS) ou Siccité et de la Matière Volatile (MV) : ... 68
2. Réacteurs en batchs ... 68
3. Tests BMP (Biochemical Methane Potential) ... 70
4. La caractérisation biochimique des substrats ... 72
   a. Extractions de fibres Van Soest ... 72
   b. Dosage Carbone Total par le TOC-V: ... 74
   c. Dosage Phosphore par spectrophotométrie: ... 76
   d. Dosage Azote total par la méthode de Kjeldhal ... 76
   e. Dosage lipide par extraction solvant : ... 77
   f. Dosages Sodium et Potassium par photométrie de flamme ... 77
   g. Rapport de C/N ... 78

IV. Détermination du pouvoir fertilisant des digestats ... *78*
1. Préparation des digestats ... 78
2. Spéculations testés ... 79
   a. Le maïs ... 79
   b. Le sorgho : ... 79
   c. La menthe : ... 80
   d. La Laitue ... 81
3. Protocoles de recherches ... 81
   a. Comparaison, sous serre, de la valeur agronomique de digestats et substrats respectifs ... 81
   b. Détermination de la valeur agronomique de digestats en microjardinage ... 83
4. Analyses statistiques ... 86

CHAP. III : CARACTERISATION BIOCHIMIQUE ET DETERMINATION DU POTENTIEL METHANE DE SUBSTRATS ORGANIQUES ... 87

INTRODUCTION ... 88

CHAP. III.1 : CARACTERISATION ET COMPARAISON DE POTENTIEL METHANE DE DEUX MACROALGUES VERTES (*ULVA LACTUCA* ET *CODIUM TOMENTOSUM*) ET D'AUTRES SUBSTRATS ORGANIQUES DISPONIBLES AU SENEGAL ... 90

I. Introduction ... *91*

II. Matériel et méthode : ... *92*

III. Résultats ... *92*
1. Détermination de la matière sèche (MS), matière volatile (MV) ... 92
2. Composition biochimique des substrats étudiés. ... 94
3. Détermination du pouvoir énergétique des substrats ... 94
   a. Les tests BMP : ... 94
   b. Biodégradation des substrats en réacteur en batchs ... 96

CHAP. III.2 : ETUDE DE POTENTIALITES ENERGETIQUES DE QUELQUES SUBSTRATS COLLECTES A SANGALKAM AU SENEGAL ... 99

I. Introduction ... *100*

II. Matériels et méthodes ... *101*

III. Résultats ... *101*
1. Estimation qualitative et quantitative des substrats en zone périurbaine de Dakar ... 101
   a. Production semi-industrielle de composés organiques méthanisables ... 101
   b. Production domestique de déchets méthanisables ... 102
2. Caractérisation biochimique de substrats représentatifs de Sangalkam ... 103

3. Production de Biogaz à partir de substrats représentatifs de Sangalkam 104
4. Mise au point et fabrication de prototype de biodigesteurs 105

CHAP. IV : VALEUR AGRONOMIQUE DE DIVERS DIGESTATS 107

INTRODUCTION 108

CHAP. IV.1 : EFFET DES DIFFERENTS TYPES DE DIGESTATS SUR LA CROISSANCE DES PLANTES EN MICROJARDIN. 110

I. Introduction 110

II. Effet des biodigestats sur la biomasse de plants en microjardin. 111
1. Effet sur la croissance de laitue 112
2. Effet sur la croissance de différentes variétés de menthe 113

III. Effet des digestats comparés à la solution macro-micro 117

CHAP. IV.2 : EFFET FERTILISANT DE DIGESTATS SUR LA CULTURE DE CEREALES 119

I. Introduction 119

II. Matériel et méthode 120

III. Résultats 120
1. Effet des digestats sur la croissance du maïs 120
   a. Effet sur la hauteur et le diamètre collet 120
   b. Effet des digestats sur les biomasses aérienne et racinaire du maïs 121

IV. Effet des digestats sur la croissance du sorgho 124
   a. Effet sur la hauteur et diamètre du collet 124
   b. Effet sur les biomasses humides des parties aériennes et racinaires du sorgho. 125

DISCUSSION GENERALE 128

I. Caractérisation biochimique des substrats organiques 129

II. Détermination du pouvoir énergétique des substrats 132

III. Utilisation des digestats en microjardin 133

IV Utilisation des digestats pour fertiliser les céréales 135

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 138

I. CONCLUSION 139

II. PERSPECTIVES 140

BIBLIOGRAPHIE 1

ANNEXES 10

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

I. Contexte et objectifs de l'étude

Dans le contexte mondial actuel, certains pays sont confrontés à un problème énergétique lié à l'instabilité géopolitique qui contribue à la fluctuation du prix du pétrole qui est le principal carburant utilisé. Contrairement à certains pays de l'Afrique de l'Ouest, le Sénégal est doté de très peu de réserves énergétiques forestières, alors qu'aujourd'hui cette seule source couvre plus de 53% de la demande énergétique des ménages. Les sources énergétiques à base de pétrole fossile couvrent 34% de la demande et les résidus agricoles environ 1% (Sokona, 2000). De plus, avec l'augmentation de sa démographie, sa demande énergétique s'accroit de plus en plus. Différentes initiatives sont prises par les autorités pour répondre à cette demande énergétique croissante accentuée par l'urbanisation galopante. Le programme de butanisation qui visait à substituer la demande des villes (74% d'utilisateurs en ville contre 12% en zone rurale) en charbon de bois est vite passée de 15 000 tonnes en 1987 à plus de 100 000 tonnes en 2000, aggravant la dépendance des ménages sénégalais aux produits pétroliers. Pour essayer de répondre à cet accroissement de la population et donc à leurs besoins énergétiques, l'Etat du Sénégal a mis en place une politique énergétique qui vise à diversifier les sources énergétiques mais surtout à tenir compte du potentiel de production des énergies renouvelables qu'offre notre pays. Si des pistes sont proposées pour la capitale et les grandes villes, très peu d'initiatives sont proposées pour les besoins des zones périurbaines et rurales qui concentrent la presque totalité des ménages à faibles revenus. Certaines technologies sur la base d'énergies renouvelables sont proposées, mais souvent financièrement inaccessibles et sophistiquées à entretenir pour les populations rurales et périurbaines. A l'opposé, le processus microbiologique de conversion des composés organiques (déchets) en méthane (biogaz) par une digestion anaérobique est traditionnellement bien étudié et couramment utilisé dans beaucoup de pays américains et asiatiques. Les présomptions socioculturelles et l'absence d'intérêt économique expliquent le faible succès de cette technologie à fort potentiel au Sénégal. Pourtant, la production de biogaz constitue une solution pour répondre à plusieurs problématiques (gestion des déchets, réchauffement climatique, fertilité des sols).

C'est dans ce contexte que notre projet de thèse, intitulé : « Contribution à la caractérisation de déchets organiques provenant de zones périurbaines et urbaines de Dakar pour la

production de biogaz et biofertilisants», a vu le jour. Ce projet cible la zone de Sangalkam à cause de sa double facette. En effet, Sangalkam est une zone rurale et de plus en plus considéré comme une zone périurbaine à cause de sa position vis-à-vis de Dakar. L'activité agricole au sens large y est très développée et par conséquent, il est ainsi une zone potentielle de production d'importantes quantités de déchets et de composés organiques (élevage, agriculture, industrie…). Cependant, aucune étude à notre connaissance n'a évalué de manière exhaustive le potentiel de production d'énergie renouvelable de cette zone. Le but de cette étude est d'estimer le potentiel de ces composés en Bioénergie et Biofertilisant. La valorisation de ces composés organiques aidera aussi les populations de Sangalkam à mieux gérer leurs déchets biodégradables et les matières fécales de leurs animaux domestiques.

L'objectif principal de cette étude est la production d'une énergie renouvelable et de fertilisants biologiques accessibles aux populations périurbaines par un processus de méthanisation à partir de divers résidus et déchets organiques.

Pour atteindre cet objectif principal, nous nous sommes fixés comme objectifs spécifiques :

- OS 1) Evaluer les pools de résidus et déchets organiques disponibles dans le site d'étude.
- OS 2) Caractériser et déterminer le pouvoir énergétique des résidus et déchets organiques collectés.
- OS 3) Caractériser et déterminer le potentiel fertilisant des digestats en agriculture.

II. Domaines d'intervention

La Figure 1 donne les différents domaines d'intervention du processus de méthanisation dont :

- Recyclage de déchets

- Production d'énergie renouvelable

- Production de fertilisant biologique

- Promotion de l'élevage

- Changements climatiques

Figure 1: Représentation schématique des domaines d'intervention des études de cette thèse

III. Plan de la thèse

Après une introduction générale, une synthèse bibliographique (**Chapitre I**) et une présentation des matériels et méthodologies utilisées (**Chapitre II**), les résultats obtenus et discutés sont présentés en quatre sous-chapitres dont deux par chapitre (Chapitre III et Chapitre IV). Les résumés des articles scientifiques qui sont soumis où publiés sont présentés dans la partie Annexes.

Le **Chapitre III** relate des travaux menés au laboratoire sur les déchets organiques collectés sur site. Ces échantillons ont d'abord subit une caractérisation biochimique pour déterminer leur taux de cendre, carbone, azote, phosphore, potassium, sodium, lipides, les fractions cellulosique et lignine, magnésium et aussi leur potentiel méthane. Dans ce chapitre nous avons rapporté les résultats des enquêtes menées sur la disponibilité saisonnière des différents types de déchets organiques sur les sites d'études, et aussi des résultats de modélisation de prototypes de biodigesteurs expérimentaux.

Le **Chapitre IV** : Dans ce chapitre, nous avons testé le pouvoir fertilisant des digestats issus du chapitre précédent. Les tests menés en serre ont porté sur les spéculations sorgho et maïs ; ceux menés en microjardin ont porté sur la laitue et la menthe. L'effet des digestats est comparé à l'effet de la fertilisation chimique sur ces cultures.

Enfin les résultats obtenus ont fait l'objet d'une discussion générale suivie de la conclusion et des perspectives tirées de ce travail.

CHAP. I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE: METHANISATION ET VALORISATION DE SES DERIVES

I. Les Bioénergies de la biomasse

1. Définition

Par définition, les bioénergies désignent l'ensemble des filières de valorisation énergétique de la biomasse correspondant donc à la conversion de l'énergie solaire en biomasse par le processus biologique de la photosynthèse (Futura-science , 2015).

Dans des conditions d'exploitation durable, ces énergies sont considérées comme renouvelables.

Dans un sens large, la biomasse réfère aux matières organiques végétales ou animales brutes (bois, cultures énergétiques, déchets verts,...) ou ayant subi une transformation (effluents, déchets,...). Ainsi, la biomasse constitue la source principale d'énergie dans les pays en voie de développement. Son utilisation est en plein essor dans les pays développés où elle occupe une place importante comme source d'énergie alternative et propre.

Le caractère renouvelable que l'on peut attribuer à l'énergie issue de la biomasse s'explique par le cycle du carbone : les émissions correspondant à l'utilisation de la biomasse sont compensées par le stock de carbone effectué pendant la croissance de cette dernière.

Par contre, lorsque les émissions liées à la consommation de la biomasse ne sont pas compensées par sa croissance naturelle (par exemple dans le cas d'une forêt surexploitée), la biomasse ne peut et ne doit pas être considérée comme une source d'énergie propre et renouvelable.

2. Les différents types d'énergies de la biomasse

Dans le détail, on distingue plusieurs types de biomasse (Enea Consulting, 2012) :

- les dendroénergies, issues de la production de matière organique par les arbres et extraites au travers de l'exploitation forestière. Il s'agit essentiellement de combustibles ligneux solides, mais il existe des processus pour produire des combustibles liquides ou gazeux ;

- les agroénergies, issues de la production agricole au travers de la conversion des cultures, des sous-produits et des résidus agricoles en combustibles solides (pailles), liquides (biocarburants) ou gazeux (biogaz) ;

- les énergies de la biomasse algale, collectée localement ou au sein d'algoculture en bassins ou en réacteurs. Cette biomasse est ensuite convertie en biocarburants ou en biogaz ;

- les énergies issues des déchets organiques domestiques et industriels. Ces dernières sont exploitées soit par combustion avec cogénération d'énergie thermique et électrique, soit par méthanisation et transformation en biogaz ;

- l'énergie musculaire des animaux de bât, de trait ou de monte, ainsi que celle de l'Homme : marche à pied, aviron, cyclisme, etc. L'énergie musculaire est la plus ancienne énergie exploitée par l'Homme. Cette énergie est encore très importante dans de nombreux pays en voie de développement, en particulier en milieu rural.

Enfin, il est à noter que dans certains milieux, le terme de bioénergie recouvre l'ensemble des énergies renouvelables, considérées comme des énergies dynamiques (flux), par opposition aux énergies fossiles (stock).

3. Une filière polymorphe

Les bioénergies peuvent être séparées en plusieurs sous-filières.

Au niveau des intrants tout d'abord, il est possible de distinguer deux principaux types de biomasse : la biomasse issue de cultures énergétiques (bois, paille, céréales, colza, algues...) et la biomasse déchet (déchets ménagers, lisiers, effluents industriels,...) (Enea Consulting, 2012).

Deux grandes familles de procédés permettent de valoriser cette biomasse en énergie : les procédés de conversion thermochimiques (combustion, pyrolyse, gazéification) et physicochimiques (fermentation, extraction d'huile végétale, méthanisation).

Cette multiplicité des filières permet d'obtenir des produits finaux de natures diverses, qu'il s'agisse de l'énergie sous forme de chaleur et/ou d'électricité ou d'un vecteur énergétique intermédiaire liquide, gazeux ou solide.

a. Les transformations thermochimiques

Les procédés de traitement thermique de la biomasse pour sa valorisation énergétique se différencient principalement par l'apport d'air qui est effectué au niveau des réactions

thermochimiques en jeu. Ces dernières sont donc différentes, donnant lieu à des produits de réaction variés.

Combustion : Méthode la plus évidente, et la plus ancienne, pour valoriser l'énergie de la biomasse, la combustion se présente sous une extrême variété de procédés : alors que les fours traditionnels sont encore utilisés dans les pays en développement, des unités de grande puissance (de l'ordre de 100 MW au plus) et à très haut rendement sont développées pour des applications industrielles. La combustion génère de l'énergie thermique qui peut être utilisée comme telle ou transformée, par l'intermédiaire d'une turbine à vapeur par exemple. Les rendements des meilleures technologies de combustion développées pour l'industrie atteignent 75 à 90%.

Pyrolyse et gazéification : En alternative à la combustion, la voie pyrolyse/gazéification offre une plus grande flexibilité en termes de forme de l'énergie finale mais également un rendement de conversion meilleur pour la production d'électricité. La pyrolyse consiste en une décomposition thermique de la biomasse en milieu inerte (absence ou très faible quantité d'air). Elle conduit à la production de trois phases : un solide, le charbon ou « biochar » ; un liquide, l'huile pyrolytique (issue de vapeurs condensables) ; et un gaz combustible à faible pouvoir calorifique. Les proportions des différents produits sont fonction des paramètres opératoires de la pyrolyse (temps de séjour de la biomasse et température).

La réaction dite de gazéification englobe la phase de séchage de la biomasse, la pyrolyse, la gazéification du résidu carboné (le char) et le reformage des gaz et des vapeurs condensables de pyrolyse. Elle aboutit ainsi à la production d'un gaz combustible communément appelé syngaz constitué majoritairement de CO et de H_2 et dont le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est généralement compris entre 5 et 20 MJ/Nm^3 (en fonction de la biomasse utilisée et du vecteur de gazéification – air, vapeur ou O_2).

Le gaz de synthèse produit peut être valorisé selon trois filières : production d'électricité et de chaleur par cogénération, production de biocarburant liquide après transformation par un procédé Fischer-Tropsch ou encore reformage pour produire de l'hydrogène par Water Gas Shift ou du biométhane par méthanisation. Le rendement énergétique global de la transformation varie entre 45 et 95% en fonction du produit final.

Les produits de la pyrolyse seule ont aussi leurs propres débouchés : les huiles pyrolytiques en particulier sont une des voies de production des biocarburants de 2nde génération.

b. Les transformations physicochimiques

On distingue parmi les procédés de traitement physicochimique de la biomasse deux filières relativement différentes : les procédés d'extraction et de fermentation, et la digestion anaérobie ou méthanisation.

Fermentation et extraction d'huile végétale : Ces procédés sont destinés à transformer de la biomasse pour la production de biocarburants liquides : Les procédés de fermentation et distillation permettent d'obtenir, à partir de biomasse riche en sucres ou en amidon, de l'éthanol qui peut être utilisé pur ou de manière combinée avec des carburants fossiles. Les procédés d'extraction sont à la base de la production de biodiesel à partir de plantes oléagineuses.

Méthanisation : Le procédé de méthanisation, ou digestion anaérobie, est adapté à une biomasse humide, de type biodéchets et/ou effluents ménagers, agricoles ou industriels. Utilisé à l'origine comme procédé de dépollution (apparition de la digestion anaérobie en station d'épuration au début du XX^{ème} siècle), son intérêt énergétique s'est vite révélé à travers la possibilité de valoriser le biogaz produit.

II. Etat des lieux de la méthanisation dans certains pays Européens et Africains

Certains pays ont fait le choix de privilégier l'aspect production énergétique de la méthanisation, par l'utilisation de cultures énergétiques en particulier ; c'est le cas de l'Allemagne. Le biogaz représentait environ 2,7% de la production d'énergie primaire en Allemagne en 2007. La méthanisation et la valorisation du biogaz, encore peu présentées en France par rapport à l'Allemagne, sont en plein développement grâce à des politiques incitatives mais aussi l'efficacité reconnue de la digestion anaérobie comme procédé de dépollution en comparaison à des procédés aérobies classiques (aération prolongée, lagunage,...). La création dans un futur proche d'un cadre réglementaire relatif à l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel permettra de développer ce type de projet pour

optimiser la valorisation énergétique du biogaz et donnera une nouvelle dynamique à l'ensemble de la filière.

C'est dans une optique de préservation de l'environnement et d'amélioration des conditions de vie, que c'est dernières années, plusieurs projets liés à la production de biogaz se sont développés sur le continent africain. L'énergie issue du biogaz apparaît quelque peu comme une solution aux coupures intempestives d'électricité dans certains Etats africains, comme le Sénégal, la Mauritanie et le Burkina Faso. Ces délestages avaient entraîné des manifestations contre la Société nationale d'électricité, au Sénégal, dont la plus importante a été organisée le 23 juin 2011. On retrouve la plupart du temps des installations reliant des latrines au digesteur lui-même relié à des cuisines ou des lampes fonctionnant au biogaz.

Ces pays ont initié un programme national de biogaz, qui a pour objectif d'assurer durablement l'approvisionnement des ménages urbains et ruraux en énergie de cuisson, et d'éclairage à partir des bouses de vaches pour la plupart des cas.

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. Ce système devrait bientôt équiper de nombreux équipements collectifs au Rwanda.

Au Burkina Faso, dans la région du Plateau central, la technologie du biodigesteur 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 Biodigesteur au Burkina Faso (PNB-BF) qui subventionne plusieurs installations.

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 est une ONG formée par des biologistes, environnementalistes et autres professionnels du développement rural. Cette ONG est particulièrement active dans la région de Kayes ou les ressources ligneuses se font rares et ou la demande en énergie est largement supérieure a 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 digesteur pour s'alimenter en gaz (ex: L'hôpital baptiste de Banso, centre de santé du nord-ouest du Cameroun). De plus des études ont montré l'intérêt économique d'installer des digesteurs 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 du Togo). Cependant les résultats ne furent pas concluant. L'hôpital CHU de Tokoin à Lomé à était équipé d'un biodigesteur qui alimentait son bloc opératoire en électricité pendant une période. Cependant une mauvaise utilisation de celui-ci et le manque de main d'œuvre qualifié dans cette nouvelle technologie a entrainé l'abandon de l'initiative autosuffisance 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.

III. Le secteur de l'énergie au Sénégal

L'analyse du cadre politique, institutionnel et réglementaire du secteur de l'énergie fait ressortir que l'accès des populations aux différentes formes d'énergies commerciales est faible de même que le niveau de consommation d'énergie finale. Par contre la

dépendance énergétique vis-à-vis de l'extérieur est élevée et constitue un fardeau pour les pouvoirs publics.

Aussi, la nouvelle politique énergétique du pays, pour la période 2012 – 2017, met-elle l'accent sur un secteur énergétique caractérisé par une parfaite disponibilité de l'énergie et garantit un accès universel aux services énergétiques modernes dans le respect des principes d'acceptabilité sociale et environnementale. A cela s'ajoute la volonté du Sénégal à faire accéder au moins la moitié de la population rurale et péri urbaine aux services énergétiques modernes à l'horizon 2015 (Ministère de l'énergie, 2011).

A travers la nouvelle politique énergétique que le Gouvernement entend mettre en œuvre une stratégie se rapportant au secteur et dont les principaux axes sont les suivants:

- Garantir la sécurité énergétique et accroître l'accès à l'énergie pour tous, afin d'impulser une croissance économique et un développement social équitable ;
- Développer un mix énergétique comme base de sortie de crise associant le charbon, le gaz naturel, l'hydroélectricité, les interconnections et les énergies renouvelables
- Poursuivre et accélérer la libéralisation du secteur ;
- Améliorer la compétitivité afin, d'une part, de rendre l'énergie accessible, en termes de prix, au plus grand nombre de consommateurs, tout en préservant la rentabilité des fournisseurs de services énergétiques et, d'autre part, d'aboutir à un dépérissement progressif du soutien financier de l'Etat ;
- Accélérer la réforme des cadres réglementaires et de gouvernance ;
- Apporter des innovations en vue d'accroître les flux financiers dans le secteur à travers leur mobilisation stratégique auprès de sources publiques et privées, ainsi que sur les marchés nationaux et extérieurs.

Ainsi, l'Etat du Sénégal cherche aussi par cette loi à inviter les sources de financement dont le secteur privé à investir et à prendre en main le secteur afin de le remplacer.

L'objectif de l'État est de faire passer le taux de pénétration des énergies renouvelables dans le mix électrique, de 0,4% en 2013 à 20% en 2017 en délivrant des agréments (72) à des promoteurs désirant revendre de l'électricité d'origine renouvelable à la SENELEC qui devra conduire une étude de stabilité de son réseau électrique pour l'intégration du renouvelable dans son parc de production (SENELEC, 1999).

THS 2020-0050

Comme on le constate, l'introduction du renouvelable dans le réseau de la SENELEC est une autre opportunité d'affaire pour le secteur privé si cela, comme mentionné, ne crée pas de désagréments au niveau du réseau.

1. Sous-secteurs des énergies renouvelables au Sénégal

Pour ce qui est du cadre réglementaire du sous-secteur des énergies renouvelables (EnRs), il est marqué par les éléments suivants (Journal officiel, 2011) :

- La loi n°2010-21, portant loi d'orientation sur les énergies renouvelables qui met l'accent sur le développement des biocarburants, des combustibles domestiques et de façon générale sur les énergies renouvelables en tant que levier de réduction de la dépendance vis à vis des produits pétroliers. Pour ce faire, elle met l'accent sur :
  - l'instauration d'un cadre incitatif à l'achat d'énergies et à la commercialisation des énergies renouvelables ;
  - la libéralisation des secteurs d'utilisation;
  - la diffusion des moyens de production d'énergies renouvelables ainsi que le régime fiscal où la loi précise clairement la baisse de taxes liées à ces équipements ;
  - la protection environnementale notamment la fixation des termes relatifs au recyclage des déchets en rapport avec les matériels des EnRs et la création d'un cadre attractif au profit du développement par l'appui du marché carbone.
- La loi n° 83-05 portant Code de l'Environnement dont le dernier réaménagement date de 2001 et qui introduit les études d'impact comme éléments du processus des décisions environnementales.

  En outre, le Code insiste sur la participation des populations dans ce processus de décision. Cette participation passe par l'information, la consultation et l'audience publique.
- Le projet de loi sur les énergies renouvelables au Sénégal adopté en décembre 2010 et le projet de loi dit d'orientation n°08/2010 sur les énergies renouvelables ont tous deux pour objectif d'augmenter la part des EnRs dans la production d'électricité et aussi dans le bilan énergétique national ;
- Le Projet de décret d'application de la loi sur les énergies renouvelables : Adopté le 21 Décembre 2011, ce projet de décret d'application est venu renforcer la loi

d'orientation de 2010 en apportant plus de précision sur la commercialisation des énergies renouvelables sous forme d'énergie électrique. En outre, elle autorise et réglemente l'injection du renouvelable dans le réseau de la SENELEC.

2. Le Biogaz au Sénégal

Concernant le secteur de la production du biogaz, différents grands projets sont en cours (EDE-Sénégal, 2013) :

- Le projet Missirah avec la coopération Brésilienne ;
- Le projet de production de gaz à partir du Bambou ;
- Le projet Italien de 100 MW de biogaz.
- Le Programme National de Biogaz domestique au Sénégal (PNB-SN)

Le PNB-SN est la première tentative d'introduction du biogaz en milieu rural, abstraction faite des expérimentations qui ont eu lieu par le passé. Cependant, son bilan reste positif sur le terrain ; par contre ce résultat pouvait l'être davantage n'eût été les problèmes d'ancrage institutionnel notés au démarrage, la non implication du Ministère de l'Élevage qui dispose en son sein d'un fonds d'appui à l'élevage logé à la Caisse Nationale du Crédit Agricole du Sénégal (CNCAS), et le manque de recherches scientifiques accompagnant le programme pour sa pérennité (HEEGDE, DIOP, & UKKERMAN, 2008).

a. *Les acteurs*, on a :
   - les intervenants institutionnels comme la Direction de l'Energie, la Direction des Hydrocarbures, la Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés, l'Office National de l'Assainissement du Sénégal (ONAS),
   - les Agences dont l'ANEV et l'ANER,
   - les projets et programmes dont le PNB-SN,
   - les institutions de recherche (ISRA, CERER),
   - les ONG (HEIFER, ENDA)
   - le secteur privé (SOGAS-Thécogaz, BIOECO, African Building Service)

b. *Les technologies utilisées* sont :
   - le digesteur à dôme flottante (CERER, CRAT, ENDA, CARITAS),
   - le digesteur à dôme fixe avec le prototype GGC (Figure 5) et les autres variantes par le PNB-SN et le BIOECO (ONAS, 2013),

- le système ballon ou bâche (Figure 3) (SOGAS Dakar avec TECHOGAS),
- le digesteur Transpaille (Figure 2) expérimenté par le CRA de Bambey, la SERAS de Thiès, AGRIFORCE et CIRAD (Farinet & Copin, 1994),
- le digesteur à boue activée de première génération (STEP de Cambérène).

Figure 2 : Le digesteur expérimental de type Transpaille (ISRA-CIRAD, Année 1984)

Figure 3: Le moteur transformateur du biogaz et le digesteur à bâche de THECOGAS (Année 2013)

Figure 4: Prototype GGC (PNB-SN, BIOECO, Année 2013)

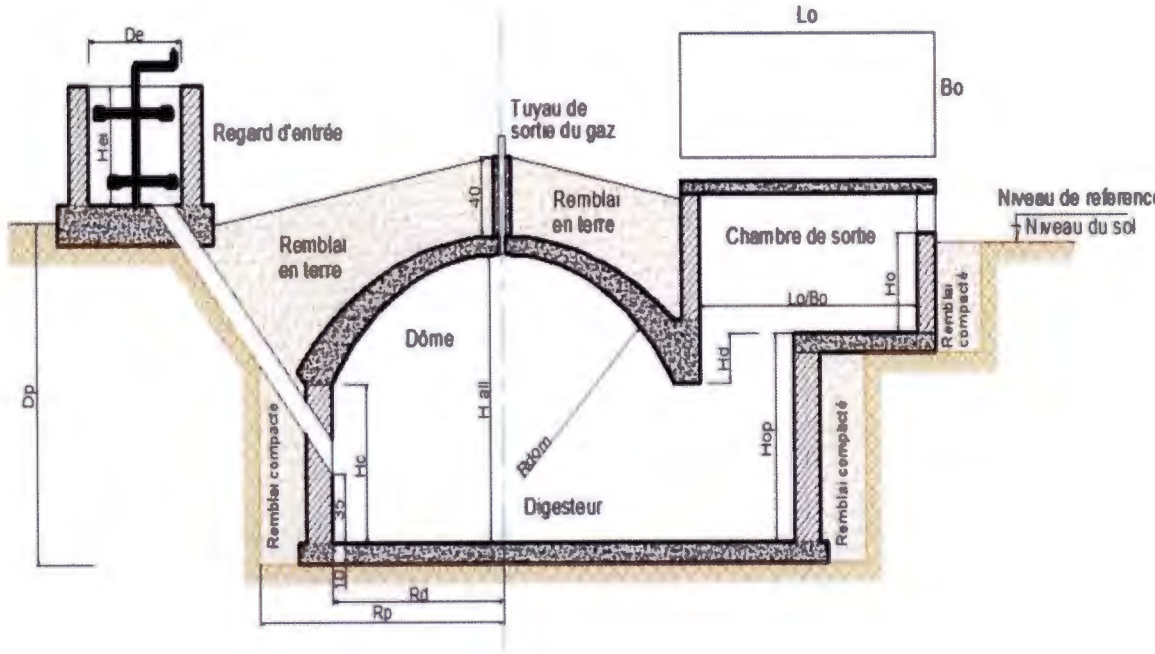


Figure 5 : Plan type d'un biodigesteur à dôme fixe

c. *Les activités :*

- au niveau domestique : 537 biodigesteurs ont été installés dans le cadre du PNB-SN (Figure 4).
- au niveau industriel : actuellement nous avons l'unité de la STEP de Cambérène, de la SOGAS Dakar et de la SOGAS de Saint-Louis.

d. *Les coûts d'investissement* (ANSD, 2011):

- Pour les unités industrielles : ils sont estimés pour la STEP de Cambérène à 437 millions de FCFA ; à 386 millions de FCFA pour le biodigesteur à bâche de la SOGAS de Dakar et 12,5 millions de FCFA pour la SOGAS de Saint-Louis. Pour les unités domestiques produites dans le PNB-SN, ils varient de 185.930 FCFA pour les $4m^3$ à 587.373 FCFA pour les $18m^3$.

e. *Les coûts d'exploitation :*

- Ils sont estimés annuellement pour les unités industrielles à 81 millions de FCFA pour la SOGAS Dakar ; à 298 millions de FCFA pour la STEP de Cambérène et à 4 millions de FCFA pour la SOGAS Saint Louis.
- Pour les unités domestiques, ils varient de 14.797 FCFA pour les 4 m^3 à 32.551 FCFA pour les 10 m^3 qui sont les plus utilisés (60% des cas). Ces montants sont faibles parce que certains coûts comme la main d'œuvre familiale et l'eau obtenue du puits ne sont pas facturées en milieu rural.

f. *Les substrats utilisés* au Sénégal et dans la sous-région, comprennent:

- les déjections d'animaux,
- les déchets marins (algues, débris de poisson)
- les résidus de récolte,
- les ordures ménagères,
- les boues des stations d'épuration,
- et les effluents d'abattoir.

Aussi, il ressort que si l'on utilisait 5% du potentiel valorisable en biogaz au Sénégal, le taux de pénétration des EnRs passerait de 0.4% à 7%.

g. *Les teneurs en méthane* varient de :

- 60% pour le biogaz domestique,
- 75% environ pour le biogaz industriel.

h. *Les formes de valorisation du biogaz* vont de :
la cuisson à l'éclairage pour les unités domestiques (Figure 6),

- la production d'électricité à celle de chaleur sous forme d'eau chaude pour les unités industrielles.

Figure 6 : Applications courantes du biogaz au Sénégal (cuisson à gauche et éclairage à droite)

i. *Les effets et impacts socioéconomiques et environnementaux* on peut noter (GRET, 2006) :

- l'amélioration des conditions de vie des femmes,
- la réduction des maladies pulmonaires dont la source est la fumée provenant du bois et du charbon de bois,
- la réduction de combustibles ligneux et aussi de gaz butane.
- amélioration des rendements, restauration de la fertilité des sols par les digestats issus de la digestion anaérobique.
- la création d'activités génératrices de revenus dans les domaines de la maçonnerie, de l'artisanat (menuiserie métallique) de l'élevage et du commerce.

j. Les résultats (SYLLA, 2013)

- Les ménages qui disposent d'un biodigesteur savent qu'ils ont fait un bon investissement qui leur permet d'économiser sur le temps consacré à la collecte du bois mort mais aussi sur l'acquisition du gaz butane auquel, une part importante du budget familial est affectée.
- Depuis l'adoption de la loi n°2010-21, le biogaz industriel devient attractif pour des investisseurs ; en ce sens que la loi instaure un cadre incitatif à la production, à la commercialisation des énergies renouvelables. En outre, la loi protège les investisseurs contre les fraudeurs potentiels non détendeurs de titre en insistant sur les sanctions pénales qu'ils encourent. Les investisseurs du biogaz industriel ont la possibilité, avec le décret d'application de cette loi, de vendre une quantité importante d'électricité dont la puissance minimale est de 150 kW.

On peut noter les efforts faits par l'Etat du Sénégal pour promouvoir le sous-secteur des énergies renouvelables grâce à la mise en place d'une politique de subvention des composantes solaires (panneaux photovoltaïques) et des biodigesteurs. En outre, il met l'accent sur le fait que le biogaz peut s'avérer une alternative intéressante aux combustibles ligneux traditionnels que sont le bois de chauffe et le charbon de bois ; à la limite même, se substituer à eux si des mesures idoines comme l'augmentation du niveau de la subvention aux biodigesteurs et la création d'un fond d'appui à la protection de l'environnement sont mises en place. L'étude a montré aussi que le biogaz est entrain de promouvoir un autre modèle de développement du monde rural qui est basé sur la création de synergies entre l'agriculture, l'élevage, le développement socioéconomique et l'énergie.

Pour mieux amener les investisseurs à s'intéresser au secteur de l'énergie et surtout au sous-secteur des énergies renouvelables, la loi 2010/21 met l'accent sur l'ouverture de ce sous-secteur à la concurrence et aussi au respect de la transparence en insistant sur les procédures qui seront mises en place (appels d'offres). En outre, le projet de décret apporte des précisions supplémentaires, en ce qui concerne la capacité des acteurs qui peuvent commercialiser les énergies renouvelables ainsi que sur les peines et sanctions que peuvent encourir les fraudeurs potentiels.

Le biogaz à l'instar du gaz butane peut s'avérer une alternative importante aux combustibles ligneux traditionnels que sont le bois de chauffe et le charbon de bois ; à la limite même, se substituer à eux si des mesures idoines comme l'augmentation du niveau de la subvention aux biodigesteurs et la création d'un fond d'appui à la protection de l'environnement sont mises en place.

IV. La méthanisation

1. Définition

La méthanisation (fermentation ou digestion anaérobie, ou minéralisation de la matière organique) est un procédé biologique permettant de valoriser des matières organiques en produisant du biogaz qui est source d'énergie renouvelable et un digestat utilisé comme fertilisant (Figure 7).

La méthanisation est un processus qui peut se produire dans l'environnement de façon naturelle, c'est le cas par exemple des gaz de marais, les lieux de décomposition de matières végétales et animales. Les bactéries qui réalisent ces réactions se trouvent à l'état naturel dans le lisier et dans les écosystèmes anaérobies, c'est-à-dire dans un milieu sans oxygène. Ce processus peut se traduire par la formation des bulles à la surface de l'eau. Il se déroule en quatre phases distinctes, chacune réalisée par une classe de micro-organismes spécialisés, qui se développe dans un milieu très réducteur en absence d'oxygène (facultative ou stricte) conduisant à la formation du biogaz et d'un digestat.

Le biogaz issu de la fermentation des matières organiques animales ou végétales est essentiellement composé de méthane et de gaz carbonique. La plupart de l'azote se retrouve dans le digestat.

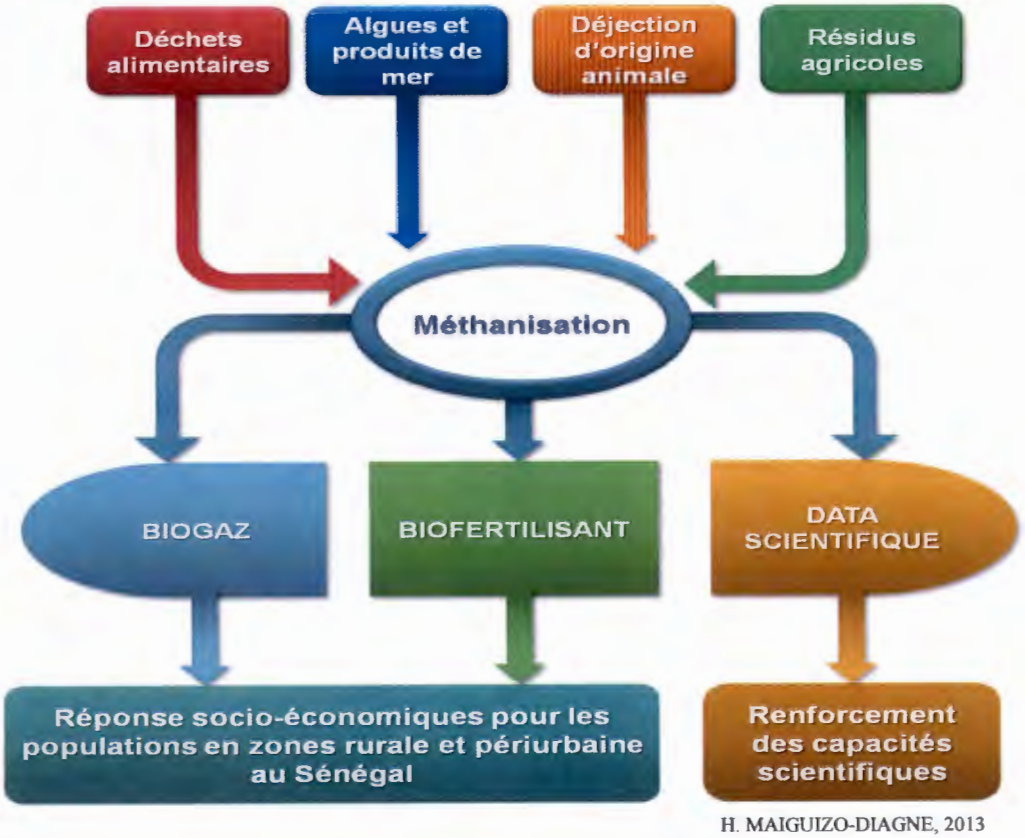


Figure 7 : Valorisation des déchets organiques par méthanisation

2. Principales dates clés du développement de la méthanisation

L'usage du biogaz a probablement débuté en Chine, à des époques très anciennes (ALCEN, 2015).

1630 : Van LEMOND (Nederland), découvre que la fermentation de matière organique dégage du gaz inflammable.

1776 : le physicien italien Alessandro VOLTA constata la présence d'un gaz émis par vases en putréfaction d'un marais et montra par la suite que ce gaz était combustible.

1808 : Sir Humphry DAVY, physicien et chimiste britannique expérimente la fermentation du fumier. Il produit du biogaz et identifie lui aussi le méthane. Mais ce qui l'intéresse alors n'est pas de produire de l'énergie, mais d'obtenir du fumier maturé.

XIXème Siècle : PASTEUR et ses élèves montrent que l'origine de ce gaz est une fermentation bactérienne.

1859 : la première installation de méthanisation fut construite dans une colonie britannique à Bombay en Inde.

1881 : l'ingénieur Donald CAMERON dépose un brevet à Exeter en Grande Bretagne concernant une fosse septique pour le traitement des eaux d'égouts et construit une installation de méthanisation à Exeter.

1884 : GAYON, BECHAMP (FR) identifient la fermentation méthanique.

1885 : EXETER (GB), éclairage public au biogaz.

1898 : L'entrepreneur Louis MOURAS déposa lui aussi un brevet concernant une nouvelle fosse pour épuration des eaux de latrines par fermentation méthanique.

1920 : L'allemand IMHOFF met au point un système de digestion continu, qui équipe quelques années plus tard plusieurs villes allemandes.

1930 : Les mécanismes biologiques sont décrits dans le détail par BUSWELL.

1939 : Les premiers systèmes fonctionnels discontinus de biométhanisation ont été développés en Algérie, puis en France par MM. ISMAN et DUCELLIER.

1940 : Station d'Achères, Paris.

1970 : Suite aux chocs pétroliers, se sont développés d'autres systèmes (systèmes semi-continus, avec biomasse fixée, ...), qui permettent la méthanisation de substrats divers : effluents industriels dont la charge polluante est élevée, déchets ménagers, lisiers, fumiers.

1973 : Le choc pétrolier et l'inquiétude d'une possible pénurie d'énergie fossile ont montré la nécessite de chercher d'autres sources énergétiques renouvelables ou alternatives au pétrole. De ce fait, l'intérêt des énergéticiens s'est à nouveau porté sur la méthanisation comme une des solutions à ces problèmes. Elle a connu une réussite importante dans le domaine agricole, notamment avec les techniques de méthanisation à la ferme.

1977 : Carl WOESE identifie le groupe des Archées, auquel appartiennent les bactéries méthanogènes, comme une famille distincte à la fois des bactéries proprement dites et des eucaryotes.

3. La méthanisation domestiquée : biogaz

a. Biogaz et STEP :

Les plus anciens digesteurs connus sont ceux de la ville d'Exeter, en Angleterre (qui utilise le biogaz comme gaz d'éclairage), et de la léproserie de Mantunga près de Bombay. Il s'agit plus de digestion septique que de méthanisation proprement dite, dont l'aboutissement sera la célèbre « fosse IMHOFF » qui assure la décantation et la digestion des eaux usées.
La digestion des boues, dans des ouvrages séparés de la ligne de traitement des eaux usées, comme nous la connaissons aujourd'hui, date du tournant du siècle (stations d'épuration de Lawrence, USA, 1899 ; Birmingham, Angleterre et Allemagne, 1906). Le procédé devient continu (1911). Pour bien digérer, il faut brasser les boues (on préfèrera le brassage par injection de gaz plutôt que le brassage mécanique à cause des filasses qui s'emmêlent dans les hélices), et les chauffer : ce sera mis en pratique sur une station d'épuration en Allemagne dès 1913, et les stations d'épuration commencent à produire de l'électricité grâce au gaz de digestion. En 1920, une station d'épuration en Allemagne livre son surplus de gaz au réseau municipal de gaz. Dans les années 1940, on s'aperçoit que l'ajout de résidus gras augmente la production de biogaz.
Le concept technique de la méthanisation des boues urbaines n'évoluera plus, fondamentalement, jusqu'à la fin du XX^{ème} Siècle : Au début des années 1990, une majorité

des boues urbaines est traitée, en l'Europe, par digestion anaérobie, essentiellement par voie mésophile.

Jusqu'en 1973, la majorité des installations n'utilisent le biogaz que pour le chauffage des digesteurs et parfois des locaux techniques. Seules les installations les plus importantes produisent de l'électricité ou livrent de la chaleur à des utilisateurs proches.

A partir des années 1980, la cogénération de chaleur et d'électricité se développe fortement y compris pour des installations de petite capacité.

La consommation d'électricité représente l'un des postes d'exploitation les plus importants sur une station d'épuration urbaine, et le biogaz peut subvenir, classiquement, à la moitié des besoins récupération du biogaz produit par les installations de stockage débute aux Etats-Unis dans les années 1970, un peu plus tard en Europe. Ce phénomène est à mettre en rapport avec une production croissante de déchets, qui conduit à la création de centres d'enfouissement de grande taille, où les déchets compactés trouvent un environnement favorable à la fermentation.

La valorisation du biogaz est d'emblée mise à l'ordre du jour : on recense en Europe 3 sites de valorisation en 1980, 23 en 1983. Le développement s'accélère dans les années 1990 : 298 unités de valorisation sont en fonctionnement en 1995, et 423 en 1997.

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.

En 2007, la puissance électrique installée en Europe est estimée à 1.200 MW électriques pour une production de 7 TWh. Le principal pays producteur est le Royaume-Uni, qui domine largement le secteur avec 818 MW installés en 2006 (Adler, 2009).

b. Méthanisation des déchets municipaux

Dans les années 1980, les premiers pilotes de méthanisation de déchets ménagers solides entrent en service. Mais l'essor commercial et industriel démarre réellement au milieu des années 1990, avec une croissance de la capacité de traitement de plus de 25 % par an, qui s'accélère depuis 1997 (croissance de + 40 % par an depuis 1996).

c. *Méthanisation agricole*

La méthanisation des déjections d'élevage figure parmi les premières applications de la méthanisation. Elle a connu divers cycles de développement : dans les années 40, puis 50, ensuite pendant la crise du pétrole 1973-1985.

A partir de 1985, la méthanisation se diffuse lentement dans le domaine agricole dans quelques pays européens : au Danemark, avec des installations collectives, et en Allemagne, avec des installations individuelles.

Depuis le milieu des années 1990, la filière est en forte croissance en Allemagne. La cogénération biogaz se généralise. La puissance électrique installée est passée de 49 MW en 1999 à 247 MW el. en 2004.

A partir de 2004, les nouveaux tarifs d'achat d'électricité incitent à la production de cultures énergétiques pour le biogaz, et le nombre d'installations double tandis que les puissances moyennes augmentent : la puissance installée atteint 1270 MW en 2007. La production totale d'énergie par méthanisation du secteur agricole en Europe est estimée à 2 Mtep, dont 90 % en Allemagne (RECORD, 2009).

4. Les processus élémentaires de la méthanisation

Le processus de la méthanisation se retrouve dans de nombreux écosystèmes naturels: sols, sédiments, tube digestif de divers animaux. Dans les systèmes de méthanisation contrôlée, des communautés microbiennes complexes, dont la diversité et la variabilité est importante, se mettent en place. Les organismes qui composent cet écosystème sont de nature très diverses: eubacteries, archae, eucaryotes (protozoaires, cilliés, etc...). Ces espèces ont chacune, comme nous allons le voir des fonctions précises dans le processus de dégradation du carbone organique qui se divise en 4 grandes parties à savoir: l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et enfin la méthanogénèse.

Ce processus est tout particulièrement intéressant en raison du biométhane produit, qui est un gaz énergétique valorisable et du digestat très bonne source d'azote.

Tableau 1: Réaction de l'acidogénèse du glucose

Produits	Réactions
Propionate	$C_6H_{12}O_6 + 2H_2 \rightarrow 2CH_3CH_2COOH + 2H_2O$
Butyrate	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2 + 2CO_2$
Ethanol	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CH_2OH + 2CO_2$
Lactate	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CH_3CHOHCOOH$

c. L'acétogenèse

L'étape d'acétogenèse recouvre la transformation des AGV, de l'hydrogène et du dioxyde de carbone en acétate bicarbonate et hydrogène. Cette étape est très rapide par rapport aux autres.

Les bactéries qui la réalisent sont désignées comme les bactéries productrices obligées d'hydrogène. En effet, l'action de ces bactéries ne peut avoir lieu que dans des conditions où la pression partielle en hydrogène est très basse. Leur occurrence dépend donc de l'élimination de l'hydrogène dans le milieu.

Cette élimination est réalisée soit par les bactéries méthanogènes consommant l'hydrogène, soit par les bactéries sulfato-réductrice (réduction des sulfates en sulfures). Ces espèces sont désignées sous le nom de bactéries syntrophes, car elles ont besoin d'être associées à une espèce consommant l'hydrogène pour se développer.

Parmi les syntrophes, on peut en distinguer les genres comme: les Syntrophobacter, Syntrophomonas, Syntrophis. En considérant toujours le glucose comme substrat de référence on représente l'acétogénèse productrice d'hydrogène par les équations du Tableau 2:

Tableau 2 : Réaction de l'acétogenèse du glucose

Substrat	Réaction
Propionate	$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2$ $CH_3CH_2COOH + 2H_2O + 2CO_2 \rightarrow CH_3COOH + 3H_2 + 3HCOOH$
Butyrate	$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$ $CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O + 2CO_2 \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 + 2HCOOH$
Ethanol	$CH_3CH_2OH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2$
Lactate	$CH_3CHOHCOOH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2 + CO_2$

L'homoacétogénèse à partir de l'hydrogène : C'est un autre mécanisme de formation d'acétate et il a lieu à partir de l'hydrogène et du bio-carbonate selon l'équation suivante:

$$CO_2 + 2H_2 \rightarrow CH_3COOH$$

Bien que cette transformation ne semble pas être dominante lors du déroulement normal de la méthanisation, il semble cependant qu'elle contribue à la régulation d'un niveau bas en hydrogène dans le milieu.

Les bactéries intervenant dans cette étape sont appelées homoacétogènes et on en retrouve des genres comme: Clostridium, Acétobactérium, Sporomusa, Acétogenium, Acétoanaerobicum.

d. La méthanogénèse

C'est la formation de méthane soit par dégradation de l'acide acétique (70 % de la production), soit par réduction du CO_2 par l'hydrogène (30 % de la production). 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.

Les espèces méthanogènes utilisent principalement comme substrats l'acétate, le CO_2 et l'hydrogène. Leur taux de croissance est plus faible que celui des bactéries acidogènes. Classées parmi les Archaes, elles présentent des différences importantes avec les bactéries tant du point de vue de la structure que du matériel génétique. En général, il existe deux groupes de méthanogènes:

- les méthanogènes qui consomment l'acétate (acétotrophes) et qui sont responsables de 70% de la production de méthane dans les digesteurs. Pour l'exemple du glucose, la réaction caractérisant cette étape est donnée:

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$$

- les méthanogènes hydrogénotrophes qui contribuent au reste de la production de méthane (environ 30%) en réduisant le couple H_2 /CO_2 ou le formate en méthane selon le Tableau 3suivant :

Tableau 3: Réaction de méthanogénèse du glucose

Substrat	Réaction
H2/CO2	$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
Formate	$4HCOOH + 2H_2O \rightarrow CH_4 + 2H_2O + 3CO_2$

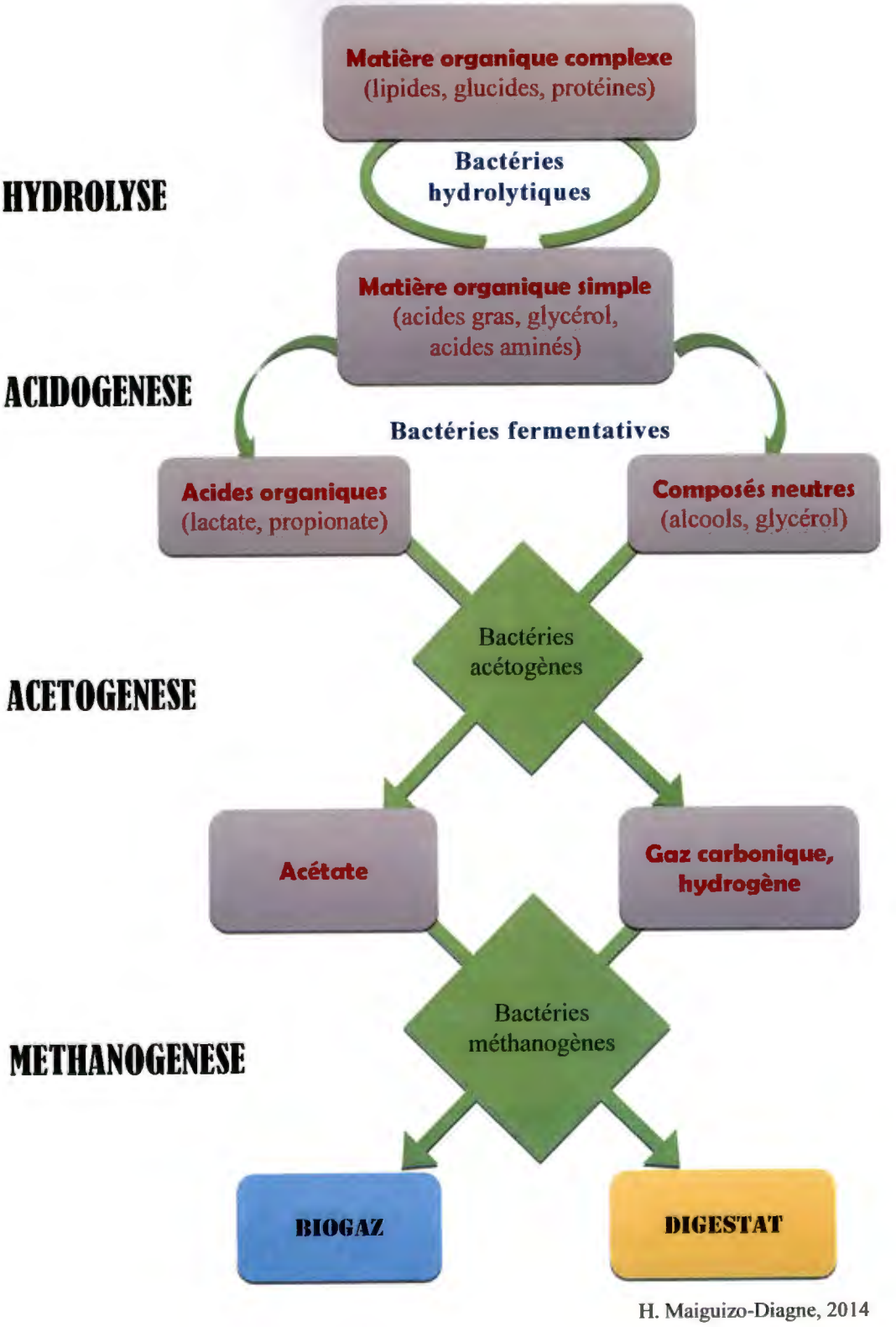


Figure 8 : Schéma de la chaîne trophique des étapes de la fermentation anaérobique

6. Les facteurs théoriques ou conditions physico-chimiques influençant la méthanisation

Comme tout micro-organisme, la population bactérienne qui constitue le consortium méthanogène exige des conditions particulières pour sa croissance.

Les principaux facteurs physico-chimiques qui affectent le procédé de digestion anaérobie, résultant de la considération de la biomasse face au substrat à digérer, sont les suivants : la charge, le pH, le couple « température - temps de séjour », le potentiel d'oxydo- réduction et les substances toxiques.

e. Le pH

C'est l'un des plus importants facteurs d'adaptation des populations bactériennes. Le pH optimum de la digestion anaérobie se situe autour de la neutralité. Il est le résultat du pH optimum de chaque population bactérienne: celui des bactéries acidifiants se situe entre 5.5 et 6, les acétogènes préfèrent un pH proche de la neutralité mais peuvent rester actives jusqu'à un pH de 5, tandis que les méthanogènes ont une activité maximale dans une gamme de pH comprise entre 6 et 8. C'est pourquoi la zone théorique optimale de pH à respecter s'étend de 6,8 à 7,2.Toutefois, la méthanisation peut se produire dans des milieux légèrement acides ou alcalins. Dans le cas d'une chute de pH due à une augmentation de la concentration en acides gras, un ajout de soude ou de chaux, au niveau de l'alimentation en boues fraîches épaissies ou directement dans le digesteur, permet le maintien du pH.

f. La température

L'activité de la méthanisation est étroitement liée à la température. La température doit être gardée constante pour éviter une perturbation de la digestion. En effet, les bactéries méthanogènes sont particulièrement sensibles à toute variation de température, même de l'ordre de 1°C par jour.

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

- lorsque la température est inférieure à 15°C, la digestion est de type psychrophile,
- lorsque la température est comprise entre 28 et 40°C, la digestion est de type mésophile,
- lorsque la température est supérieure à 45°C, la digestion est thermophile.

La majorité des espèces bactériennes a été isolée dans des environnements mésophiles, mais tous les groupes trophiques des étapes de digestion anaérobie possèdent des espèces thermophiles utilisant les mêmes voies métaboliques que les bactéries mésophiles avec des performances analogues. Il reste possible de travailler à des températures différentes des optima avec des performances plus faibles.

g. *Le temps de séjour*

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.

Température et temps de séjour sont deux facteurs liés. En effet, une élévation de température entraîne une activation des réactions d'acétogénèse, de méthanisation et de croissance des bactéries. Il en découle une diminution du temps de séjour nécessaire à la stabilisation et une augmentation de la production de gaz.

h. *Le potentiel d'oxydo-réduction*

Ce paramètre représente l'état de réduction du système, il affecte l'activité des bactéries méthanogènes. Ces bactéries exigent l'absence d'oxygène et un potentiel d'oxydo-réduction inferieur à 330mV pour initier leur croissance.

i. *La charge*

La charge d'un digesteur s'obtient en rapportant le poids des matières volatiles introduites au volume du digesteur. Elle s'exprime en kg de MV/m^3 et permet d'apprécier la quantité de matières nutritives introduites par rapport à la biomasse présente ; celle-ci contient en fin de digestion toutes les souches bactériennes nécessaires à la digestion des boues fraîches. 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.

j. Les substances toxiques

On distingue plusieurs types d'inhibiteurs de la digestion : certains cations, les sulfures et les éléments-traces (certains composés organiques : cyanures, phénols, phtalates ; les antibiotiques ; les détergents).

Il a été montré que les éléments-traces affectent, en activeurs ou inhibiteurs, le procédé de digestion anaérobie (Degrémont, 1989) :

- ils sont nécessaires à la croissance de certaines bactéries, les bactéries méthanogènes par exemple.
- ils inhibent la toxicité produite par les sulfides.
- ils permettent la formation de phosphates et l'agrégation des bactéries.

Toutefois en trop grande concentration, les éléments-traces inhibent l'accroissement des bactéries et donc la production de méthane.

7. Besoins nutritionnels

Comme tout micro-organisme, chaque bactérie constituant la flore méthanogène demande un apport suffisant de macro-éléments (C, N, P, S) et d'oligo-éléments pour sa croissance.

a. Les macro-éléments

Les besoins en macro-éléments peuvent être évalués grossièrement à partir de la formule brute décrivant la composition d'une cellule ($C_5H_9O_3N$). Pour les bactéries méthanogènes, le milieu de culture doit avoir des teneurs en carbone (exprimée en DCO), en azote et en phosphore au minimum dans les proportions DCO/N/P égal à 400/7/1. L'ammoniac est leur principale source d'azote. Certaines espèces fixent l'azote moléculaires alors que d'autres ont besoins d'acides aminés. Les besoins en azote représentent 11% de la masse sèche volatile de la biomasse et les besoins en phosphore 1/5 de ceux de l'azote. Les bactéries méthanogènes possèdent de hautes teneurs en protéines Fe – S qui jouent un rôle important dans le système transporteur d'électrons et dans la synthèse de co-enzymes. Ainsi la concentration optimale de soufre varie telle de 1 à 2mM dans la cellule. Cette flore utilise généralement les formes réduites comme le sulfure d'hydrogène. Les méthanogènes assimilent le phosphore sous forme minérale.

b. *Les oligo-éléments*

Certains oligo-éléments sont nécessaires à la croissance des méthanogènes. Il s'agit plus particulièrement du nickel, du fer et du cobalt. En effet, ce sont des constituants de coenzymes et de protéines impliquées dans leur métabolisme. Le magnésium est essentiel puisqu'il entre en jeu dans la réaction terminale de synthèse du CH_4 ainsi que le Sodium apparaissant dans le processus chimio-osmotique de synthèse de l'ATP. Il existe des facteurs de croissance stimulant l'activité de certains méthanogènes: acides gras, vitamines ainsi que des mélanges complexes comme l'extrait de levure.

8. Les substrats méthanisés dans le monde

a. *Méthanisation des biodéchets municipaux*

Les biodéchets représentent les déchets verts, déchets de cuisine, papier-carton des collectivités locales.

En Europe, les premiers pilotes de méthanisation des déchets solides ont été installés dans les années 80. L'essor commercial et industriel démarre réellement au milieu des années 90.

Le biogaz est principalement valorisé par cogénération sur moteurs à gaz. L'électricité est revendue au réseau, la chaleur est soit utilisée pour le procédé, soit exportée.

b. *Méthanisation d'effluents d'élevage*

Les effluents d'élevage couvrent toutes les productions animales : porcins, bovins, volailles.... Les déjections d'élevage sont majoritairement représentées par les lisiers et fumiers de porcins et de bovins. La principale source de substrats méthanisables en Afrique est le fumier de bovin couramment appelé « bouse de vache ». Ce substrat est celui utilisé en grande quantité par le PNB-SN.

En unités collectives et centralisées, les installations bénéficient des effets d'échelle. Ces unités sont principalement développées au Danemark et en Allemagne où les pouvoirs publics les soutiennent par un appui logistique déterminant.

La problématique est différente dès lors que l'on parle d'unités individuelles (biogaz à la ferme) et unités centralisées.

Les unités de méthanisation centralisées danoises par exemple suscitent un grand intérêt. Toutefois, les conditions propres à ce pays sont difficilement transposables à un autre pays : forte coopération entre agriculteurs, forte densité d'élevage, possibilité de valorisation thermique sur de petits réseaux de chaleur et valorisation électrique intéressante du fait du tarif d'achat élevé.

Le contexte du biogaz à la ferme est fondamentalement différent et concerne de petites installations ne dépassant pas la centaine de kWh. On assiste aujourd'hui à un renouveau de cette application avec un développement rapide en Allemagne.

En France, depuis la publication des tarifs d'achat d'électricité de juillet 2006 qui se situe entre 110 et 140 €/MWh, on compte 4 installations en fonctionnement équipées d'une valorisation par moteur dual-fuel.

La valorisation du biogaz est thermique et électrique par cogénération sur moteur à gaz ou moteur dual-fuel.

c. *Stations d'épuration urbaines*

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. En Allemagne, la digestion anaérobie concerne plus de deux tiers des boues produites dans les stations d'épuration urbaines. En France et au Royaume-Uni, elle porte sur 40 à 60 % des quantités. Bien que toutes les stations ne valorisent pas la totalité du biogaz produit (élimination en torchère), le taux de valorisation est élevé pour les unités les plus importantes, qui représentent aussi le gisement principal (RECORD, 2009).

d. *Méthanisation des effluents industriels*

La méthanisation des déchets ou effluents industriels se montre compétitive dès lors que la matière biodégradable, exprimée en DCO (demande chimique en oxygène) est suffisamment élevée. Elle est donc utilisée sur des substrats divers, effluents ou boues de : distilleries, brasseries, conserveries de fruits et légumes, laiteries, abattoirs, raffinerie de sucre, papeteries, industries pharmaceutiques, usines de production d'amidon, d'acide citrique, de malt, textiles...

Il s'agit de technologies présentes dans tous les pays européens, l'Allemagne et les Pays-Bas viennent en tête (une centaine d'unités), suivis par la France (une cinquantaine d'unités) et le Royaume-Uni (une vingtaine d'unités).

Dans la plupart des cas, le biogaz est valorisé directement pour des usages thermiques sur le site de production (chaudières, turbines, moteur). La cogénération est assez peu développée.

e. Installation de stockage de déchets (ISD) : méthanisation en décharge

Les déchets sont compactés et enfouis dans une zone étanche à toute intrusion extérieure (eau, air). Le procédé de méthanisation se produit donc « spontanément » à l'intérieur des installations de stockage des déchets.

Le biogaz de décharge est le principal gisement exploité, majoritairement en Allemagne et au Royaume-Uni. Ce dernier pays a particulièrement mis l'accent sur la valorisation de ce type de biogaz.

Dans la majorité des cas de valorisation, le biogaz est valorisé sous la forme d'électricité livrée en quasi-totalité au réseau (moteur ou turbine à gaz). Les valorisations thermiques existent en proportions non négligeables (production sur site : vapeur, séchage, déshydratation des lixiviats) mais sont limitées par l'absence de débouchés locaux (valorisation extérieure : livraison de chaleur à un réseau urbain ou à un industriel). La cogénération (production d'électricité et de chaleur) est majoritairement utilisée dans le cas de valorisation de la chaleur.

f. Co-digestion

Tous les substrats précédemment énumérés peuvent être traités en mélange par méthanisation. On parle alors de co-digestion. Ces unités sont des applications nouvelles encore peu représentées.

Si le nombre de ce type d'installation est faible, il représente une solution de traitement centralisé de plusieurs substrats différents permettant la production d'une quantité d'énergie non négligeable. Étant donné les politiques actuelles de traitement des déchets et la problématique des boues de STEP urbaines et des effluents d'élevage, ces plates-formes de traitements générateurs d'énergie ont un avenir certain.

V. Le Biogaz

1. Définition

Gaz issu de la fermentation anaérobie (en absence d'air et donc d'oxygène) de la matière organique contenue dans les déchets. Le biogaz est du méthane « contemporain » (CH_4) et non du méthane fossile enfoui dans les entrailles de la terre.

Trois sources principales existent : les usines de traitement des eaux usées (boues d'épuration), les décharges et le traitement par méthanisation des déchets fermentescibles : déchets ménagers, industriels, agricoles, déchets d'élevage...

La différence entre biogaz de décharge et biogaz de méthanisation réside dans les conditions de leur production : dans le cadre de la méthanisation, les déchets organiques sont très abondants et l'opération est conduite dans des digesteurs, enceintes confinées à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées pendant quelques semaines. Il s'agit en quelque sorte d'accélérer le processus de fossilisation, qui dure normalement des millions d'années.

2. La composition 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 combustible (CH_4) et de dioxyde de carbone inerte (CO_2), 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 (H_2S), des mercaptans (R-SH), des composés organiques volatiles (alkanes, hydrocarbures aromatiques, composés organo-halogénés...). Ces derniers sont principalement présents dans le gaz de décharge.

La teneur de ces gaz dépend non seulement du déchet traité mais aussi du degré d'avancement de la méthanisation.

Tableau 4 : Principaux gaz qui composent le biogaz

Nature du gaz	Proportion (%)
Méthane (CH_4)	50 – 80
Dioxyde de Carbone (CO_2)	20 – 50
Oxygène (O_2)	trace
Azote (N_2)	trace
Hydrogène Sulfuré (H_2S)	0 – 0,5

Source: (RECORD, 2009)

3. La valorisation du biogaz

a. Production de chaleur : les chaudières

L'utilisation de chaudières au biogaz constitue une solution très efficace. En effet, le rendement de telles installations est incontestablement plus élevé que celui des moteurs ou turbines. L'utilisation du biogaz en chaudière est le moyen de valorisation le plus simple et le moins coûteux. Le biogaz peut comporter un faible taux de méthane mais un minimum de 50% est recommandé pour un bon fonctionnement de l'installation. En général, seule une déshydratation du biogaz est nécessaire. La chaleur de combustion peut servir pour la production d'eau chaude, de vapeur ou bien dans des fours pour les procédés industriels, dans les fourneaux de cuisson pour l'usage domestique. Cependant, la chaleur n'est pas facilement stockable ou transportable et les besoins sur les sites producteurs de biogaz sont souvent minimes par rapport à l'énergie disponible.

b. Production d'électricité : les moteurs ou les turbines à gaz

La production d'électricité est réalisée par des moteurs thermiques stationnaires ou des turbines à gaz. Le rendement électrique de ces installations est compris entre 25 et 35%. Cependant, il y a une possibilité de disposer également d'énergie thermique. Cette chaleur est récupérée dans les systèmes de refroidissement intrinsèques des moteurs (ou turbines) ou en refroidissant les gaz d'échappement. On parle alors de co-génération.

4. Le biogaz et les autres sources d'énergies

Le schéma ci-dessous (Figure 9) nous montre l'équivalent de $1m^3$ de méthane

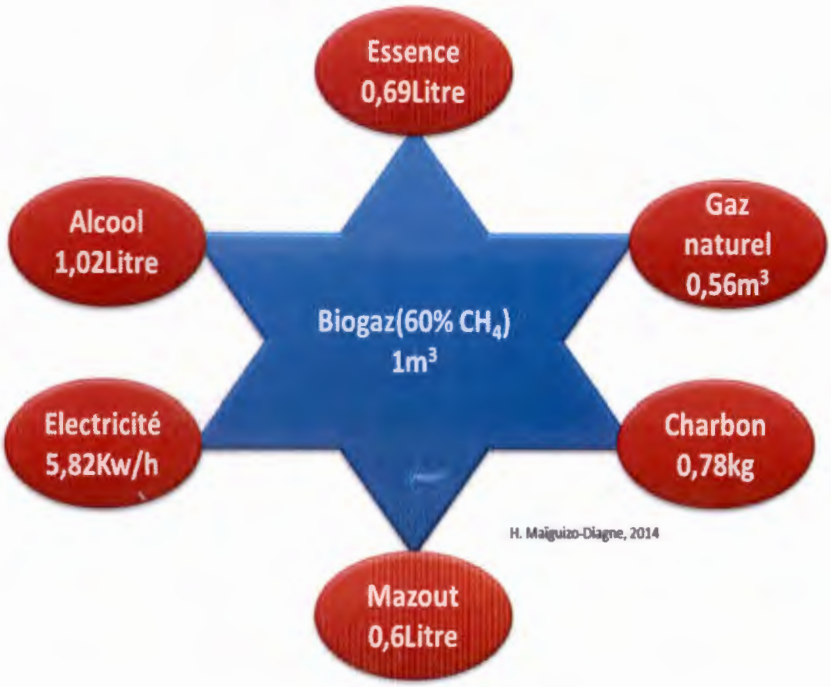


Figure 9: Correspondance énergétiques du biogaz et d'autres sources d'énergie

5. Les caractéristiques des gaz du biogaz

Les principaux facteurs permettant de qualifier les mélanges gazeux pour une valorisation en production d'électricité, par exemple combustion dans les moteurs à gaz, sont : la composition, le pouvoir calorifique et l'indice ou le potentiel méthane.

Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de combustible.

Le PCI est le pouvoir calorifique inferieur lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur.

Le PCI du méthane à 0°C à pression atmosphérique est de 9.94 KWh/m^3. Pour le biogaz, le PCI sera proportionnel à sa teneur en méthane (par exemple, pour un biogaz contenant 70% de méthane, le PCI sera de $9.94 \times 0.7 = 6.96$ KWh/m^3.

Les données ci-dessous (Tableau 5) sont issues d'une notice réglementaire allemande ainsi que les résultats d'une étude Ineris basés sur des mesures sur sites (Poulleau, 2002) et donnent un exemple de composition de biogaz et des caractéristiques de ses gaz.

Tableau 5: Caractéristiques et Composition moyenne des gaz du biogaz

	Digestion de lisier	OM		OM+DIB		Step	
Composants principaux (% vol)		Max.	Min.	Max.	Min.	Min. et Max. usuels	
CH_4	65,0	61,0	43,1	55,0	36,0	59,5	73,8
CO_2	34,0	39,0	30,9	43,0	28,0	39,5	25,9
N_2	1,0	-	23,0	1,4	31,0	1,0	-
O_2	-	-	3,0	0,6	5,0	-	0,3
Traces (mg/m3)							
H_2S	6 500	30	10	140	900	500	3000
NH_3	70	-	-	-	-	-	-
C_2 + CnHm	-	-	-	-	-	-	-
Chlorofluorocarbone (CFC)	-	50	180	800	60	-	-
Données combustion							
PCS (kWh/m^3)	7,2	6,7	4,8	6,1	4,0	6,6	8,2
PCI (kWh/m^3)	6,5	6,1	4,3	5,5	3,6	6,1	7,4
Densité relative (d'air=1)	0,90	0,93	0,96	0,94	1,0	0,97	0,81
Indice de Wobbe(kWh/m^3)	7,6	7,0	4,9	6,3	4,0	6,7	9,1

Max. : maximal Min. : minimal OM : Ordures Ménagères DIB : Déchets Industriels Banals

6. Les facteurs déterminant de la combustion et les caractéristiques du combustible

a. *Caractérisation d'un combustible*

Les propriétés physiques d'un gaz de biomasse sont obtenues par la moyenne pondérée des grandeurs physiques par rapport aux proportions des différents constituants (Cf. Tableau 6 des grandeurs physiques des principaux constituants ci-avant).

b. *Pouvoir calorifique*

Le pouvoir calorifique d'un combustible indique sa capacité à fournir une quantité de chaleur lors de sa combustion.

Le pouvoir calorifique est dit supérieur ou inférieur selon que l'eau produite par la réaction de combustion est considérée à l'état liquide ou vapeur.

c. *Pouvoir comburivore*

Le pouvoir comburivore est la quantité d'air demandée par la combustion du gaz dans les conditions stœchiométriques.

d. *Indice de Wobbe*

L'indice de Wobbe (W) se définit comme le rapport du pouvoir calorifique supérieur volumique (PCs) du gaz (MJ/m^3) par la racine carrée de la densité dudit fluide. L'indice de Wobbe d'un gaz permet de caractériser un brûleur il est notamment utilisé, pour déterminer les pressions d'alimentation à appliquer à un injecteur pour conserver la puissance pour des pressions variables.

e. *Indice méthane*

L'indice méthane est un indice équivalent à l'indice d'octane pour les combustibles liquides. Il se détermine par l'équivalence à un mélange de méthane et d'hydrogène ayant le même comportement au niveau de la détonation que le gaz à étudier.

L'indice 0 correspond à de l'hydrogène pur, l'Indice 100 à du méthane pur.

On peut obtenir des indices supérieurs à 100 (CH_4+ CO_2) comme dans le cas du biogaz. La méthode de calcul de cet indice (qui est actuellement uniquement mesuré) est en cours de normalisation sous la dénomination ISO/NP 22302.

L'indice de méthane d'un mélange gazeux dépend de plusieurs facteurs dont les principaux sont :

- le méthane : principal constituant du combustible destiné aux moteurs à gaz ;
- l'hydrogène qui contribue à la réduction significative de l'indice de méthane ;
- les composés hydrocarbonés non méthaniques favorisent l'instabilité et la tendance au cliquetis ;
- l'azote inerte et le CO_2 qui ne prennent pas activement part au processus de combustion, mais font accroître l'indice de méthane, l'effet du CO_2 étant trois fois celui du N_2.

f. Limite d'auto-ignition ou auto-inflammabilité ou TC (température critique)

La limite d'auto-ignition est définie par des conditions de pression et température ainsi que par la stœchiométrie des réactifs en présence d'un flux thermique externe (conditions adiabatiques).

La température critique est la température à laquelle le mélange va s'autoinflammer à une pression donnée.

g. Volatilité

Les biogaz et gaz de synthèse sont classés sans la catégorie des carburants légers, c'est-à-dire constitués de molécules comportant en moyenne moins de dix atomes de carbone et qui peuvent se volatiliser entièrement à des températures assez basses pour ne pas réagir significativement avec O_2 avant leur complète évaporation.

h. Coefficient de richesse Phi ou dosage de la combustion

La richesse d'un mélange sous-entendu « richesse en combustible » est un rapport adimensionnel de la quantité relative de combustible à cette même quantité relative dans le mélange stœchiométrique.

Le mélange stœchiométrique correspond donc à la richesse 1.

Phi= 1/lambda,

Lambda étant égal à 1- l'excès d'air par rapport à un mélange stœchiométrique.

En mélange pauvre, phi<1, ce qui signifie un excès d'air

La richesse du mélange est un paramètre de contrôle de la combustion et de la puissance.

i. Vitesse de propagation de flamme

La vitesse de flamme est définie comme étant la vitesse à laquelle les gaz frais sont happés par la flamme. C'est la vitesse de déplacement d'un élément du front de flamme par rapport aux réactifs.

La vitesse de propagation d'un combustible est une donnée physique pour une température et une pression donnée, liée à sa composition et aux propriétés des différents composants.

7. Les caractéristiques des principaux composés et leurs problématiques pour la valorisation

D'un point de vue physicochimique, différents paramètres sont utilisés pour caractériser les gaz issus du biogaz. Le Tableau 6 donne un exemple typique d'analyse.

Tableau 6 : Caractéristiques physiques des principaux composés des gaz de biomasse

	Symbole	Unité	CH_4	CO_2	CO	O_2	N_2	Air	H_2	H_2O	H_2S
Masse molaire	M	g / mol	16,04	44,01	28,01	32,00	28,01	28,96	2,016	18,02	34,08
Masse volumique	r	kg/Nm3	0,72	1,98	1,250	1,43	1,25	1,29	0,090	0,86	1,54
Densité	d	-	0,56	1,53	0,97	1,11	0,97	1,00	0,07	0,67	1,19
Pression critique	Pc	bar	46,00	73,90	34,94	50,40	33,90	37,70	89,40	220,60	12,97
Température critique	Tc	K	190,50	304,50	132,85	154,60	126,20	132,45	33,2	647,10	373,20
Pouvoir calorifique supérieur massique	PCSm	MJ / kg	55,66		10,12				141,8		16,52
PCS volumique	PCSv	MJ / m3(n)	39,82		12,63				12,75		25,37
Pouvoir calorifique inférieur massique	PCIm	MJ / kg	50,04		10,12				119,97		15,19
PCI volumique	PCIv	MJ / m3(n)	35,88		12,65				10,78		23,33
Indice de Wobbe	W	MJ / m3 (n)	53,41		12,82						23,28
Pouvoir comburivore	Lmin	m3(n) / m3(n)	9,57		2,38				2,38		7,23
Volume de fumées humides	Vgb,h	m3(n) / m3(n)	10,52		2,88				2,88		7,70

$M^3(n)$: mètre-cube normal, à 1 atm et 0°C. source : Poulleau J., 2002)

a. *Le méthane : CH_4*

Le taux de CH_4 confère aux gaz de biomasse un pouvoir calorifique. Il est en effet un des principaux constituants participant au dégagement d'énergie lors de la combustion. La température d'ignition du méthane à pression atmosphérique en présence d'une flamme ou étincelle est de 550°C. Son autoinflammation n'est donc pas spontanée. Il est inodore et incolore.

b. *L'oxygène : 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.

c. *Le dioxyde de carbone : CO_2*

La présence de CO_2 est inhérente aux gaz de biogaz. Il ne participe pas au processus de combustion mais fait accroître l'indice de méthane.

d. *L'hydrogène : 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. Les trois paramètres principaux de propagation de la flamme sont :

- les proportions du mélange : plus on est proche de la stœchiométrie, plus la flamme se propage vite (pour l'hydrogène, cela reste vrai en mélange pauvre, mais en mélange riche, le maximum de vitesse de propagation est décalé vers une richesse supérieure à 1) ;
- la température des gaz frais : plus la température est élevée (proche de la température provoquant l'inflammation spontanée), plus la propagation est élevée ;
- l'écoulement des gaz : les obstacles et turbulences modifient la progression de la flamme.

e. *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.

f. 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 NOx lors de la combustion, ce qui peut impacter sensiblement les émissions polluantes. L'ammoniac peut aussi passer dans l'huile du carter vilebrequin, la polluer et provoquer de la corrosion.

g. Le méthanol

Dans le cas de méthanisation d'alcool, le méthanol s'évapore dans le gazomètre. Son point de rosée est compris entre 30°C et 63°C. Il faut être particulièrement attentif lors de la digestion des alcools car comme le NH_3, il entraîne une faible résistance au cliquetis et favorise l'autoinflammation aux endroits chauds de la chambre de combustion.

h. L'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.

La solution consiste à refroidir le gaz via les conduites souterraines, ou par un groupe froid.

i. Les composés soufrés

Le biogaz contient toujours de l'H_2S dont la proportion peut atteindre en fonction du substrat les valeurs de 20 000 ppm. La production de H_2S n'est pas continue. Il ne faut donc pas effectuer les mesures à la même heure quotidiennement.

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). L'H_2S en milieu humide corrode l'acier en surface à une vitesse de l'ordre du millimètre par an et fragilise la structure par la formation de cloques.

On peut aussi constater l'augmentation de la fréquence des vidanges d'huile, du fait de la combustion de l'H_2S qui provoque l'acidification de l'huile de moteur.

Les composés soufrés sont également des poisons au niveau des catalyseurs des piles à combustible et des moteurs. En effet, l'H_2S empoisonne les catalyseurs.

L'H_2S est également à l'origine de pluies acides, de pollution, d'odeurs aux conduites d'échappement et il est nocif à la santé.

Les solutions consistent à désulfurer le gaz soit par voie biologique ou par 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.

j. Les composés organiques volatiles (COV)

Les composés organiques volatiles (COV) présents dans les biogaz proviennent de deux origines :

- produits intermédiaires de la fermentation (acides organiques par exemple), concernant tous les biogaz ;
- produits présents dans le substrat (produits présents dans les déchets ménagers, antibiotiques présents dans les lisiers…).

Les éléments présents peuvent être très nombreux, en particulier dans le gaz de décharge.

Leur concentration dépend de plusieurs facteurs :

- le type de déchets enfouis (OM, DIB…) ;
- les conditions de décomposition (température, humidité…) ;
- l'âge de la décharge.

Ce dernier facteur peut être résumé ainsi :

- Déchets « jeunes » (< 5 ans) : forte concentration de traces organiques, pourcentages élevés d'alcools et d'hydrocarbures halogénés.
- Déchets « moyens » (entre 5 et 10 ans) : diminution de la concentration totale de traces organiques, pourcentages d'alcools et d'hydrocarbures halogénés stables et augmentation du pourcentage d'hydrocarbures aromatiques (cycliques).
- Déchets « anciens » (> 10 ans) : diminution constante de la concentration totale de traces organiques, pourcentage prédominant d'alkanes qui augmenteront avec l'âge et pourcentage d'hydrocarbures aromatiques qui diminueront avec l'âge.

k. Le silicium et ses composés : les siloxanes

Les siloxanes présents dans le biogaz et leurs conséquences :

Les siloxanes volatiles sont composés de plusieurs constituants chimiques sous forme gazeuse : silicium, oxygène, chaîne carbonée. Ce sont des polymères organiques, hydrophobes et inerte chimiquement de formule générale R-SiO-R'. Communément utilisés pour la fabrication de cosmétiques, d'huiles et de peintures, ils se retrouvent principalement dans le gaz de décharge et en 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.

VI. Les digesteurs anaérobiques

1. Définition

Elle est appelée digesteur, une enceinte confinée à l'intérieur de laquelle des réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, grâce à un procédé de méthanisation des matières organiques pour produire du biogaz et du biofertilisant.

2. Les différents types de digesteur

Les déchets souvent utilisés pour la production de biogaz sont très diverses et peuvent être d'origine agricole, élevage, agro-industrie ou urbaine (eaux usées ou ordures ménagères). Pour permettre une meilleure assimilation par les micro-organismes, certains prétraitements

sont souvent nécessaires tels que: le tri, le broyage, le prétraitement thermique, le prétraitement chimique et l'homogénéisation.

En effet, tous les digesteurs anaérobiques sont des combinaisons de deux réacteurs à savoir :
-le réacteur parfaitement agité à l'intérieur duquel les particules ont toutes des concentrations identiques en tout point du réacteur et,

-le réacteur piston à l'intérieur duquel les particules entrant au même moment avancent à la même vitesse dans le réacteur et sortent simultanément.

Cependant, le choix du réacteur biologique dépend en général du type de déchets à traiter.

On réunit les types de digesteurs en deux grandes familles: les digesteurs du type continu et ceux du type discontinus.

a. Les digesteurs discontinus

Souvent appelés batch, les digesteurs discontinus utilisent peu d'eau et acceptent les substrats aussi bien liquide que solide. Le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, le temps de rétention étant fonction de la température et d'autres facteurs. A la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer. Ces systèmes, rustiques et d'une grande simplicité technique, sont avantageux pour traiter les déchets solides comme les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière: au début du cycle, la fermentation du substrat ne venant que de commencer, la production de biogaz est lente. Elle s'accélère, et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute en fin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur. Cependant, il n'est plus fréquemment utilisé actuellement car il demande un travail de maintenance tant pour la charge que pour le vidange. De plus si on vise une production régulière dans le temps, on est obligé d'utiliser plusieurs cuves. Dans cette gamme, il existe deux principaux types de digesteurs :

Le digesteur Ducellier-Isman

La particularité de ce type de biodigesteur (Figure 10) vient du fait qu'il possède un système de pré-fermentation aérobie qui, au démarrage des réactions biologiques, permet d'éviter la phase d'acidogénèse. Ses principaux compartiments sont représentés sur la figure ci dessous:

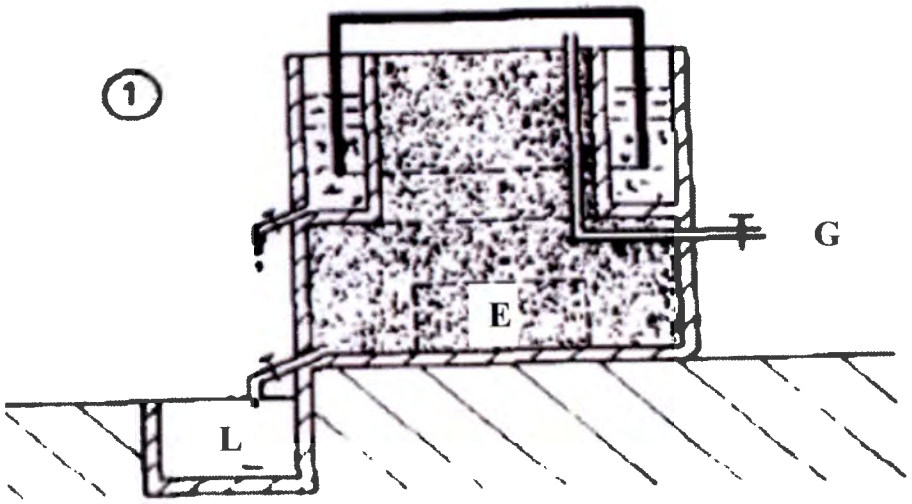


Figure 10 : Schéma de digesteur type Ducellier-Isman

(Sorties : L – Liquide à faible taux de MS, E – Effluents, G – Gaz)

Digesteur du CIEH ou puits

Ce type de digesteur est souvent disposé en batterie et la Figure 11nous montre ses différents composants:

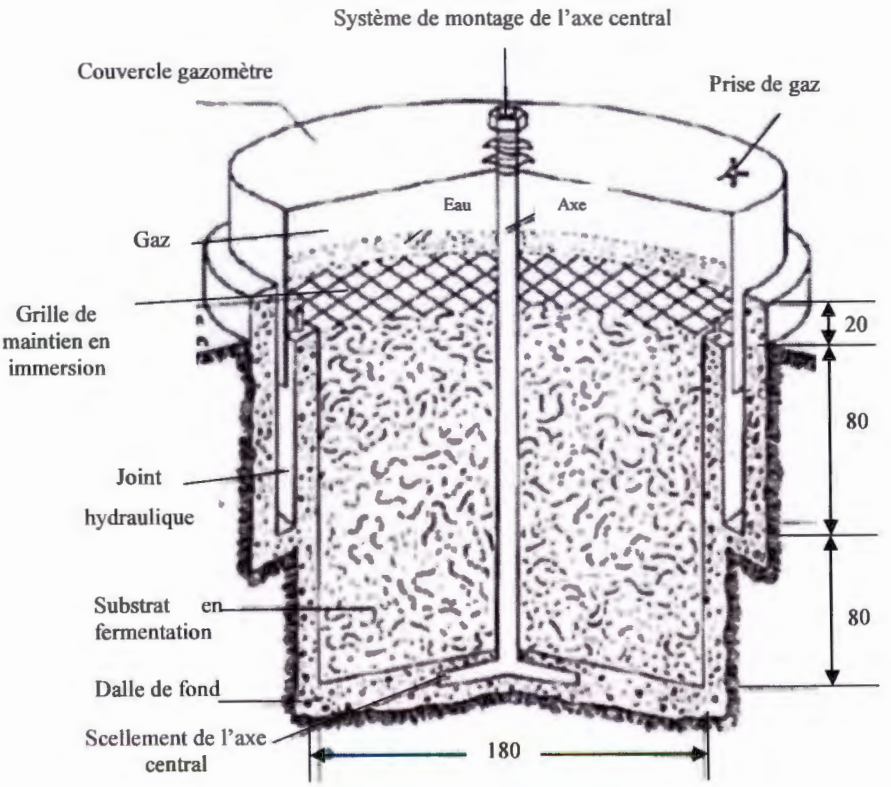


Figure 11: Schéma de digesteur type CIEH

b. Les digesteurs de type continu

Ce sont les plus nombreux et les plus développés actuellement. Ces digesteurs traitent en général un substrat n'excédant pas 15% de matière sèche (MS), des déchets industriels et des déchets très humides de l'élevage. L'avantage majeur avec ce type de digesteur est qu'il ne nécessite pas trop de travail au cours de la charge et la vidange. Les différents types de digesteurs continus sont:

Les digesteurs à cellules libres

Ces réacteurs continus sont parmi les plus anciens et les plus simples. Ici la biomasse est en suspension dans le réacteur.

Digesteurs infiniment mélangés

Le mélange dans le digesteur est généralement traité dans des réacteurs parfaitement agités. L'agitation à l'intérieur du digesteur peut se faire mécaniquement via la rotation d'hélices ou en recirculant le contenu du digesteur. Une dernière solution consiste à injection sous pression du biogaz produit.

Avantage : Ce procédé est adapté aux effluents riches en matières en suspension (> 10g/L)

Inconvénient : Le temps de séjour de la biomasse est strictement égal au temps de séjour hydraulique. Compte-tenu de la lente croissance des organismes méthanogènes, cette technologie limite donc les débits qui peuvent être appliqués en entrée du digesteur.

La Figure 12 nous montre un digesteur infiniment mélangé avec les différents types d'agitation possible.

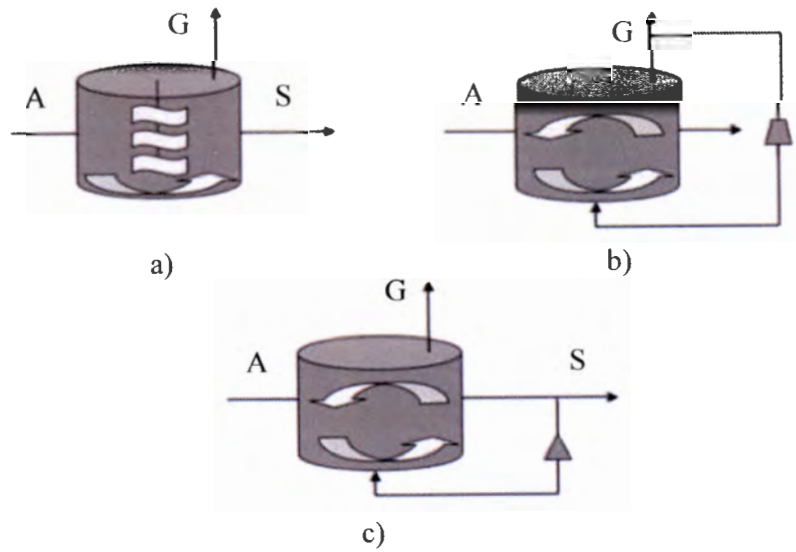


Figure 12: Schéma de digesteurs infiniment mélangés

a) Par rotation d'hélices, b) Par compression et recirculation du biogaz, c) Par recirculation du milieu. A : Alimentation, S : Sortie, G : Biogaz

Digesteurs à contact

Ce système associe un réacteur parfaitement agité et un décanteur. Le mélange décanté est recirculé dans le réacteur biologique afin d'augmenter la concentration en biomasse active ainsi que le temps de séjour des particules non dégradées. L'augmentation de la quantité de biomasse dans le digesteur permet d'améliorer la performance du système et ainsi d'accroître

les débits entrant et sortant ou de réduire le volume de la cuve . Des technologies ont été développées pour découpler le temps de séjour hydraulique de celui des solides et favoriser l'accumulation de biomasse. La solution la plus simple consiste à placer en sortie du digesteur un système pour séparer la biomasse de l'effluent, et à recirculer la biomasse concentrée. La récupération de la matière particulaire du digestat peut se faire à l'aide d'un décanteur ou bien grâce à une membrane (Figure 13).

Avantage : Technologie simple d'utilisation et peu onéreuse.

Inconvénient : Des problèmes de décantation due à la production résiduelle de biogaz dans le décanteur peuvent apparaître.

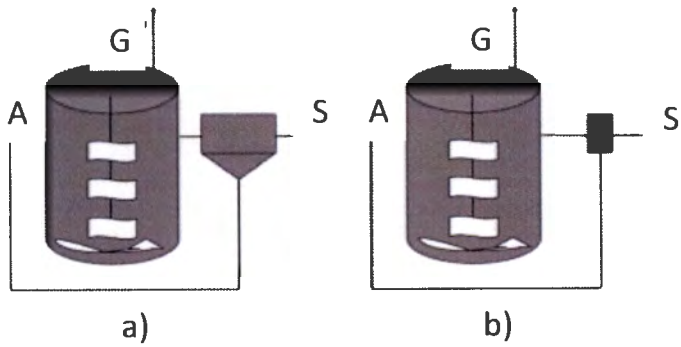


Figure 13 : Schéma de digesteur à contact.

a) Rétention assurée par décanteur, b) Rétention par membrane. A : alimentation, S : Sortie, G : Biogaz

- *Les digesteurs à biofilm et à granules*

Un biofilm est un groupe de microorganismes inclus dans une matrice de polymères biologiques. Les espèces qui composent le biofilm adhèrent entre elles et forment dans ce cas des granules. Les micro-organismes peuvent également se développer sur un support mobile ou fixe. L'attachement de la biomasse permet d'appliquer des débits importants sans risquer de lessiver la biomasse; ces digesteurs sont donc plus robustes face à des chocs hydrauliques que les réacteurs à cultures libres.

- *Les digesteursà lit fixe*

Procédé dans lequel la biomasse colonise sous forme de biofilm un support mobile (Cf.

Figure 14). Ce type de procédé est garni de supports de croissance des micro-organismes mobiles qui se déplacent au sein du réacteur biologique. Le flux entrant met en suspension les

supports mobiles et crée un milieu homogène permettant un contact optimal des micro-organismes et du substrat. Le flux entrant peut être ascendant ou descendant. Dans le cas d'un flux ascendant, les supports utilisés doivent avoir une densité supérieure à 1 pour contrer le flux et être mis en suspension. Dans le cas d'un flux descendant, la densité des supports utilisés doit être inférieure à 1.

Avantage : Nécessite moins de mélange, et est particulièrement robuste aux surcharges organiques.

Inconvénient : Ce type de réacteur est difficile à conduire car le flux entrant doit être parfaitement maîtrisé pour avoir une mise en suspension suffisante et homogène des supports.

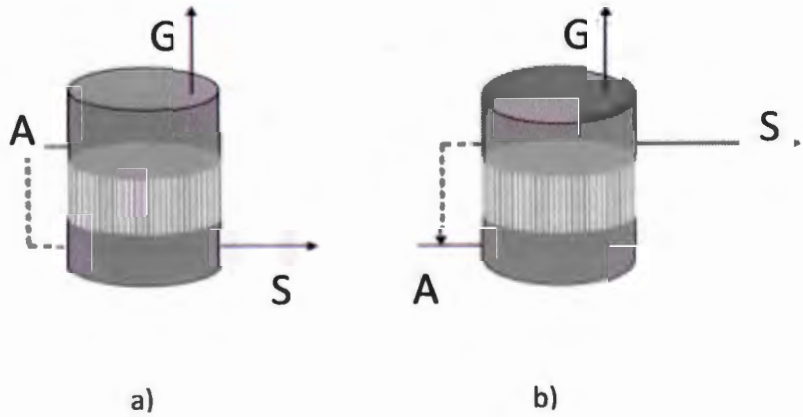


Figure 14:Schéma de digesteur à lit fixe.

a) Flux descendant, b) Flux ascendant, A : Alimentation, S : Sortie, G : Biogaz

- *Les digesteurs UASB*

Le principe de ce réacteur est basé sur la colonisation des micro-organismes sous forme de granules facilement décantables. Le flux entrant ascendant permet de mettre en suspension la biomasse et d'avoir un mélange homogène. Ce système doit être équipé d'un séparateur triphasique à son sommet pour retenir la biomasse dans le réacteur.

Avantage : Ce type de réacteur permet d'atteindre des charges importantes.

Inconvénients : Le démarrage de ce type de réacteur est généralement long car la charge doit être augmentée progressivement pour favoriser la granulation. Ce système est sensible aux longues périodes de surcharge et de sous charge. La granulation étant perturbée par la

présence excessive de bactéries acidogènes, la phase d'acidification doit être réalisée en amont dans une cuve séparée.

Digesteurs à support mobile

C'est la dernière génération de digesteurs à biomasse fixée. Ils ont été développés pour combiner les avantages des digesteurs à biomasse fixée et de ceux à cellules libres. Le digesteur est rempli avec un support inerte de faible taille sur lequel, et au sein duquel la biomasse peut se développer. Le rapport surface/volume élevé du support et l'application de débits volumiques importants permet d'éviter le bouchage. Si le lit est expansé de moins de 20% on parlera de lit "expansé", et lorsque l'expansion du lit dépasse les 30%, on parle de lit "fluidisé". La mobilité des supports est accrue dans le cas des lits fluidisés ce qui permet de limiter les colmatages et d'assurer un mélange efficace.

Digesteurs à deux étages

Dans un fermenteur classique, l'acidogénèse et la méthanogénèse se déroulent dans une même cuve, et en fonctionnement normal, les acides sont produits et consommés à la même vitesse. En cas de surcharge organique, ou dans le cas de substrats difficiles à dégrader, il peut arriver que l'acidogénèse génère les acides plus rapidement que les bactéries méthanogènes ne peuvent pas les éliminer. La technologie des digesteurs à deux étages repose sur une vision en deux étapes du procédé de dégradation de la matière organique: hydrolyse et acidogénèse, méthanogénèse (Figure 15).

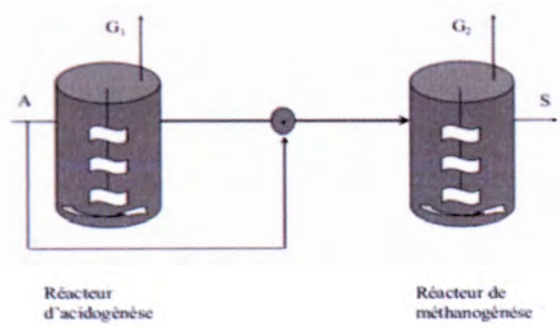


Figure 15 : Schéma de digesteur à deux étapes.

A : Alimentation ; S : Sortie ; Gi : composés gazeux

Ces deux étapes sont séparées spatialement ; l'acidogénèse se déroule dans un premier réacteur qui alimente le réacteur de méthanisation à proprement parlé. L'intérêt de cette

technologie est d'appliquer des conditions opératoires différentes. Pour la dégradation de matière soluble, c'est la méthanogénèse qui est l'étape limitante et les taux de dilution doivent être choisis de façon à éviter l'intoxication des méthanogènes par un excès d'acides. Ce procédé assure au réacteur de méthanisation une alimentation de qualité constante.

VII. Le Digestat

1. Définition

Le digestat est le produit résidu de la méthanisation, composé de matière organique difficilement biodégradable (lignine), des matières minérales (azote, phosphore) et de l'eau. Une fois le processus de production de gaz réalisé, la biométhanisation produit un résidu qui peut être valorisé comme fertilisant ou amendement organique. La valeur fertilisante des effluents d'élevage méthanisés n'est pas affectée (la quasi-totalité de l'azote contenu dans le fumier ou le lisier est conservé lors de la digestion), et est même parfois améliorée. La particularité du digestat est qu'il s'agit d'un fertilisant organique riche en azote minéral et éléments minéraux. Malgré la valorisation combinée des différents types de biomasse, le digestat est un produit liquéfié et homogène, ila l'avantage d'avoir une faible teneur en matière sèche et une haute viscosité ce qui le rend moins agressif pour le sol et facilite son infiltration et donc réduit le temps d'évaporation suite à l'épandage. Il peut être épandu avec un simple tonneau à lisier. Le mélange contient de l'ordre de 10% de matière sèche et est désodorisé. On notera que l'épandage de digestat engendre une quantité d'azote résiduelle dans le sol. Par cette technique performante d'épandage, la valorisation des éléments nutritifs contenus dans le digestat est optimale (ValBiom-ULC, 2010).Ce digestat est stocké dans des fosses ou des dalles en béton.

2. Propriétés du digestat

a. L'humus dans le digestat

La lignine présente dans les substrats entrants se dégrade peu lors de la méthanisation, elle se retrouve en partie dans le digestat. A l'inverse du compostage, la méthanisation n'active pas l'humification de la matière organique (les champignons responsables de cette dégradation de la lignine se développent uniquement en condition aérobie). Cependant, la méthanisation

transforme les molécules facilement dégradables (cellulose, hémicellulose, acides gras) en biogaz, ce qui va augmenter indirectement le coefficient d'humification du produit (SOLAGRO, 2001).

b. Le pH du digestat

La diminution des acides gras volatiles suite à la méthanisation entraîne une augmentation du pH du digestat. Cette augmentation a l'avantage de rendre le digestat moins agressif pour la végétation. Cependant, cela va augmenter également la proportion d'ammoniac dans le digestat et donc entraîner un risque de volatilisation de l'azote.

c. L'évolution du rapport C/N

La conversion d'une partie de la matière organique en méthane et dioxyde de carbone (sans pour autant modifier la teneur en azote totale) a pour conséquence de diminuer le rapport C/N du digestat par rapport au mélange entrant. Ce rapport peut diminuer de moitié après deux mois de digestion anaérobique.

d. La diminution des odeurs

Les odeurs proviennent souvent de l'ammoniac, des amines, des acides organiques, des phénols et de l'hydroxyde de soufre. La méthanisation, en transformant la matière organique facilement biodégradable en biogaz, va éliminer une partie de ces composants. Les odeurs du digestat sont donc nettement atténuées par rapport au mélange entrant.

e. La préhygiénisation lors de la méthanisation

La réduction des agents pathogènes lors de la méthanisation (bactéries, virus, parasites) est liée essentiellement au couple température-durée. Globalement, la digestion va éliminer une bonne partie des germes pathogènes, la digestion thermophile sera encore plus efficace. Cependant, les températures de méthanisation ne sont pas assez importantes pour avoir une hygiènisation complète comme le compostage (montée en température d'au moins 70°C).

f. Séparation de phase

Après méthanisation, le digestat peut subir une séparation de phase pour retrouver deux éléments à épandre : - une partie liquide (environ 3 à 7 % de matière sèche) dans laquelle se concentre la partie ammoniacale de l'azote ; - une partie solide (environ 25 % de MS) riche en matière organique et en phosphore. La séparation de phase permet de disposer d'une part d'un produit solide utilisable comme amendement de fond et d'autre part d'un produit riche en azote, cela permet d'optimiser les apports en fonction des besoins des cultures.

g. Effet sur l'azote

La réaction de méthanisation n'engendre pas de réduction des quantités d'éléments fertilisants (azote, phosphore, potasse). Cependant, elle entraîne un changement de forme de ces éléments. Lors de la méthanisation, une partie de l'azote organique est transformée en azote minéral (ammonium NH_4 + et ammoniac NH_3). Ce changement peut rendre l'azote plus facilement et rapidement disponible pour les plantes quand elles en ont besoin.

Cependant, la minéralisation de l'azote organique a un inconvénient, elle rend l'azote du digestat plus volatil. En effet, l'azote minéral peut se retrouver sous forme d'ammoniac et d'ammonium, l'équilibre entre ces deux composés va dépendre du pH. Or, le pH du digestat étant plus élevé que celui des déjections brutes, une bonne partie de l'azote se retrouvera sous forme ammoniacale, forme la plus volatile. Une part importante de cet azote est directement disponible et rapidement valorisée par la culture en place. La quantité d'azote totale contenue dans le digestat est de l'ordre de 4.4 unités/m^3. Le coefficient d'efficacité de l'azote total contenu dans le digestat est de l'ordre de 40% à condition que celui-ci soit enfoui rapidement après épandage, vu la part ammoniacale (volatile) importante du produit. L'efficacité maximale est observée pour des quantités d'épandage proches de 25m^3 par hectare, au-delà, l'azote contenu dans le digestat est moins bien valorisé. Il sera nécessaire de prendre des précautions afin d'éviter son évaporation et des pertes importantes lors du stockage et de l'épandage.

CHAP. II : MATERIELS ET METHODES

I. Sites d'études

1. Sites d'échantillonnages

Sangalkam

La localité de Sangalkam et ses alentours ont été choisis comme site d'étude. Sangalkam (marqué par la flèche rouge sur la Figure 16) est situé à la périphérie de Dakar dans le département de Rufisque et qui s'étend sur une superficie de 195 Km^2.

Elle est limitée géographiquement :

- à l'Est par les Communes de Sébikotane et de Pout dans la région de Thiès,
- à l'Ouest par la Commune de Keur Massar,
- au Nord par l'océan atlantique et la Communauté Rurale de Diander,
- et au Sud par les Communes de Bargny, Rufisque et Diamnadio (Demortreux, 2011).

Figure 16 : Carte de la commune de Dakar

La baie de Hann Bel Air

Le second site d'étude est la baie de Hann située sur la façade orientale de la presqu'île du Cap Vert entre la pointe de Bel-Air et le village de Mbao (Figure 17). Il y a encore 25 ans, la baie de Hann était une des plus somptueuses baies du monde avec la baie de Rio de Janeiro au Brésil, sur une superficie de 40 km^2. Cette baie est de plus en plus polluée par les industries qui y déversent leurs déchets, ce qui favorise le développement des algues (Cf. Figure 18)

La pollution algale, avant très limité, dans le temps, est permanente du fait de l'Eutrophisation poussée de la baie.

Figure 17 : La ville de Dakar et ses plages

Les macroalgues sur lesquels nous avons travaillées ont été collectées sur cette baie de Hann de Dakar. Vers le mois de Janvier, la profondeur de dépôt d'algues sur la plage est maximale et atteint environ 50 cm. La collecte a été réalisée sur quatre points; un tapis de macroalgues de $1cm^2$, pleine profondeur, ont été recueillis, pesés, séchés dans un four à 65 ° C pendant 72 h et repesés à la sortie. Nous avons estimé la quantité annuelle de macroalgues dans la baie de Hann à Dakar à 3000 t / an.

Figure 18 : Vue satellitaire de la carte de pollution de la baie de Hann

Flèche blanche : étendu de la pollution par les eaux usées ; Marque verte : la prolifération des macroalgues

Enquêtes et estimation des ressources organiques

Sur le site, des enquêtes ont été menées pour estimer les différents types de déchets organiques, leurs quantités et leurs disponibilités saisonnières. Les enquêtes concernaient le niveau domestique (voir fiche d'enquête en Annexes), et le niveau industriel (petite et grande échelle). Les types d'activité pratiquée ainsi que l'utilisation prévue pour la valorisation du biogaz ont été relevés.

2. Sites d'analyses

Laboratoire de biotechnologies de l'environnement de l'INRA-FRANCE (INRA-LBE)

Le Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE) est situé à Narbonne en France (Figure 19). Le LBE est une unité de recherche de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA). Concentré d'innovation, le LBE mène des recherches centrées sur le concept de la bioraffinerie environnementale. Le LBE est :

- Le premier laboratoire mondial en termes de production scientifique dans le domaine de la méthanisation.
- Résolument tourné vers les collaborations internationales (14 nationalités en 2011).
- Très impliqué dans un fort partenariat public-privé (5 entreprises de biotechnologie hébergées actuellement).

Figure 19 : Vue aérienne du Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE-INRA)

Laboratoire National de Recherches sur les Productions Végétales LNRPV-ISRA

Le Laboratoire National de Recherches sur les Productions Végétales (LNRPV), un centre de recherche de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles qui a une vocation transversale qui lui permet d'intervenir sur des problématiques pouvant intéresser l'ensemble des zones agro-

écologiques du Sénégal. Il génère des connaissances, des techniques et technologies pouvant contribuer à lever certaines contraintes au développement agricole. Par ailleurs, il apporte son appui en prodiguant des conseils aux différents partenaires qui œuvrent dans le domaine du développement rural en général, et du développement agricole en particulier. Le laboratoire a également pour vocation de développer des recherches en amont (sur les outils et les méthodologies) pour proposer des solutions aux partenaires de la recherche et du développement.

Figure 20: Serre de LNRPV-ISRA Bel Air

La serre du LNRPV a abrité nos tests de biofertilisation des digestats. Ces tests de détermination du pouvoir fertilisant des substrats et dérivés ont été effectués aussi en micro-jardinage.

- ***Le laboratoire commun de Microbiologie LCM (IRD-ISRA-UCAD)***

Le LCM est une Unité de Microbiologie travaillant sur la diversité, la mise en place et l'adaptation des symbioses fixatrices d'azote et mycorhiziennes à des contraintes abiotiques (ex. sécheresse, salinité). Les travaux font appel à des approches microbiologiques, écologiques, écophysiologiques, phylogénétiques, génomiques et cellulaires, et s'appuient sur une large palette d'outils en Microbiologie, Biochimie, Biologie moléculaire et Génomique disponibles au LCM. Les travaux sont principalement menés sur des espèces végétales et microbiennes, d'intérêts agricole et sylvicole, et sur la restauration des sols dégradés des agroécosystèmes représentatifs des milieux soudano-sahéliens. Le LCM est un laboratoire

d'accueil de l'école doctorale « Science de la vie, de la santé et de l'environnement » de l'UCAD (Figure 21). Le LCM développe un important réseau de collaborations nationales, régionales et internationales. Il a également pour mission de vulgariser la technologie de l'inoculation auprès des organisations de producteurs (ex. CNCR, ANCAR). Le LCM est un laboratoire certifié ISO 9001 depuis 2008.

Figure 21: agitateur pour l'incubation des mini-digesteurs

- *Le laboratoire LAMA (Laboratoire des Moyens Analytiques)*

Le laboratoire d'analyses du Centre IRD Bel Air de Dakar, certifié ISO 9001 version 2008, fait partie de l'US 191, IMAGO (Instrumentation, Moyens Analytiques, Observatoires en Géophysique et Océanographie).Il effectue des analyses minérales de sols, d'eaux et de végétaux, ainsi que des mises au point méthodologiques à la demande des programmes de recherche de l'IRD ou d'organismes partenaires.

Une partie de nos analyses de caractérisation biochimique ont été effectuées au LAMA (Figure 22).

Figure 22: L'analyseur de gaz du LAMA

II. Substrats exploités

Des enquêtes menées ont permis de recenser les principaux substrats rencontrés qui étaient au nombre de six appartenant à différentes catégories : excréments d'animaux (fientes de volaille, bouse de vache) ; végétaux (algues et typha) ; résidus de transformation (tourteaux et reste alimentaires)

1. Les fientes de volaille :

C'est la matière fécale de la volaille (poulets, canards…) d'une façon générale. La fiente de volaille est le principal déchet produit dans le site de Sangalkam (Figure 23). Après les collectes, une faible quantité a été prélevée des échantillons et mis à l'étuve pendant 48 h à une température de 75 ° C pour déterminer la composition de la masse sèche, avec des pesées avant et à la sortie de l'étuve. Et l'autre partie a été broyée dans une machine avant d'être mis dans les fioles pour les tests de BMP (Biochemical Methane Potential).

Figure 23: Fientes de poulet récolté dans une ferme à Sangalkam

2. Bouse de vaches

La bouse est l'excrément des mammifères ruminants tels que les bovins et les buffles. Quelle que soit l'espèce d'animale herbivore, les déjections solides sont constituées d'eau, de résidus de fourrage non digérés (fibres végétales constituées principalement d'hémicellulose, de cellulose et de lignine), de métabolites animaux, de microorganismes et de métabolites microbiens (Haynes & Williams, 1993). Une vache adulte produit une moyenne de 12 bouses par jour d'environ 3 kg chacune. La bouse de vache est une source importante de gaz à effet de serre, mais l'expérience montre qu'elle peut être recyclée pour la production de biogaz génératrice d'électricité. La bouse de vache est le principal substrat utilisé par le "Programme

National de Biogaz domestique du Sénégal (PNB-SN)" pour faciliter l'accès des populations aux sources d'énergie alternatives au bois-énergie.

Dans le cas de cette étude, des échantillons ont été prélevés dans deux fermes de Sangalkam : Niakourab et Wayembam (Figure 24). La bouse est prélevée et entassée en monticule par les propriétaires pendant une période de 1 à 2 mois. Ceci est typiquement ce genre d'engrais qui utilisent habituellement comme un amendement du sol.

Dès notre retour sur Dakar, une partie a été mise à l'étuve à 35° C pendant 5 jours puis broyée et utilisée les tests d'analyses de la composition chimique et la détermination de la masse sèche. Le reste a servi pour les tests de BMP.

Figure 24: Bouse de Vache récolté dans une ferme à Sangalkam

3. Les algues

Les algues envahissent les étangs, les lacs et les mers, et modifient l'écosystème de l'eau. Ils inhibent le développement des êtres vivants très rapidement. Une faible population d'algues n'est pas vraiment préjudiciable à l'environnement marin, mais quand ces algues commencent à fleurir, l'un des problèmes qu'elle va déclencher est l'épuisement de l'oxygène. D'où l'intérêt de contrôler la population des algues pour empêcher la mort des poissons et de l'environnement marin.

Figure 25 : Pollution de la baie de Hann par les macroalgues (vaste étendue et grande profondeur)

Figure 26 : Les deux espèces dominantes à la baie de Hann (Ulva lactuca et Codium tomentosum)

La profondeur de dépôt des macroalgues sur la plage de la Baie de Hann peut atteindre environ 50 cm en Janvier (Figure 25). Les prélèvements ont été effectués à quatre endroits éloignés d'environ 200 m de distance. Des échantillons de 50 x 50 cm sur toute la profondeur ont été recueillis et conservés dans des sacs plastiques différents. Ils ont été étendus sur des sachets plastiques à l'ombre pendant 48h puis ils ont été mis à l'étuve à 35°C pendant une semaine. Ensuite ces échantillons ont été broyés et mis en fiole et le reste a été envoyé au LAMA pour les analyses biochimiques.

4. Tourteau de Jatropha

Le terme « tourteau » désigne le résidu issu du pressage des graines de *Jatropha curcas L* (Classification du Jatropha dans le Tableau 7*)*. Il représente la majeure partie des produits finaux obtenus après transformation : 1 tonne de graines de Jatropha pressées génère 500 à 800 kg de tourteaux pour 240 à 300 kg d'huile (Devappa, 2010). Plus de 85 % de la biomasse des graines de Jatropha sont ainsi inutilisés dans la production de biocarburant. L'élimination et/ou la valorisation de ces déchets solides sont essentielles. Sinon, cela risquera potentiellement de générer à plus ou moins long terme différents problèmes environnementaux tels que ceux liés à la gestion de déchets solides. Le tourteau de Jatropha est riche en protéines et en éléments minéraux. Il pourrait donc être valorisé en fertilisant ou en aliment pour le bétail et ainsi fortement participer à l'économie de la filière, comme c'est le cas dans les autres filières oléagineuses telles que le soja et le colza. Pourtant, ce coproduit n'est pour le moment que peu ou pas valorisé. En effet, l'attention de la communauté scientifique et du développement s'est tout d'abord portée sur l'huile de Jatropha et sur sa transformation en biodiesel, négligeant ainsi les autres coproduits issus de cette plante. Cela constitue actuellement un manque à gagner significatif pour tous les acteurs de la filière, notamment les producteurs...

Les échantillons ont été prélevés à partir de trois unités de traitement artisanal utilisant le même procédé pour extraire l'huile des graines de Jatropha. Pour chaque échantillon, environ 1 kg de tourteau a été échantillonné à partir de tourteau séché à la température ambiante.

Tableau 7 : Classification des espèces utilisées comme substrats

Classification selon APG III (2009)			
	Macroalgues		Plantes
Domaine	Eukaryota	Eukaryota	Eukaryota
Règne	Plantae	Plantae	Plantae
Embranchement	Chlorophyta	Chlorophyta	Magnoliophyta
Classe	Ulvophyceae	Bryopsidophyceae	Magnoliopsida
Ordre	Ulvales	Bryopsidales	Euphorbiales
Famille	Ulvaceae	Codiaceae	Euphorbiaceae
Genre	Ulva	Codium	Jatropha
Nom Binominal	*Ulva lactuca* L., 1753	*Codium tomentosum* Stackh., 1797	*Jatropha curcas* L., 1753

Source : (Wikipédia)

5. Les déchets ménagers :

Les déchets ménagers sont un mélange de plusieurs résidus différents qui ne présentent pas de caractère dangereux et ne comportent aucun risque pour l'homme ou l'environnement. Ils résultent de la vie quotidienne de chaque personne vivant dans une habitation.

Les déchets ménagers se composent :

- d'une partie recyclable : verre, carton, papier, restes de cuisine, etc. ;
- d'une partie non recyclable dite ultime : destinée à l'enfouissement.

Des restes alimentaires ont été récoltés dans le restaurant de l'ISRA. Leurs compositions dépendent essentiellement de la nature des aliments, ainsi pour notre alimentation dont l'élément de base est le riz, nous aurons principalement ce dernier mais aussi, les éléments auxquels il est associé. Le reste était des déchets d'origine végétale ou animale.

Figure 27: Reste alimentaire de restaurant

III. Détermination du potentiel méthane des substrats

Le potentiel méthane représente la quantité de biogaz et de méthane (CH_4) pouvant être produite par un substrat. Plusieurs tests permettent de déterminer la production maximale de biogaz d'un échantillon de biomasse : - tests en mode fed-batch dans les réacteurs, de taille variable entre 5 et 15 litres, et - tests de BMP (Biochemical Methane Potential), dans des réacteurs de 400 ml à 1 litre.

1. Mesure de la Matière Sèche (MS) ou Siccité et de la Matière Volatile (MV) :

Pour poursuivre à bien la caractérisation de nos substrats, les matières sèche (MS) et volatile (MV) ont été déterminées sur des supports secs selon des procédés standard (APHA (American Public Health Association), 1992) par séchage de la biomasse à 105 ° C pendant 24 h, suivi d'incinération à 550 ° C pendant 2 h.

Etapes :

- Tarer une capsule en aluminium, noter la tare,
- Ajouter l'échantillon, noter le poids (P) ; protéger la capsule avec un morceau de papier aluminium troué,
- Placer à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures.
- Sortir de l'étuve mettre la capsule dans un dessiccateur jusqu'à parfait refroidissement, peser et noter le poids ;
- Placer au four à 550° C pendant 2 heures ;
- Sortir la capsule et faire refroidir à l'air libre pendant 5mns puis dans un dessicateur jusqu'à refroidissement total puis peser et noter le poids :

$$\% \text{ MS} = (\text{P après étuve} / \text{P avant étuve}) * 100$$

$$\% \text{ MV} = (\text{P avant four} - \text{P après four} / \text{P après étuve}) * 10$$

2. Réacteurs en batchs

Pour la réalisation de ces essais, quatre réacteurs en verre à double enveloppe ont été utilisés (voir Figure 28).

Les réacteurs ont un volume utile de 6 litres. Ils sont mis sous agitation mécanique et thermostatés à 35°C par recirculation d'eau dans la double enveloppe. Ils sont équipés d'un système de mesure en ligne du pH et du volume de gaz produit et d'un ordinateur pour l'acquisition des données.

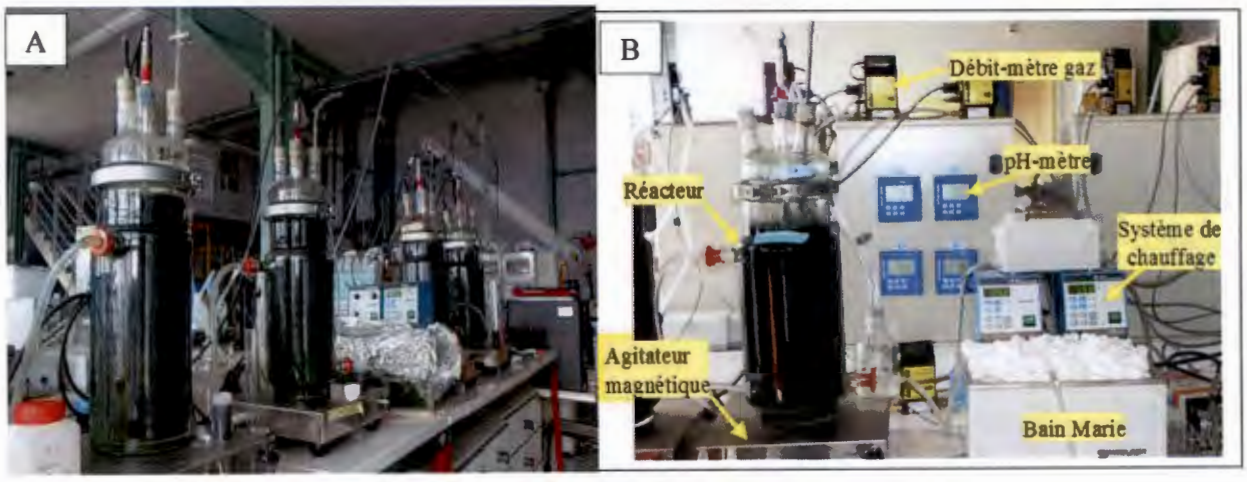


Figure 28 : Réacteurs en batchs de 6l du LBE

Le volume de biogaz produit a été mesuré au moyen d'un débitmètre Ritter milligas-counter MGC-1 dont le schéma est présenté à la Figure 29. Ce débitmètre comprend une cellule de mesure d'environ 1 ml qui se remplit avec le biogaz produit. Dès que la cellule est pleine, elle se soulève et bascule de l'autre côté du débitmètre en se vidant. Un compteur enregistre les mouvements de la cellule ce qui permet de déterminer le volume de biogaz produit, une impulsion correspondant à la production d'un volume connu de biogaz (environ 1 ml). Ce type de débitmètre permet de mesurer la production de très faibles volumes de biogaz.

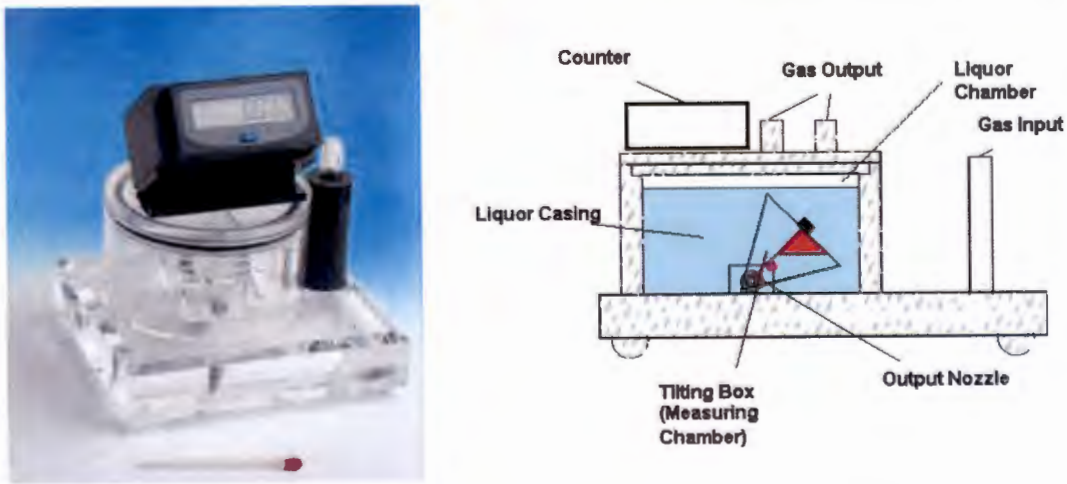


Figure 29: Schéma du débitmètre Ritter milligas-Counter MGC-1.

Les conditions de fonctionnement

Compte-tenu des faibles volumes de substrat à ajouter, les réacteurs ont fonctionné en mode fed-batch c'est à dire avec des batchs successifs sans vidange.

Au début et à la fin de chaque essai, les réacteurs ont été alimentés avec de l'éthanol pour vérifier l'activité des boues et mesurer la respiration endogène c'est-à-dire, l'activité des boues lorsqu'il n'y a plus de substrat à dégrader, ce qui correspond en quelque sorte à la « ligne de base ». Deux batchs ont été réalisés avec 2 ml d'éthanol.

Pour les substrats, 3 batchs de 0.5 g puis 2 de 1 g de MV par litre de réacteur au début de chaque batch ont été réalisés.

Ils sont ajoutés dans le réacteur manuellement et, lors de l'ouverture du réacteur, le ciel gazeux est dégazé à l'azote pendant 2 minutes pour éviter tout apport d'oxygène dans les réacteurs afin d'éviter toute inhibition de la flore anaérobique.

Les paramètres suivis en ligne

Le débitmètre Ritter milligas-Counter MGC-1 permet l'enregistrement pour chaque batch de la courbe représentant le cumul du volume de biogaz produit en fonction du temps. Le pH est également enregistré en ligne pour chaque batch. Le logiciel ModularSPC, développé au LBE, permet l'acquisition et le traitement des données.

3. Tests BMP (Biochemical Methane Potential)

Principe

Le principe de la mesure du potentiel biochimique consiste à incuber une petite quantité caractérisée de déchets organiques à l'aide d'un inoculum anaérobie et de faire des mesures.

Méthodologie

La boue d'inoculum utilisé est prélevée au niveau de l'industrie de sucre « *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) » (Jard, et al., 2012). La concentration VS initiale de la boue était d'environ 110 g MS / kg. Les tests BMP ont été préparés en double exemplaire en bouteilles de 500 ml de sérum avec 400 ml de volume de travail. Chaque bouteille contenait 2 g MS d'inoculum et 1 g de MS substrat. Les bouteilles ont été remplies de 400 ml avec un tampon bicarbonate complété avec du substrat. Témoins positif et négatif contenant soit un substrat

entièrement biodégradable (éthanol) ou pas de substrat ont été effectuées. De l'azote gazeux a été balayé dans l'espace aérien afin d'éliminer les traces d'oxygène et de maintenir des conditions anaérobies. Les bouteilles ont été rapidement scellées avec des bouchons caoutchouc butyle et serrées avec des colliers en aluminium. Une fois préparés, les bouteilles ont été agitées à fond et incubées à 35 ° C sous agitation douce pendant 60 jours. Le volume et la composition du biogaz ont été pris régulièrement pendant l'incubation ; d'abord avec un jour d'intervalle pour les premiers jours après ensemencement ; puis avec trois jours d'intervalle du $10^{ièmes}$ jour jusqu'à la fin de la digestion anaérobique. La quantité de biogaz produit est mesurée à l'aide de l'appareil de dégazage (Figure 30). La composition du biogaz est déterminée à l'aide de la micro-chromatographie à phase gazeuse (Shimadzu Corporation, 2004). Le chromatographe micro GC CP4900 (Figure 30) est équipé d'un détecteur à conductibilité thermique. Ce détecteur réagit aux différences de conductibilité thermique entre le gaz vecteur et les composés de l'échantillon. Le micro GC- comprend 2 colonnes: la première permet de séparer l'H_2, l'O_2, le N_2, le CH_4, le CO, et les gaz nobles. La seconde colonne permet de séparer le CO_2 des autres gaz. La marge d'erreur de cette mesure était de 5%. Le gaz vecteur est l'hélium. Pour l'injection de gaz dans l'appareil il est préférable d'utiliser des aiguilles fines de 0.4mm de diamètre. La production de biogaz obtenue à partir du témoin négatif (respiration endogène) a été soustraite des biogaz obtenus avec des échantillons au cours de la période d'incubation. Les rendements de méthane ont été calculés en divisant le volume de méthane corrigé (pression et température standard) par le poids de l'échantillon ajouté.

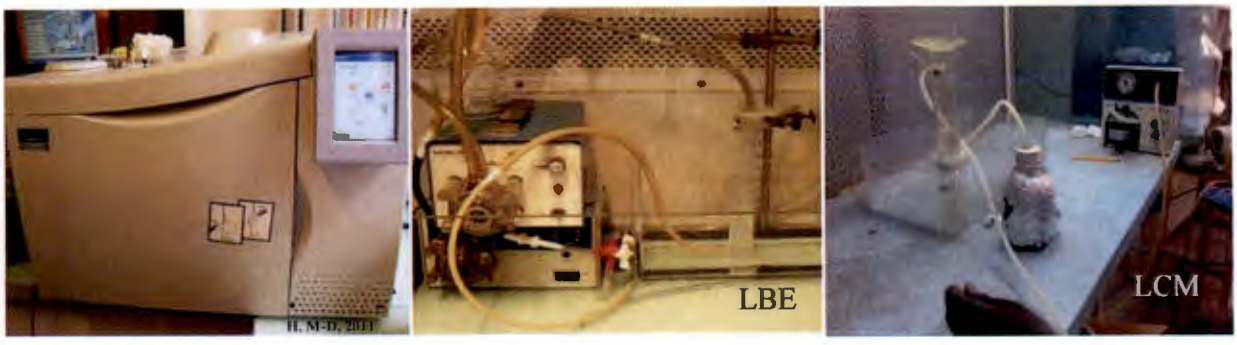


Figure 30: µChromatographie à phase gazeuse et Appareils de Dégazage sous hotte

4. La caractérisation biochimique des substrats

a. *Extractions de fibres Van Soest*

Principe

La méthode de mesure des fibres de Van Soest repose sur des extractions successives de composés de plus en plus difficiles à solubiliser (voir Figure 31). A chaque étape, l'échantillon est lessivé à l'aide d'un solvant puis séché et pesé. Les différents composés sont déterminés par différence de masse.

Figure 31 : Dispositif Van Soest

Méthodologie

Les détails de la méthodologie sont décrits par Van Soest P.J (Soest, Robertson, & Lewis, 1991).

Mode de calcul

Nous notons les différentes pesées successives :

+ T : tare du creuset ou bécher
+ TS : masse du bécher + sac
+ M0 : masse du bécher + sac + échantillon
+ M1 : pesée après extraction NDF et séchage ;
+ M2 : pesée après extraction ADF et séchage ;
+ M3 : pesée après extraction ADL et séchage ;
+ M4 : pesée après calcination.

Nous notons également MS et MV les teneurs en matière sèche et en matière organique, mesurées en parallèle sur un échantillon identique.

Calcul des résidus

Les résidus (NDF, ADF, ADL) s'expriment en fraction de la matière organique totale. Chaque résidu est calculé comme le reste après séchage moins le reste après calcination. Une correction par rapport à la masse du sac est effectuée (99,2% de la masse du sac est calcinée lors du passage à 550°C).

$$\mathrm{NDF} = \frac{M1 - M4 - 0{,}992 \times (TS - T)}{(\mathrm{M0} - \mathrm{TS}) \times \mathrm{MS} \times \mathrm{MV}}$$

$$\mathrm{ADF} = \frac{M2 - M4 - 0{,}992 \times (TS - T)}{(\mathrm{M0} - \mathrm{TS}) \times \mathrm{MS} \times \mathrm{MV}}$$

$$\mathrm{ADL} = \frac{M3 - M4 - 0{,}992 \times (TS - T)}{(\mathrm{M0} - \mathrm{TS}) \times \mathrm{MS} \times \mathrm{MV}}$$

Calcul des fractions

A partir des résidus, nous pouvons calculer les quantités représentées par chaque fraction (les résultats sont exprimés en fraction de la matière organique) :

- SOLU (fraction soluble) = 1-NDF
- HEMI (hémicellulose) = NDF-ADF
- CELL (cellulose) = ADF-ADL
- LIGN (lignine) = ADL

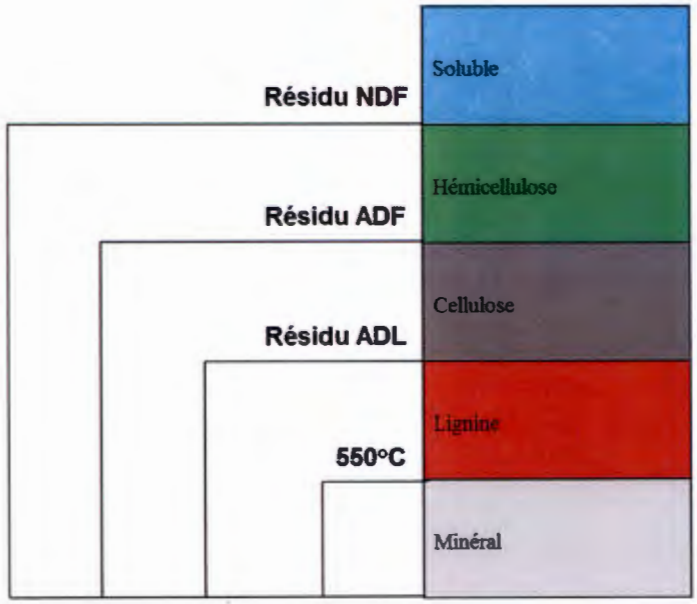


Figure 32 : Schéma de l'extraction des fibres Van Soest

b. *Dosage Carbone Total par le TOC-V:*

- *Principe :*

Le TOC-V est un analyseur de carbone (Figure 33) qui utilise une méthode de combustion catalytique à haute température. Le CO_2 produit est détecté par infrarouge.

- *Analyse des solides :*

- Vérifier les niveaux : d'acide (HCl 2M), d'eau de dilution, d'eau (milli-Q), d'eau de l'humidificateur, flacon d'égout, des tuyaux d'évacuation, de la vanne d'oxygène, de la température du four, d'acide (H_3PO_4), de la trappe du séparateur gaz/liquide
- Renseigner le tableau en sélectionnant une courbe de calibration
- Peser et noter une masse (en général inférieure à 1 g) dans une nacelle propre et sèche
- Introduire la nacelle dans le port d'injection
- Bien refermer la vis d'admission
- Appuyer sur START, avancer la nacelle dans le four et suivre les indications affichées sur l'écran

Figure 33 : Appareils de mesure de carbone total TOC-V

- ***Préparation des échantillons***

Il est possible d'analyser avec ce module des solides, des suspensions et des solutions.

Plusieurs caractéristiques de l'échantillon peuvent affecter les résultats :

- forme, taille des particules
- matrice
- teneur en eau
- quantité
- mélange avec l'acide phosphorique
- produits de réaction avec l'acide

Les paramètres suivants doivent être également optimisés :

- débit d'oxygène
- couverture de la nacelle
- additifs (catalyseurs)
- solutions étalons

Si l'échantillon contient des COV, il faut fermer immédiatement le compartiment après introduction de la nacelle.

c. *Dosage Phosphore par spectrophotométrie:*

Principe:

Les ions phosphates forment en présence du réactif phosphomolybdique un complexe jaune qui peut être dosé par spectrophotométrie visible (Figure 34).

d. *Dosage Azote total par la méthode de Kjeldhal*

Principe :

La méthode de Kjeldhal (Dunod, 1975) repose sur une minéralisation à chaud en milieu acide de l'azote organique, suivie d'un passage en milieu alcalin pour transformer les ions ammonium en ammoniac (Voir dispositif Figure 34). Ce dernier est ensuite distillé et récupéré dans une solution indicatrice pour être dosé par titration avec une solution d'acide de normalité connue (HCl 0,02N).

Figure 34 : Spectrophotomètre (A) ; Appareils de dosage d'Azote Total (B)

Titration :

- Les résultats de la titration sont exprimés en mg/l de N.

$$\text{Calculs : } \frac{V \times 0{,}02 \times 1000 \times 14}{PE} = \text{XmgN/l}$$

+ V = V' (descente HCl échantillon) - V" (descente HCl témoin)
+ PE = Prise d'essai (2 ou 5 ml)
+ 0,02 mol/L correspondent au titre de l'acide chlorhydrique.
+ 14 g/mol est la masse molaire de l'azote.

e. Dosage lipide par extraction solvant :

Principe :

La mesure est une extraction par solvant. La quantité de graisse extraite se mesure en quantifiant la masse de graisse récupérée dans le solvant après évaporation de ce dernier (voir dispositif sur la Figure 35).

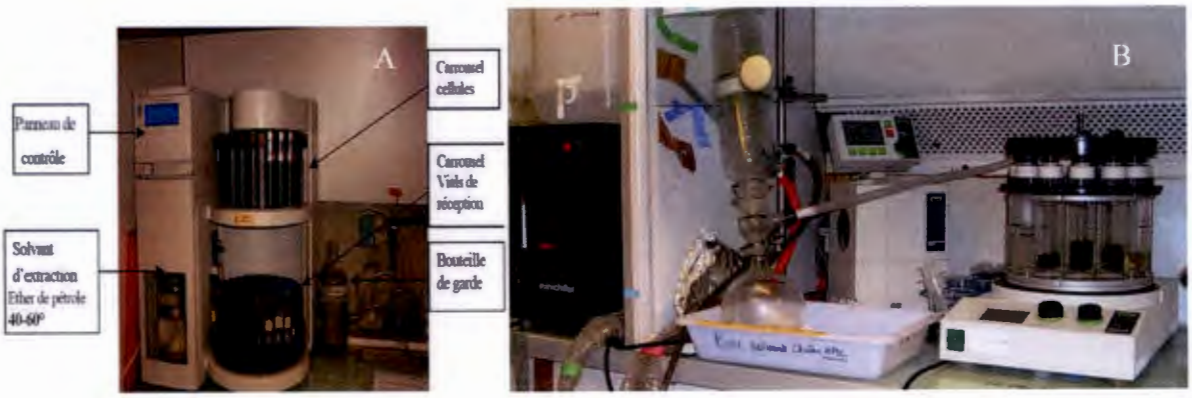


Figure 35 : Dispositif pour le dosage des lipides

(Extracteur de lipide A et Evaporateur de solvant B)

Mesure de la quantité de graisses extraites :

- TV tare du vial (g)
- MV masse du vial après étuve (g)
- M_{PE} masse d'échantillon introduit dans la cellule avant extraction (à noter précisément)

Masse de graisse récupérée :

$$MGE = MV\text{-}TV$$

$$\%\ \text{Massedegraisses} = \frac{MPE}{MGE} * 100$$

f. Dosages Sodium et Potassium par photométrie de flamme

Principe : La Photométrie de flamme (Figure 36) est constituée de trois éléments : le brûleur, le monochromateur et d'une cellule photoélectrique.

Le *brûleur* fournit une flamme dans laquelle on pulvérise la solution à analyser.

Le *monochromateur* permet de sélectionner la longueur d'onde caractéristique de l'élément à doser.

Le *récepteur photoélectrique* est composé d'une cellule photoélectrique qui transforme le flux lumineux en intensité électrique.

La lecture est obtenue sous forme digitale.

Figure 36 : La Photométrie de flamme

g. Rapport de C/N

Pour la détermination du rapport de C /N, la méthodologie que nous avons utilisé est la suivante : la valeur du pourcentage du carbone total est divisé par celui de l'azote total pour chaque substrat. Par contre certains auteurs recommandent (Paré, Dinel, Schnitzer, & Dumontet, 1998) d'estimer le ratio C/N avec le N et C biologiquement disponibles et non avec le C organique et N total. Ces auteurs estiment que seules les formes solubles et hydrolysables sont bio disponibles pour les micro-organismes. La biodégradabilité de la matière organique serait mieux évaluée par le ratio C bio disponible/N bio disponible, en particulier dans le cas où la teneur en N non hydrolysable est élevée. D'autre part, (Said-Pullicino, Erriquens, & Gigliotti, 2007) préconisent d'utiliser le ratio C organique extractible à l'eau/N extractible à l'eau.

IV. Détermination du pouvoir fertilisant des digestats

1. Préparation des digestats

Le digestat ou déchet « digéré », est un des deux résidus, au même titre que le biogaz, issu du processus de méthanisation (digestion anaérobie) de la matière organique. Selon la nature des

produits de départ, la méthanisation peut produire un digestat stabilisé utilisable comme fertilisant ou amendement organique.

Après digestion anaérobique des substrats pendant 90 jours, les digestats sont récupérés et tamisés avec un tamis de maille environ 0,5 mm.

Pour déterminer le pourcentage d'eau et de matière sèche des digestats, nous avons prélevé une quantité de 8 à 10g environ dans une boite de pétri dont le poids est noté au préalable. La boite de pétri est placée à l'étuve à 65° C pendant 72 h pour séchage. Cette opération est répétée trois fois pour chaque digestat. La quantité moyenne de MS du digestat est déterminée par différence de poids de la boite avant et après séchage.

Ces solutions de digestat sont conservées dans des bouteilles de 10 l et stabilisées en chambre froide entre 4 et 11° C. Chaque digestat est dilué avec de l'eau claire du robinet pour obtenir une concentration de 0,6 g/l de MS. Les quantités nécessaires pour l'arrosage des essais sont prélevées au moment opportun.

2. Spéculations testés

Les espèces végétales qui avaient été utilisées pour estimer les valeurs agronomiques des digestats en serre est le maïs et le sorgho.

a. Le maïs

Le maïs ou *Zéa mays*, est une plante herbacée tropicale vivace de la famille des Poacées. Nous avons utilisé la variété de *Maka* originaire de la Mauritanie au long du fleuve Sénégal qui s'adapte bien dans la zone centre et sud du Sénégal. Il peut être une culture pluviale ou irriguée d'où notre choix de le cultiver en serre. C'est la deuxième céréale la plus cultivée au Sénégal et sur toute l'étendue du territoire. Les grains ont été pré-germés dans des bocaux, où nous les avions placés sur des papiers imbibés d'eau. Les bocaux étaient placés à l'obscurité dans une étuve à 37° C pendant 48heures.

b. Le sorgho :

Le sorgho ou *Sorghum sp* est une plante herbacée annuelle de la famille des Poaceae (Graminées). Originaire d'Afrique, elle est cultivée soit pour ses graines, le sorgho grain, soit comme fourrage, le sorgho fourrager. Le sorgho est la cinquième céréale mondiale, après

le maïs, le riz, le blé et l'orge. La plante du sorgho grain ressemble au maïs. Son appareil racinaire plus profond lui permet de mieux résister à la sécheresse. Le sorgho est une plante pérenne et peut être récolté plusieurs fois par an, cependant il est traité comme une plante annuelle.

c. La menthe :

Les menthes forment un genre *(Mentha)* de plantes herbacées vivaces de la famille des *Lamiacées (Labiées)* comprenant de nombreuses espèces, dont beaucoup sont cultivées comme plantes aromatiques et condimentaires, ornementales ou médicinales.

La menthe se multiplie facilement par marcottage, ou simplement par division de la touffe (en avril). On peut aussi bouturer des tiges, au printemps et en été. Le semis est plus aléatoire et plus long à produire des plants, sans compter qu'un certain nombre de menthes sont des hybrides stériles.

Trois principales variétés de menthe sont cultivées par les membres du GIE « Bollo TAKKU Ligueye » du parc de Hann. Les noms locaux sont : l'ordinaire, la menthe et la saoudienne (Figure 37). Elles seront utilisées pour les tests en microjardinage.

Figure 37: Trois variétés de menthes utilisées sur support polystyrène en hydroponie

d. La Laitue

Les laitues (Figure 38) sont des plantes annuelles de la famille des Astéracées (composées) dont certaines espèces sont cultivées pour leurs feuilles tendres consommées comme salade verte. La laitue fait partie des spéculations utilisées en microjardin car elle est une demande de consommation en apportant de nombreuses fibres permettant de lutter contre les problèmes gastro-intestinaux. La variété utilisée dans ce travail était la *Lactuca sativa L.*

Figure 38: La laitue sur support solide

3. Protocoles de recherches

a. Comparaison, sous serre, de la valeur agronomique de digestats et substrats respectifs

- *Matériel nécessaire :*

- Cent graines de chacune des deux (2) spéculations (maïs, sorgho).
- Gaines : un paquet de cent (dont quatre vingts seront utilisées)
- Sol : Trois brouettes de sol de dune pauvre en nutriment
- Traitements :
  - 1 kg de fiente de poulet pondeuse (Fpp)
  - 1 kg de bouse de vache (BV)
  - 1 l de digestat de bouse de vache (D-BV)
  - 1 l de digestat de fiente de poulet pondeuse (D-Fpp)
  - 1 kg d'engrais NPK (10, 10, 10)

Méthodologie :

Le test s'est déroulé sous la serre du LNRPV avec 2 spéculations (Maïs, Sorgho) semées dans des gaines contenant différents traitements (BV : Bouse de Vache, Fpp : Fiente de Poulets Pondeuses, D-BV : digestat bouse de vache, D-Fpp : digestat fiente de poulets pondeuses, BV/Fpp, D-BV/D-Fpp, témoin négatif et témoin NPK) et cinq répétitions par traitement. Pour les substrats (BV et Fpp) et le NPK, la dose a été calculée à partir des données recommandées (15 t/ha pour la matière organique et 150 kg/ha de la formule 15/10/30 céréales pour le NPK). Le NPK et la matière organique ont été appliqués en engrais de fond (3 jours avant semis) et les digestats ont été appliqués deux fois ; première application 10 jours après semis et deuxième application a eu lieu deux semaines après la première application. A chaque application, nous apportons 40ml de solution de digestat à 0,6 % de MS par gaine.

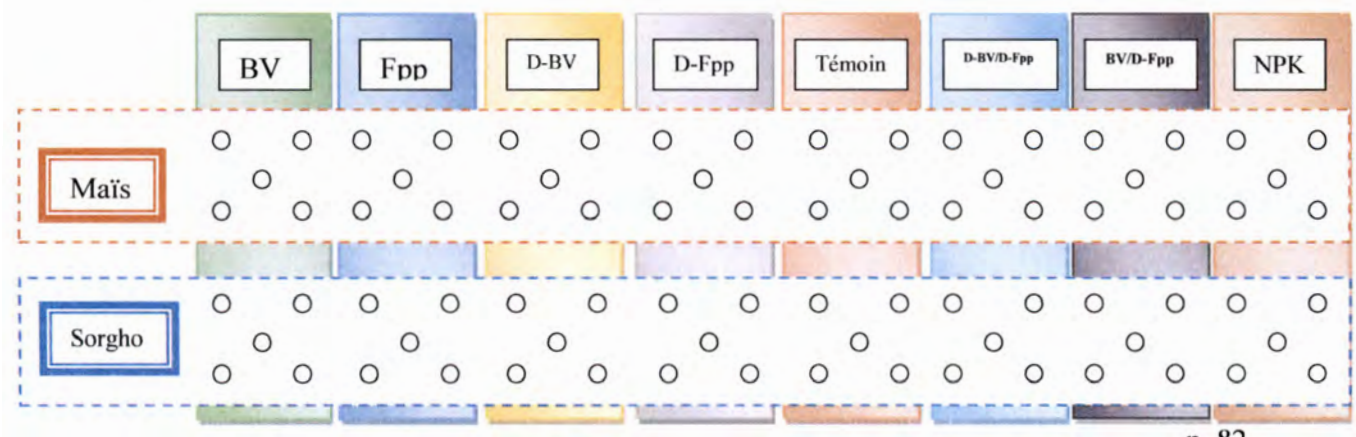
Paramètres mesurés :

La valeur agronomique des digestats a été mesurée à travers plusieurs paramètres tels que la longueur de la tige, le nombre de feuilles, le diamètre au collet et les poids frais et secs des parties aériennes et racinaires des plantes.

Les premières mesures, concernant les paramètres longueur de la tige et nombre de feuilles, ont été prises deux semaines après semis. Cinq (5) mesures ont été prises au total pour ces deux paramètres à intervalle de deux semaines/mesure. Le diamètre au collet a été pris lors de la quatrième et cinquième mesure. Nous avons récolté après la cinquième et déterminé les poids de matières fraiches aérienne et racinaire. Ensuite les deux parties de la plante ont été mises à l'étuve 45 ° C pendant 72h pour la détermination de la matière sèche.

NB : Le pH des digestats ont été ajustés à 7 avant application.

Dispositif sous serre :



b. *Détermination de la valeur agronomique de digestats en microjardinage*

Matériel physique

Pour préparer l'expérimentation nous avons besoin des matériaux de confection de tables à savoir :

- Le bois
- Les punaises
- Des marteaux
- De la toile
- Des drains
- Du polystyrène,
- Un matelas de 2 cm d'épaisseur
- Un rouleau de moustiquaire pour la protection contre les insectes,
- Un marqueur,
- Un registre pour les activités de l'expérimentation sur le terrain,
- Des substrats c'est-à-dire la coque d'arachide, la balle de riz et les grains de latérite

Matériel biologique (digestats liquides)

Trois types de digestats liquides (DLs) seront utilisés pour les tests de microjardinage. Ce sont les digestats : des macroalgues de la baie de Hann Bel-air ; de la bouse de vache et des restes alimentaires. Les digestats seront produits selon des conditions contrôlées décrites ci-dessus.

Méthodologie

Confection et construction de table pour microjardinage : La confection de ce type de table est détaillée dans le nouveau manuel : « *Manual du Microjardinage au Sénégal de la FAO* ». Quelques phases sont résumées dans ce mémoire (Figure 39).

En suivant les indications données dans le manuel, 24 tables de la même structure que celle de la figure ci-dessous ont été réalisées avec le personnel d'appui technique du *GIE « Bollo TAKKU Ligueye »*.

Figure 39: Table confectionnée avec substrat solide (source FAO)

Culture en hydroponie (cas de la menthe) : Le substrat liquide est composé d'eau potable. Le bac plastifié est rempli jusqu'à 2 cm du bord supérieur pour poser la feuille de polystyrène portant des trous de 25/27 mm de diamètre. Cette feuille de polystyrène sert de support aux plantes cultivées.

Le matelas est ensuite coupé en cubes d'éponge de 3cm fendus aux ¾.

On nettoie les racines de la plantule extraite du substrat solide de post-pépinière avant de l'insérer dans la fente du cube d'éponge trempé. Le tout est introduit dans le trou du polystyrène flottant sur le bac rempli d'eau.

Culture sur substrat solide (cas de la laitue) : Le substrat solide est la matière sur laquelle on effectue le semis direct, la pépinière ou le repiquage des plantules. Le substrat solide est composé de trois(3) éléments : la balle de riz, la coque d'arachide et la latérite. Les proportions des mélanges sont 20% balle de riz, 60% coque d'arachide et 20% latérite. La balle de riz et la coque d'arachide sont nettoyées dans une bassine d'eau avant le mélange, la latérite est concassée et tamisée (taille de la graine de baobab).

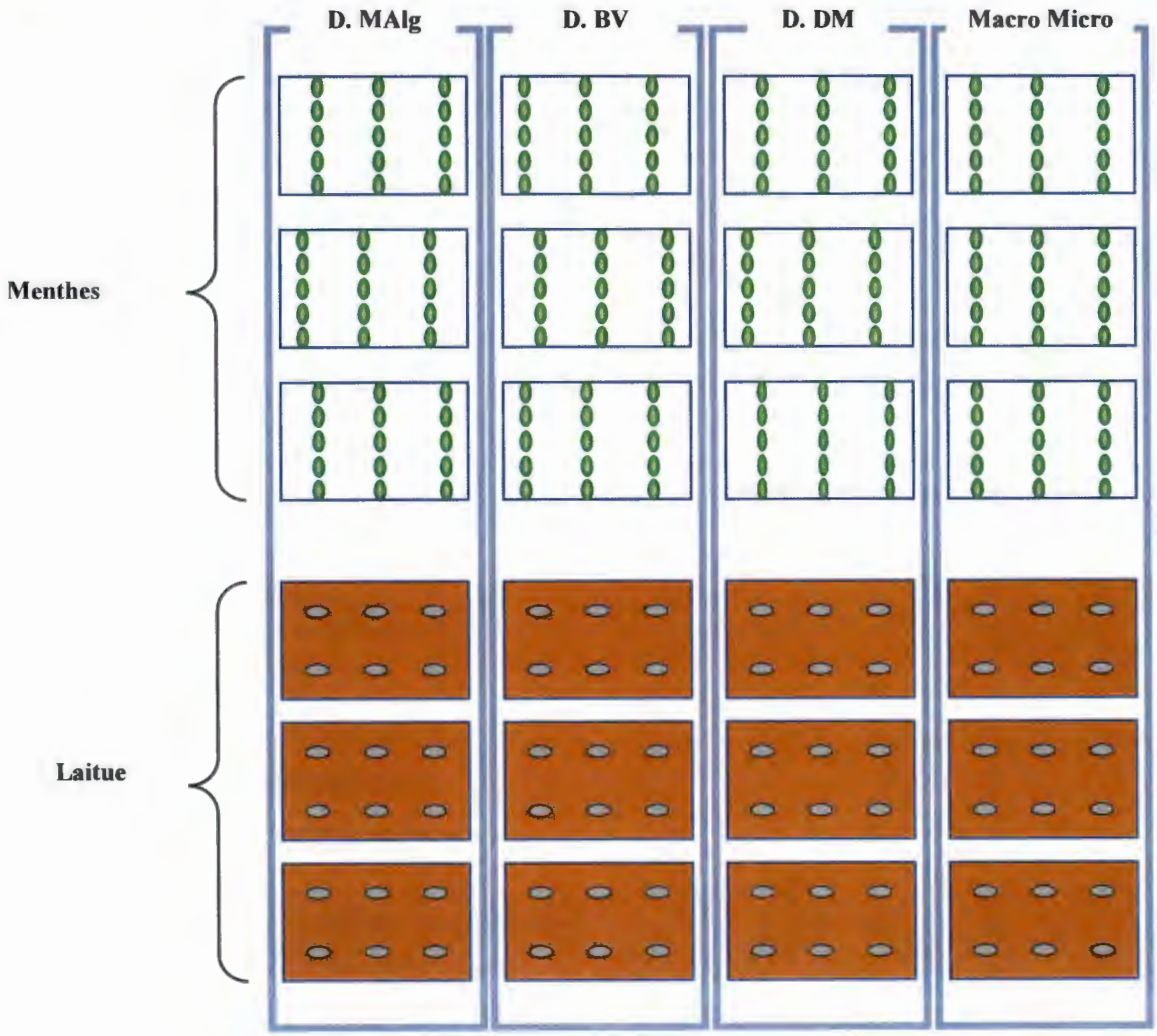
Ces trois éléments bien mélangés et humidifiés constituent le substrat solide avec lequel on remplit le bac jusqu'à ce qu'il soit plein à ras. On nivelle la surface avec la binette ou la paume de la main. On arrose copieusement le substrat en commençant par le côté opposé au drain. On laisser ressuyer le tas pendant 24 heures avant utilisation. On trace les sillons à l'aide d'une binette. On prélève la plantule de la pépinière ou de la post-pépinière sur substrat

solide à l'aide de la binette ; on tient les feuilles et on enterre les racines nues jusqu'au niveau des premières feuilles (cotylédons).

Protocole d'arrosage et d'apport de fertilisant : Chaque table de 0,5 m^2 doit être arrosée avec un volume de 1l de solution 2 fois/jour pour 6 jours sur 7. Le matin, l'eau est enrichie avec la solution de digestats. Dans l'après-midi la solution d'arrosage est faite d'eau claire.

Le septième jour chaque table doit être arrosée avec 3 l d'eau claire pour lessiver les sels accumulés pendant les jours de fertilisation.

- *Dispositif expérimental*[1]



D. : Digestat ; MAlg : macroalgues ; BV : Bouse de vache ; DM : Déchets ménagers

[1] Bordure : 10 à 15 cm, Ecart : 40 cm, 6 plants/ ½ m^2 (FAO, 2010)

Paramètres mesurés

Pour mesurer les effets des différents entrants utilisés sur la croissance des plantes, les paramètres suivants seront mesurés :

Paramètres physiques

- Hauteur des plants (chaque semaine)
- Nombre de feuilles / plants (chaque 10 jours)
- Diamètre au collet (fin expérimentation)
- Une image en vue aérienne d'une table par traitement et 1 fois par semaine.

Paramètres physiologiques

- Poids frais (fin expérimentation) : partie aérienne et partie racinaire
- Poids sec (fin expérimentation) : partie aérienne et partie racinaire

Chronogramme des activités au parc de Hann.

L'expérimentation a débuté le lundi 18 mars 2013 :

- Nous avons effectué d'abord des pépinières de laitue.
- Puis confectionné des tables les deux jours qui suivent.
- ensuite préparé des post-pépinières de menthe sur le substrat liquide sur deux ou trois tables le 01 avril 2013
- le mardi 23 avril, nous avons repiqué la laitue et la menthe : 6 pieds par table pour la laitue ; 15 pieds par table dont 5 pieds par variété pour la menthe.
- A partir du mercredi 24 avril 2013 nous avons débuté les tests de croissance avec les différentes solutions en suivant le protocole décrit plus haut.
- Nous avons récolté le 08 juin 2013 et noté le poids frais des plants
- 10 et 11 juin 2013 puis nous avons mis les échantillons dans l'étuve à 35° C pendant 72h pour le séchage.
- Après séchage, le poids sec des deux parties des plantes ont été mesurés

4. Analyses statistiques

Afin de voir des différences significatives entre les traitements, des analyses de la variance (ANOVA) ont été effectué à l'aide du logiciel statistique XLSTAT en appliquant un seuil de signification (risque d'erreur) de 5 %.

CHAP. III : CARACTERISATION BIOCHIMIQUE ET DETERMINATION DU POTENTIEL METHANE DE SUBSTRATS ORGANIQUES

INTRODUCTION

Plusieurs types de matière organique peuvent être potentiellement utilisés pour la production de biogaz, vraisemblablement beaucoup plus que les substrats comme les déjections humaines ou animales (la bouse de vaches ou chevaux) généralement utilisés au Sénégal.

Ainsi d'autres substrats ont été utilisés à travers le monde pour la production de biogaz. C'est le cas de :

- Déchets alimentaires provenant des restes alimentaires ou des industries alimentaires.
- Déchets issus de trappes à graisse,
- Le saule, biomasse et algues,
- Céréales et résidus de cultures,
- Etc…

La production de biogaz à partir de ces substrats est un processus microbien complexe et qui est le résultat de la décomposition d'une partie de la matière sèche laquelle varie en fonction des types de matière organique et de son origine. Certaines matières sont plus appropriées que d'autres, aussi bien en termes de quantité (volume) que de qualité (teneur en CH_4). Cette production dépend donc de plusieurs paramètres biochimiques intrinsèques à la matière organique comme :

- la teneur en carbone et en azote (et donc de la valeur du ratio C/N),
- la teneur en graisse, en carbohydrate et protéine ; généralement le biogaz formé est plus important et de meilleure qualité pour la méthanisation des graisses, suivi des protéines (qualité).
- La teneur en matière volatile sèche, qui correspond à la fraction de la matière sèche transformée en biogaz.

La connaissance de certains paramètres biochimiques permet de prédire la production de biogaz à partir d'un substrat donné. Ainsi l'objectif des deux sous-chapitres du Chapitre II était de faire la caractérisation biochimique et de déterminer le potentiel méthane de quelques

substrats organiques considérés comme déchets et produits en grande quantité à partir de processus biologique naturel ou issus d'activités humaines.

La biodégradabilité anaérobie de pratiquement tout substrat organique peut être déterminée en utilisant une série de tests, tel que le test BMP « Biochimical Methane Potential », qui donne la quantité maximale de production de biogaz à partir d'un substrat en présence des communautés microbiennes actives. Un autre test, tel que la digestion dans les réacteurs en mode fed-batchs peut être utilisé pour comparer la vitesse de biodégradabilité des substrats, le pouvoir d'attaque des substrats par les microorganismes méthanogènes. En outre, la composition physico-chimique de la matière organique peut être évaluée en utilisant Van Soest fractionnement pour quantifier les concentrations de l'hémicellulose, la cellulose et la lignine. Ces analyses ainsi que la détermination de la teneur en matière organique et le rapport carbone / azote (C/N) sont couramment utilisés pour prédire le comportement des substrats au cours de la digestion anaérobie (Torrijos, et al., 2008) and (Vanegas & Bartlett, 2013).

Etant donnée la position géographique du pays et l'importance que la pêche occupe au Sénégal, le premier sous-chapitre est axé sur la caractérisation de substrat d'origine marine comme les macroalgues de la baie de Hann. Ces substrats ont été comparés à la bouse de vache et tourteau de *Jatropha curcas*. Le second chapitre étudie le potentiel de déchets (fientes) issus d'activité avicole qui constitue une des principales activités de la zone périurbaine de Dakar. Les fientes caractérisées d'un point de vue biochimique ont été comparé à d'autres déchets tels les restes de cuisine et la bouse de vache comme référence.

CHAP. III.1 : CARACTERISATION ET COMPARAISON DE POTENTIEL METHANE DE DEUX MACROALGUES VERTES (*ULVA LACTUCA* ET *CODIUM TOMENTOSUM*) ET D'AUTRES SUBSTRATS ORGANIQUES DISPONIBLES AU SENEGAL

Les résultats de ce sous-chapitre III.1 ont fait l'objet d'un article scientifique titré :

"High methane potential of two green macroalgae (*Ulva lactuca* and *Codium tomentosum*) as compared to inland feedstocks available in Senegal"

MAIGUIZO-DIAGNE H., NDIAYE N. A., NDIAYE-CISSE M. F., NDOUR-BADIANE Y., MASSE D., TORRIJOS M., SOUSBIE P., GAYE M. L., NDOYE I., HAMELIN J., FALL S..

I. Introduction

Comme de nombreux écosystèmes côtiers à travers le monde, les côtes de l'océan Atlantique sont cycliquement envahies par les macroalgues (Morand & Merceron, 2005), qui sont des algues opportunistes des écosystèmes côtiers eutrophes. Une des causes de ce phénomène est le rejet d'eaux usées directement dans l'océan Atlantique, et, plus spécifiquement, la baie de Hann, qui est situé à la sortie du village de Hann Bel-Air, au Sénégal. De grandes quantités de sels dans l'eau de mer peuvent réduire la pollution par les eaux usées, mais l'augmentation des nutriments organiques favorise la prolifération des macroalgues durant la saison froide. Les macroalgues marines vertes de la baie de Hann sont dominées par deux espèces principales: *Ulva lactuca* et *Codium tomentosum*. *Ulva lactuca* est un thalle mince et aplati. *Codium tomentosum* est une algue verte avec d'épais brins tubulaires, de couleur vert-foncé disposés dans les branches. Il a un toucher velouté, un peu comme une éponge. Les deux espèces sont très fréquentes dans le monde entier (Lohmann, 1995). Même si elles sont considérées comme comestibles (Chapman & Chapman, 1980), le fait qu'ils se développent dans les eaux usées limite leur utilisation en tant que source de nourriture ou dans des applications industrielles (Dacy-Vrillon, 1993). Cette biomasse algale pourrie souvent dans la baie de Hann est collectée et traitée comme déchets dans les décharges municipales.

Les procédés de traitement biologique anaérobie pour le recyclage des eaux usées, fumier, résidus agricoles, déchets alimentaires et d'autres types de déchets est appropriée pour les pays en développement. Il implique la dégradation et la stabilisation de complexes matières organiques par un consortium de micro-organismes et une production de biogaz riche en énergie qui peut être utilisé comme énergie renouvelable pouvant substituer les combustibles fossiles (Raposo, Rubia, Fernández-Cegrí, & Borja, 2012). Un mètre cube de biogaz contenant jusqu'à 60% de méthane a un pouvoir calorifique d'environ 6 kWh et est l'équivalent de l'énergie de 0,6 litres de fioul (Moletta, 2011).

Au Sénégal et dans nombreux d'autres pays de l'Afrique subsaharienne (ASS), le fumier d'animaux tels que les vaches et les chevaux est fréquemment utilisé pour produire du biogaz, alors que la nécessité de reconstituer le sol appauvri est en hausse chaque année. En outre, la digestion anaérobie est d'intérêt beaucoup plus grand pour la réduction de composés toxiques (Ruíz et al., 2001) et organismes pathogènes dans les déchets (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015). Par conséquent, la fraction restant après la digestion anaérobie, appelé digestat, peut être utilisée comme engrais pour les sols appauvri.

La culture du *Jatropha curcas* a été proposée en Afrique subsaharienne comme une alternative écologique aux combustibles fossiles. Cependant, le tourteau de Jatropha, qui est le solide restant après extraction de l'huile à partir de graines de Jatropha, contient des substances toxiques (Nafisa, Kurchania, & Swati, 2010), le rendant impropre à une utilisation comme source de fourrage pour les animaux ou pour d'autres fins. En conséquence, les tourteaux de Jatropha ont été proposés comme une matière première alternative pour les installations de biogaz (Nafisa, Kurchania, & Swati, 2010).

De nombreuses études ont été menées pour évaluer la réelle faisabilité et la viabilité de l'utilisation de la biomasse algale (Morand & Merceron, 2005), y compris les espèces marines telles que *Saccorhiza polyschides* (Singh, Nigam, & Murphy, 2011), *Ulva sp. Laminaria digitata* (Bastianoni, et al., 2008), *Fucus serratus* (Jard, et al., 2012) et *Saccharina latissimi* (Vanegas & Bartlett, 2013). Le but de ce présent étude était de déterminer le potentiel de production de biogaz des deux macroalgues vertes (*Ulva lactuca* et *Codium tomentosum*) de la baie de Hann de Dakar-Sénégal.

Ces macroalgues, récoltées au Sénégal, n'ont jamais été étudiées en tant que substrat pour la digestion anaérobie. Le potentiel de production de biogaz des deux macroalgues a été comparé à celui de la bouse de vache et du tourteau de *Jatropha curcas*, qui pourrait être produit en grandes quantités au Sénégal.

II. Matériel et méthode :

Pour la description du matériel et méthode de ce chapitre se référer aux pages 68 du chapitre II, Matériels et méthodes.

III. Résultats

1. Détermination de la matière sèche (MS), matière volatile (MV)

La composition organique a été déterminée pour les macroalgues (MAlg), les bouses de vaches (Cwd) et les tourteaux de *Jatropha curcas* (Jcc). Les résultats obtenus montraient que la matière sèche (Tableau 8) dans les macroalgues était significativement ($p < 0,0001$) plus élevée (851,4 g MS / kg) par rapport respectivement, à celles de la bouse de vache et du tourteau de Jatropha (742,4 et 797,4 g MS / kg,). Plus intéressant encore, la matière volatile

des macroalgues était de 499,8 g MV / kg et environ deux fois plus importante que celle de la bouse de vache (251,3 g MV / kg), qui est habituellement utilisé pour la digestion anaérobie. Toutefois, la matière volatile et le rapport MV / MS (Tableau 8) étaient plus élevés avec les tourteaux de *Jatropha curcas* (respectivement 699,9 g MV / kg et 87,7), suivi des macroalgues (respectivement, 499.8 g MV / kg et 58,7). Les valeurs les plus faibles étaient obtenues avec les bouses de vaches (respectivement 251,3 g MV / kg et 33,8).

Tableau 8 : Quelques caractérisations physico-chimiques des substrats organiques étudiés

	Composition organique				Fractionnement Van Soest		Lipides
	Matière Solide g MS/kg	Matière Volatile g MV/kg	Minéral g/kg MS	MV/MS (%)	fraction Cellulosique g/kg MS	Lignine g/kg MS	g/kg MS
MAlg	851.4±6.4	499.8±4.4	109.6±1.0	58.70	428.3±8.7	206.5±1.5	25.1±0.8
Cwd	742.4±2.2	251.3±7.9	357.5±6.3	33.85	254.2±6.3	243.5±3.9	2.3±1.5
Jcc	797.5±5.8	699.9±8.8	24.8±4.8	87.78	113.5±6.1	339.2±2.5	8.21±1.7

La composition minérale (Tableau 8) a été significativement ($p < 0,0001$) plus élevée pour la bouse de vache (357,5 g / kg MS) par rapport aux macroalgues (109,6 g / kg MS) et au tourteau de Jatropha (24,8 g / kg MS). Tous les substrats étudiés dans ce travail étaient assez secs et les taux de matière sèche contenus étaient au-dessus de 740 g MS / kg.

D'autre part, la teneur en lipides (25,1 g / kg MS) est dix fois plus élevé dans les macroalgues que dans la bouse de vache (2,3 g / kg MS) et environ trois fois plus élevée (8,2 g / kg MS) dans les tourteaux de Jatropha. Les différences dans les lipides étaient moins, mais sont restés significatifs ($p < 0,0106$). Des valeurs élevées en lipides (25,8 g / kg MS) et une forte proportion en fractions cellulosiques confèrent aux macroalgues une place privilégiée en tant que substrat source de biogaz.

La concentration en cellulose déterminée par Van Soest fractionnement (Tableau 8) présentent des valeurs significativement ($p < 0,0001$) plus élevé (428,3 g / kg MS) dans les macroalgues que dans les tourteaux de Jatropha (254,2 g / kg MS) ou la bouse de vache (113,5 g / kg MS).

2. Composition biochimique des substrats étudiés.

La composition biochimique des substrats a été déterminée pour mieux caractériser les substrats étudiés. Le carbone, l'azote et le phosphore total contenu des macroalgues étaient respectivement 115,1 g C / kg TS, 13,3 g de N / kg TS et 48,1 g de P / kg TS, (Tableau 9). Toutefois, les teneurs en carbone et en phosphore (401,6 g C / kg TS et 15,70 g de P / kg TS), dans les tourteaux de *Jatropha curcas* étaient les plus élevées, mais sa teneur en azote était la plus faible (12,9 g N / kg TS). Les teneurs en carbone et d'azote dans le fumier de vache étaient intermédiaires (respectivement, 253.7g C / kg TS et 12,9 g N / kg TS).

Le plus faible ratio C/N dans les microalgues était d'environ 8,7 ; par rapport à respectivement 19,7 et 32,4 pour la bouse de vache et les tourteaux de *Jatropha curcas*. La digestion anaérobie est sensible au rapport C/N.

Tableau 9 : Composition biochimique des substrats organiques étudiés en g / kg MS.

	C	N	C/N	P	Ca	Mg	K	Na
MAlg	115.1	13.3	8.7	4.8	17.5	15.0	12.3	35.3
Cwd	253.7	12.9	19.7	6.4	18.7	3.9	2.2	1.6
Jcc	401.6	12.4	32.4	15.7	ND	ND	3.8	2.1

C : Carbone ; N : Azote ; P : Phosphore ; Ca : Calcium ; Mg : magnesium ; K : Potassium; Na : Sodium

La teneur en sel (Mg^+, K^+ et Na^+) est au moins trois fois plus grande dans les macroalgues que dans les autres substrats testés. Les macroalgues contenaient une teneur plus élevée en Na^+ que les substrats étudiés (Bouse de vache et tourteau de *Jatropha curcas*).

3. Détermination du pouvoir énergétique des substrats

a. Les tests BMP :

Les BMP des trois substrats ont été suivi pour une deux mois (Figure 40). La production cumulée de CH_4était plus élevée pour les macroalgues que pour la bouse de vache et les tourteaux de *Jatropha curcas*. Le volume de méthane cumulé a atteint environ 216,4 L CH_4 /

kg MS pour les macroalgues alors que le volume était inférieure à 135 L de CH_4 / kg MS pour les autres substrats.

La composition du biogaz[2] contenait plus de 50% de méthane (Figure 41) et moins de 30% de dioxyde de carbone pour les trois substrats testés. En particulier, la composition de production de biogaz des macroalgues étaient riche à plus de 62% en méthane.

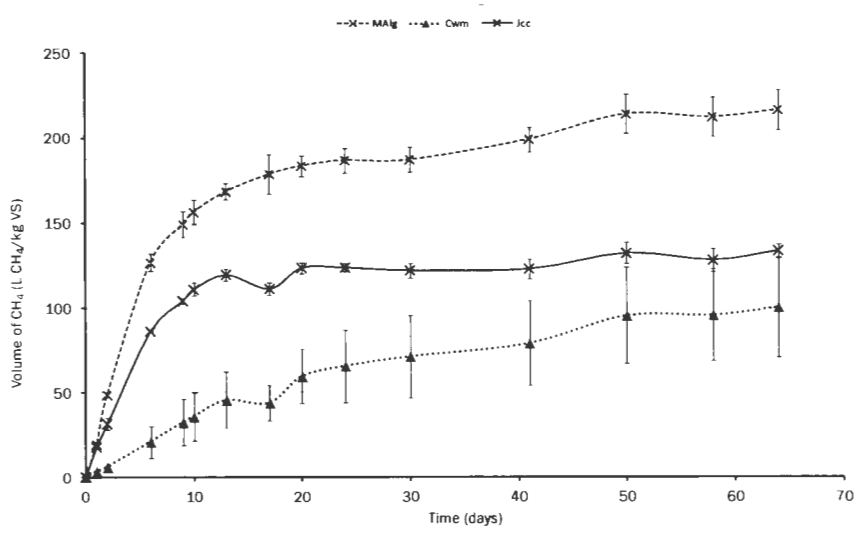


Figure 40 : Production cumulative de méthane (CH_4) des trois substrats étudiés

Macroalgues (MAlg); Tourteaux de Jatropha (Jcc); Bouse de vache (Cwd).

[2] Les autres gaz (O_2 et H_2S) sont presque nuls dans les biogaz captés. L'azote (N_2) n'a pas été pris en compte, il a été utilisé comme gaz porteur pour chasser l'air dans les dispositifs BMP.

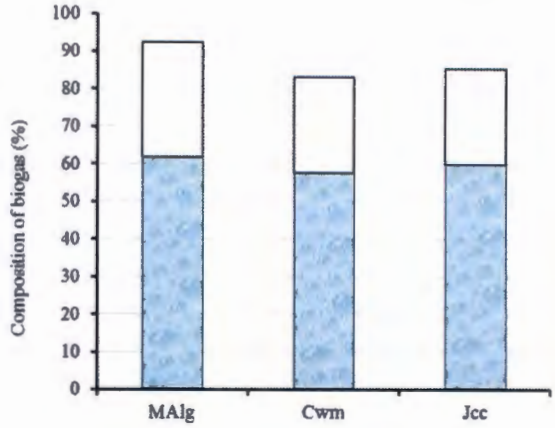


Figure 41 : Composition de biogaz (%) des trois substrats

Le méthane (CH4) = partie colorée ; Le dioxyde de carbone (CO2)= partie blanche.

Pour connaitre la production énergétique des substrats étudiés, leur pouvoir calorifique a été calculé à partir des potentiels méthanes (Tableau 10). Le pouvoir calorifique des macroalgues (2151 kWh/t) était plus élevé que pour le tourteau de *Jatropha curcas* (1328 kWh/t). Il l'était encore plus pour la bouse de vache (997 kWh/t).

Tableau 10 : Valeur énergétique des substrats organiques étudiés

	Potentiel Méthane (L CH_4/kg MV)	Pouvoir calorifique (kWh/t)
MAlg	216.4±12.0	2151
Cwm	100.3±29.5	997
Jcc	133.6±04.1	1328

b. Biodégradation des substrats en réacteur en batchs

Dans le but d'étudier la biodégradabilité des trois substrats, la vitesse de dégradation a été suivie en fonction du temps pour différentes doses de substrats injectés (macroalgues, bouse de vache, et tourteau de *Jatropha curcas*).

Ces courbes (Figure 42) représentent le cumul du volume de biogaz produit suite à l'ajout d'une quantité connue (0,5 à 1 g/litre) de substrat dans un réacteur en batchs de 6 l.

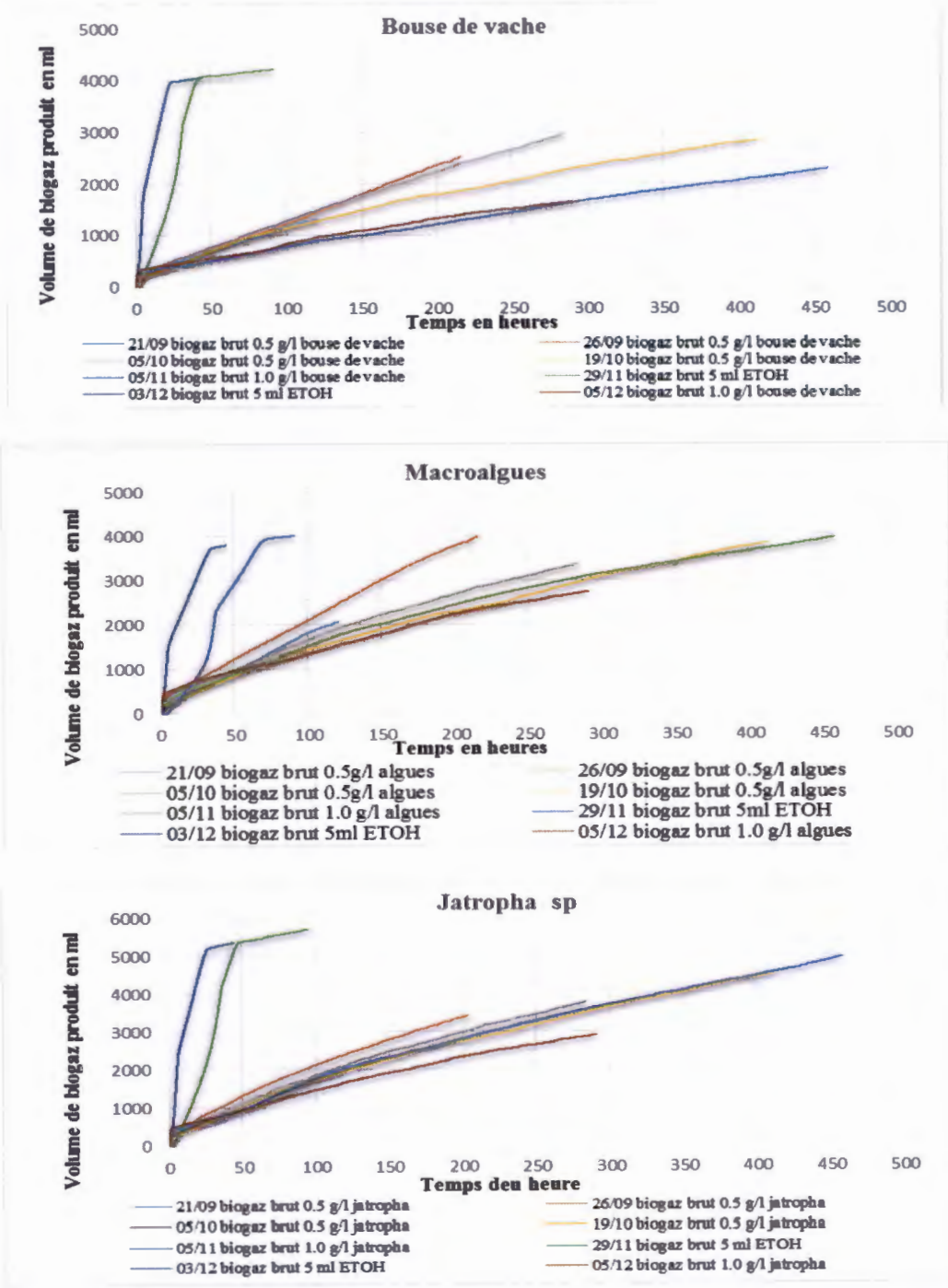


Figure 42: Comparaison de la dégradabilité des substrats à celle de l'éthanol dans des réacteurs en batchs

Nous avons testé chaque réacteur avec deux injections d'éthanol, et la vitesse de dégradabilité de chaque substrat sera comparée à celle de l'éthanol du même réacteur. Les mesures prises

par l'ordinateur en ligne, prennent en compte les erreurs qui sont liées à chaque digesteur, au milligaz-counter qui lui est relié et à l'activité des microorganismes dans l'inoculum.

Les résultats de l'étude en réacteur batchs de petites quantités (0,5 et 1g) de substrats permettent de tirer plusieurs remarques :

- Dans les trois réacteurs, la vitesse de digestion de l'éthanol pur était supérieure à celle des substrats.
- La première injection d'éthanol dans les trois réacteurs, était digérée beaucoup plus lentement que la seconde.
- Les dernières injections de substrats ont été digérées plus rapidement que les premières
- En comparant les trois courbes on remarque qu'à l'instant T = 100 h, la digestion des macroalgues est la plus rapide suivi de celle des tourteaux puis de la bouse de vache.

CHAP. III.2 : ETUDE DE POTENTIALITES ENERGETIQUES DE QUELQUES SUBSTRATS COLLECTES A SANGALKAM AU SENEGAL

Avant propos:

Dans cette partie nous nous sommes fixés comme objectifs dans un premier temps, de recenser les principaux substrats organiques méthanisables dans la communauté rurale de Sangalkam, et dans un second temps de déterminer leurs caractérisations physico-chimiques et leur potentiel méthane. Leurs caractéristiques ont été comparées et les meilleurs substrats vont subir la suite des études. Parallèlement aux enquêtes, nous avons aussi mis au point des prototypes de biodigesteurs expérimentaux qui seront exposés dans ce sous-chapitre.

Quelques résultats de ce sous-chapitre ont fait l'objet d'un article scientifique en rédaction :

MAIGUIZO-DIAGNE, H. ; et al. ; 2016

Anaerobic digestion of substrates from Sangalkam as an alternative to conventional solutions

I. Introduction

La production de biogaz à partir de déchets est un processus qui offre des avantages socio-économiques dans le domaine de l'éclairage, de cuisson..., mais aussi des bioengrais pour les cultures de rente et les cultures vivrières. Il est donc à envisager d'inclure la production de biogaz dans un système intégré qui vise à la production facile de bioengrais et d'énergie. Cette technologie est particulière car, elle s'adapte bien en zone rurale et périurbaine.

Différentes études ont été réalisées sur le potentiel de production de biogaz de différentes matières organiques telles que, les résidus agricoles, les fientes de volailles (M'Sadak & Ben M'Barek, 2013). Cependant, au Sénégal, quelques rares études se sont intéressées aux déchets d'abattoir (cas de TECHOGAS-Dakar) et au vue de la très grande diversité des substrats, les meilleures combinaisons entre substrats en co-digestion demeurent encore un challenge.

Cette partie de ce travail s'inscrivait donc dans le contexte d'un projet financé par le ministère de l'enseignement supérieur de la recherche et dont l'objectif principal était, la production d'une énergie renouvelable et accessible aux populations périurbaines par un processus de méthanisation à partir de divers résidus et déchets. Il est basé sur la mise en place d'un système intégré de recyclage et de valorisation de déchets dans la zone périurbaine de Dakar (Sangalkam). Il vise entre autre à impliquer les jeunes agriculteurs ainsi que les autorités locales dans le système de recyclage. Grâce à la disponibilité de déchets organiques et à sa valorisation, le projet contribuera à améliorer les besoins essentiels d'une couche de la population les plus vulnérables (femmes, jeunes agriculteurs...) notamment en leur fournissant de l'énergie et des biofertilisants.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont donc contribué à l'atteinte des objectifs du projet à travers les deux premiers objectifs spécifiques que sont :1) l'évaluation des pools de résidus et déchets organiques disponibles dans un site de démonstration d'une agriculture intégrée et 2) Evaluer les rendements énergétiques des résidus et déchets organiques dans nos prototypes de digesteurs en milieu réel (site de Sangalkam).

Ce sous-chapitre du chapitre III comportera l'estimation qualitative et quantitative des substrats dans les environs de Sangalkam, leur caractérisation biochimique et leur potentiel méthane. Enfin, nous allons aussi aborder la mise au point des prototypes expérimentaux de digesteurs de laboratoire.

II. Matériels et méthodes

Les matériels et méthodologies utilisés dans ce sous chapitre ont été décrite dans le chapitre II (p. 58, 63, 70) de ce document.

III. Résultats

1. Estimation qualitative et quantitative des substrats en zone périurbaine de Dakar

Pour déterminer la production domestique de substrats ou déchets organiques méthanisables de la zone d'étude, des enquêtes ont été menées au niveau des villages de Sangalkam, Gorom II et Bayakh. A Sangalkam, les enquêtes ont concerné surtout les exploitations artisanale et industrielle, alors qu'à Gorom et Bayakh les enquêtes ont concerné la production de déchet organique des foyers.

a. *Production semi-industrielle de composés organiques méthanisables*

Dans la localité de Sangalkam et environnement proche, les quantités de substrats variaient entre 150 Kg/mois (ferme avicole3) et 56 tonnes/mois (ferme de Wayembam). Les fermes de Sédima et Niakoulrab avaient des productions aussi importantes de 28 tonnes /mois. A Ndiakhiratt, la production était d'environ 17 tonnes /mois (Cf. Tableau 11).

Au total, une moyenne de 22,5 tonnes /mois et une production totale de 135 tonnes /mois. Par type de substrat, la production de bouse de vache représentée un total de 84 tonnes / mois contre 51 tonnes /mois pour les fientes de volailles. Les intérêts exprimés pour la transformation du stock de matière organique en biogaz étaient surtout pour la cuisson et l'éclairage pour Sangalkam, alors que dans les fermes bovines, les intérêts étaient plutôt tournés vers la transformation du biogaz en électricité.

Tableau 11 : Résultats d'enquêtes sur Sangalkam et alentours (gros producteurs de déchets)

Localités	Nom ou structure	Types de substrats	Fréquence de ramassage	Intérêt
Sangalkam	Ferme avicole1	FV Copeaux et sciures de bois	~1,5 t/mois	Cuisson/éclairage
Sangalkam	Ferme avicole2	FV	~4,35 t/mois	Cuisson/éclairage
Sangalkam	Ferme avicole3	FV Copeau et sciures de bois	~150 kg/mois	Cuisson/éclairage
Ndiakhiratt	Ferme avicole4	FV Balle de riz	~17 t/mois	Cuisson/éclairage
Sangalkam	SEDIMA	FV (sans litière)	~28 t/mois	Electricité/chauffage
Niakoulrab	Ferme	BV	~28 t/mois	Electricité
Wayembam	Ferme	BV	~56 t/mois	Electricité

FV : Fientes de Volaille, BV : Bouse de Vache

b. *Production domestique de déchets méthanisables*

A Bayakh, les participantes à l'enquête étaient organisés en association (Groupement « Jubalu Jarinu ») ce qui facilite la collecte et partage de l'information. L'échantillon était composé à 90% de femmes et 10% d'homme. A Gorom, le nombre de foyers enquêtés était de 5 dont 1 seule a données des résultats exploitables. A Sangalkam, l'enquête s'était faite sur 10 foyers aussi.

Les résultats (

Tableau **12)** montrent que :

- A Bayakh, les quantités de déchets organiques méthanisables produites varient en moyenne entre 3 et 54 kg/jour.
- Dans la zone de Gorom, par contre la production variaient entre 3 et 12 Kg/jour.
- La moyenne de la production des ménages était de ~15 Kg/jour ce qui sensiblement identique à la production moyenne (16 Kg/jour), alors que la restauration pouvait produire jusqu'à 50Kg/jour

Les deux zones, l'utilisation du biogaz comme combustible pour la cuisson est la principale application.

Tableau 12 : Résultats d'enquêtes à Sangalkam et environs (producteurs domestiques)

Localité	Enquêté	Profession de l'enquêté	Application	Type de déchets	Quantité (Kg/jour)	Moyenne /Localité (Kg/jour)
Bayakh	F	Ménagère	Cuisson	DM/Rt	9,94	16,09
	F	Commerçante	Cuisson	DM/Rt/B/Ag	17,50	
	F	Ménagère	Cuisson	DM/Rt/B/Ag	12,25	
	F	Ménagère	Cuisson	DM/Rt	14,13	
	F	Restauratrice	Cuisson	DM/Rt/B/Ag	54,13	
	F	Ménagère	Cuisson	DM/Rt/B/Ag	12,38	
	F	Ménagère	Cuisson	DM/Rt	14,19	
	M	Non-Déterminer	Cuisson	DM/Rt	4,50	
	F	Ménagère	Cuisson	DM/Rt	13,56	
	F	Ménagère	Cuisson	DM/Rt	8,30	
Gorom	M	Eleveur	Cuisson - Eclairage	DM	3,43	
				B	12,27	

F : Féminin, M : Masculin, DM : Déchet Ménager, Rt : Reste de cuisine, Ag : Résidu Agricole, B : Bouse d'animaux

2. Caractérisation biochimique de substrats représentatifs de Sangalkam

Suite à l'enquêtes menait à Sangalkam, les substrats les plus représentatifs (Fientes de volaille, Bouse de vache et Reste alimentaires) ont été caractérisé d'un point de vue biochimique. Les résultats (Tableau 13) montrent que les fientes étaient le plus riches en composés organiques méthanisables avec 35.5 % de cendre, suivi de la bouse de vache avec 23.75% de cendre et enfin les restes alimentaires avec 7.8% de cendre.

Tableau 13: Caractéristique biochimique des principaux substrats méthanisables à Sangalkam

	Cendre	C	N	C/N	P total	Ca	Mg	K	Na
	%	%	%		g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
Fiente de volaille	35,5	27,21	2,60	10,5	15,67	23,90	6,12	19,49	3,19
Bouse de vache	23,75	36,63	1,37	26,7	5,11	10,66	3,75	8,83	2,83
Reste Alimentaire	7,8	42,69	2,04	30,9	3,92	5,46	0,92	9,81	9,15

N : azote ; C : carbone ; P : phosphore ; Ca : calcium ; Mg : magnésium ; K : potassium ; Na : sodium

La teneur en Carbone (C en %) des trois substrats était relativement proches dans fientes et la bouse de vache, les tandis que la teneur en azote (N en %) était proche entre fiente et reste alimentaire et plus faible dans les bouses de vaches. Par conséquent, le C/N était proche de 10 pour les fientes et supérieur à 25 pour les deux autres substrats.

Pour les autres éléments mesurés (Phosphore total, Calcium, Magnésium, Potassium et Sodium), les fientes montraient des taux les plus élevés à l'exception du sodium Na. Ce dernier était plus présent dans les restes alimentaires.

3. Production de Biogaz à partir de substrats représentatifs de Sangalkam

Les caractéristiques biochimiques ont été complétées par les mesures de potentiel de biogaz qui ont été réalisées pour la bouse de vache et les fientes (notamment fientes de poule pondeuse, Fpp). Le potentiel des restes alimentaires n'avait pas était mesuré (dénaturation de l'échantillon). Les résultats montraient (Figure 43) que le volume total de biogaz était plus important pour une moyenne 364 ml/j pour les bouses de vache (BV) contre 211 ml/j pour les fientes.

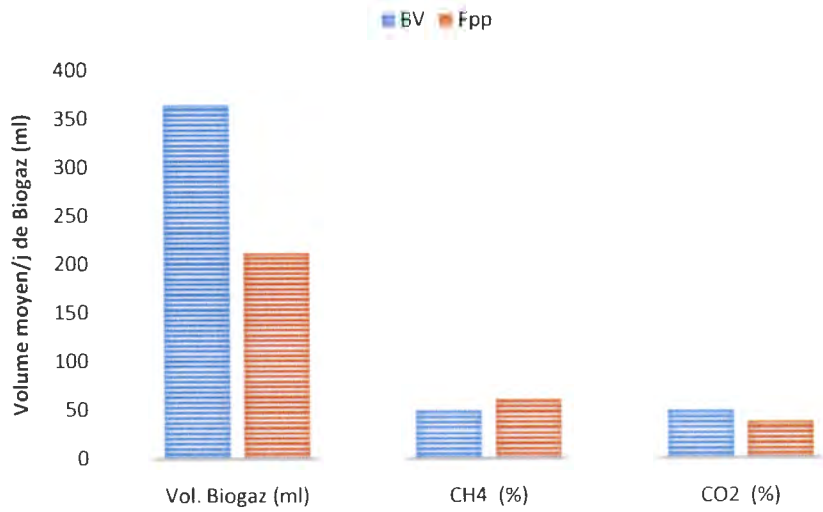


Figure 43: Biogaz et méthane(%) produits par les fientes de poulets pondeuses

Les gaz recueillis à la fin de l'incubation a permis de mesurer la qualité des gaz. Ainsi l'analyse en micro-CPG des gaz montrait malgré que la production de biogaz fût plus importante les BV, la qualité du biogaz de ce dernier sensiblement meilleure avec les fientes.

En effet, le biogaz dans les fientes était composé de plus de 60% de méthane (CH_4), alors que le biogaz issu de la bouse des BV était seulement composé d'environ 50% de méthane. La proportion de CO_2 était respectivement de 37% et 48% dans les fientes de poule pondeuse et Bouse de vache. Dans ces analyses les micro-CPG n'avait pas permis de détecter les traces d'autres gaz comme l'oxygène, l'azote ou sulfure d'hydrogène (H_2S).

4. Mise au point et fabrication de prototype de biodigesteurs

L'objectif était de mettre au point des mini-digesteurs expérimentaux de laboratoire de petite taille (0,5 l et 10 litres) et qui reproduisait en gros les propriétés de la technologie des réacteurs en batchs.

Le mini-biodigesteur de 500 ml nous permettait d'estimer la production de chaleur de différents substrats. Cependant, pour des raisons de sécurité et d'efficacité, ce prototype a été remplacé au profit du Biodiambar (Figure 44).

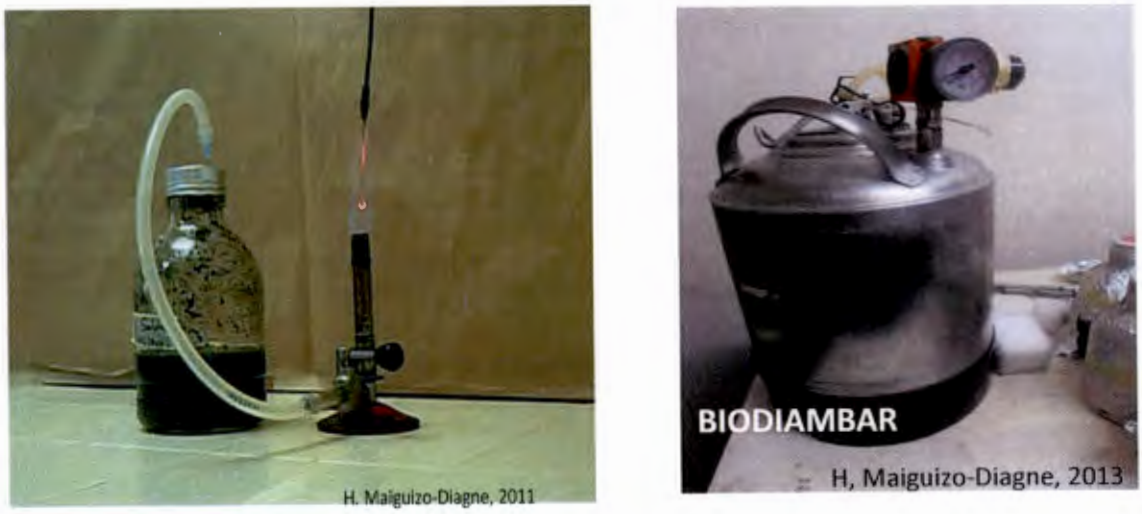


Figure 44: Prototypes de digesteur expérimental : Mini-prototype de 500 ml et le Biodiambar de 10 l

- *Digesteur artisanal expérimental de 10 L « BIODIAMBAR » :*

Il s'agissait d'un biodigesteur expérimental de 10 L fabriqué à partir de matière métallique recyclée. Il a été baptisé BIODIAMBAR et a été conçu à l'image des digesteurs expérimentaux du LBE (premier laboratoire mondial en termes de données scientifiques sur la méthanisation). Le prototype de Biodiambar est en acier inox. Sa paroi interne est tapissée

d'une couche épaisse de col augmentant l'isolement et la conservation de la température interne.

Il est doté d'un nanomètre nous permettant de surveiller la pression du gaz. Le Biodiambar est pourvu de quatre sorties : - une destinée au nanomètre, une de grande taille pour le remplissage en substrats, - une pour la récupération du biogaz produit et - la dernière destinée aux sondes de température ou de pH pour d'éventuelles recherches. Le couvercle central est muni d'un système permettant le mélange manuel du substrat dans le digesteur.

- *Les avantages du Biodiambar* :

- Le Biodiambar, un digesteur expérimental de taille moyenne nous servira de modèle pour la fabrication d'autres digesteurs de taille expérimentale,
- Le Biodiambar peut fonctionner en mode continu ou discontinu.
- Le Biodiambar, nous permet d'effectuer les tests de réacteur en batch et pouvoir programmer les fréquences de remplissage des digesteurs de très grande taille,
- Le Biodiambar, nous permet de faire des tests sur la digestion sèche, c'est-à-dire déterminer la quantité minimale d'eau à utiliser pour chaque type de substrat et ainsi apporter des solutions aux zones sèches désirant produire du biogaz par méthanisation,
- Ce Biodiambar, nous permet aussi de mener des recherches pour la détermination de la meilleure boue d'inoculum, boue nous permettant de raccourcir le temps d'incubation des BMPs.

CHAP. IV : VALEUR AGRONOMIQUE DE DIVERS DIGESTATS

INTRODUCTION

L'amélioration de la fertilité des sols dans les pays en voies de développement comme le Sénégal pourrait déclencher le développement économique au niveau national et réduire la dégradation de l'environnement et la désertification des zones rurales. Par conséquent, cette amélioration de la fertilité pourrait aussi assurer la sécurité alimentaire, améliorer le niveau de vie des populations rurales.

D'après la FAO, les problèmes majeurs de la gestion de la fertilité des sols sont :

- la dégradation des terres et déclin de la fertilité : les sols sont exploités avec très peu d'approches pour restaurer la fertilité,
- les incertitudes climatiques, les changements des cartes climatiques amplifient les incidents liés à la sécheresse et des inondations dans certaines régions.
- l'insécurité foncière constitue un obstacle majeur à la gestion des terres et la conservation, et donc à la sécurité alimentaire.
- le manque de technologies adaptées et d'irrigation.
- la croissance rapide de la population ;
- la pression sur les terres cultivables ;
- l'utilisation faible d'engrais ce qui constitue un obstacle pour la productivité. Les rendements dans plusieurs zones restent faibles.

La fertilité des sols et l'amélioration de la productivité doivent être soutenues par des politiques d'accès aux crédits, l'accès aux marchés et sécurité foncière, mais surtout une recherche développement pour contribuer à la restauration durable des terres dégradées.

Il est généralement admit aujourd'hui que le recyclage du fumier, l'utilisation des résidus de récolte, l'utilisation d'engrais verts et des cultures de couverture; et l'adoption de l'agroforesterie sont des pistes durables pour améliorer la fertilité des sols dégradés et soutenir une agriculture durable.

C'est dans ce contexte qu'après la caractérisation biochimique de quelques substrats organiques représentatifs des zones d'étude, nous avons proposé dans cette partie de travailler sur l'évaluation de la valeur agronomique de ces substrats bruts et leurs digestats.

Les digestats sous forme liquide ont été testées en microjardin (première partie de ce chapitre 4), et en serre sur des cultures de céréales (sorgho et maïs) présenté dans la deuxième partie de ce même chapitre 4.

CHAP. IV.1 : EFFET DES DIFFERENTS TYPES DE DIGESTATS SUR LA CROISSANCE DES PLANTES EN MICROJARDIN.

I. Introduction

La grande ville de Dakar est devenue avec l'augmentation de la population urbaine un très grand centre de consommation de produits maraichers. La consommation est estimée à environ 65 milles tonnes, soit ~40% de la consommation nationale (GAYE & NIANG, 2010). Les productions provenant de la zone des Niayes et de la zone Périurbaine permettent de satisfaire une bonne partie de cette demande urbaine en légumes et les prix des légumes est fortement dépendant des fluctuations de la production. Pour faire face à cette demande de plus en plus importante en légume et incertitude des prix, une production moderne de production de légume dénommé « le microjardin »s'est développé dans Dakar et les grandes villes du Sénégal.

En effet, le microjardin est une technique qui permet la culture hors sol de diverses plantes en milieu urbain, dans de petits espaces extérieurs habituellement non cultivables. Avec l'aide du Programme de Coopération Technique de la FAO (TCP/SEN/8823), le premier centre de formation et de démonstration de la technologie de microjardin a été établi à Dakar en 1999, au Centre pour le Développement de l'Horticulture (CDH) de l'ISRA. Le microjardinage permet aux habitants de la ville de récolter chaque jour des légumes frais pour la consommation de la famille. Il contribue ainsi à une meilleure alimentation, plus saine et plus équilibrée. Par cette pratique de microjardin, il est en effet possible de cultiver une vaste gamme de produits selon la préférence de chacun : des légumes comme la salade, le chou, la tomate et l'oignon, des plantes aromatiques comme la menthe et le basilic. Le microjardin peut constituer également une activité génératrice de revenus pour des femmes qui peuvent écouler les excédents de légumes produits.

Le microjardinage est généralement pratiqué sur système flottant (à l'aide de plaques de polystyrène et de mousses), ou sur substrat solide (coque d'arachide, balle de riz et cailloux). La nutrition minérale des légumes se fait par apport régulier de fertilisation appelé : micro et macro (FAO, 2010). Sa composition chimique révèle que le fertilisant est constitué de plusieurs micronutriments chimiques alors que le microjardin est basé sur un concept d'une agriculture bio et durable. Il se pose aussi un problème d'approvisionnement de ces solutions

micro et macro, car les prix sont élevés et souvent inaccessibles aux ménages à faibles revenus.

D'autre part le processus de production d'énergie par la technique de biogaz, aboutit aussi à la production d'un digestat souvent utilisé comme engrais en agriculture biologique (Bayer, 2004).Le digestat est reconnu non seulement comme un biofertilisant, mais aussi il a la particularité d'être très hydraté avec de la matière organique réduite en microéléments après la phase d'hydrolyse (Cf. Chap. I page 26).

L'objectif de ce travail était de tester l'effet de différents types de bio-digestats sur la croissance des plantes cultivées en microjardin, afin de proposer des solutions de substitutions des macronutriments et micronutriments. Les effets des composts méthanogènes ont été testés sur la laitue (*Lactuca sativa*) et différentes variété de menthes (*Mentha spicata*) les plus couramment utilisés à Dakar, dans un dispositif (Figure 45) mis en place par l'ONG ACRA en association avec la mairie de Dakar et l'Université de Milan (Italie).

Figure 45: Dispositif de microjardin de l'ONG ACRA installé dans le parc de Hann Bel-Air
(source, Halima MAIGUIZO-DIAGNE)

II. Effet des biodigestats sur la biomasse de plants en microjardin.

Comme décrit dans le chapitre II (p. 83), les trois types de digestats issus de la méthanisation d'algues, de bouse de vache et de restes alimentaires ont été testés sur la croissance des plantes en microjardin et ensuite comparé aux systèmes de culture avec le macro et micro.

1. Effet sur la croissance de laitue

Les trois types de digestats ont été appliqués pour substituer la solution macro-micro et les effets sur la croissance après deux mois de culture sur les tables de microjardin ont été relevés.

Poids frais des parties aériennes et racinaires

Les poids frais de la laitue obtenus variaient entre 20 et 40 g / pieds (Figure 46) pour la partie aérienne et entre 13 et 23 g / pieds pour la partie racinaire. Les poids frais les plus élevés étaient obtenus avec les digestats des restes alimentaires, mais les poids obtenus ne montraient pas de différence significativement entre les traitements.

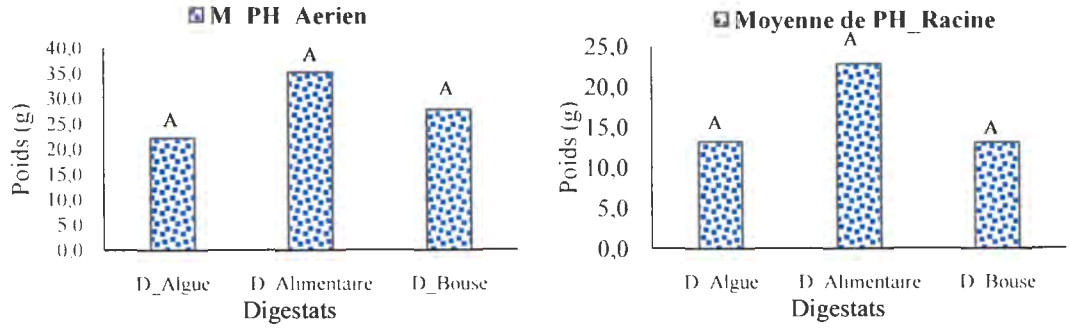


Figure 46 : Poids aérien et racinaire de la laitue après 2 mois de croissance

Poids secs des parties aériennes et racinaires

De la même manière que les poids frais, les poids secs de la laitue étaient évalués et les résultats obtenus sont représentés à la Figure 47.

L'analyse statistique à un seuil de 5% indique que le poids sec de la laitue issus de la fertilisation avec les déchets alimentaires était significativement ($p<0.08$) plus important que celui des plants issus de la fertilisation des digestats de bouse de vache ou des algues.

Ainsi, malgré un développement relativement correct des plants de laitue sur les tables microjardin, l'application des différents digestats issus du processus de méthanisation se comportaient sensiblement de la même manière.

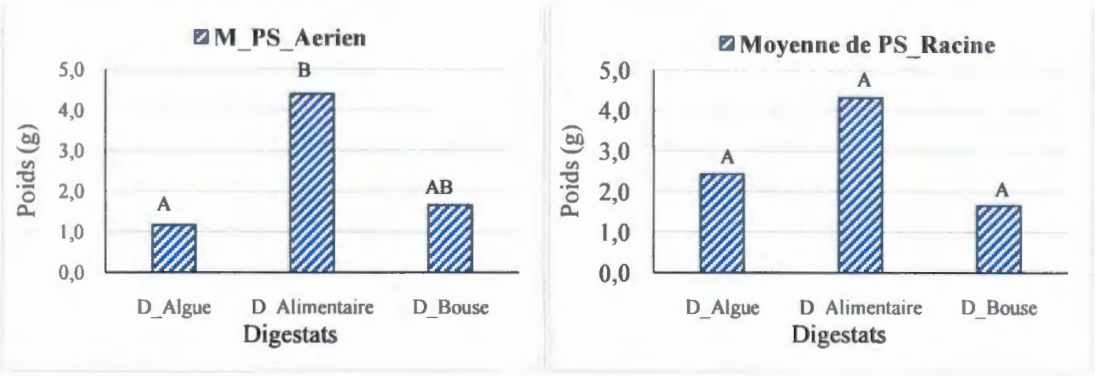


Figure 47 : Poids sec racinaire et aérien de la laitue après 2 mois de croissance

Une tendance légèrement plus importante est observée avec le digestat issu des restes alimentaires.

Ces mêmes digestats ont été testés sur différentes variétés de menthes, vu son importance dans la production en microjardin au Sénégal.

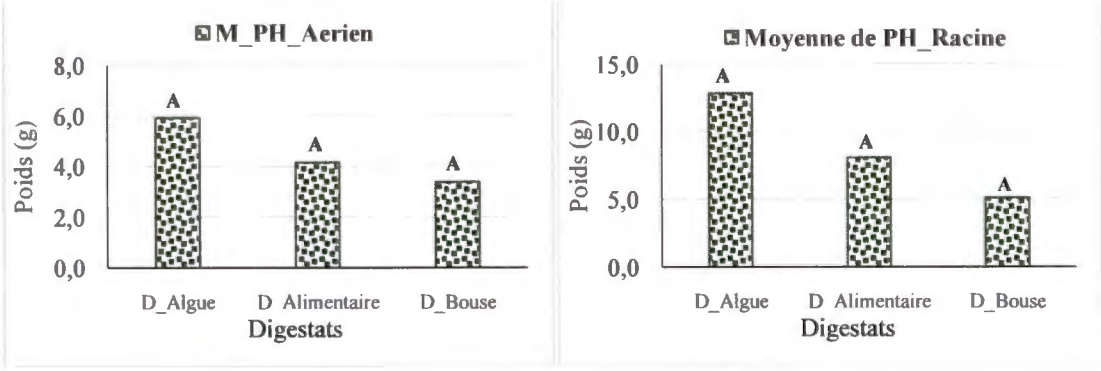
2. Effet sur la croissance de différentes variétés de menthe

L'effet des digestats avait été testé sur trois variétés de menthes qui étaient : la variété « *ordinaire* », la variété « *menthe* » et la variété « *saoudienne* »

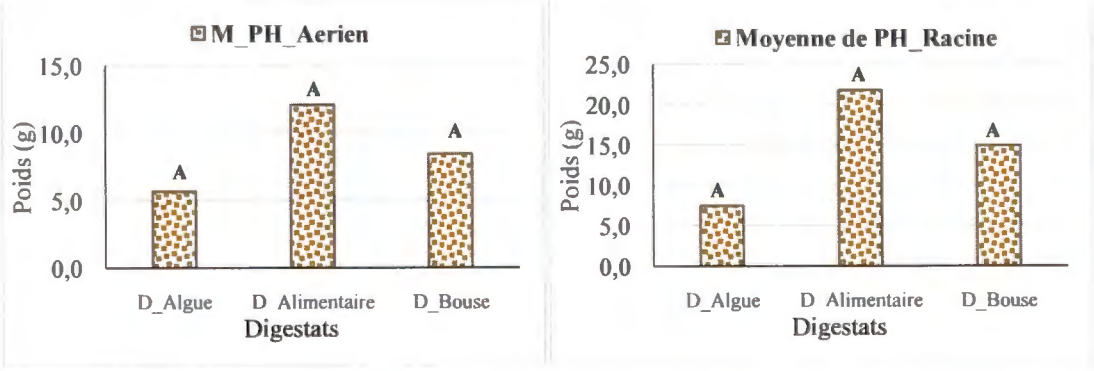
- *Poids frais des parties aériennes et racinaires*

Les résultats obtenus montraient (Figure 48) que la réponse des différentes variétés de menthes variait en fonction du digestat appliqué. Contrairement à la laitue, étudiée précédemment, il y a un bon développement des systèmes racinaire, ainsi nous allons remarquer dans les résultats qui suivent que les poids racinaires frais étaient plus élevés que ceux des parties aériennes.

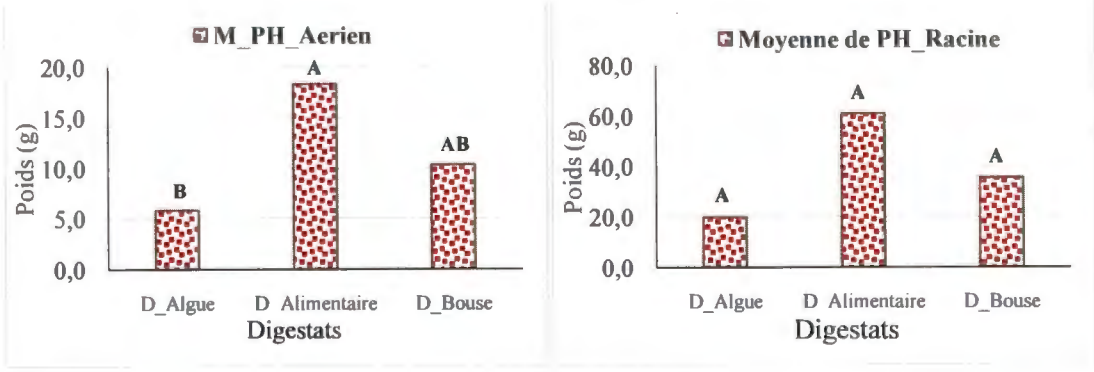
Les digestats issus des algues donnaient les biomasses les plus importantes en termes de poids frais des parties aérienne et racinaire pour la variété dite *ordinaire*.



Menthe «ordinaire»



Menthe «menthe»



Menthe «saoudienne»

Figure 48: Réponses des tests de digestats sur les poids humides des différentes variétés de menthes

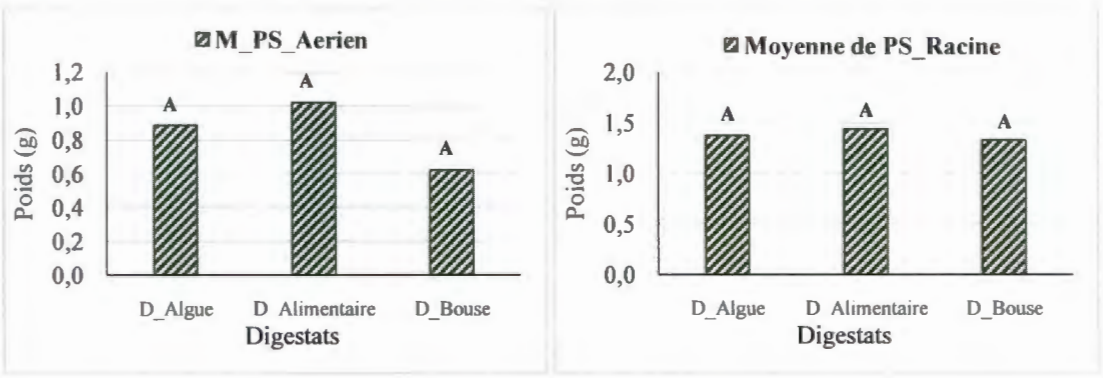
Pour les variétés dites *menthe* et *saoudienne*, les poids humides étaient plus importants avec les digestats issus des restes alimentaires que ceux issus de la bouse de vache ou des algues. D'ailleurs, une augmentation significative ($p<0.013$) de biomasse de la variété saoudienne était obtenue avec le digestat de reste alimentaire. Aussi les meilleures croissances étaient notées avec les digestats issus des restes alimentaires (D_Alimentaire) aussi bien pour les

poids secs et poids humides des deux autres variétés de menthes c'est-à-dire la variété menthe et la variété ordinaire.

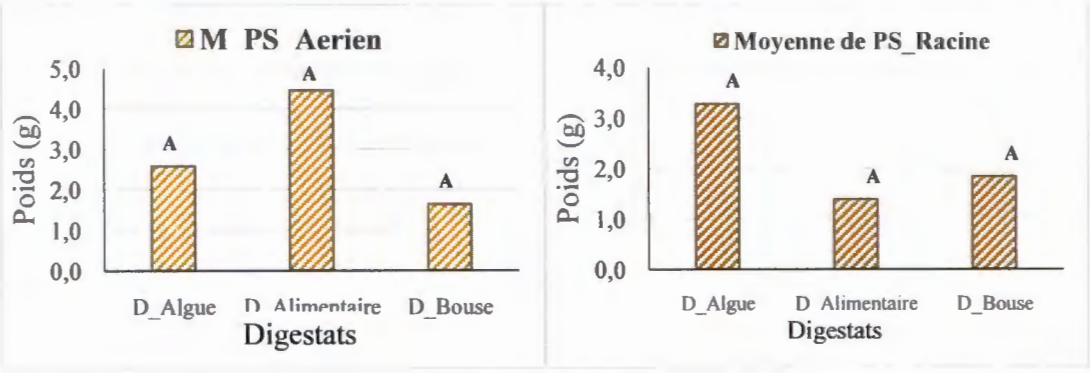
Poids secs des parties aériennes et racinaires

Les différentes parties aériennes et racinaires ont été séchées et leur poids sec déterminé (

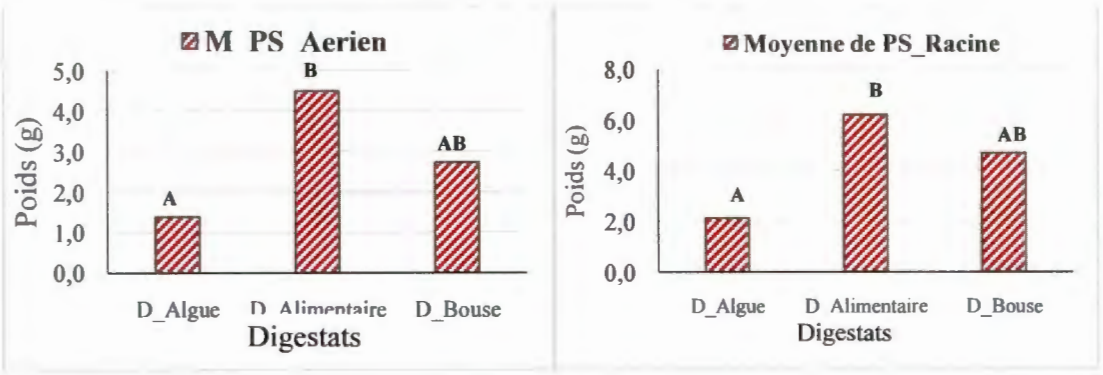
Figure 49).



Menthe «*ordinaire*»



Menthe «*menthe*»



Menthe «*saoudienne*»

Figure 49: Poids sec des différentes variétés de menthes après deux mois de croissance.

Pour la variété *ordinaire*, l'analyse des résultats montrent qu'il n'y a pas de différences significatives de croissance entre les digestats des algues, bouse de vache et restes alimentaires.

Pour la variété *menthe* aussi, les résultats ne montraient pas de différences significatives entre les différents digestats.

Pour la variété *saoudienne*, le poids sec des parties aériennes et racinaires issues de la fertilisation avec les restes alimentaires étaient significativement plus importantes (Figure 49) que ceux des autres traitements (algue et bouse de vache) ; par contre, le poids sec du traitement avec les algues étaient le moins important. Alors que les poids sec aérien et racinaire issus des digestats bouse de vache étaient intermédiaires et significativement pas différent de celui des restes alimentaires.

Tableau 14: ANOVA sur le cumul de biomasse humide de la production de menthe

Modalité	Poids frais parties aériennes	Poids frais parties racinaires
D_Alimentaire	$11,54^{a}$	$30,32^{a}$
D_Bouse	$7,41^{b}$	$18,56^{ab}$
D_Algue	$2,94^{c}$	$4,84^{b}$

Pour mieux appréhender les effets des traitements sur les poids frais, une analyse cumulée des différentes biomasses obtenues par digestats a été réalisé (Tableau 14). L'analyse montre que :

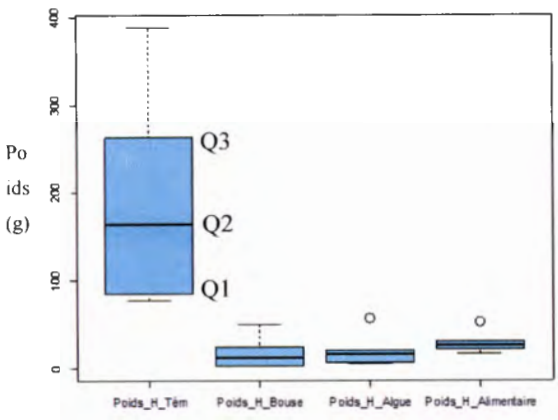
- Les poids cumulés des plants issus des digestats alimentaires restent significativement différent des autres traitements aussi bien pour les parties aériennes que pour les parties racinaires.
- Les parties aériennes obtenues avec la bouse de vache étaient significativement différentes de celles obtenues avec les algues, qui avaient les plus faibles poids aériens.
- Pour les parties racinaires, le poids obtenu avec le digestat des restes alimentaires était significativement plus important que celui avec obtenu la bouse ou les algues. Par contre, il n'y avait de différence entre ces deux traitements (Algue et Bouse de vache).

III. Effet des digestats comparés à la solution macro-micro.

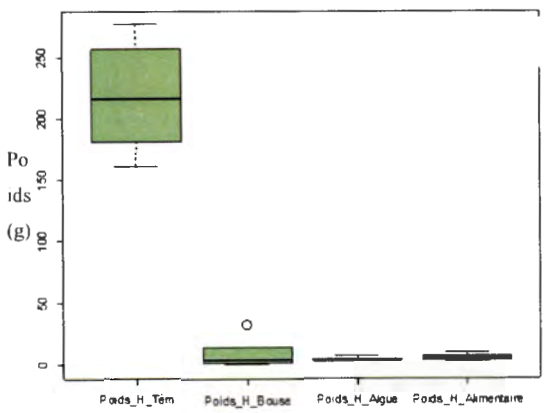
Dans l'optique de proposer un digestat comme solution de substitution des nutriments micro-macro, utilisé en microjardin, nous avons comparé les effets des trois digestats testés avec ceux de la solution micro-macro sur des plants en microjardin.

La comparaison a été faite sur les spéculations précédemment testées. A cause de la forte variabilité observée, les comparaisons sont faites à l'aide de boites à moustache (Figure 50) qui donne aussi la dispersion autour de la médiane. Le trait au milieu de chaque boite donne la médiane (Q2), alors que les côtés supérieurs et inférieurs donnent les quartiles (Q1 et Q3) à 25 et 75% des valeurs observées.

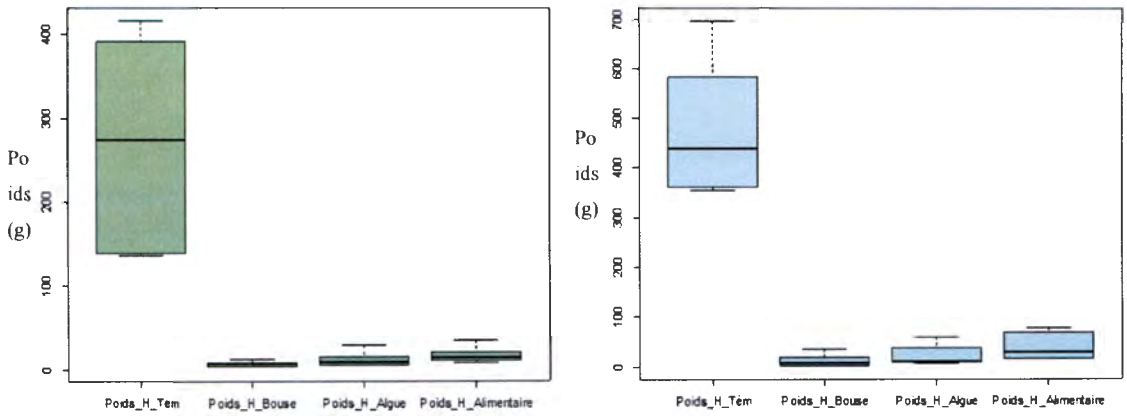
Les poids humides des échantillons issus des solutions macro-micro appliqué dans les conditions habituelles étaient significativement supérieurs à ceux des échantillons pour lesquels les digestats étaient appliqués. Ce qui signifie que malgré un développement des plants, les digestats semblaient moins efficace que les solutions de nutriments apportées avec les macro et micro.



La laitue



Menthe «*ordinaire*»



Menthe « *menthe* »

Menthe « *saoudienne* »

Figure 50 : Boites à moustache des poids humides des plants en microjardinage

Celles des plants Témoins fertilisés avec les solutions macro-micro, sont comparées à celles des plants fertilisées avec les digestats (Reste alimentaire, Bouse et Algue). Q1, 2 et 3 représente respectivement le premier, deuxième et troisième quartile.

Nous pouvons aussi noter que le poids médian de la menthe varie d'une variété à l'autre. Le poids médian le plus élevé était obtenu avec la « *saoudienne* » suivi des variétés « *menthe* » et « *ordinaire* ». La même tendance était aussi observée avec la fertilisation avec les restes alimentaires.

CHAP. IV.2 : EFFET FERTILISANT DE DIGESTATS SUR LA CULTURE DE CEREALES

I. Introduction

Les sols en Afrique subsaharien, possèdent les plus faibles taux d'utilisation de fertilisant minérale au monde. En effet, comparer à la moyenne mondiale qui est de 90 kg de nutriment (N, $P_2 0_5$, K_2O)/ha par an, les sols dans ces pays reçoivent environ 9 fois moins et environ 13 fois moins que ceux des pays asiatique (FAO-STAT , 2013). Un ajustement de ces taux pourrait être une approche simple pour augmenter la productivité agricole. Une telle approche a eu peu de succès dans nos pays, car face aux faibles rendements agricoles, les agriculteurs ne sont pas en mesure d'acheter les intrants, et très peu de politiques existent pour faciliter l'accès aux crédits agricoles. L'amélioration de la productivité agricole pourrait donc passer par une augmentation des nutriments à la fois minérale ou organique, en utilisant des technologies économiquement accessible et facile à mettre en œuvre pour les populations. Une des technologies proposées est l'utilisation de la méthanisation (digestion anaérobique) qui produit à la fois de l'énergie (biogaz) et un biofertilisant (cf. chapitre I, p. 20).

Les nutriments (NPK) complexifiés dans les substrats organiques sont sous une forme parfois difficile à être absorbé par les plantes. Généralement, ~50% de l'azote présent est sous une forme d'ammonium dissout qui peut être transformée en nitrate plus accessible pour les plantes. Ainsi, la digestion anaérobique améliore la disponibilité de l'azote dans la matière organique (Bayer, 2004). De même, la teneur en phosphore et en potasse ne change pas pendant la méthanisation et leur disponibilité respectivement de 50 et 80 % n'est pas réduit pour autant.

L'objectif de ce travail était de contribuer à l'amélioration de croissance de deux céréales que sont le maïs et le sorgho. Ces deux spéculations constituent avec le mil, les principaux aliments de base du monde rural au Sénégal. Ainsi le programme de productivité en Afrique de l'Ouest (WAAPP) en a fait une priorité, et les résultats des essais dans le cadre de cette thèse contribuent à l'atteinte des objectifs de ce vaste programme.

II. Matériel et méthode

Le matériel et méthodes utilisés dans cette partie de ce travail ont été décrits dans le chapitre II, pages 63, 79, 81.

III. Résultats

1. Effet des digestats sur la croissance du maïs

Afin d'évaluer l'effet fertilisant des digestats sur la culture les céréales (Maïs et Sorgho), les apports de digestats de fiente de poule pondeuse (D_FPP) ont été comparé à différents référentiels, c'est-à-dire fiente de poulet pondeuse (FPP), digestat de bouse de vache (D_BV), bouse de vache (BV), engrais NPK et les mélanges substrats et digestats (BV/FPP, D-BV/D-Fpp).

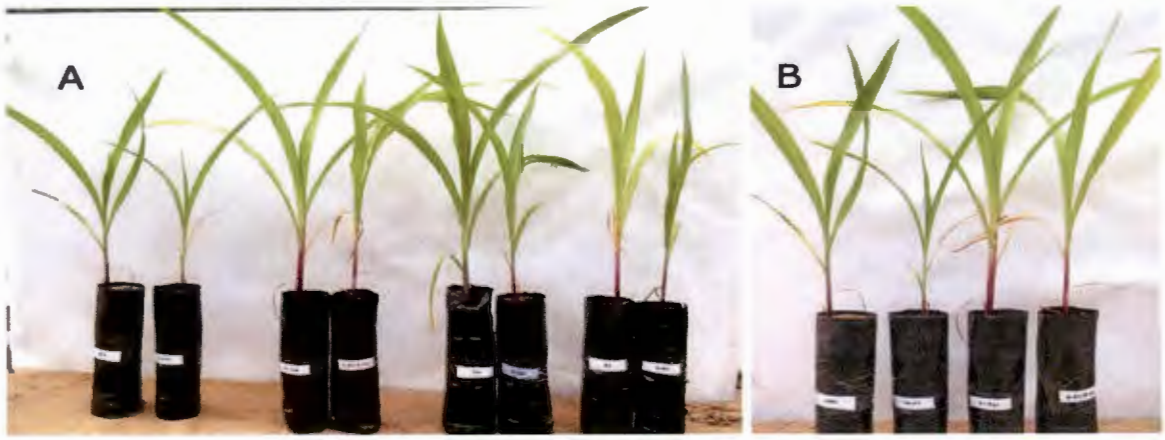


Figure 51: Vue d'ensemble des plants de maïs selon les différents traitements appliqués (A); comparaison entre les traitements digestats et témoins(B)

a. *Effet sur la hauteur et le diamètre collet*

A JAS 75, la hauteur des plantes (Tableau 15) de maïs variée entre 50,82 cm pour le témoin sans apport de fertilisant et 74.52 cm pour les plants avec apparts de fiente de poule pondeuse. Les analyses statistiques sur ces hauteurs du maïs montraient que Fpp et les Fpp mélangé avec la bouse de vache (BV/Fpp) avaient des hauteurs significativement plus importantes que les autres fertilisations organiques ou minérales (NPK). La croissance du maïs était identique pour les digestats seuls (D-Fpp) ou combinée (D-BV/D-Fpp), les bouses de vaches, les engrais NPK et les digestats de bouse de vache. Cette dernière était intermédiaire et significativement pas différent du témoin.

Tableau 15 : Hauteur des plants de maïs à JAS 75

Modalité	Hauteur (cm)	Diamètre collet (cm)
Fpp	74,52a	0,56a
BV/Fpp	71,22a	0,54a
D_BV/D_Fpp	58,26b	0,4b
D_Fpp	57,44bc	0,38bc
BV	56,20bc	0,34bcd
NPK	55,76bc	0,34bcd
D_BV	54,06cd	0,32cd
T0	50,82d	0,28d

Les mêmes tendances étaient observées pour les diamètres des collets (Tableau 15), avec une différence significativement plus importantes pour les Fpp et BV/FPP comparé aux autres traitements de fertilisant. On n'observait pas de différence significative entre les autres traitements qui étaient identiques au témoin c'est-à-dire sans apport de fertilisant.

b. Effet des digestats sur les biomasses aérienne et racinaire du maïs

- *Sur les biomasses fraiches des parties aériennes et racinaires:*

Les valeurs de biomasse aériennes fraiches variaient en moyenne entre ~25 et ~8 g par plante (Figure 52). Comme pour la hauteur, les fientes de poules pondeuses (Fpp) ont provoqué une augmentation significative de la croissance des plantes comparées avec les autres traitements.

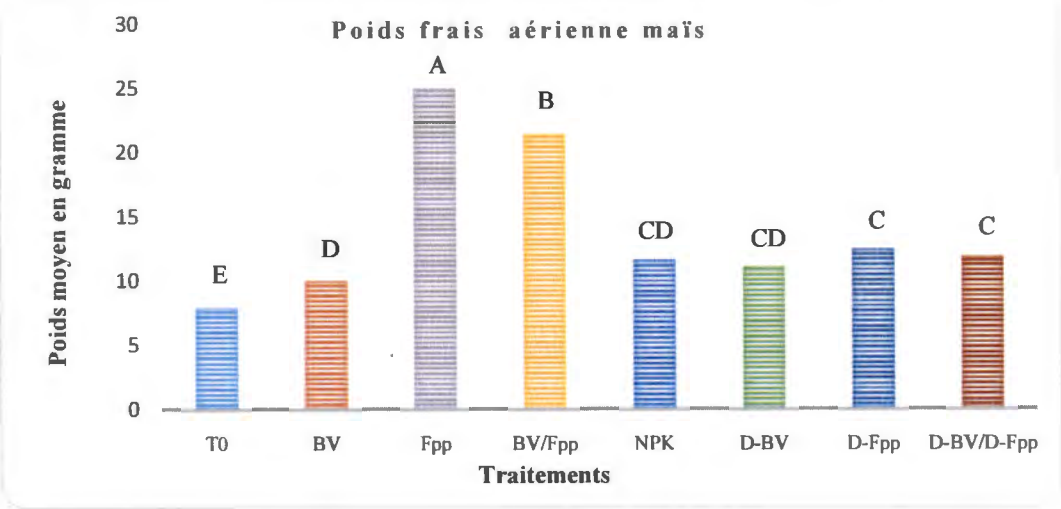


Figure 52 : Poids moyen des parties aériennes en fonction des traitements organiques ou minéral

La croissance des plantes obtenues avec les fientes de poulets pondeuses mélangées à la bouse de vache (BV/Fpp) étaient aussi significativement plus importante que les autres traitements.

Le traitement avec le engrais NPK, était significativement pas différent des traitements de digestat de fientes de poulets pondeuses seule ou mélangé au digestat de la bouse de vache.

Les valeurs de biomasse les moins importantes ont été obtenu avec les témoins, c'est-à-dire sans apport de fertilisant.

Le poids humide des parties racinaires à JAS 75 varient entre ~4,7 et 1.5 g en moyenne par plante (Figure 53). Les poids les plus élevés ont été notés avec les plantes amendées avec les fientes de poulet pondeuses (Fpp) seules ou en combinaison avec la bouse de vache (BV/Fpp) et qui sont significativement plus importants que les biomasses issues des autres traitements.

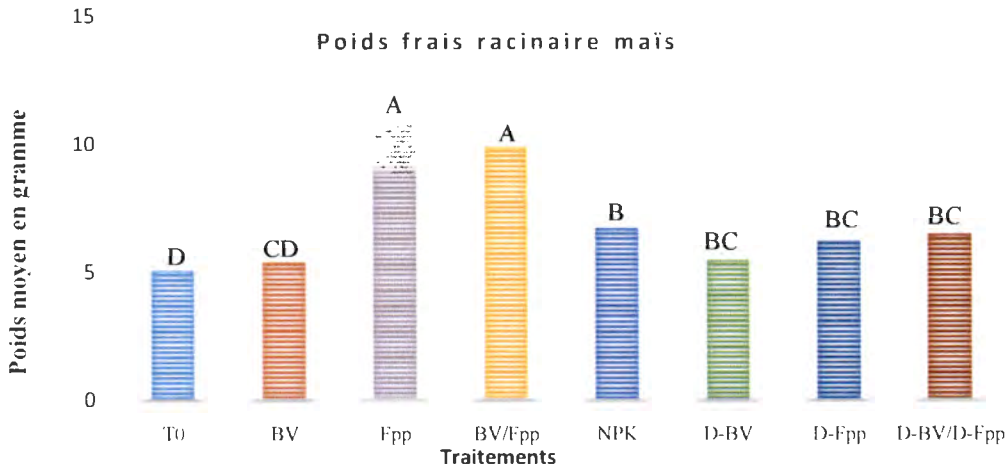


Figure 53 : Poids moyen des parties racinaires en fonction des traitements organiques ou minéral

Les biomasses racinaires du maïs du traitement NPK, était significativement plus importantes que celles du témoin (T0) ou du traitement avec la bouse de vache (BV), par contre significativement pas différente des digestats de la bouse de vache (D_BV), ou de fiente combinée au digestat de bouse de vache (D_BV/D_Fpp).

- *Sur les biomasses sèches des parties aériennes et racinaires*

Les biomasses sèches des parties aériennes et racinaires des plantes sont reportées dans le Tableau 16 suivant.

Tableau 16 : biomasse sèches des parties aériennes et racinaires du maïs en fonction des traitements

Modalité	Poids sec moyen des parties aériennes	Poids sec moyen des parties racinaires
Fpp	4,744a	1,926a
BV/Fpp	4,486a	1,742a
D-Fpp	2,516ab	1,182b
D-BV/D-Fpp	2,168bc	1,062bc
NPK	2,166bcd	1,008bc
D-BV	1,904cd	0,850c
BV	1,806de	0,830c
T0	1,514e	0,820c

Comme pour les biomasses humides, les biomasses sèches des parties aériennes et racinaires des plantes amendées avec les fientes seule ou mélangée avec la bouse de vache étaient significativement plus importantes que celles des autres traitements.

La biomasse du traitement témoin était significativement moins importante que celles des autres traitements. Les digestats de fientes (D_Fpp et D_BV/Fpp) produisaient des valeurs intermédiaires entre celle des fientes (Fpp et BV/Fpp) et celle du témoin (T0).

Dans le but de voir si les digestats favoriser le développement des parties aériennes ou racinaires, une corrélation est faite entre les biomasses des parties aériennes et racinaires (Figure 54).

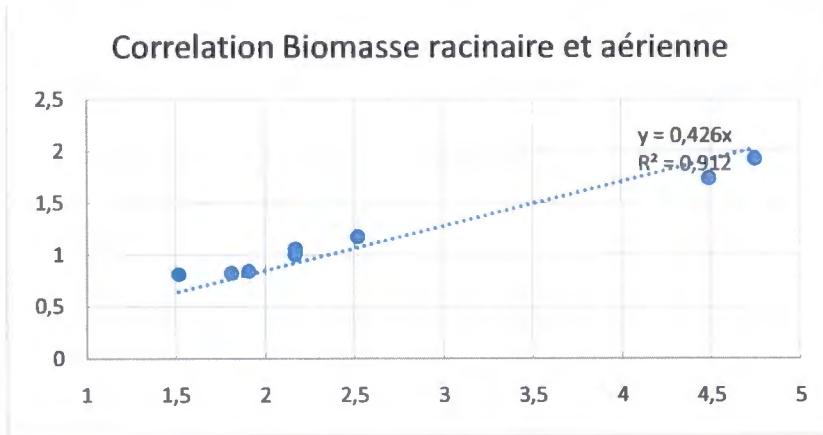


Figure 54: courbe de corrélation biomasse racinaire /biomasse aérienne

Les résultats montrent qu'il y a une bonne relation entre les biomasses racinaires et aériennes, avec une valeur de R2 très proche de un (1).

IV. Effet des digestats sur la croissance du sorgho

a. *Effet sur la hauteur et diamètre du collet*

La hauteur et le diamètre du collet des plants de sorgho à JAS 75 variaient respectivement entre 50 et 81 cm ; et 0,74 et 0,30 cm (Tableau 17). Les hauteurs les plus importantes étaient enregistrées avec les plantes amendées avec les fientes seules (Fpp) ou mélangées avec la bouse de vache (BV_Fpp). Les valeurs de croissance les plus faibles étaient enregistrées avec les bouses de vache (BV) seule qui étaient significativement plus basses que tous les autres traitements à l'exception du témoin absolu (T0). Les digestats de fientes seuls ou mélangés avaient un effet intermédiaire.

Tableau 17: hauteur et diamètre du collet des plantes de sorgho avec différents types de bio-fertilisation

Modalité	Hauteur (cm)	Diamètre collet (cm)
Fpp	80,94e	0,74d
BV/Fpp	76,54e	0,64d
D_Fpp	68,16d	0,52c
D_BV/D_Fpp	67,6d	0,48c
NPK	63,5cd	0,44bc
D_BV	59,42bc	0,42bc
T0	55,68ab	0,34ab
BV	50,04a	0,3a

L'analyse du diamètre des collets (Tableau 17), montraient les mêmes tendances que les hauteurs des plants de sorgho. Ainsi, les diamètres des plants fertilisés avec les fientes de poules pondeuses (Fpp) seules ou mélangées donnaient des diamètres significativement plus élevés que ceux des autres traitements. Les valeurs les plus basses étaient enregistrées, comme dans le cas des hauteurs, avec les bouses de vaches.

b. Effet sur les biomasses humides des parties aériennes et racinaires du sorgho.

- *Effet des digestats sur les biomasses humides aériennes*

Les biomasses humides du sorgho après 75 jours de croissance variaient entre 18 et ~ 4 g en moyenne. Les biomasses issues de la fertilisation avec fientes de poules pondeuses (Fpp) étaient significativement plus importantes que tous les autres traitements.

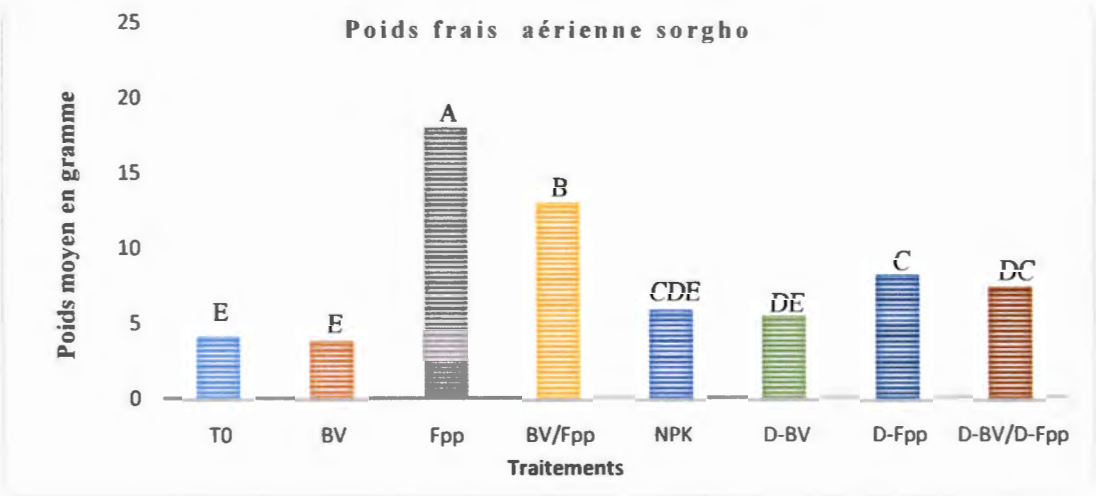


Figure 55: Poids moyen des parties aériennes du sorgho en fonction des traitements organiques ou minéral

Les digestats des fientes poules pondeuses (Fpp) et comme pour les hauteurs des plants donnaient des valeurs intermédiaires, identiques à celle du traitement minéral (NPK), mais significativement supérieures à celles des traitements bouse de vache (BV) ou témoin (T0).

- *Effet des digestats sur les biomasses humides racinaires*

La biomasse racinaire moyenne des plants fertilisées avec la bouse de vache étaient les plus faibles (2.88 g) alors que la fertilisation avec les fientes donnaient les biomasses les plus importantes pour une valeur proche de 8 g en moyenne.

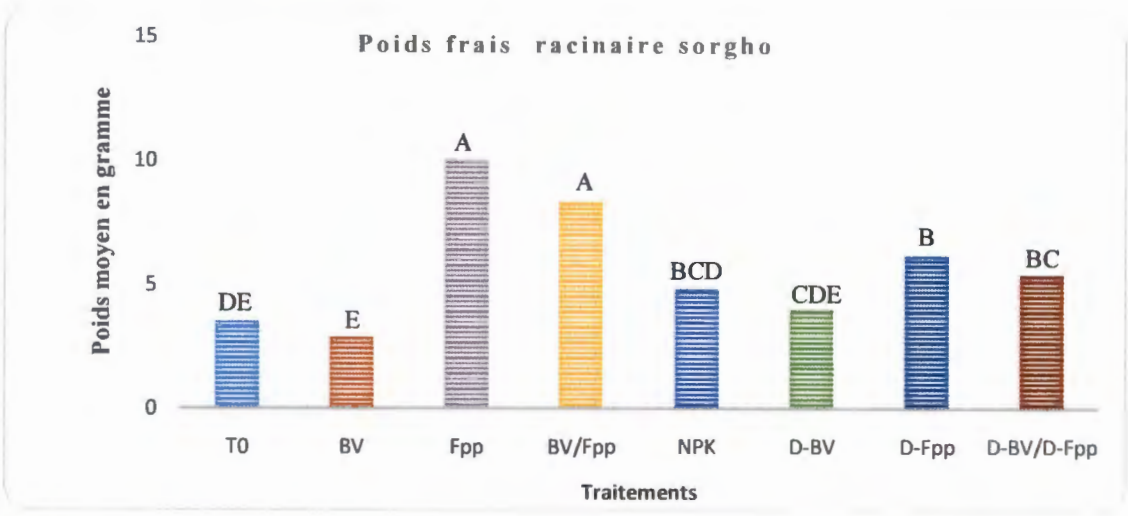


Figure 56: Poids moyen des parties racinaires du sorgho en fonction des traitements organiques ou minéral

Comme pour les résultats précédents, des différentes significatives étaient observées entre les digestats des fientes (Fpp) et les témoins, ce qui signifie un effet positif de la fertilisation avec les digestats (Figure 56).

- *Sur les biomasses sèches des parties aériennes et racinaires*

Après séchage des parties aériennes et racinaires, les résultats des biomasses sèches donnaient presque les mêmes différences significatives entre les traitements (voir Tableau 18). Les fientes de poules pondeuses (Fpp) donnaient les valeurs les plus importantes suivies des digestats de Fpp (D_Fpp), du digestat de bouse, du témoin (T0) et enfin de la bouse de vaches (BV). Ceci aussi bien pour les biomasses sèches des parties aériennes que celles des parties racinaires.

Tableau 18 : Biomasse sèche aérienne et racinaire du sorgho en fonction des traitements

Modalité	Poids sec moyen des parties aériennes	Poids sec moyen des parties racinaires
Fpp	4,46a	2,00a
BV/Fpp	3,40b	1,65a
D_Fpp	2,12c	1,12b
D_BV/D_Fpp	1,94cd	1,09b
NPK	1,50cde	0,87ab
D-BV	1,38de	0,72c
T0	1,10e	0,710c
BV	0,95e	0,510c

La courbe de corrélation (Figure 57) montrait un coefficient de corrélation proche de 1 et une pente 0.5, ce qui suggère que les biofertilisants avaient des effets identiques sur les deux parties de la plantes (racinaire et aérienne).

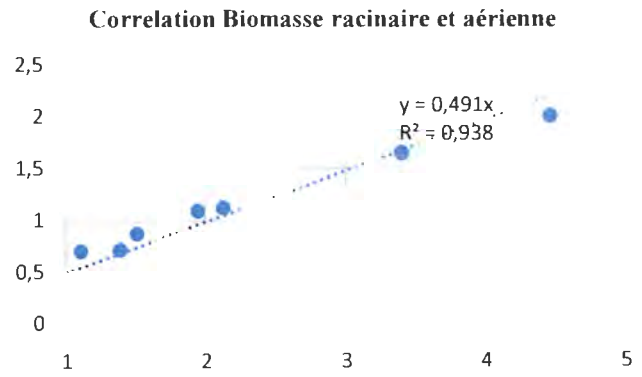


Figure 57: courbe de corrélation biomasse racinaire et aérienne

DISCUSSION GENERALE

Discussion Générale

I. Caractérisation biochimique des substrats organiques

La connaissance de certains paramètres biochimiques permet de prédire la production de biogaz à partir d'un substrat donné. Parmi les paramètres les plus utilisés peuvent être cités : les matières sèche et volatile (MS et MV) (Torrijos, et al., 2008), la composition physico-chimique (carbone, azotes, rapport C/N) (Vanegas & Bartlett, 2013), les fractions selon Van Soest, quelques éléments minéraux (Na, Mg, Ca , P, ...) (Mao, Feng, Wang, & Ren, 2015) et le potentiel méthane en BMP et en mode fedbatchs (Adelekan, 2012). Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous avons mesuré ces paramètres sur différents substrats choisis selon leur abondance, pour prévoir leur transformation au cours de la méthanisation.

La matière sèche (MS) des macroalgues, était déterminée et comparé à celles de la bouse de vache et des tourteaux de *Jatropha curcas*. La comparaison a montré que la MS des macroalgues était significativement plus élevée que celle de la bouse de vache et des tourteaux de Jatropha. Il faut souligner que, tous les substrats étudiés dans ce travail étaient assez secs et les taux de MS contenus étaient au-dessus de 740 g MS / kg. Et ce taux de MS contenu dans les macroalgues était compatible avec d'autres données publiées (Ward, Lewis, & Green, 2014). La bouse de vache et la plupart des autres types de fumier animal sont assez riches en MS et contiennent des micro-organismes impliqués dans les processus aérobies et anaérobies nécessaires pour la production de biogaz (Moletta, 2011). Cela explique pourquoi il a toujours été le plus pratique pour la production de biogaz, en particulier dans les zones rurales de l'Afrique de l'Ouest. Nos résultats montrent que les matières volatiles (MV) des macroalgues étaient environ deux fois plus élevées que celles de la bouse de vache, ce qui implique que ces macroalgues pourraient bien être valorisées par la digestion anaérobique. Les matières volatiles sont principalement composées d'acides gras, de protéines et d'hydrocarbures, qui sont plus biodégradables que certains hydrocarbures (Godbout, et al., 2010) En outre, (Habig & Ryther, 1984), ont aussi trouvé une corrélation significative entre les rendements en méthane et la teneur en glucides de certains macroalgues, y compris *Ulva sp*.

Nous avons déterminé par Van Soest fractionnement, la concentration de cellulose et lignine. Lignine et celluloses constituent les parois de construction de toutes les plantes et sont

ubiquistes dans la plupart des régions de notre planète (Malherbe & Cloete, 2002).Nos résultats ont révélé que la fraction de cellulose dans les macroalgues était quatre fois plus élevée que dans les tourteaux. En outre, la valeur de la lignine dans les macroalgues était significativement plus faible que dans les autres substrats. Une analyse des macroalgues à des fins alimentaires et pharmaceutiques a révélé la présence de grandes quantités d'une source de polysaccharides (Mabeau & Fleurence, 1993). Leurs propriétés biochimiques signifient que les macroalgues sont digérées très rapidement, ce qui est peu propice à la production durable de biogaz. Pour surmonter cette biodégradabilité rapide des algues, (Yen & Brune, 2006) avaient équilibré cette faible teneur en carbone par le biais de co-digestion de déchets de papier avec des microalgues. Ce faisant, ils ont augmenté la production de biogaz par plus de la moitié. Pour les applications futures, nous proposons que la production de biogaz à partir d'algues puisse être améliorée au fil du temps par la co-digestion avec d'autres substrats. Contrairement aux macroalgues, les tourteaux de Jatropha ont une forte teneur en lignine, ce qui peut inhiber les microorganismes méthanogènes (Moletta, 2011) , et peut ensuite réduire la production de méthane. En effet, la lignine présente dans les substrats se dégrade peu lors de la méthanisation, elle se retrouve en partie dans le digestat. A l'inverse du compostage, la méthanisation n'active pas l'humification de la matière organique, les champignons responsables de cette dégradation de la lignine se développent uniquement en condition aérobie (ADEME; Gaz de France; Solagro, 2001).

Concernant la composition physico-chimique, nous avons déterminé les teneurs en carbone, azote, phosphore...etc aussi bien pour les macroalgues, *Jatropha curcas*, bouse de vache, fientes de poulet et reste alimentaires Tableau 19.

Tableau 19: Comparaison entre C, N et C/N des substrats étudiés

Substrats	Macroalgue	Bouse de Vache	Tourteau Jatropha	Fiente de volaille	Reste Alimentaire
Carbone (% C)	11,51	25,37	40,16	27,21	42,69
Azote (% N)	1,33	1,29	1,24	2,6	2,04
C/N	8,7	19,7	32.4	10,5	30,9

Nous constatons qu'en ce qui concerne le carbone (C en %), les restes alimentaires échantillonnés et les tourteaux de Jatropha étaient les plus riches. Ce sont des substrats bruts qui n'ont pas encore subi d'action microbienne. La bouse de vache et les fientes ayant déjà subi la méthanisation dans les tubes digestifs des animaux, ont perdu une grande partie de leur

carbone (Molette, 2002). Les macroalgues étaient les plus faibles en carbone parmi tous les substrats, ce qui nous ramène à la discussion du paragraphe précédent, le besoin de rééquilibrer le carbone lors de la digestion anaérobique des algues.

La détermination du taux d'azote, phosphore, potasse, sodium, ..., nous renseignent sur la qualité du digestat en tant que biofertilisant. La réaction de méthanisation n'engendre pas de réduction des quantités d'éléments fertilisants. Cependant, elle entraîne un changement de forme de ces éléments. Lors de la méthanisation, une partie de l'azote organique est transformée en azote minéral (ammonium NH_4+ et ammoniac NH_3). Ce changement peut rendre l'azote plus facilement et rapidement disponible pour les plantes quand elles en ont besoin (Bayer, 2004).Cependant, la minéralisation de l'azote organique a un inconvénient, elle rend l'azote du digestat plus volatil. De là, nous pouvons considérer le second groupe comme celui qui pourra produire le meilleur des digestats. L'application la plus efficace du digestat est l'épandage au printemps, ce qui permet une assimilation rapide par les plantes (ADEME, 1999).

La valeur en azote des substrats est importante pour son utilisation comme biofertilisant (Giroux & Audesse, 2004). Cependant la forte teneur en azote dans le substrat peut inhiber la digestion anaérobique (Fricke, Santen, Wallmann, Hüttner, & Dichtl, 2007). Ainsi, nos résultats montrent que les fientes étaient les plus riches en N suivis des restes alimentaires. Cette valeur était supérieure à 1,4%, celle trouvée par (Borowski & Weatherley, 2013). Les valeurs en N dans les macroalgues, la bouse de vache et tourteau de *Jatropha curcas* étaient proche de 1%. Ainsi on peut supposer que les digestats de ses substrats peuvent être de très bon biofertilisant si toutefois le système d'épandage est respecté (Cf. p. 54)
Concernant les rapports C/N, on en distingue deux catégories les substrats avec un rapport supérieur ou proche à 20 (la bouse de vache, les tourteaux de Jatropha curcas et les restes alimentaires), et les substrats avec un rapport inférieur ou proche de 10 (les macroalgues et les fientes de volaille). Un rapport C/N trop élevé fournit de l'azote insuffisante (Giroux & Audesse, 2004) alors qu'un faible ratio reflète une forte teneur en azote dans les substrats, qui peut conduire à l'inhibition du processus anaérobie (Fricke, Santen, Wallmann, Hüttner, & Dichtl, 2007).

Nous avons trouvé un rapport C/N de 8,7 pour macroalgues, qui était en accord avec les résultats antérieurs obtenus par (Ward, Lewis, & Green, 2014). Les valeurs C/N de la bouse

de vache et le tourteau de *Jatropha curcas* et restes alimentaires étaient plus proches à un ratio de 25, qui est le rapport le plus souvent recommandé (Mao, 2015) dans le cas d'une digestion anaérobique.

Aussi, nos résultats montrent que les substrats comme les macroalgues et les restes alimentaires avaient les teneurs plus élevées en Na^+ que les autres substrats étudiées (Bouse de vache et tourteau de *Jatropha curcas*). La concentration en sel trouvé ici peut ne pas poser des problèmes pour la production de biogaz, mais surtout la valorisation des digestats de ces substrats potentiellement intéressant comme biofertilisant organique. Une séparation, des parties liquides et solides des digestats peut être une approche pour tenter de réduire la forte teneur de Na dans ces digestats.

II. Détermination du pouvoir énergétique des substrats

Pour étudier la capacité maximale de production de méthane des substrats étudiés, les potentiels de méthane ont été mesurés par BMPs. Le potentiel de méthane obtenue pour les macroalgues (216,4 L CH_4 / kg MV) était plus élevé que pour le tourteau de *Jatropha curcas* (133,6 L CH_4 / kg MV). Il l'était encore plus pour la bouse de vache (100,3 L CH_4 / kg MV). Les valeurs potentielles du méthane avec les macroalgues étaient similaires à celles obtenues avec différentes espèces d'algues (Costa, et al., 2012) ; y compris *Saccharina latissima* dans un réacteur à fonctionnement discontinu (Jard, et al., 2012).

Concernant la comparaison du potentiel méthane des deux déjections animales (Bouse de vache et fiente de volaille) par les BMPs nous avons constaté que, les bouses de vache (BV) produisent environ 364 ml de biogaz/jour contre 211 ml de biogaz/jour pour les fientes de volailles. Cependant, ces résultats sont contradictoires avec ceux trouvés par (M'Sadak & Ben M'Barek, 2013).

Dans le but de voir la digestibilité des substrats, des injections d'éthanol et de substrats dans des réacteurs batchs ont été réalisées. Ceci nous a permis aussi de voir l'état d'activité des archaebactéries mais aussi la vitesse de digestion de l'éthanol comparée à celle des substrats introduits. En effet, l'éthanol est un des substrats les plus rapidement digérés par les microorganismes méthanogènes. En effet, au cours de l'acidogenèse, des acides gras et des alcools tels le méthanol et l'éthanol sont synthétisés (Ballerini, Alazard-Toux, & Olivier, 2006), ces produits sont transformés en méthane au cours de la phase de méthanogenèse. Ce

qui est normal puisque que les autres substrats doivent passer par toutes les phases de la digestion anaérobique, ce qui n'est pas le cas pour l'éthanol qui commence directement par la phase d'acétogenèse (Moletta, 2011). Nos résultats montrent que les macroalgues ont été digérées beaucoup plus rapidement que les tourteaux de *Jatropha curcas* et la bouse de vache. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés plus haut par les tests de fractionnement de Van Soest et la caractérisation physico-chimique (MAIGUIZO-DIAGNE, et al., 2015).

En termes de pouvoir calorifique, le potentiel atteint par les macroalgues vertes était 2151 kWh/t MV et environ trois fois plus élevé que celui de la bouse de vache. Ces différences peut être expliquées par le fait, les conditions environnementales du tube digestif des bovins sont particulièrement favorables aux Archeas méthanogènes (Barone, 1984) ; la bouse y perd une partie de son carbone par conséquent une perte de son potentiel méthanogène. Ainsi avec une hypothèse base de 120,28 F CFA le KWh (SENELEC, 1999), l'utilisation d'une tonne de matière sèche (MS) de macroalgues permettrait d'économiser en moyenne 259 722,28 F CFA (sans les investissements de base). Hors les estimations grossières de la prolifération était d'environ 3000 tonnes[3] en moyenne/saison. En d'autre terme la valorisation des macroalgues pourrait générer environ 776 166 840 F CFA.

III. Utilisation des digestats en microjardin

Etant donné, que les plantes ont besoin de nutriments (NPK, et autres éléments) pour se développer, il n'était pas possible dans cette expérience en hydroponie d'avoir un témoin absolu sans apports. Le dispositif a été donc mis en place pour comparer dans un premier temps l'effet des digestats issus de bouse de vaches, macroalgues et restes alimentaire sur les spéculations (laitue et menthe) et dans un second temps l'effet de ces digestats ont été comparés à ceux des solutions micro-macro.

Les trois types de digestats issus de la méthanisation d'algues, de bouse de vache et de restes alimentaires ont été testés dans un essai en microjardin, sur la laitue qui est la spéculation maraichère la plus cultivé dans les Niayes de Pikine et Patte d'Oie (CISSE & al., 2014). Malgré que l'essai ait été fait dans des conditions climatiques favorables (Parc de Hann Bel-Air), la comparaison des trois digestats sur la croissance de la laitue montrait une différence significative uniquement pour les parties aériennes sèches. Les digestats se comportaient de la

[3] Cette quantité a été estimée au mois de grande prolifération i.e. Janvier.

même manière sur la laitue. Il est connu que la laitue peut prospérer avec des exigences en éléments nutritifs moindres, ce qui fait qu'elle est bien adaptée en microjardin. En effet, cultivées sur sol, les taux de matière organique entre 2.5 et 8% sont suffisants pour permettre un bon développement. Ceci est en accord avec les résultats de comparaison d'efficacité de digestat fait par (Elbl, Plosek, & Kintl, 2013) qui montre un effet positif du digestat sur la laitue comme modèle. Dans le cas de notre expérience, les digestats utilisés avaient une concentration de 0,6g/l, et environ 105 l, soit 375g de MV de digestat ont été apporté pendant la durée de deux (2) mois de croissance de laitue. Cependant, comparé à la croissance des laitues obtenues avec les solutions macro-micro, les biomasses étaient significativement plus importantes en faveur des engrais organiques.

La deuxième spéculation testée était les trois variétés de menthe qui est aussi une culture très souvent utilisée en microjardin. D'abord d'un point de vue des variétés, toutes les variétés semblent être très adaptées à la culture en hydroponie comme l'atteste les biomasses racinaires qui étaient plus importantes que celle des parties aériennes. Cependant, d'un point de vue des poids humides, il n'avait pas eu de différences significatives entre les traitements à l'exception, des digestats alimentaires qui montraient une biomasse de la menthe *var. saoudienne* significativement plus importante que celles des autres. Pour les poids secs, la variété *saoudienne*, donnait des différences significativement plus importantes que les autres traitements aussi bien pour les parties racinaires que les parties aériennes. L'analyse des propriétés biochimiques des restes alimentaires avait révélé que ces derniers étaient relativement riches en azotes (2.04 g N/100g MS) mais surtout caractérisés par des teneurs relativement faible en ions Na+ et K+ (respectivement 9.80 et 9.15g/kg). A l'opposé le NaCl était très élevé dans les digestats de macroalgues lié à leur origine marine. En d'autre terme, les différences observées entre les digestats des restes alimentaires et les autres seraient probablement liées aux teneurs en azotes.

D'autre part, une ANOVA globale sur les biomasses cumulées des variétés, montre par contre des différences significatives entre les traitements, et notamment les biomasses étaient significativement différentes par ordre décroissant : D_Alimentaires>D_Bouse>D_Algues. Les biomasses des parties racinaires des plantes traitées avec la bouse étaient intermédiaire entre celle des restes alimentaires (la plus élevée) et celle des algues (la moins importante).

Aussi, il est à noter qu'en moyenne la biomasse obtenue avec les plantes traitées avec les algues est multipliée par 5 avec les digestats, ce qui n'est pas négligeable pour les adeptes du microjardin ; de plus cette différence est significative.

Cependant, malgré une augmentation significative des biomasses en fonction des digestats utilisés, les biomasses obtenues restent relativement faibles comparées à celles obtenues avec les solutions macro-micro. Effet, aussi bien pour les biomasses racinaires ou aériennes, les engrais macro-micro donnaient des différences significativement plus importantes que celles des digestats, ceci pour toutes les spéculations testées. Les différences sont parfois 100 fois supérieures et plusieurs hypothèses peuvent être posées pour tenter de comprendre ces différences :

- La teneur relativement importante en azote dans la solution macro-micro. En effet, d'après le fabriquant les solutions toutes confondues renferme 34 g/l d'azote (FAO, 2010);
- Une dilution trop importante des digestats, expliquées par les volumes d'arrosage important ;
- Un cycle d'arrosage inadapté pour les biodigestats.

Il faut rappeler que dans ce cas de cette expérience, les recommandations des fournisseurs des engrais chimiques avaient été appliquées aussi aux fertilisants organiques. Il est donc envisageable d'augmenter les temps de rétention des biofertilisants dans le système microjardin pour augmenter leurs effets bénéfiques (absorption efficace et développements d'une microflore associé).

IV. Utilisation des digestats pour fertiliser les céréales

En Afrique de l'ouest, les céréales occupent une place importante dans l'alimentation humaine et animale, et de ce fait elles jouent un rôle important dans la sécurité alimentaire. Cependant, la productivité des céréales demeure faible. Le rendement de l'ensemble des quatre principales céréales (maïs, sorgho, riz et mil) produites dans la région reste très faible, environ 1179 kg par hectare comparé aux 6 tonnes à plus de 12 tonnes réalisés en Asie et en Europe sur le blé, le maïs et le riz (SOULE & GANSARI, 2010). Une des causes est la baisse des fertilités des sols et les apports insuffisants en composés organiques. Dans le but de rechercher des solutions alternatives, des biodigestats issus de la méthanisation (digestion) de

déchets, constitués essentiellement d'excréments d'animaux ou de résidus collectés à Sangalkam ont été testés en serre pour évaluer leur valeur agronomique.

L'effet de ces substrats peut être important, car les zones comme Sangalkam égorgent de grande quantité de substrats notamment entre 150 kg/mois pour les petites exploitations avicoles à 4 350 kg/mois pour les grandes exploitations. Les exploitations industrielles ou semi-industrielles avoisinent des productions de 28 000 kg/mois.

Les résultats montrent que les fientes de poules pondeuses (Fpp) et les Fpp mélangées avec la bouse de vache (BV/Fpp) avaient des hauteurs, des poids aériens et racinaires significativement plus importants que les autres fertilisations organiques ou minérales (NPK). Le même effet était observé aussi sur la croissance du maïs que sur celle du mil. Un effet positif de fiente de volaille sur la croissance de céréales (Ivanov, Matrosova, & Trelasov, 2013) et de tubercules a aussi été observée (Vasanthi & Kumaraswamy, 2000). Comparer aux engrais minéral (NPK), les fientes de poules pondeuses avaient augmenté significativement le développement du maïs et du sorgho par le fait que la minéralisation des bioengrais comme les excréments de volaille s'étale dans le temps avec une minéralisation rapide des acides uriques qui a lieu durant les premiers jours voir premières semaines de l'application du bioengrais (Edwards & Daniel, 1992). Il est estimé que plus de 69% de l'azote dans les fientes de volailles peuvent être minéralier dans les quatre mois et demi qui suivent leur application sur le sol (Bitzer & Sims, 1988). Les principales formes d'azote dans les fientes sont : l'acide urique et les protéines non digérées, qui représentent respectivement 70% et 30% de l'azote total. Dans le cas de cette étude, il est supposé que le processus de minéralisation par oxydation de l'azote organique est plus favoriser pour donner une forme ammoniacale et par oxydation de la première forme en nitrate (NO_3^-) utilisable par la plante. Ces formes d'azote dans les substrats n'ont pas pu être dosées dans le cadre de ce travail ; l'hypothèse la plus vraisemblable pour tenter d'expliquer la croissance des plants fertilisé avec Fpp plus importante que celle du NPK est donc la présence de nitrate plus importante dans les Fpp que la forme d'engrais minérale utilisée qui avait ~ 14% de N.

D'autre part, il existe différentes forme de fientes (poulet de chair, poussin, poule pondeuse…) et une étude préliminaire (CISSE & al., 2014) a montré que la composition des fientes était très variable en fonction du type de support utilisé (balle de riz, sciures de bois, litière de filao…), des types d'aliment et du type d'élevage. L'évaluation de production de

biogaz montre que les fientes de poules pondeuses (Fpp) possèdent une quantité de biogaz et qualité en méthane (CH_4) plus importantes, ce qui explique son choix.

Les différences entre types d'élevage expliqueraient alors les différences observées aussi bien pour la production de biogaz que les valeurs agronomiques. Les poules pondeuses séjournent généralement plus longtemps que les autres types d'élevage, de ce fait, les excréments subissent une phase de pré-compostage plus longue dans des conditions d'humidité et de température convenables. Les Fpp pré-compostés favorisent alors la phase suivante de méthanisation. Cependant, les paramètres agronomiques mesurés sur les plantes fertilisées avec les digestats de Fpp (D_Fpp) étaient inférieurs à ceux des fientes bruts (Fpp), alors qu'il est connu que la méthanisation favorise l'accumulation des formes azotées (Abouelenien, Fujiwara, Namba, Kosseva, & al., 2010) après production de gaz riches de carbone et hydrogènes (CH_4 ; CO_2..). Ces différences peuvent s'expliquer par un temps de séjours relativement longs des fientes. Nous pouvons observer l'effet des traitements selon le gradient suivant :

Fpp > BV/Fpp > D-Fpp > D-BV/D-Fpp > NPK > BV > D-BV > T0.

Néanmoins il y a plusieurs avantages de passer par la phase de production de biogaz avant l'utilisation des fientes comme bioengrais :

- Production d'énergie par le biogaz, qui peut être utilisée pour l'irrigation ou le chauffage dans les exploitations familiales en milieu rural,
- La réduction des risques sanitaires liés à l'utilisation directe de déchets et d'excréments dans l'environnement,
- Une économie d'eau, les digestats riches en eau favorisent l'espacement des cycles d'arrosage,
- Le développement des chaines de valeur liée à la production et la commercialisation des bioengrais dans les zones comme Sangalkam.

Ainsi dans un contexte de sécurité alimentaire et de réchauffement climatique, le développement de biogaz peut être une alternative durable pour à la fois produire de l'énergie et de bioengrais pour la restauration des terres dégradées.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

I. CONCLUSION

Une énorme quantité de déchets organiques est produite chaque année dans les grandes zones urbaine et périurbaine de Dakar. Seule une faible fraction de ces déchets subissent un recyclage alors que des solutions efficaces, économiques et écologiques adaptées à chaque type de déchets existent pour arriver à recycler et valoriser la presque totalité de ces composés organiques. C'est dans ce contexte que nos travaux ont cherché à proposer la production de biogaz à partir de déchet organique fréquemment rencontré à Dakar et dans la zone périurbaine. La production de biogaz (méthanisation ou digestion anaérobique) représente une technologie de base qui peut valoriser les déchets organiques.

La digestion anaérobie peut transformer un véritable problème environnemental en une source d'énergie renouvelable et d'engrais. C'est le cas par exemple des macroalgues de la baie de Hann qui sont issues d'une prolifération par eutrophisation de la baie. En effet, les résultats de caractérisation des macroalgues de la baie ont démontré qu'elles possédaient des caractéristiques biochimiques intéressantes qui faisaient qu'elles avaient un potentiel biogaz meilleur que ceux du tourteau de Jatropha ou de la bouse de vache qui est classiquement utilisées pour la production de biogaz au Sénégal.

La zone périurbaine comme Sangalkam est une zone ou l'élevage est en plein extension. Ceci s'accompagne d'une production importante de déchets ou déjections d'animaux qui sont potentiellement utilisable pour la production à la fois de biogaz et de bioengrais (ou biofertilisant). Les résultats de nos enquêtes nous ont confirmés que la zone de Sangalkam est un « véritable gisement de biogaz » avec ses quantités énormes de déchets organiques à potentiel méthane élevé. Les résultats de tests montrent que les digestats de certains substrats organiques gardent toujours leur pouvoir fertilisant après leur passage par la digestion anaérobique et peuvent même substituer les engrais chimiques. C'est le cas des digestats des restes alimentaires et des fientes de volaille qui ont donné des résultats meilleurs que ceux de l'engrais chimique NPK sur la culture sous serre de céréales comme le maïs ou le sorgho. Leur utilisation permettra de promouvoir l'agriculture biologique au Sénégal. L'effet de ces digestats sur les systèmes en microjardin est positif sur la culture de la laitue et de la menthe, mais reste relativement faible comparer à l'effet induit par des apports de macro ou micro qui sont des engrais chimiques. Cependant, cela n'exclut pas la possibilité de trouver des digestats

avec des concentrations beaucoup plus adaptées au microjardinage. Quant aux digestats des macroalgues, l'excès de sel marin diminue sa qualité en temps que bioengrais. Cependant, les travaux se poursuivent pour la recherche des meilleurs couples digestats-plantes.

Tous les types de substrat étudié dans cette thèse (bouse de vache, fientes de volaille, restes alimentaires, macroalgues) peuvent être valorisés à travers la méthanisation et ainsi éviter le fait de les détruire (soit par entassement à Reubeus ou par calcination sur place) avec dégagement de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère contribuant ainsi au réchauffement climatique.

II. PERSPECTIVES

D'après les conclusions tirées du présent travail, il est recommandé de poursuivre les recherches pour clarifier certains aspects des points majeurs soulevés. Les perspectives envisageables en prolongement direct de cette thèse concernent 3 objectifs importants:

- l'optimisation de la méthanisation des déchets disponibles à travers des recherches :
  - de meilleures combinaisons de codigestion pour un bon rendement en biogaz et biofertilisant,
  - d'une boue d'inoculum permettant de réduire les temps d'incubation des BMPs

- modélisations de biodigesteurs plus adaptés aux conditions de notre pays,

- de même, une vérification sur site des pouvoirs fertilisants des digestats, ce site sera en même temps une plateforme de tests, de démonstration et de formation des acteurs et population concernés.

Les perspectives qui se dégagent de ces travaux de thèse pourront faire l'objet de projet de recherche et son exécution dans le cadre de mémoire de masters ou thèse futurs au sein de l'équipe de recherche de l'ISRA-IRD-UCAD.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y., Kosseva, M., & al. (2010). *Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle 101(16) pp. 6368–6373.* Récupéré sur Bioresource technology, Elsevier,: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410005481

Actualités locales - Focus. (2011, Juin 14). *Le biodigesteur pour mettre fin aux calvaires des femmes et ...* Consulté le 2015, sur http://ouaga-ca-bouge.net/Le-biodigesteur-pour-mettre-fin aux calvaires des femmes et ...

Adelekan, B. A. (2012). Cassava as a Potent Energy Crop for the Production of Ethanol and Methane in Tropical Countries. *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering 4(1)* , 25-32.

ADEME. (1999). *Les installations de stockage de déchets ménagers et assimilés : techniques et recommandantions.* Paris: Ademe Editions.

ADEME; Gaz de France; Solagro. (2001). *La valorisation du biogaz en Europe : Contexteréplementaire, fiscal, économique et politique.* Paris: ADEME ed.

Adler, E. (2009). Le biométhane, une énergie naturelle renouvelable qui a fait ses preuves. *http://www.aconsult.fr/* , pp. 1-6.

AFNOR. (2010). Norme U. Paris: Tour Europe.

ALCEN. (2015). *Connaissance des Energies.* Consulté le 2015, sur La Méthanisation: http://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/methanisation

ALMANSOUR, E. (2011, Decembre 11). *Bilans énergétiques et environnementaux de filières biogaz :Approche par filière-type.* Consulté le 2015, sur http://ori-oai.u-bordeaux1.fr/pdf/2011/ALMANSOUR_ESSAM_2011.pdf

ANSD. (2011). *Rapport définitif sur la situation économique et sociale au Sénégal* . Dakar.

APHA (American Public Health Association). (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.* Washington: (L. S. Clesceri, A. E. Greenberg & R. R. Trussell, eds), 18th edition. .

Ballerini, D., Alazard-Toux, N., & Olivier, A. (2006). *Les biocarburants : (état des lieux, perspectives et enjeux du développement).* Paris: Ed. Technip, Paris, FRANCE (Monographie) p. 348 ISBN 2-7108-0869-2.

Barone, R. (1984). *Anatomie comparée des Mammifères domestiques. Tome3 : Splanchnologie.* Paris: Vigot.

Bastianoni, S., Coppola, F., Tiezzi, E., Colacevich, A., Borghini, F., Focardi, S., et al. (2008). Biofuel potential production from the Orbetello lagoon macroalgae: A comparison with sunflower feedstock. *Biomass and Bioenergy 32 (7)* , 619-628.

Bayer, A. (2004). Récupéré sur http://www.lfu.bayern.de

Bitzer, C. C., & Sims, J. T. (1988). Estimating the availability of nitrogen in poultry manure through laboratory and field studies. . *J. Environ. Qual.* , 17, 47-54.

Borowski, S., & Weatherley, L. (2013). Co-digestion of solid poultry manure with municipal sewage sludge. *Bioresource Technology 142* , 345–352.

Chapman, V. J., & Chapman, D. J. (1980). Sea vegetables (algae as food for man). In: Seaweeds and their uses. *Chapman & Hall (ed.), London* , 62–97.

CISSE, O., & al. (2014). Evaluation du pouvoir méthanisant des déchets organiques collectés dans la zone périurbaine de Dakar : cas des fientes de poulets. 53.

Costa, J., Gonçalves, P., Nobre, A., & Alves, M. (2012). Biomethanation potential of macroalgae Ulva spp. and Gracilaria spp. and in co-digestion with waste activated sludge. *Bioresource Technology, 114* , 320-326.

Dacy-Vrillon, B. (1993). Nutritional aspects of the developing use of marine macroalgae for the human food industry. *International journal of Food Science and Nutrition 44* , 23-35.

Degrémont, S. (1989). *Mémento technique de l'eau.* Rueil-Malmaison: Degrémont Suez 9e édition.

Demortreux, J., Fulcheri, P., Sow, I., & Sarr, S. (2011). *Etude diagnostic du village de noflaye (NDIAKHIRATE NDIOBENE)* . Récupéré sur

http://www.urgenceafrique.org/sites/default/files/temoignages-rapports-files/etude_diagnostic_du_village_de_noflaye_.pdf

Devappa, R. K., Makkar, H. P., & Klaus Becker, K. (2010). Biodegradation of Jatropha curcas phorbol esters in soil. *J. Sci. Food Agric. 90* , 2090–2097.

Diallo, O. (2007, Août Septembre). Problématique de la gestion des déchets solides urbains à Dakar. *in revue VIE N°1* .

Dunod, R. (1975). L'analyse de l'eau, vol. 1. Dans B. L. Jean Rodier. Paris: Edition dunod éditeur de savoirs, isbn 9782100072460.

EDE-Sénégal. (2013, Septembre). Revue technique et économico-financière des installations de Biogaz au Sénégal. p. 77.

Edwards, D. R., & Daniel, T. C. (1992). *Environmental impacts of on-farm poultry waste disposal—A review.* Récupéré sur Bioresource Technology: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/096085249290094E.

Elbl, J., Plosek, L., & Kintl, A. (2013). *Effect of organic-waste compost addition on leaching of mineral nitrogen from arable land and plant production.* Récupéré sur World Academy of ...: http://www.waset.org/publications/17402

Enea Consulting, 2. (2012 , juin). *le biomethane : enjeux et solutions techniques* . Récupéré sur http://www.enea-consulting.com/wp-content/uploads/2015/05/ENEA-Consulting-Le-biomethane.pdf

FAO. (2010). *Les Microjardins au Sénégal.* Dakar.

FAO-STAT . (2013 , août 12). Agriculture et développement, 1. *Division de la Statistique* , pp. 47-55.

Farinet, J. L., & Copin, Y. (1994). *Dossier traitement des déchets : Transpaille, plant en mottes, lagunage.* Bambey-Sénégal.

Fricke, K., Santen, H., Wallmann, R., Hüttner, A., & Dichtl, N. (2007). Operating problems in anaerobic digestion plants resulting from nitrogen in MSW. *Waste Management.* .

Futura-science . (2015). Récupéré sur http://www.futura-sciences.com/

GAYE, M., & NIANG, S. (2010). *Manuel des bonnes pratiques de l'utilisation saine des eaux usées dans léagriculture urbaine.* Dakar: ENDA-RUP FAO.

Giroux, M., & Audesse, P. (2004). Comparaison de deux méthodes de détermination des teneurs en carbone organique, en azote total et du rapport C/N de divers amendements organiques et engrais de ferme. *AGROSOL-PRODUCTIONS ANIMALES 15 (2)* , 4.

Godbout, S., Verma, M., Larouche, J., Potvin, L., Chapman, A., Lemay, S., et al. (2010). Methane production potential (B0) of swine and cattle manures--a Canadian perspective. *Environmental technology, 31* , 1371– 1379.

GRET. (2006). La gestion des ordures ménagères dans les villes secondaires du Sénégal. p. 94.

GTZ. (1989). biogas plants in animal husbandry. 134.

Habig, C., & Ryther, J. H. (1984). Some correlations between substrate compositions and biogas yields. *Symposium Papers, Energy from Biomass and Waste, Institute of Gas Technology, Chicago 8,* , 817-832.

Haynes, R. J., & Williams, P. H. (1993). *Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem.* Récupéré sur http://www.sciencedirect.com/science/bookseries/00652113

HEEGDE, T. F., DIOP, L., & UKKERMAN, R. (2008). *Rapport sur l'étude de faisabilité du Programme national de biogaz domestique au Sénégal ;.* Dakar: Agence Sénégalaise d'Electrification Rurale.

IEA. (2009). Energy sector methane recovery and use – the importance of policy World Bank-1987 . *Household energy handbook* .

INERIS. (2006). *Etude comparative des dangers et des risques liés au biogaz et au gaz naturel.* Paris: Ministère de l'écologie et du développement durable.

Ivanov, A. A., Matrosova, L. E., & Trelasov, M. Y. (2013). Récupéré sur Producing and applying poultry manure-based biofertilizer.: http://agris.fao.org/agris-search.do?recordID=Ru2014000101

Jard, G., Jackowiak, D., Carrère, H., Delgenes, J., Torrijos, M., Steyer, J., et al. (2012). Batch and semi-continuous anaerobic digestion of Palmariapalmata: Comparison with Saccharinalatissima and inhibition studies. . *Chemical Engineering Journal 209* .

Journal officiel. (2011). Récupéré sur http://www.jo.gouv.sn/

Julien, J. C. (2008, décembre). Description de Codium tomentosum,.

Lamptey, J., & al. (1990). Bioenergy. *IDRC/UNU* , 210.

Lohmann, M. (1995). Flore et faune du littoral . Chantecler, ISBN 2-8034-2778-8.

M'Sadak, Y., & Ben M'Barek, A. (2013). Caractérisation qualitative du digestat solide de la biométhanisation industrielle des fientes avicoles et alternative de son exploitation agronomique hors sol. *Revue des Energies Renouvelables 16(1)* , 33-42.

Mabeau, S., & Fleurence, J. (1993). Seaweed in food products : biochemical and nutritional aspects. . *Trends in Food Science & Technology.*

MAIGUIZO-DIAGNE, H., NDIAYE, N. A., NDIAYE-CISSE, M. F., NDOUR-BADIANE, Y., MASSE, D., TORRIJOS, M., et al. (2015). High methane potential of two green macroalgae (Ulva lactuca and Codium tomentosum) as compared to inland feedstocks available in Senegal. *Water Science and Technology* .

Malherbe, S., & Cloete, T. E. (2002). Lignocellulose biodegradation: Fundamentals and applications. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology 1(2)* , 105-114.

Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and SustainableEnergyReviews 45* , 540-555.

Ministère de l'énergie. (2011). Récupéré sur http://www.gouv.sn/

Ministère de l'Energie. (2011). *Lettre de Politique de Développement du Secteur de l'Energie* . Dakar.

Moletta, R. (2002). *Etude bibliographique sur la méthanisation de déchets organiques.* Villeurbanne: Association RECORD.

Moletta, R. (2011). *La méthanisation (2e Edition).* Paris: Editions TEC et DOC.

Moletta, R. (2011). *Technologie de la méthanisation de la biomasse Déchets ménagers et Agricoles.* La méthanisation 2e édition.

Morand, P., & Merceron, M. (2005). Macroalgal population and sustainability . *Journal of Coastal Research, 21 (5)* , 1009–1020.

Nafisa, A., Kurchania, A. K., & Swati, B. (2010). Bio-methanisation of Jatropha curcas defatted waste. *Journal of Engineering and Technology Research, 2(3)* , 038-043.

ONAS. (2013). *Rapport final biogaz.* Consulté le 2015, sur http://www.riaed.net/IMG/pdf/ONAS_Rapport_Final_Biogaz_novembre2013.pdf

Paré, T., Dinel, H., Schnitzer, M., & Dumontet, S. (1998). Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper. *Biology and fertility of soils, 26, 3* , 173-178.

Poulleau, J. (2002). *Caractérisation des BIOGAZ-Bibliographie Mesures sur sites.* INERIS, DRC-02-27158-AIRE-n°316b-JPo.

Raposo, F., Rubia, M., Fernández-Cegrí, V., & Borja, R. (2012). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 16* , 861-877.

RECORD . (2002). Aide à la définition des déchets dits biodégradables, fermentescibles, mèthanisables. *no00-0118/1A* , p. 153.

RECORD. (2009). Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse. *RECORD n°07-0226/1A* , p. 253 .

Ruíz, C., Torrijos, M., Sousbie, P., Lebrato Martínez, J., Moletta, R., & Delgenès, J. P. (2002). Treatment of winery wastewater by an anaerobic sequencing batch reactor. *Water Science and Technology. 45 (10)* , 219-224.

Ruíz, C., Torrijos, M., Sousbie, P., Martinez, J. L., & Moletta, R. (2001). The anaerobic SBR process : basic principles for design and automation. *Wat. Sci. Techl., 43 (3)* , 201-208.

Said-Pullicino, D., Erriquens, F. G., & Gigliotti, G. (2007). Changes in the chemicals characteristics of water-extractable organic matter during composting. *Bioresource technology 98-9* , 1822-1832.

Senelec . (2015). Récupéré sur http://www.senelec.sn/content/view/12/49/

SENELEC. (1999). *L'électricité au Sénégal, la Tarification.* Consulté le 2015, sur Commité de régulation du secteur de l'électricité: http://www.crse.sn/crse.php?pg=4tarification

Shimadzu Corporation. (2004). *User Manuel SSM-5000A for TOC-V series.* Kyoto-Japon.

Singh, A., Nigam, P. S., & Murphy, J. D. (2011). Renewable fuels from algae: an answer to debatable land based fuel. *Bioresource Technology, 102(1)* , 10-16.

Soest, V. P., Robertson, J. B., & Lewis, B. A. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. . *Journal of dairy science.*

Sokona, Y. (2000). Widening access of rural energy services in Africa: What perspectives from the multi-functional platform case in Mali. *Business Briefing: Global power engineering & Technology* .

SOLAGRO ; ADEME; GDF. (2001). La valorisation du biogaz en Europe / Contexte règlementaire, fiscal, économique et politique. *BIOG0100, SOLAGRO,* , p. 55.

SOULE, B. G., & GANSARI, S. (2010). La dynamique des échanges régionaux des céréales en Afrique de l'Ouest. *Michigan State University* .

Standard Methods . (1992). Oil and Grease : Introduction APHA 5520 A ; Soxhlet. *Standard Methods 18th edition* .

SYLLA, M. (2013). *le biogaz une solution du gouvernement du Sénégal au problème d'accès à l'énergie domestique.* Dakar.

Torrijos, M., Thalla, A., Sousbie, P., Bosque, F., Delgenes, J., al., et al. (2008). Anaerobic digestion of residues from production and refining of vegetable oils as an alternative to conventional solutions. *Water Science & Technology, 58 (9)* , 1871–1878.

ValBiom-ULC. (2010). *Microsoft Word - 2010Digestat_rapport_Surice.doc.* Consulté le 2015, sur Valeur fertilisante de digestats issus de la biométhanisation en comparaison avec un lisier bovin.: http://www.centre-pilote-mais.be/files/download/digestat10.pdf

Vanegas, C., & Bartlett, J. (2013). Green energy from marine algae: biogas production and composition from the anaerobic digestion of Irish seaweed species. *Environmental Technology , 34(15)* , 2277-2283.

Vasanthi, D., & Kumaraswamy, K. (2000). Effects of manure-fertilizer schedules on the yield and uptake of nutrients by cereal fodder crops and on soil fertility. . *Journal of the Indian Society of Soil Science. 48 No. 3* , 510-515.

Ward, A. J., Lewis, D. M., & Green, F. B. (2014). Anaerobic digestion of algae biomass: a review. *Algal Research, 5,* , 204-214.

Wikipédia. (s.d.). Récupéré sur https://fr.wikipedia.org/wiki/

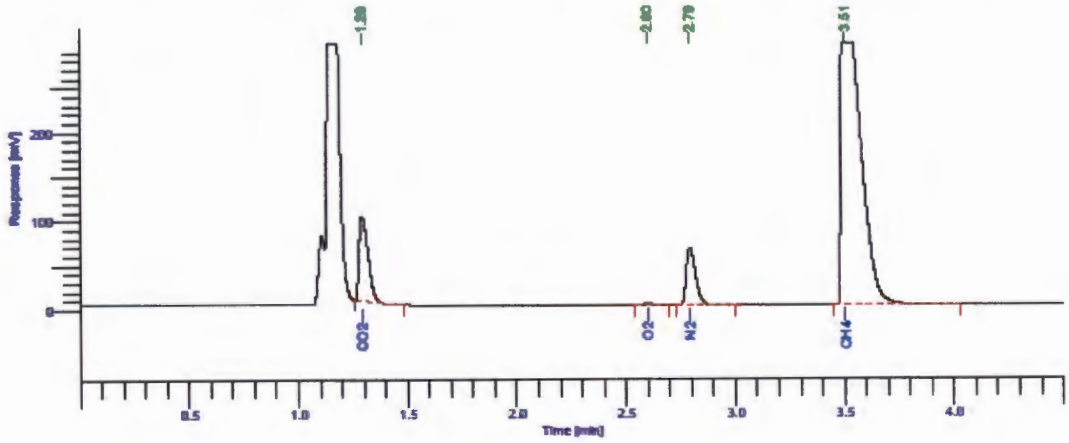
Yen, H. W., & Brune, D. (2006). Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. . *Bioresource Technology 98* , 130–134.

ANNEXES

Annexe 1 : Rapport de Gaz d'une analyse de biogaz par un micro-Chromatographie à phase gazeuse

Software Version	: 6.3.2.0646	Date	: 10/15/2012 4:28:05 PM
Sample Name	: R1ciel	Data Acquisition Time	: 10/15/2012 12:12:05 PM
Instrument Name	: GAZ	Channel	: B
Rack/Vial	: 0/0	Operator	: lcprocess
Sample Amount	: 1.000000	Dilution Factor	: 1.000000
Cycle	: 1		

Result File : C:\GC PERKIN\GAZ\DATA\Halima\15102012_HMD_Reacteurs_001.rst
Sequence File : C:\GC PERKIN\15102012_HMD_Reacteurs.seq



RAPPORT GAZ

Component Name	Time [min]	Area [uV*sec]	Height [uV]	Quantity of mol [µmol]	Percentage [%]	Injected vol [µL]
CO2	1.293	270460.10	98007.17	2.2848	28.12	198.8
O2	2.599	8174.50	3006.68	0.0283	0.35	198.8
N2	2.794	198107.26	64916.55	0.9914	12.20	198.8
CH4	3.506	2238004.90	410306.40	4.8203	59.33	198.8
		2714746.75	574236.81	8.1248	100.00	

Report stored in ASCII file: C:\GC PERKIN\GAZ\DATA\Halima\15102012_HMD_Reacteurs_001.TXT

Annexe 2 : Comment interpréter une courbe de production de biogaz pour un batch

Nous avons fixé la fin de la réaction au temps à partir duquel la vitesse de production de biogaz ne différait pas de la valeur mesurée pour la seule respiration endogène (production de biogaz quand le substrat apporté a été entièrement éliminé).

A partir de ces courbes, il est possible de déterminer deux paramètres (**Figure 58**) :

- Le temps nécessaire pour éliminer la matière organique apportée ou temps de la réaction,
- Le volume de biogaz produit. Cette valeur sera utilisée pour calculer le potentiel méthane, après soustraction du volume produit par la seule respiration endogène.

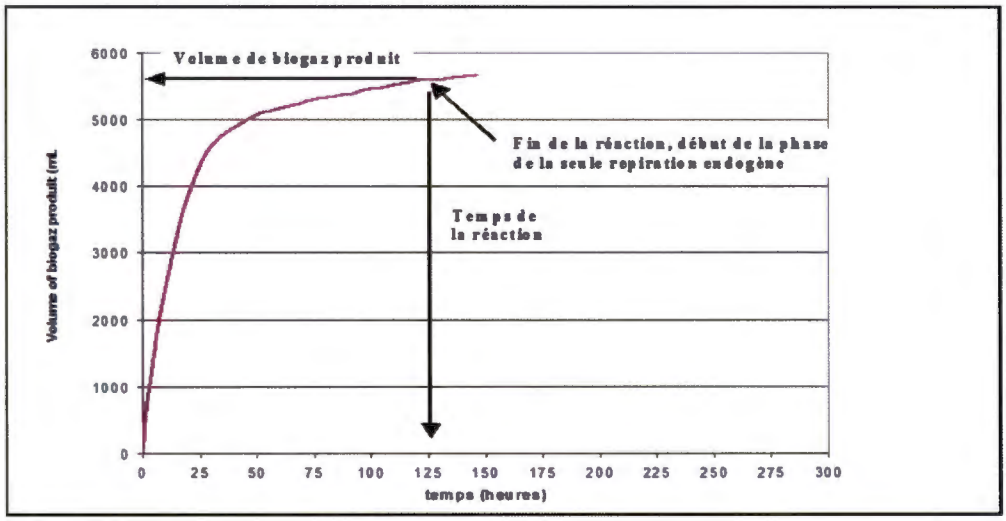
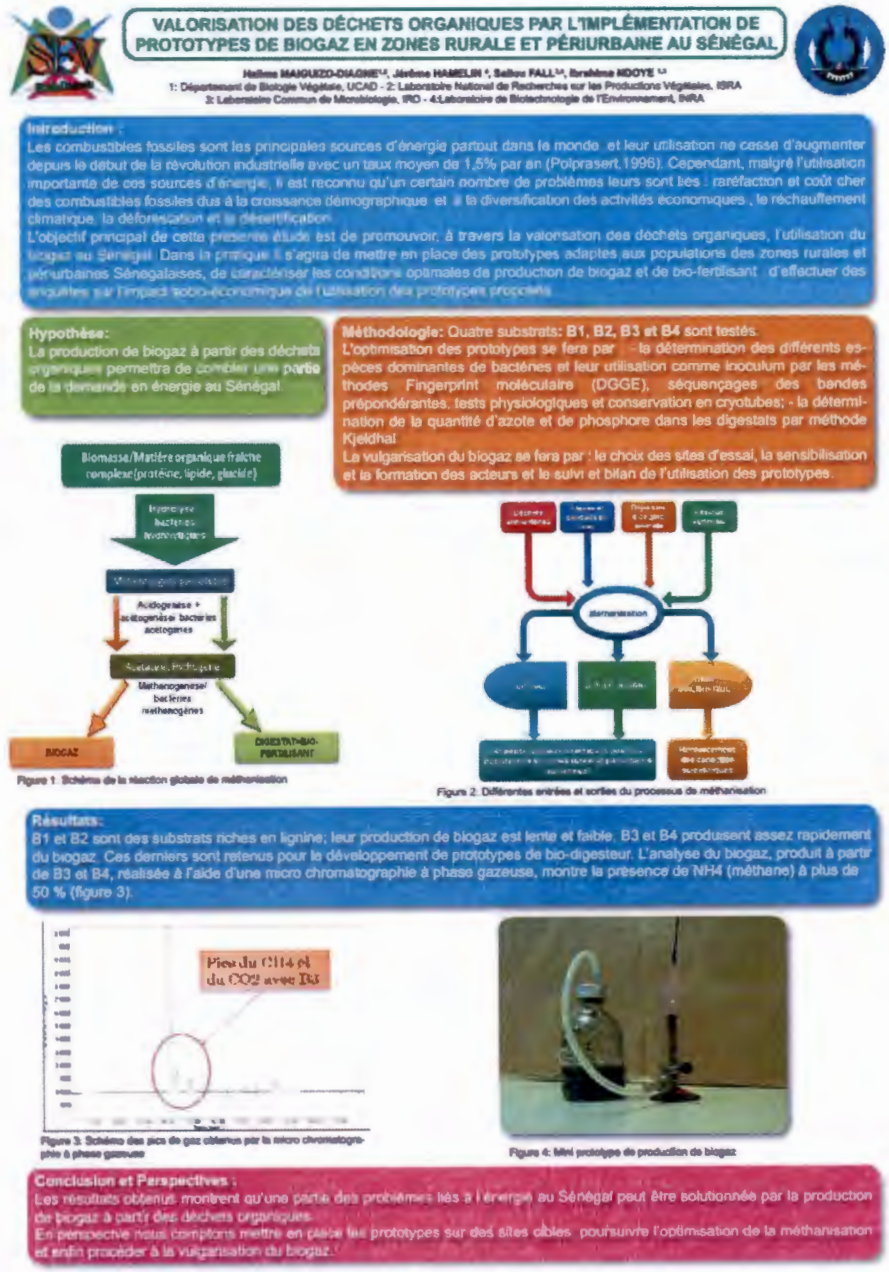


Figure 58 : Comment interpréter une courbe de volume de biogaz produit au cours d'un batch

Annexes 3 : les Posters

Poster 1 : Doctoriales ED-SEV UCAD (Troisième édition) Dakar 2012



Poster 2 : Doctoriales de l'Institut français (Première édition) Dakar 2013

VALORISATION DES DÉCHETS ORGANIQUES POUR LA PRODUCTION DE BIOGAZ ET BIOFERTILISANT EN ZONES RURALE ET PÉRIURBAINE AU SÉNÉGAL

Halima MAIGUIZO-DIAGNE[1,2]; Saliou FALL[2,3], Ibrahima NDOYE [1,3], Jérôme HAMELIN [4]

1: Département de Biologie Végétale, UCAD - 2: Laboratoire National de Recherches sur les Productions Végétales, ISRA 3: Laboratoire Commun de Microbiologie, IRD - 4:Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, INRA

INTRODUCTION

De nos jours, les combustibles fossiles constituent les principales sources d'énergie à traves le monde. Cependant, d'importants problèmes sont liés à leur forte exploitation (épuisement des réserves, coût énergétique élevé, réchauffement climatique, déforestation, désertification...).
Par ailleurs, nos sociétés génèrent chaque année plusieurs millions de tonnes de déchets organiques. Leur valorisation par méthanisation pourrait constituer une source d'énergie renouvelable alternative aux combustibles fossiles.
L'objectif principal de cette étude consiste à promouvoir, à travers la valorisation des déchets organiques, l'utilisation du biogaz au Sénégal. Dans la pratique il s'agira de : i) déterminer le potentiel méthane des déchets organiques disponibles et le pouvoir fertilisant de leurs digestats ; ii) mettre en place des centres de démonstration pour les populations au Sénégal.

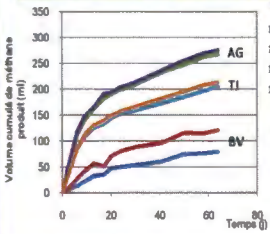
HYPOTHÈSE

Le biogaz et le digestat produits par méthanisation à partir des déchets organiques et résidus de culture est une alternative durable pour réduire la dépendance énergétique et améliorer la fertilité des sols au Sénégal.

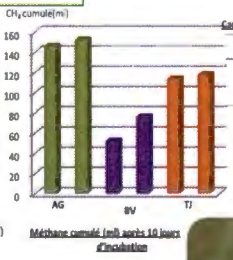
MÉTHODOLOGIE

Détermination du potentiel méthane des substrats par :
Tests BMP ; Réacteurs en mode fed-batchs.
Caractérisation biochimique des substrats et digestats : Carbone total par la méthode du TOC-V ; Azote total par la méthode de Kjeldhal ; Phosphore par spectrophotométrie ; Lipides par une extraction par solvant ; Sodium et Potassium par photométrie de flamme.
Détermination du pouvoir fertilisant des digestats : tests sous serre avec digestats solides sur des espèces céréalières ; tests sur planche avec du digestat liquide sur culture maraichère ; tests au laboratoire pour la détermination de la biodégradabilité.

RESULTATS ET DISCUSSIONS



Courbes de production de méthane des substrats étudiés



Méthane cumulé (ml) après 10 jours d'incubation

Caractérisation biochimiques des substrats étudiés

Les substrats AG, BV et Tj produits annuellement en très grande quantité au Sénégal, ont répondu favorablement à la réaction de méthanisation. Cependant, les substrats AG et TJ présentent des potentiels méthanes 2 à 3 fois supérieurs à celui du substrat BV couramment utilisé dans les digesteurs anaérobiques.
La composition chimique des différents substrats préconise la mise en place de co-digestions pour l'obtention de digestat efficient en vue d'une meilleure fertilisation des sols.

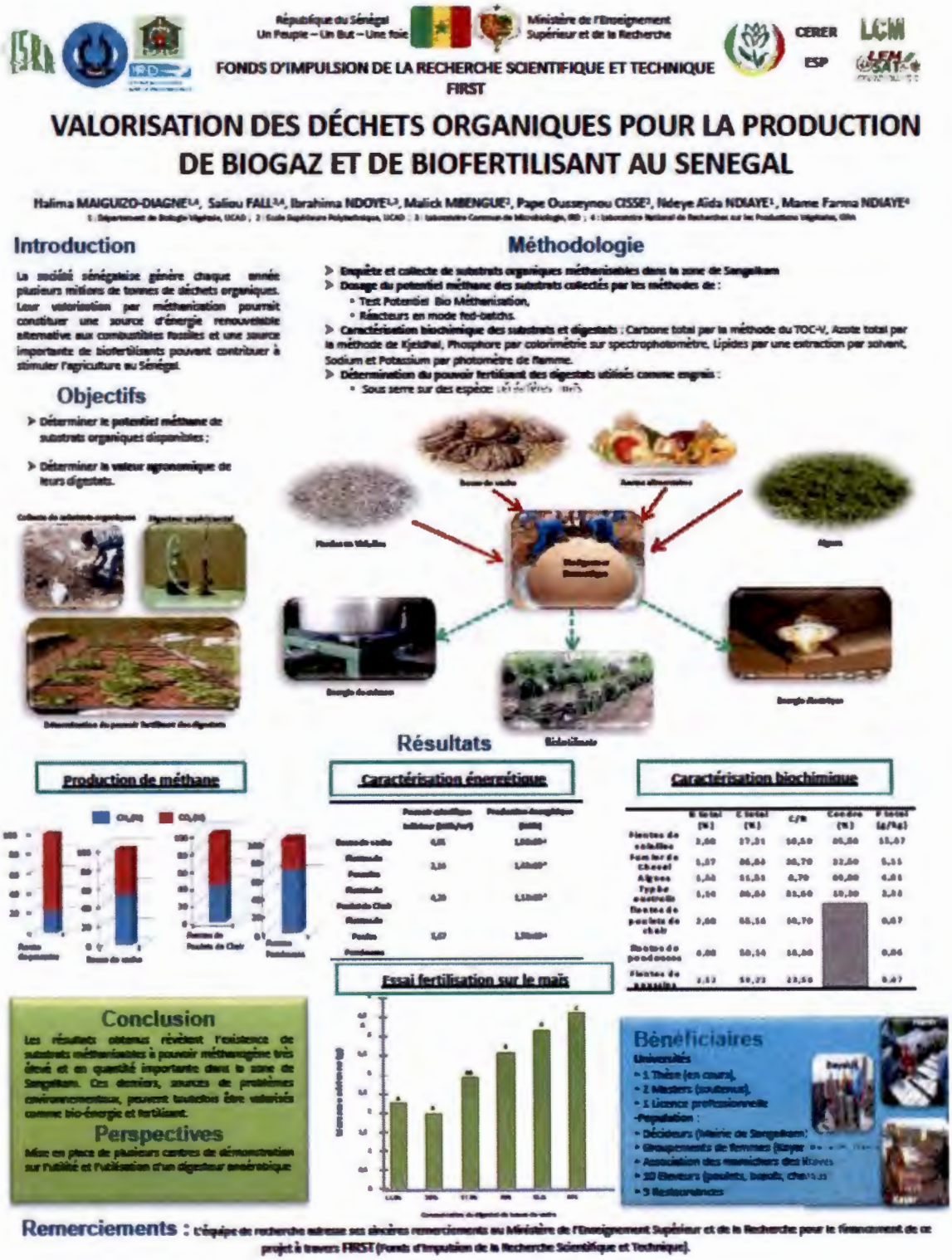
CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus révèlent l'abondance des « gisements » de biogaz constitué par les déchets organiques au Sénégal. Ces derniers, sources de problèmes environnementaux, peuvent toutefois être valorisés comme énergie et fertilisant

Perspectives
- Mise en place de plusieurs centres de démonstration sur l'utilité et l'utilisation d'un digesteur anaérobique en zones rurales et périurbaines.

Références :
C. Ruiz, M. Torrijos, P. Sousbie, J. Lebrato Martinez, R. Moletta, J.P. Delgenès. (2002). Treatment of winery wastewater by an anaerobic sequencing batch reactor. Water Science and Technology, Vol. 45, N° 10, pp 219-224.
R.R. Dague, C.E. Habben and S.R. Pidaparti. (1992). Initial studies on the anaerobic sequencing batch reactor. Wat. Sci. Tech., 26(9-11), 2429-2432.

Poster 3 : Journées scientifiques du CAMES (Deuxième édition), Dakar 2015



Annexes 4 : Fiches d'enquêtes (Sangalkam et environs)

INSTITUT SENEGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES
Route des Hydrocarbures, Bel-Air
BP : 3120 DAKAR

Tél. : (221) 33 859 17 36
Fax : (221) 33 832 24 27
Web : http://isra.sn

Date.....

Projet FIRST BIOGAZ : Production d'énergie renouvelable (Biogaz) pour réduire la dépendance énergétique et la vulnérabilité des populations à faible revenu à Sangalkam

N°.....

Description de la source

Prénom : .....
Nom : .....
Tél : .....
eMail : .....
Adresse complète .....
.....
.....

Objectif : l'enquette est destinée à estimer les stocks et la qualité d'ordures produites dans la communauté rurale de Sangalkam dans une perspective de trier et de valoriser les substrats organiques en BIOGAZ

I. Description du foyer de production d'ordures

Localité GPS..... ☐ Sangalkam ☐ Site 2 ☐ Site 3

Type de dechets ☐ Ordure ménagère Urbains ☐ Elevage ☐ Restauration ☐ Artisanat ☐ Industrie ☐ Agricole ☐ Autres

Description activité professionnelle .....

Nombre de personnes .....

II. Description de la production de déchets organiques*
cocher la case et poursuivre selon le type commentaire correspondant

	OUI	NON	Commentaires
Est-ce que vous triez vos ordures ?	☐	☐	.....
Si OUI, quelles utilisations			.....
			.....
Quelle fréquence de ramassage des ordures / sem.?			.....
Connaissez vous le BIOGAZ ?	☐	☐	.....
Etes-vous intéressés à l'utiliser ?	☐	☐	

Pour quelle application ? ☐ Cuisson ☐ éclairage ☐ Autres

III. Utilisation de fertilisants organiques

	OUI	NON	Commentaires
Utilisez-vous des fertilisans organiques	☐	☐	.....
Quel type de fertilisant organique ?			.....

INSTITUT SENEGALAIS DE RECHERCHES AGRICOLES
Route des Hydrocarbures, Bel-Air
BP : 3120 DAKAR

Tél. : (221) 33 859 17 36
Fax : (221) 33 832 24 27
Web : http://isra.sn

Date.....
N°.....

Comment vous optenez les fertilisants ? .....
A quel prix ? .....

	OUI	NON	
Connaissez-vous les digestats	☐	☐	.....
Avez-vous déjà utilisé les digestats	☐	☐	.....

IV. Suivi masse d'ordure (en Kg)

N°	Date (Jour/mois/année)	Masse totale	Masse Organique	Masse minérale	Autres
01					
02					
03					
04					
05					
06					
07					
08					
09					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					