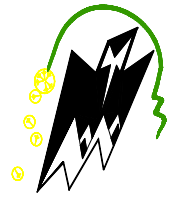


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi ousou
Faculté du génie de la construction
Département de Génie Civil



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme Master 2 en
Génie Mécanique
Option
Énergétique

Thème :

*Système d'alimentation énergétique d'une ferme
par combinaison digesteur anaérobie et éolienne*

Proposé et dirigé par :

M^r : AIT AIDER Aomar

Réalisé par :

M^r : IGUENANE RABAH

Année 2011/2012

DEDICACE

Je dédie Ce Travail à:

Je rends grâce à dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience d'avoir pu terminer mes études.

A ma chère et tendre mère

A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

A mon cher père

A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ; qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi.

A mes sœurs

A qui je souhaite toutes les réussites et le bien être.

A mes frères

En témoignage de mon profond amour et respect, a qui je souhaite le succès et le bonheur.

A mes amis

A tous mes ami(e)s, tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

Remerciements :

Avant tout, je remercie le DIEU le tout - puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je remercie ensuite mes parent et mes frères, mes sœurs pour leurs soutient.

Cette thèse ne pourrait pas avoir été menée à bien sans la confiance, la patience et la générosité du Monsieur AIT AIDER Aomar. Me remerciements particuliers pour sa gentillesse et sa rigueur. On lui apporte mon plus sincères gratitudees pour le temps précieux qu'il m'accordé.

Mon remerciement aussi aux enseignants qui m'ont enseigné durant les années du cursus.

Je terminerai par remercier tous mes amis, notamment

Fraxene, Amirouche, Nadjib, HADJ ALI Jugurta,

MOULOUD.....ainsi que tous les amis

du département Mécanique.

Sommaire

I.1. Introduction générale.....	1
---------------------------------	---

Chapitre I : Généralités et définitions

I.1. Introduction.....	2
I.2. Les énergies renouvelables.....	2
I.2.1. L'énergie hydraulique.....	3
I.2.2. L'énergie de la géothermie.....	3
I.2.3. L'énergie solaire.....	4
I.2.4. La biomasse	4
I.3. La digestion anaérobie	5
I.3.1.Histoire	5
I.3.2. Définition La digestion anaérobie.....	5
I.3.3. Définition milieu anaérobie.....	5
I.3.3.1. Mode respiratoire	5
I.3.3.2. Les facteurs physico-chimiques.....	6
I.3.2.3.1. Besoin en eau	6
I.3.3.3.2. La température	6
I.3.3.3.3 Le pH	6
I.3.4. Source d'énergie	6
I.3.5. Microbiologie de la digestion anaérobie	7
I.3.6. Condition de la digestion anaérobie	8
I.3.6.1. Les paramètres physico-chimiques de la fermentation	8
I.3.6.1.1. Température	8
I.3.6.1.2. ph.....	10
I.3.6.1.3. Oxygénation et teneur en eau.....	11
I.3.6.2. Les paramètres technologiques	11
I.3.6.2.1charge organique entrante.....	11
I.3.6.2.2. Le temps de rétention hydraulique.....	11
I.3.6.3. Quelles matières organiques peut-on méthaniser	12
I.3.6.3.1. Les déjections animales.....	12
I.3.6.3.2. Production végétale.....	12
I.3.6.3.3. Industrie alimentaire	12
I.3.6.4. Les systèmes de digestion.....	12
I.3.6.4.1. Discontinu.....	12
I.3.6.4.2. Semi-continu.....	13
I.3.6.4.3. Continu.....	13
I.3.7. Avantages et inconvénient de la digestion anaérobie.....	14
I.3.7.1. Avantages	14
I.3.7.2. Inconvénients	14
I.3.8. Biométhanisation et énergie.....	14
I.3.9. Le produit obtenu, le biogaz.....	14

I.3.9.1 Définition.....	14
I.3.9.2. composition de biogaz.....	15
I.3.9.3. Valeur énergétique du biogaz.....	16
I.3.9.4. Domaine d'utilisation du biogaz.....	16
I.3.9.5. Biogaz et environnement.....	17
I.3.9.6. Les techniques d'épuration.....	17
I.3.9.7. Stockage.....	18
I.3.9.7.1. Conditions (de stockage) faut-il stocker le biogaz	18
I.3.9.7.2. Gazomètres.....	18
I.3.9.7.3. Réservoirs sous pression.....	19
I.3.9.8. Comparaison entre biogaz, gaz naturel et gaz de pétrole ...	19
I.3.9. Le digesteur anaérobie.....	19
I.3.9.1. Définition de digesteur.....	19
I.3.9.2. Les caractéristique des digesteurs	20
I.3.9.3. Choix et dimensionnement d'un digesteur.....	20
I.3.9.4. Type de digesteur	20
I.3.9.4.1. Les digesteurs à cellules libres.....	20
I.3.9.4.1.1. Digesteurs infiniment mélangés.....	21
I.3.9.4.1.2. Digesteurs à contact.....	21
I.3.9.4.2. Les digesteurs à biofilm	22
I.3.9.4.2.1. Réacteurs à lit fixe.....	22
I.3.9.4.2.2. Réacteurs à deux étages.....	23
I.3.9.4.3. Digesteur infiniment mélangé.....	24
I.3.10.6. Paramètres techniques des digesteurs	24
I.3.10.7. Les facteurs de contrôle d'un digesteur.....	24
I.3.10.7. Les facteurs de contrôle d'un digesteur.....	24
I.3.10.8. Principale cause d'un déséquilibre	25
I.4. Energie éolienne	25
I.4.1. Histoire des éoliennes	25
I.4.2. Définition de l'énergie éolienne.....	25
I.4.4. Principe de l'éolienne	25
I.4.5. Constitution d'une éolienne.....	26
I.4.6. Les différents types d'éoliennes.....	27
I.4.6.1. Eolienne à axe vertical.....	27
I.4.6.2. Eolienne à axe horizontal.....	29
I.4.7. Les différents d'éolienne en fonction de la vitesse.....	30
I.4.7.1. Eoliennes à vitesse lentes.....	30
I.4.7.2. Eoliennes a vitesse rapides.....	30
I.4.8. Principe de fonctionnement d'une pale d'éolienne.....	31
I.4.8.1. Modélisation du vent.....	31
I.4.8.1. Comment le vent se forme-t-il	32
I.4.8.3. Système de mesure de vent	32
I.4.8.4. Principales utilisations du vent.....	32
I.4.8. 5.Critères de choix de l'implantation éolienne.....	33
I.4.9. Description d'une pale d'éolienne.....	35
I.4.10. Systèmes de Régulation de vitesse d'une éolienne.....	36
I.4.10. 1.Système à Décrochage Aérodynamique " Pitch ".....	36
I.4.10. 2.Système à Décrochage Aérodynamique "Stall".....	36
I.4.10. 3.Système à Décrochage Aérodynamique "Active Stall".....	36

I.4.11. Système de régulation et de production.....	36
I.4.11.1. Systèmes de freinage manuel.....	36
I.4.11.2. Systèmes de freinage automatique.....	36
I.4.11.2.1. Régulation et freinage par basculement de l'éolienne.....	37
I.4.11.2.2. Régulation et freinage par gouvernail articulé.....	37
I.4.12. Les générateurs éoliens.....	37
I.4.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	37
I.5. Conclusion.....	38

Chapitre II : Les besoins énergétique d'une ferme

II.1. Introduction	39
II.2. Objectif de l'énergie renouvelable dans la ferme.....	39
II.3. Présentation de la ferme qui fait l'objet notre étude.....	39
II.3.1. Description de la ferme.....	39
II.3.2. Etude des besoins énergétiques de cette.....	39
II.3.3. Les différentes formes d'énergies consommées sur la ferm.....	40
II.3.3.1. Les énergies directes, consommées sur le site de producton.....	40
II.3.3.2. Les énergies indirectes.....	40
II.3.4. Différents appareils utilisés dans la ferme.....	40
II.3.5. Le choix des équipements et pratiques associées aux dépenses d'énergie.....	42
II.3.6. La réduction d'énergie dans la ferme.....	42
II.3.7. Bilan de consommation d'énergétique dans cette ferme.....	43
II.3.8. Estimation de l'énergie produite par l'éolienne et le digeseur anaérobie.....	44
II.4. Le digesteur anaérobie dans la ferme.....	44
II.4.2. Système de La méthanisation à la ferme.....	44
II.4.3. Description d'une installation de digesteur anaérobie dans la ferme	45
II.4.4. Le choix de digesteur installé.....	46
II.4.5. Dimensionnement le volume de digesteur a installé.....	46
II.4.6. Les déchets à méthaniser.....	47
II.4.7. Valorisation de biogaz dans la ferme	47
II.4.8. Les avantages et les inconvénients de production de biogaz dans la ferme	47
II.5. L'éolien dans la ferme.....	48
II.5.1. Le rôle d'une éolienne dans l'exploitation agricole.....	48
II.5.2. Comment choisir l'emplacement d'une éolienne dans la ferme	48
II.5.3. Le choix de type d'éolienne pour l'installation.....	48
II.5.4. L'énergie annuelle délivrée par éolienne.....	49
II.5.5. Production Optimale d'énergie.....	49
II.5.6. Avantages et inconvénients d'une éolienne	50
II.6. Conclusion.....	51

Chapitre III : Dimensionnement de digesteur et de l'éolienne

III.1. Introduction	52
III.2. Etude théorique d'un digesteur	52
III.2.1. Installation expérimentale	52
III.2.2. Description de l'installation	52
III.2.3. Modélisation du bilan thermique a l'intérieur du digest.....	52

III.2.4. Formulation mathématique	53
III.2.5. Echangeur de chaleur	54
III.2.6. Evaluation du coefficient d'échange global d'un échangeur à.....	57
III.3. Etude théorique d'une éolienne	59
III.Énergie fourni par le vent.....	59
III.3.2. Énergie théorique récupérable par le rotor	59
III.3.3. La puissance maximale récupérable par l'éolienne.....	61
III.3.4. Rendement des composants d'une éolienne	63
III.3.5. La vitesse spécifique.....	63
III.3.6. Couple mécanique produit par l'éolienne.....	63
III.3.7. Etude aérodynamique des pales.....	64
III.3.8. Couple aérodynamique produit.....	66
III.4. Conclusion.....	67

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction	68
IV.2. Activités soutenues dans cette ferme.....	68
IV.3. La quantité de biogaz à produire.....	68
IV.3.1. Description du substrat utilisé.....	68
IV.3.2. Dimensionnement du digesteur installé dans la ferme.....	68
IV.3.3. La quantité de biogaz produite.....	69
IV.3.4. Equivalent du biogaz produit aux différents énergies classiques utilisées dans la ferme	69
IV.3.5. valorisation et conversion du biogaz dans la ferme	70
IV.3.6. L'utilisation de biogaz comme carburant pour les véhicules ou dans un réseau.....	71
IV.3.7. Les obligations qu'il faut prendre pour une installation de biogaz.....	71
IV.3.7.1. Protection contre l'explosion.....	71
IV.3.7.2. Mesures d'aération.....	71
IV.3.7.4. Fonctionnement et entretien.....	71
IV.4. Description d'une installation d'une éolienne dans la ferme.....	72
IV.4.2. Description du climat éolien.....	73
IV.4.2.1. Mesure du vent.....	73
IV.4.2.2. Le vent en Algérie.....	73
IV.4.3. Potentiel éolien.....	73
IV.4.4. Estimation de la vitesse moyenne du vent en fonction de l'altitude.....	74
IV.4.5. Dimensionnement du système éolien à installer.....	75
IV.4.5.1. Choix de la taille du mât (pylône).....	75
IV.4.5.2. Diamètre du rotor	75
IV.4.5.3. Vitesse de rotation de l'hélice.....	76
IV.4.5.4. Calcul du couple produit T	76
IV.4.5.5. Choix du rapport de multiplication.....	77
IV.4.5.6. Caractéristique de la machine électrique utilisée.....	77
IV.5.7. L'énergie annuelle.....	78
IV.5.7. 2. La puissance récupérable.....	78
IV.5.7. 3. Energie récupérable.....	78
IV.5.7. 4. Énergie annuelle produite	79

IV.5.8. Combien d'éolienne installée dans la ferme	79
IV.5.9. Condition de sécurité.....	79
IV.5.10. Quelques conseils pratiques pour réussir son projet dans cete ferme.....	80
IV.5.11. Coût total de l'investissement d'une éolienne.....	80
IV.5.12. Distribution l'électricité	80
IV.6. Résultat et discussion.....	80
IV.7. Conditions de vente d'électricité et le carburant.....	81
IV.8. Impact sur l'activité économique.....	81
Conclusion générale.....	82

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie. A ce titre, on distingue l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, le photovoltaïque, hydraulique et la géothermie.

Dans notre étude, je développer uniquement les énergies liées a la biomasse par le biais de la digestion anaérobie et l'énergie éolienne.

Les énergies renouvelables offrent des possibilités d'innovations technologiques décentralisées tout en créant des emplois et de nouvelles sources de revenus pour les communautés locales. Par ailleurs ces énergies peuvent s'appliquer facilement aux activités agricoles déployées par les populations rurales : pompage de l'eau, divers moulins et décortiqueuses pour les céréales, presses à huile ou le séchage et transformation des produits alimentaires, chaîne du froid pour la conservation de ces produits, et de produire l'énergie électrique et carburant synthétique.

La digestion anaérobie et l'énergie éolienne, sont constituent un gisement en continuelle augmentation. Leurs exploitations pour la production énergétique est d'autant plus intéressantes qu'elles interviennent également dans la préservation de l'environnement.

La production de biogaz et énergie électrique dans une exploitation agricole offrent l'avantage d'être une technologie de remplir une ou plusieurs fonctions spécifique à savoir :

La production d'une source d'énergies, l'assainissement et la production d'un engrais organique et préserver l'environnement. L'importance de la diffusion des installations de biogaz et l'énergie éolienne est de mettre à la disposition des fermes agricole une technologie simple dont le coût d'investissement est minime en leur permettent de résoudre les problèmes énergétiques.

Notre travail a pour titre : système d'alimentation énergétique d'une ferme par combinaison de digesteur anaérobie et énergie éolienne, il comprend quatre chapitres énoncés comme suit :

- **le chapitre I** est un ensemble de définitions indispensable a la bonne compréhension sur la digestion anaérobie et l'énergie éolienne;
- **le chapitre II** est les besoins énergétiques d'une ferme, et le choix de digesteur et éolienne qui doivent installer sur la ferme ;
- **Le chapitre III** j'exposer l'étude théorique ;
- **Le chapitre IV** est consacré sur les résultats et discussions.

Je terminerai mon travail par une conclusion générale.

**Chapitre I : Généralités et
définitions**

I.1. Introduction

La production d'énergie électrique utilise principalement des combustibles fossiles et fissiles. Plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir de matières fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou fissiles (nucléaire). La (Figure I-1) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles.

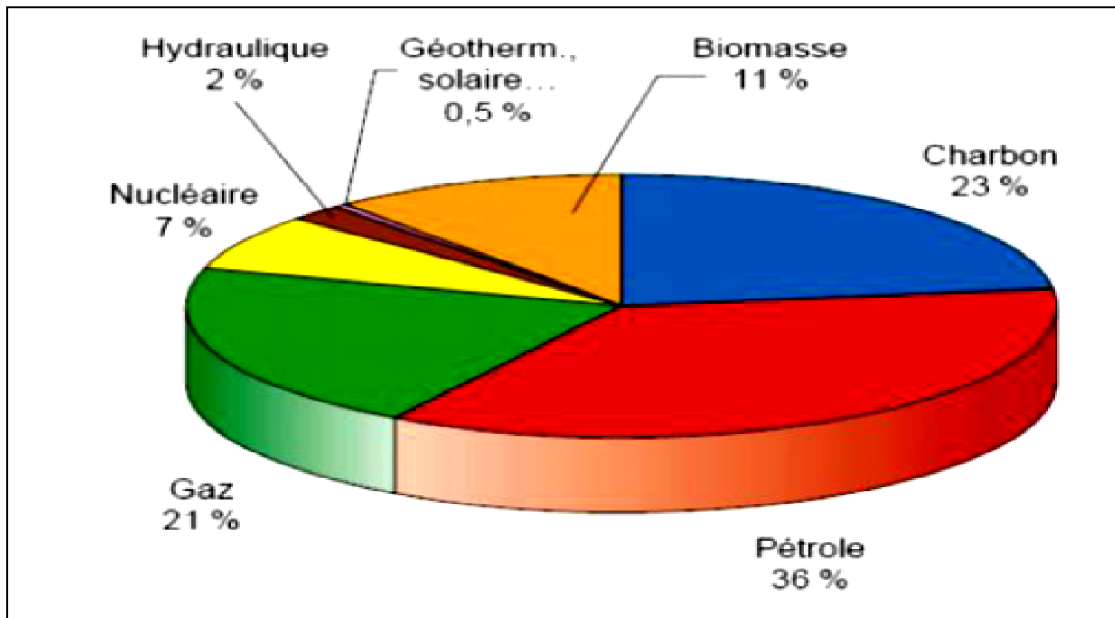


Figure (I-1): Répartition d'énergie primaire dans le monde [1].

Un recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet un dégagement massif de gaz polluant et de gaz à effet de serre.

I.2. Les énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins [2].

La figure (I.2) présente la production mondiale d'électricité en 2005.

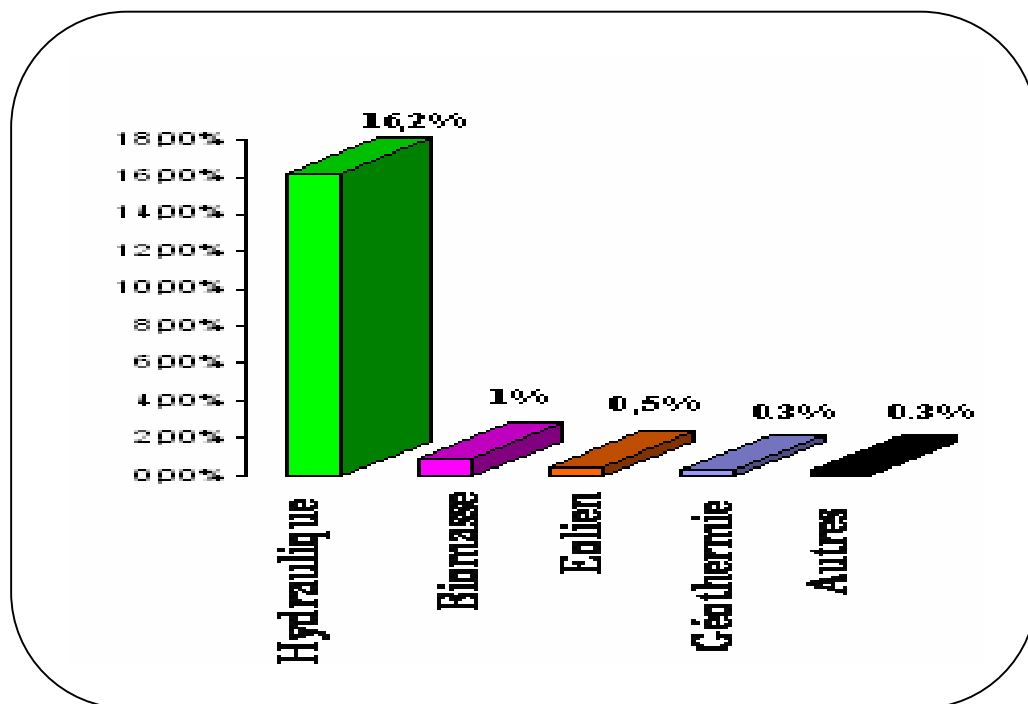


Figure (1-2) : Production d'électricité à partir de sources renouvelables en 2005

I.2.1. L'énergie hydraulique

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. On discerne la petite hydraulique (inférieure à 10 MW) et la grande hydraulique (supérieure à 10 MW). Dans le cadre de la production décentralisée on considère essentiellement la petite hydraulique [3].

I.2.2. L'énergie de la géothermie

Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie ou géothermie privilégiée qui exploite des sources hydrothermales très chaudes, ou des forages très profonds où de l'eau est injectée sous pression dans la roche. Cette géothermie est surtout utilisée pour produire de l'électricité [4].
- La géothermie de basse énergie : géothermie des nappes profondes (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures situées entre 30 et 100 °C. La principale utilisation est appliquée pour les réseaux de chauffage urbain.
- La géothermie de très basse énergie : géothermie des faibles profondeurs aux niveaux de température compris entre 10 et 30 °C. Sa principale utilisation est le chauffage et la climatisation individuelle.

I.2.3. L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année [5]. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- ✓ **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis la convertir en électricité.
- ✓ **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires.
- ✓ **L'énergie solaire passive:** est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

I.2.4. La biomasse :

C'est la masse des êtres vivants sur Terre (animaux et végétaux). La biomasse des végétaux chlorophylliens occupe une place importante sur Terre car elle transforme l'énergie solaire en énergie chimique (la matière organique fabriquée par la photosynthèse). Ce gisement d'énergie verte se renouvelle constamment s'il n'est pas surexploité et constitue la base alimentaire de tous les autres êtres vivants. La biomasse est une ressource naturelle. En effet, les bois, les cultures agricoles représentent une biomasse disponible comme source d'énergie pour l'homme.

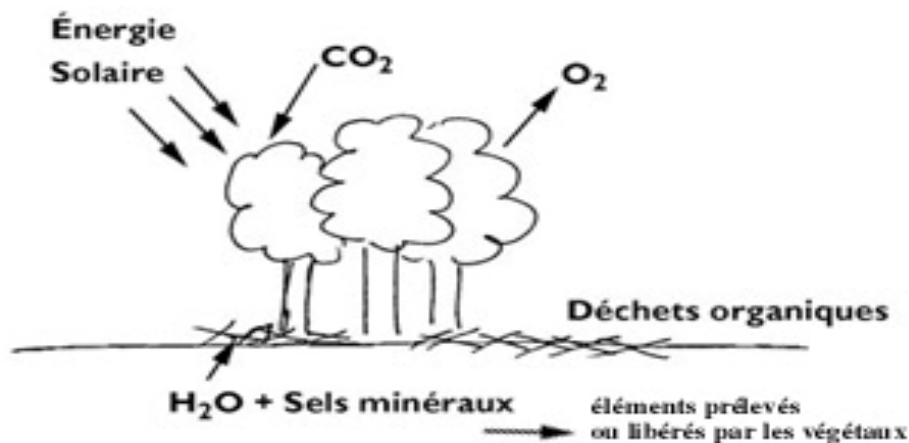


Figure (1-3): Schéma de la photosynthèse

I. 3. La digestion anaérobie :

I.3.1. Histoire :

L'intérêt scientifique dans la fabrication de gaz produits par la décomposition naturelle de la matière organique a été signalé pour la première fois au 17^{ème} siècle par Robert Boyle et Stephen Hale qui a noté que du gaz inflammable a été libéré en perturbant les sédiments des ruisseaux et des lacs. En 1808, Sir Humphry Davy a déterminé que le méthane est présent dans les gaz produits par le fumier des bovins.

Le premier digesteur anaérobie a été construit par une colonie de lépreux dans Bombay , en Inde , en 1859.

I.3.2. Définition La digestion anaérobie :

La digestion anaérobie, ou biométhanisation, est un processus biologique naturel de décomposition de la matière organique par des microorganismes (bactéries) qui s'activent dans des conditions anaérobiques, c'est-à-dire sans oxygène. La digestion de la matière organique génère à la fois du biogaz convertible en énergie et un résidu solide appelé digestat. Cette filière de valorisation de la matière organique peut donc produire de l'énergie renouvelable [6].

I.3.3. Définition milieu anaérobie

On appelle milieu anaérobie un milieu où il n'y a pas présence de dioxygène (O_2). Un organisme vivant ou un mécanisme anaérobie n'a pas besoin d'air ou de dioxygène pour fonctionner ; par exemple un digesteur produit du biogaz en anaérobie.

I.3.3.1. Mode respiratoire

Selon leur besoin en oxygène, on définit plusieurs classes de bactéries.

- **Les bactéries aérobies** : elles ont besoin d'une teneur en O_2 voisine de la pression partielle de l' O_2 dans l'atmosphère normale. (un milieu avec une bonne turbulence, comme une rivière en eau vive, est très bien aéré).
- **Les bactéries aéro-anaérobies facultatives** : elles peuvent vivre indifféremment en présence ou en absence d' O_2 .
- **Les bactéries micro aérophiles** : elles ont besoin d'une faible teneur en oxygène pour se développer.
- **Les bactéries anaérobies** : l'oxygène leur est toxique. Elles se développent en milieu très réducteur, par exemple dans le fond des marécages, dans les eaux stagnantes, également dans le tube digestif des animaux.

I.3.3.2. Les facteurs physico-chimiques

I.3.2.3.1. Besoin en eau

Un certain taux d'humidité est nécessaire pour permettre le développement bactérien. On retrouve dans la nature des bactéries partout où il y a de l'eau sous forme liquide.

I.3.3.2. La température

La plupart des bactéries se développent dans une gamme de température recouvrant 30 à 40°C. On définit plusieurs classes de bactéries suivant la gamme de température dans laquelle elles se développent :

- ✓ Bactéries thermophiles : se développent à une température supérieure à 45°C.
- ✓ Bactéries mésophiles : se développent dans une gamme de température comprise entre 10°C et 45°C.
- ✓ Bactéries psychrophiles : se développent jusqu'à une température inférieure à 20°C.

I.3.3.3 Le pH

La plupart des bactéries se développent lorsque le pH est compris entre 5.5 et 9. Il existe néanmoins des bactéries acidophiles se développant à des pH très bas, jusqu'à un pH = 1, et des bactéries alcalinophiles.

I.3.4. Source d'énergie

L'énergie produite au cours de ces oxydations n'est pas libérée globalement mais par petite étape dans le but d'être finalement transférée dans des liaisons chimique riches en énergie. Dans le cas de la digestion anaérobie la quantité d'énergie initiale qui est convertie en énergie-biomasse est très faible car l'énergie est, en grande partie, conservée sous forme de méthane (CH₄), comme ceci est présenté dans la figure suivante :

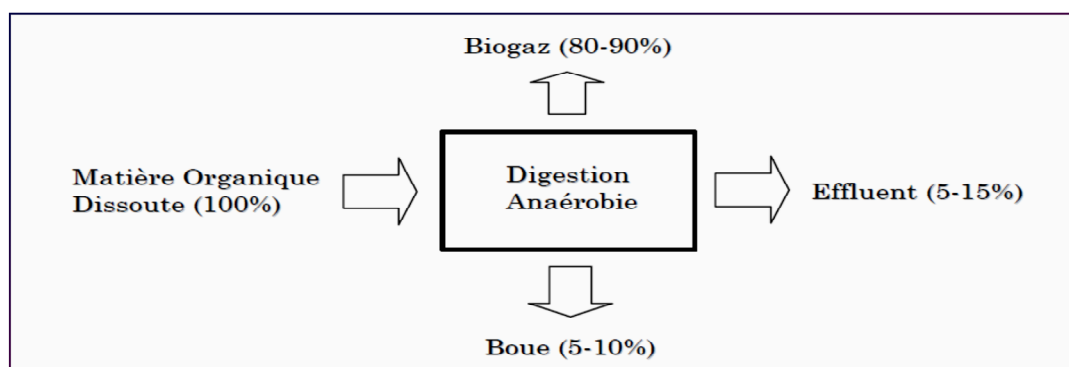


Figure (1-4) : Bilan général de matière organique dans la digestion anaérobie

I.3.5. Microbiologie de la digestion anaérobie :

La fermentation méthanogène peut servir à traiter des rejets organiques, des eaux usées, ou encore des lisiers, des ordures ménagères... Plus de 140 espèces bactériennes sont impliquées dans ce procédé pour dégrader la matière organique en biogaz. Les bactéries représentent une grande part de la flore microbienne anaérobie, mais d'autres organismes comme des protozoaires, des champignons ou des levures peuvent intervenir. Le processus microbiologique complexe de conversion de la matière organique peut être décrit en 4 étapes :

- ✓ Hydrolyse
- ✓ Acidogénèse
- ✓ Acétogénèse
- ✓ Méthanogénèse

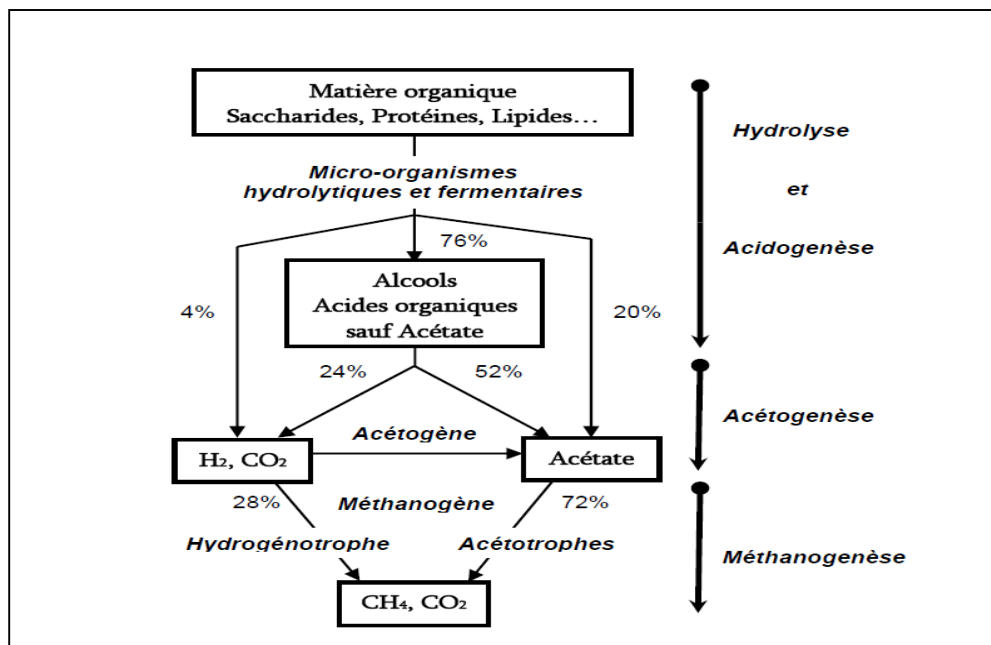


Figure (I-5) : Schéma de la chaîne trophique de la méthanogénèse et ses différentes étapes

• L'hydrolyse

L'étape d'hydrolyse est une étape enzymatique extracellulaire dans laquelle les macromolécules issues de l'étape de désagrégation sont réduites en monomères de la façon suivante :

- ✓ Les lipides sont transformés en longues chaînes d'acides gras ;
- ✓ Les protéines sont transformées en acides aminés ;
- ✓ Les acides nucléiques sont transformés en bases azotées.

• L'acidogénèse

Lors de cette étape, les produits de l'hydrolyse sont absorbés par les bactéries fermentaires qui transforment les monomères pour produire des acides gras volatils, des alcools, du sulfure de dihydrogène (H₂S), responsable de l'odeur caractéristique des méthaniseurs, du dioxyde de carbone (CO₂), et de l'hydrogène (H₂). Cette étape est très rapide et les bactéries y

participant ont un temps de duplication très court par rapport aux autres étapes et un taux de duplication plus important par rapport à celui des autres populations de bactéries.

- **L'acétogénèse**

Lors de cette étape, les produits issus de l'acidogénèse sont transformés par les bactéries acétogènes en acétate, en dioxyde de carbone, et en hydrogène. Le temps de déroulement de ces bactéries est beaucoup plus long que ceux de l'acidogénèse.

Voici les réactions chimiques mises en jeu lors de la dégradation :

- De l'éthanol: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{H}_2 + \text{H}^+$
- Du propionate: $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$

- **La méthanogénèse**

Lors de cette étape, les produits des réactions précédentes, principalement l'acétate, le formate, le dioxyde de carbone et l'hydrogène, sont convertis en méthane par les bactéries dites méthanogènes. Leur temps de dédoublement est un peu plus rapide que les populations de bactéries acétogénèse.

Il existe deux grandes voies de formation du méthane :

- La voie acétoclastique où l'acide est transformé en méthane:
 $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
- La voie hydrogénophile où c'est le mélange CO_2/H_2 qui est utilisé:
 $2\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{O}_2$

I.3.6. Condition de la digestion anaérobie :

La biométhanisation se forme naturellement lorsque certaines conditions de décomposition sont réunies. La quantité de gaz produite rapportée à la quantité de matière utilisée varie selon :

- ✓ Les paramètres physico-chimiques de la fermentation,
- ✓ La qualité du substrat,
- ✓ Les paramètres technologiques,
- ✓ Les systèmes de digestion.

I.3.6.1. Les paramètres physico-chimiques de la fermentation :

I.3.6.1.1. Température :

La fermentation anaérobie peut se dérouler dans trois catégories de température :

- ✓ les psychrophiles dominant entre 4-20°C, avec un optimum de croissance vers 15°C,
- ✓ les mésophiles dominant entre 20-45°C avec un optimum vers 37°C,
- ✓ les thermophiles dominant entre 55-70 °C, avec un optimum vers 60°C.

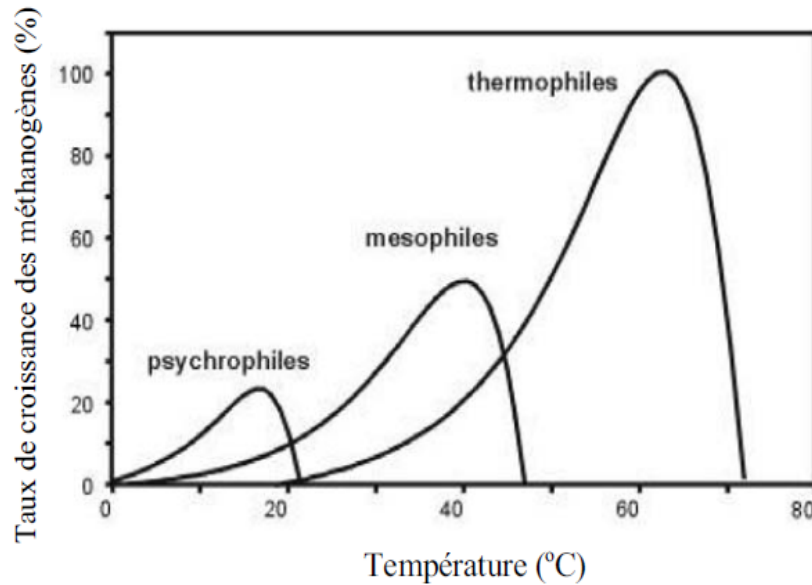


Figure (I-6) : taux de croissance des méthanogènes en fonction de la température

La plus largement étudiée est la zone mésophile. L'augmentation de la température entraîne une augmentation des vitesses de dégradation, en particulier de la phase d'hydrolyse.

Utiliser une température variable est un réel avantage en digestion anaérobie. Les bactéries facilitant la production de gaz ont une activité plus importante lorsque l'on augmente la température. En effet, les bactéries thermophiles (qui fonctionnent de 48°C à 52°C) produisent pour une même quantité de biomasse un volume de gaz plus important et ce, quelque soit le temps de séjour hydraulique.

Le fermentation thermophile est surtout utilisée dans les stations de traitement des eaux et suscite de nombreuses controverses quant à l'efficacité, son rendement ou la température optimum. [7].

La recherche montre qu'en digestion anaérobie, la température optimale pour les bactéries mésophiles est de 37°C et 52°C pour les bactéries thermophiles. Toutefois, les relations empiriques démontrent qu'il existe des espèces bactériennes se développant et produisant du biogaz entre 37°C et 52°C.

L'augmentation de la température a plusieurs avantages, dont :

- ✓ Augmente la solubilité des composés organiques qui les rend plus accessibles aux micro-organismes.
- ✓ Augmente les taux chimiques et biologiques des réactions, et accélère ainsi le processus de conversion, donc le réacteur peut être plus petit et peut fonctionner avec un plus faible temps hydraulique de rétention (THR).
- ✓ Améliore plusieurs propriétés physico-chimiques comme la diffusivité du substrat soluble, l'augmentation du taux de transfert de liquide vers le gaz dû à la faible solubilité du gaz, diminution de la viscosité liquide qui fait diminuer l'énergie d'agitation nécessaire et améliore également la séparation liquide-solide de la biomasse.

- ✓ Augmente le taux de mortalité des bactéries pathogènes particulièrement en condition thermophile, qui diminue le temps requis pour la réduction des pathogènes.

Les bactéries ne se développent que lorsqu'elles sont dans des conditions adéquates de température.

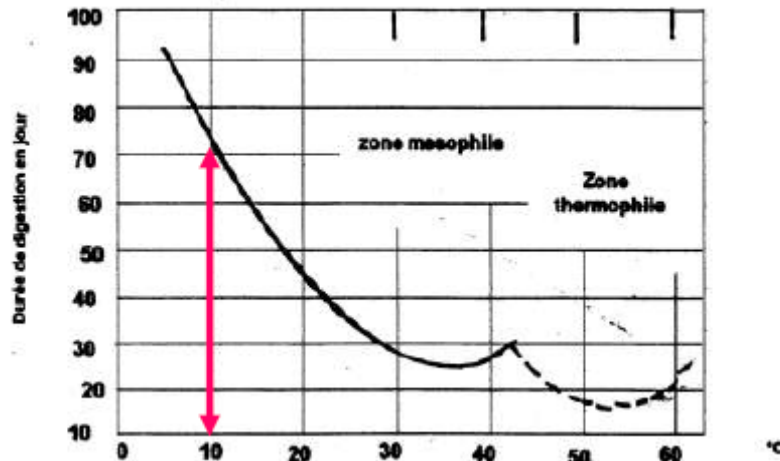


Figure (I-7) : Durée de digestion en fonction de température

On distingue dans la zone thermophile :

- ✓ Forte production biogaz et destruction des pathogènes.
- ✓ Trop d'énergie pour le chauffage.
- ✓ Bactéries sont sensibles au changement de température (fragilité du système).

I.3.6.1.2. ph:

Le potentiel hydrogène (ou ph) mesure l'activité chimique des ions hydrogènes (H^+) en solution. En solution aqueuse, ces ions sont présents sous la forme de l'ion oxonium (également, et improprement, appelé ion hydronium). Plus couramment, le ph mesure l'acidité ou la basicité d'une solution. Ainsi, dans un milieu aqueux à 25 °C :

- ✓ Une solution de $ph = 7$ est dite neutre,
- ✓ Une solution de $ph < 7$ est dite acide ; plus son ph s'éloigne de 7 (diminue) et plus elle est acide,
- ✓ Une solution de $ph > 7$ est dite basique ; plus son ph s'éloigne de 7 (augmente) et plus elle est basique.

On considère habituellement que la gamme optimale de ph pour la digestion anaérobie se situe entre 6,7 et 7,3. Un écart du ph de cette gamme est en général le signe d'un mauvais fonctionnement du digesteur.

I.3.6.1.3. Oxygénation et teneur en eau :

L'oxygène est extrêmement toxique pour les bactéries anaérobies strictes. Il est donc indispensable de protéger le milieu de toute entrée d'air. Une façon simple de procéder est de travailler en système noyé (saturé en eau) dans une cuve avec un ciel de faible volume. Les

procédés de méthanisation sont donc spécialement adaptés pour les déchets très humides (teneur en eau supérieure à 80 %).

I.3.6.2. Les paramètres technologiques :

I.3.6.2.1. La charge organique entrante :

Si le déchet est bien fermentescible, il faut éviter les surcharges brutales (augmentation de plus de 20 % en moins d'une journée) qui risquent de déséquilibrer le processus et d'acidifier le milieu par suite d'une trop rapide production d'acides gras volatils.

I.3.6.2.2. Le temps de rétention hydraulique :

Le TRH ou temps de rétention hydraulique (temps de séjour moyen des boues) est le principal paramètre de dimensionnement d'un digesteur. Il est généralement de l'ordre de 30 jours, ce qui est un compromis entre l'optimisation des performances de la dégradation de la matière organique et le volume du digesteur.

Il dépend aussi de :

- ✓ La température: plus la température est élevée, plus la digestion est rapide,
- ✓ Taux de matière sèche : plus le substrat est riche en eau et en particules fines, plus la digestion est rapide,
- ✓ La nature et la composition du substrat.

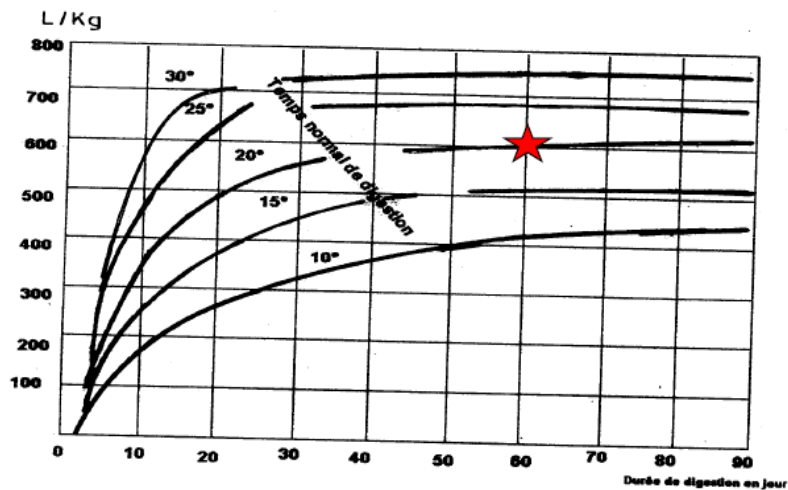


Figure (I-8) : Evolution de la production du biogaz en fonction de la durée digestion pour des températures allant de 10 C à 30 C.

I.3.6.3. Quelles matières organiques peut-on méthaniser ?

I.3.6.3.1. Les déjections animales

C'est le substrat le plus utilisé dans le milieu rural ; sa composition varie avec les conditions d'élevage.

I.3.6.3.2. Production végétale

Comme la paille de riz, de sorgho, blé, maïs, gazon, foin...

I.3.6.3.3. Industrie alimentaire

Résidus végétaux et animaux...

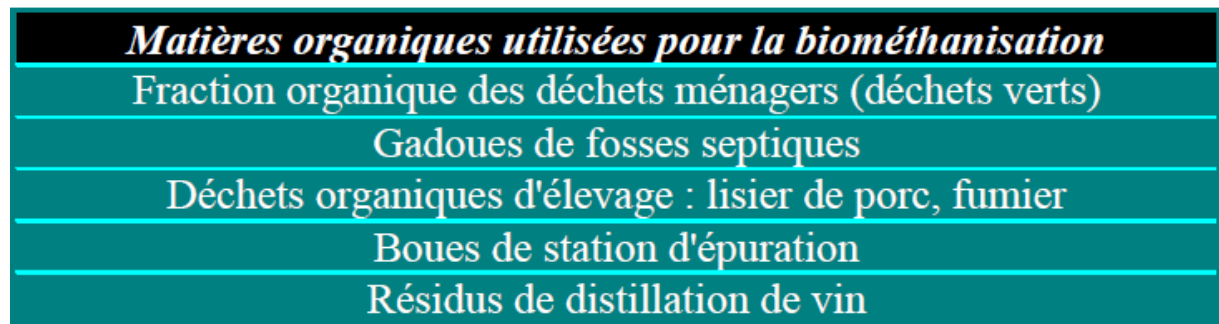


Figure (I-9) : Matières organiques utilisées pour la biométhanisation [8].

I.3.6.4. Les systèmes de digestion

Trois caractéristiques essentielles servent à distinguer les systèmes de digestion:

- ✓ Le mode d'alimentation du substrat dans le digesteur ;
- ✓ La voie retenue pour assurer le maintien d'une biomasse importante et un temps de séjour le plus élevé possible pour les microorganismes, et pour améliorer le contact entre la biomasse et le substrat à traiter ;
- ✓ La séparation des étapes du processus biologique.

Trois modes d'alimentation sont à considérer comme suit :

I.3.6.4.1. Discontinu [7]:

C'est l'alimentation en **discontinu** (ou «batch»). Une fois l'anaérobiose réalisée, la production gazeuse évolue de façon régulière, mais elle est limitée dans le temps. Pour obtenir un débit régulier de biogaz il faut disposer de plusieurs réacteurs en batterie, remplis et vidés à intervalles réguliers.

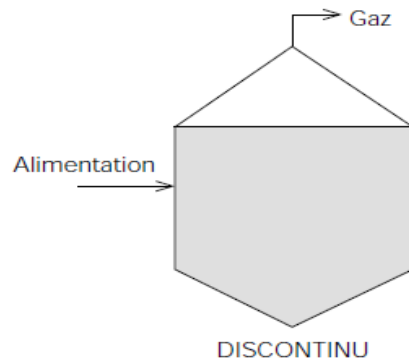


Figure (I-10) : digesteur discontinu

I.3.6.4.2. Semi-continu [7]

Le second mode d'alimentation consiste à remplir progressivement le réacteur durant la digestion, sans retirer de substrat avant la fin du processus.

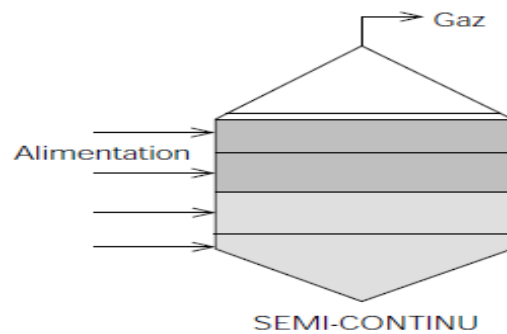


Figure (I-11) : digesteur semi-continu

I.3.6.4.3. Continu [7]

Dans le troisième mode, le substrat est introduit et le produit digéré est extrait de façon progressive et continue, si bien que le volume effectif de biomasse dans le digesteur reste constant; on parle alors d'**alimentation en continu**. Dans la pratique, la plupart des systèmes fonctionnent selon le mode continu.

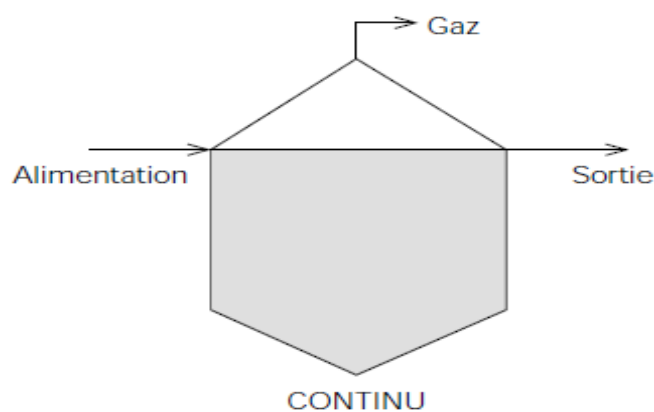


Figure (I-12): digesteur continu

I.3.7. Avantages et inconvénient de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie constitue un moyen efficace pour traiter des eaux usées, des boues de stations d'épuration, des rejets de l'industrie agro-alimentaire, ou encore des déjections animales,... Différentes technologies de méthanisation ont été développées pour s'adapter au mieux aux effluents à traiter, pour simplifier le procédé et en minimiser le coût, ou pour optimiser la production de biogaz. Le traitement d'effluents par digestion anaérobie présente de nombreux avantages par rapport à la technologie aérobie qui est plus largement répandue :

I.3.7.1. Avantages

- ✓ Une réduction de la matière sèche des boues.
- ✓ Une production d'un biogaz valorisable sous forme d'énergie (chauffage, cogénération d'électricité).
- ✓ Une réduction du nombre de micro-organismes pathogènes.
- ✓ Un intérêt agronomique, lié à une concentration importante en azote ammoniacal (NH_4^+) et en phosphates (PO_4^-) due à la lyse de la matière organique.

3.7.2. Inconvénients

- ✓ Une forte sensibilité aux variations de charges et aux composés toxiques.
- ✓ Une dégradation plus lente que pour les procédés aérobies.
- ✓ Des coûts d'investissement importants.
- ✓ Les populations microbiennes sont sensibles aux perturbations, en particulier à l'oxygène et aux métaux lourds où encore aux surcharges organiques et le procédé se révèle souvent instable.

I.3.8. Biométhanisation et énergie

Le mélange des produits gazeux issus de la biométhanisation est appelé biogaz. Ce biogaz peut être valorisé en produisant de l'énergie thermique ou électrique.

Donc le biogaz est produit naturellement, par des micro-organismes qui se sont organisés pour tirer partie de l'énergie disponible dans la matière organique, et ce sous la forte contrainte d'absence d'oxygène. Le biogaz est également, aujourd'hui, considéré comme une contribution intéressante à l'autonomie énergétique vis à-vis des énergies fossiles, et ce d'autant plus qu'il peut être produit à partir de nos résidus.

I.3.9. Le produit obtenu, le biogaz

I.3.9.1 Définition

Le biogaz est un combustible produit par la fermentation anaérobie des déchets. C'est un mélange composé essentiellement de méthane et de gaz carbonique, avec des quantités variables d'eau, d'hydrogène sulfuré (H_2S) et d'oxygène. Le méthane obtenu est appelé biométhane et il constitue de 50 à 80% de biogaz.

1.3.9.2. composition de biogaz

Gaz	Symboles	Pourcentage Volumique
Méthane	CH ₄	40 à 80
Gaz carbonique	CO ₂	15 à 56,5
Hydrogène sulfuré	H ₂ S	0,5 à 2
Vapeur d'eau	H ₂ O	≈3%
Autres gaz	(N ₂ , H ₂ , O ₂ , ...)	Traces

Tableau (I-1) : composition moyenne de biogaz [8]

Le rapport des deux constituants majeurs du biogaz (CH₄ et CO₂) varie avec :

- ✓ La nature de substrat,
- ✓ Les conditions de la digestion (température, procédé, ...).

Suivant sa provenance, le biogaz contient aussi des quantités variables d'eau, d'azote, d'hydrogène sulfuré (H₂S), d'oxygène, d'aromatiques, de composés du chlore, fluor et des métaux lourds, ces trois dernières familles chimiques étant présentes à l'état de traces.

1.3.9.3. Valeur énergétique du biogaz

Le Pouvoir Calorique représente le contenu énergétique d'un combustible. Tout combustible contient une part d'eau. Afin de ne pas biaiser l'évaluation du contenu énergétique du combustible, l'énergie nécessaire à l'évaporation de l'eau est retirée. On obtient ainsi le PCI (pouvoir calorifique inférieur) du combustible. Il s'agit de l'énergie directement utilisable.

Le PCI du biogaz est proportionnel à sa teneur en méthane :

$$\text{PCI} = 9,7 * X \text{ (KWh/m}^3\text{)}$$

Pour un biogaz à 70% de méthane, à 15°C et à pression atmosphérique normale.

Avec :

X : est la teneur, en pourcentage, de CH₄ dans le biogaz. On peut donc estimer le pouvoir calorifique moyen de biogaz, sachant que sa teneur moyenne en CH₄ est de l'ordre de 70%

$$\text{PCI biogaz} = 9,7 * 0,7 = 6,99 \text{ KWh/ m}^3$$

A titre indicatif :

- 1 m³ de Méthane est équivalent à 1 litre d'essence.
- 1 m³ de biogaz à environ 60% de méthane possède un pouvoir calorifique d'environ 6 kWh, soit 0.6 litre de fioul.

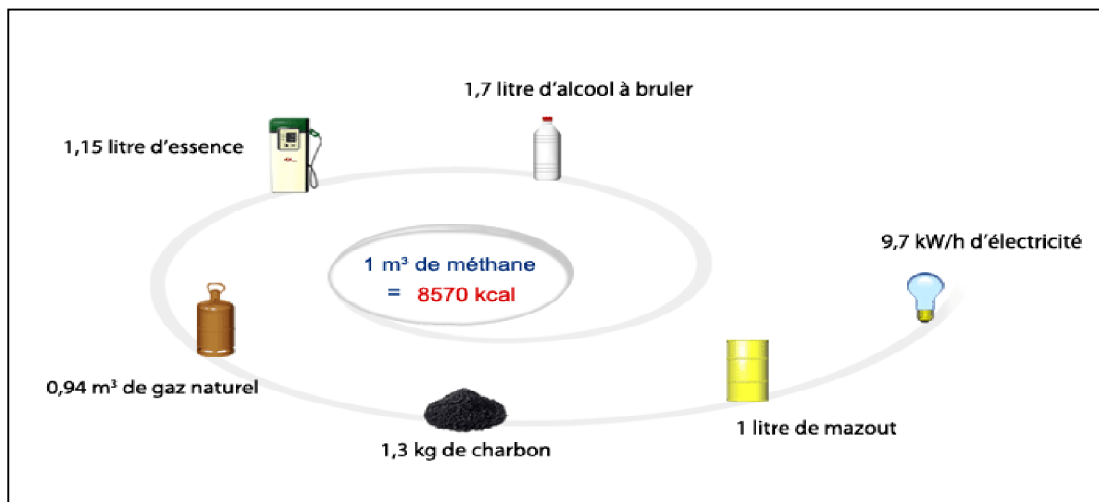


Figure (I-13) : Le schéma représente la valeur énergétique de méthane.

I.3.9.4. Domaine d'utilisation du biogaz

Le méthane issu du biogaz est utilisé comme source énergétique dans de nombreuses applications. Certaines d'entre elles sont largement développées et l'offre industrielle et commerciale est solidement établie. Il s'agit notamment de :

- ✓ La production de chaleur sous forme d'eau chaude ou de vapeur ;
- ✓ La production d'air chaud pour le séchage ;
- La production d'électricité par moteur ou turbine à gaz ;
- ✓ La production combinée d'électricité et de chaleur par cogénération.

D'autres filières sont en phase de développement, cela concerne principalement la production de biocarburants. Le biogaz est utilisé aussi pour :

- ✓ La cuisson des aliments ;
- ✓ L'éclairage des maisons ;
- ✓ La motorisation totale (moteur à essence) ou partielle (moteur diesel) ;
- ✓ La réfrigération etc. ...

I.3.9.5. Biogaz et environnement

La production et l'utilisation du biogaz ont un impact positif sur l'environnement. En effet, le biogaz se substitue très fréquemment aux énergies fossiles ce qui contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre, responsables en partie du dérèglement climatique.

De plus, dans le cas des effluents d'élevage, la production de biogaz permet de limiter considérablement les rejets de méthane qui est l'un des principaux gaz à effet de serre (l'effet du méthane est 25 fois plus important que celui du CO₂).

I.3.9.6. Les techniques d'épuration

Quel que soit l'usage final du biogaz, il est impossible de l'utiliser tel qu'il est produit ou récupéré. La seule fraction valorisable est le méthane qu'il contient en proportion plus ou moins grande et les autres composants sont inutiles. Une ou plusieurs étapes d'épuration sont donc nécessaires, comme indiqué ci-dessous.

Composants à enlever selon le mode de valorisation :

Valorisation : **chaleur** - enlever eau, soufre (H₂S, éventuellement).

Valorisation : **électricité, cogénération** - enlever eau, soufre (H₂S), organo-halogénés (éventuellement)

Valorisation : **carburant** - enlever eau, soufre (H₂S), organo-halogénés (éventuellement), dioxyde de carbone (CO₂), métaux (éventuellement).

Valorisation : **réseau gaz** - enlever eau, sulfuré (H₂S), organo-halogénés (éventuellement), dioxyde de carbone (CO₂), métaux (éventuellement), oxygène (éventuellement)

L'épuration consiste à éliminer non seulement les éléments traces comme la vapeur d'eau, l'hydrogène sulfuré, les composés halogénés, mais aussi le gaz carbonique, afin d'enrichir la concentration en méthane.

Cependant, nous nous intéressons ici seulement à l'utilisation du biogaz dans différentes appareilles soit les véhicules, les pompes, les groupe électrogènes et injecter dans les réseaux. Alors c'est pour cela, qu'il est nécessaire de purifier et valoriser ce gaz. Pour cela, les traitements à effectuer sont les suivants :

- **Elimination du sulfure de dihydrogène**

Le sulfure de dihydrogène présent dans le biogaz provient de la dégradation des protéines et autres composés contenant du soufre. Ce gaz corrosif doit être éliminé du biogaz pour préserver les compresseurs, cuves de stockage et les équipements de valorisation.

Une première solution uniquement physique consiste à "laver le biogaz" avec un solvant, c'est à dire à utiliser la solubilité du sulfure de dihydrogène pour le piéger dans une phase liquide. Le lavage peut s'effectuer à l'eau (solution la plus simple), dans lequel la solubilité du H₂S est supérieure. Le biogaz est sous pression pour augmenter sa solubilité, puis injecté au bas d'une colonne contenant le solvant, et le biogaz purifié est récupéré au sommet de la colonne. Une fois saturé, le solvant peut être régénéré soit en abaissant la pression, soit en bullant de l'air à l'intérieur. L'ajout de soude (carbonate de sodium) à l'eau de lavage permet d'élever la solubilité des gaz, et la soude réagit avec le sulfure de dihydrogène pour former du sulfate de soude ; dans ce cas l'absorption est en partie chimique.

Les membranes utilisées pour la purification du biogaz sont plus au moins perméables aux différents composés. On distingue la purification à haute-pression avec une phase gazeuse de part et d'autre de la membrane, de la purification basse-pression dans laquelle l'adsorption a lieu dans un liquide. On utilise avec succès un procédé simple étage de membranes filtrantes en polyamide pour enrichir un biogaz jusqu'à 94% de méthane.

Ces méthodes physiques et chimiques, permettent uniquement d'enlever le H₂S du biogaz mais ne le convertissent pas en produit valorisable, à la différence de la réduction ferrique qui permet de convertir le sulfure de dihydrogène en soufre.

- **Élimination des composés organo-halogénés, métaux lourds et siloxanes**

Le biogaz de décharge peut présenter de fortes concentrations en organohalogénés qui peuvent être éliminées efficacement au moyen de charbon actif associé au procédé, les petites molécules comme le CH₄, CO₂, N₂ et O₂ pourront traverser le filtre à charbon alors que les plus grosses molécules resteront piégées. Le charbon actif permet également de capter les métaux lourds qui peuvent être présents dans le biogaz.

Les siloxanes sont une classe de composés organiques de silicium. S'ils sont présents dans le biogaz, ils seront oxydés en silicate au cours de la combustion et pourront endommager les différents composés des machines (brûleurs, valves,...).

- **Élimination de la vapeur d'eau**

La vapeur d'eau est un frein à la valorisation du biogaz à plusieurs niveaux ; elle peut réagir avec le H₂S et former un acide corrosif, mais elle risque également de se condenser, et il est indispensable de sécher le biogaz. Ceci peut se faire par condensation en refroidissant les tuyaux amenant le le biogaz. Si les teneurs en eau doivent être très faibles (par exemple pour l'injection dans le réseau de gaz) il est préférable de s'orienter vers des méthodes comme la cryogénie, l'absorption sur glycols ou encore les tamis moléculaires et les membranes, qui permettent d'abaisser très nettement les concentrations en vapeur d'eau.

- **Séparation du CO₂**

L'élimination du CO₂ est aussi appelée enrichissement en méthane. Cependant nous retiendrons la plus efficace qui est l'adsorption sous pression alternante. C'est un procédé à sec, sans eau, il est donc nécessaire d'effectuer une déshumification auparavant. Le biogaz passe dans un compresseur pour être envoyé vers un absorbeur avec une pression de 8 à 10 bars. Le CO₂ y est alors absorbé par des charbons actifs ou par des tamis moléculaires de carbone. Il est possible d'atteindre des concentrations de plus de 96% de gaz pur par cette méthode.

I.3.9.7. Stockage

I.3.9.7.1. Conditions (de stockage) faut-il stocker le biogaz

Le stockage du biogaz permet de lisser les variations de production pour alimenter de manière plus régulière les équipements de valorisation. Il s'agit en général d'une capacité tampon, correspondant à quelques heures, ou quelques minutes, de production.

I.3.9.7.2. Gazomètres

Le stockage s'effectue généralement à basse pression, souvent à la même pression que dans le digesteur.

Il existe également des gazomètres en acier ou béton, avec un toit métallique :

I.3.9.7.3. Réservoirs sous pression

Les réservoirs sous pression sont utilisés pour les unités de grande capacité en cas de fortes contraintes d'emprise au sol (pression de quelques bars), ou pour la valorisation sous

forme de gaz carburant (stockage à environ 300 bars destiné à alimenter des réservoirs de véhicules à 200 bars).

Il est conseillé d'éliminer au préalable la vapeur d'eau et l'hydrogène sulfuré [9].

I.3.9.8. Comparaison entre biogaz, gaz naturel et gaz de pétrole

L'exemple de biogaz qui est présenté dans le tableau (I-2) correspond à un mélange de 60% en volume de méthane, 38% en volume de dioxyde de carbone et 2% en volume pour les autres gaz.

	<i>Biogaz</i>	<i>Gaz naturel</i>	<i>Propane</i>	<i>Méthane</i>	<i>Hydrogène</i>
Pouvoir calorifique (kWh/m ³)	6	10	26	10	3
masse volumique (kg/m ³)	1,2	0,7	2,1	0,72	0,09
Densité par rapport à l'air	0,9	0,54	1,51	0,55	0,07
Température d'inflammation (°C)	700	650	470	650	585
Vitesse max. propagation flamme dans l'air (m/s)	0,25	0,39	0,42	0,47	0,43
Plage d'explosion (% en vol.)	6 -12	4,4 -15	1,7 -10,9	4,4 -16,5	4 -77

Tableau (I-2) : Comparaison entre biogaz, gaz naturel et gaz de pétrole [30].

I.3.9. Le digesteur anaérobie

I.3.9.1. Définition de digesteur

Un digesteur désigne une cuve qui produit du biogaz grâce à un procédé de méthanisation des matières organiques. Le digesteur est généralement en béton ou en acier inoxydable, mais sa forme varie (ronde, rectangulaire) selon les constructeurs. Il peut être en « hors sol », semi enterré ou enterré, selon la nature du sol. Enterrer le digesteur permet de bénéficier de la température du sol, et ainsi de diminuer les consommations de chauffage ; mais aussi de lutter contre la pression hydraulique.

Pour assurer un bon fonctionnement du digesteur, il lui faut une bonne alimentation. Le mélange de substrats doit avoir :

- ✓ au maximum 20 % de graisses par rapport à la matière sèche de la ration,
- ✓ une charge organique constante, de l'ordre de 2 kg/m³/j,
- ✓ un ph de 7-8,

I.3.9.2. Les Caractéristiques des digesteurs

Les principales grandeurs qui caractérisent un réacteur de digestion anaérobie sont :

- La charge volumique appliquée : il s'agit de la quantité de DCO (la concentration du substrat dans l'effluent à traiter) introduite dans le réacteur par jour et par unité de volume du réacteur. Elle permet de comparer la quantité de pollution traitée par différents types de réacteur.
- Le temps de séjour hydraulique (TSH) correspond à la durée du contact entre l'effluent et la biomasse. Il représente le rapport entre le volume du réacteur et le débit d'alimentation. Le TSH permet de connaître le volume d'effluent qu'on peut traiter chaque jour dans le réacteur.
- La quantité et la composition du gaz : la quantité de gaz peut être rapportée à la quantité de matière organique éliminée (rendement) ou au volume du réacteur (productivité). La composition du gaz est variable selon l'état du réacteur.

I.3.9.3. Choix et dimensionnement d'un digesteur

Avant d'investir dans un procédé de digestion anaérobie il est essentiel d'effectuer une étude technico-économique. De nombreux paramètres sont à prendre en compte pour le dimensionnement d'un digesteur :

- La nature de l'effluent à traiter (solide, soluble,...), sa concentration (charge organique),
- Le rendement épuratoire attendu, le mode de valorisation du biogaz,....

Pour assurer un fonctionnement optimal du digesteur il est nécessaire de déterminer certains critères.

- ✓ La charge volumique appliquée (CVA) correspond à la charge organique traitée par jour et par unité de volume du digesteur. Ce paramètre doit être choisi pour assurer un effluent de sortie de qualité satisfaisante (en termes de charge organique restante). On définit la CVA au moyen de la formule suivante :

$$CVA = \frac{DCO * Q}{V}$$

D'où :

DCO : est la concentration du substrat dans l'effluent à traiter,

Q : est le débit d'alimentation du bioréacteur,

V : est le volume du digesteur.

I.3.9.4. Type de digesteur

I.3.9.4.1. 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. Parmi ces fermenteurs on trouve les réacteurs infiniment mélangés, dans lesquels un brassage continu assure l'homogénéité du milieu, ce qui favorise le contact entre la biomasse et le substrat.

I.3.9.4.1.1. Digesteurs infiniment mélangés

Le mélange dans le digesteur peut être assuré mécaniquement par un système de pâles, ou bien en recerclant le contenu du digesteur. Une dernière solution consiste à réinjecter le biogaz au bas du réacteur (voir figure I-14). Un mélange incomplet favorise l'accumulation de matière particulaire ce qui à long terme risque de diminuer le volume utile et de réduire les performances du procédé.

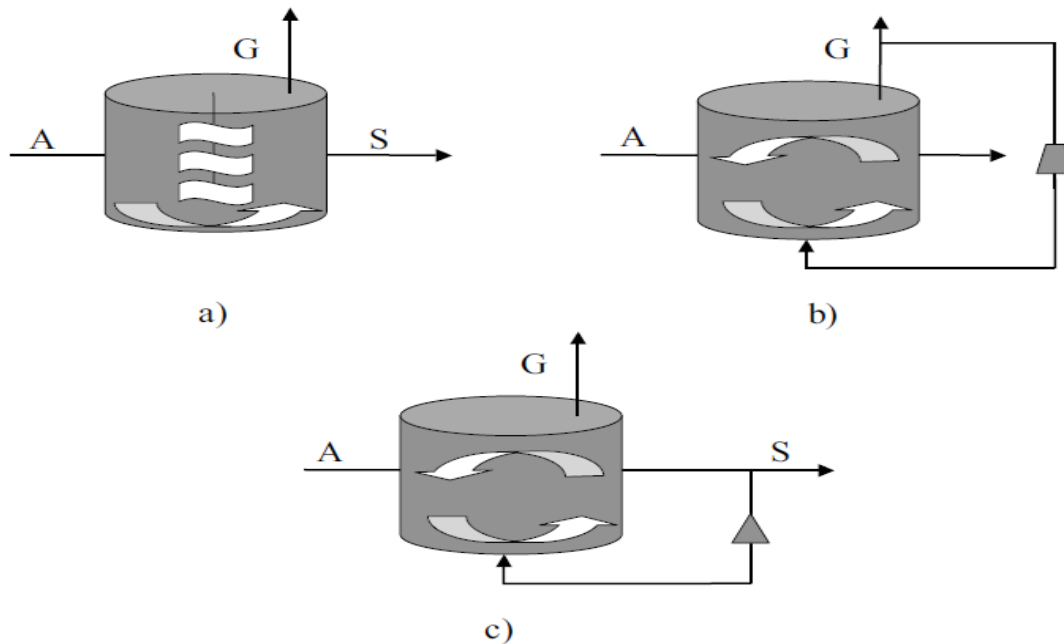


Figure (I-14) : Schéma d'un digesteur infiniment mélangé : a) mécaniquement par pâles, b) par compression et recirculation du biogaz, c) par recirculation du milieu.
A : alimentation, S : sortie, G : biogaz.

I.3.9.4.1.2. Digesteurs à contact

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.

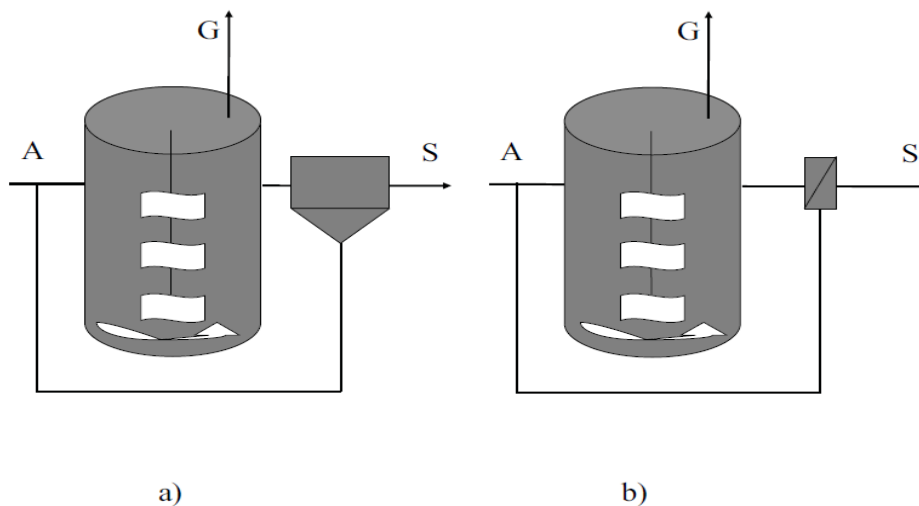


Figure (I-15) : Schéma d'un digesteur à contact où la rétention est assurée par
 a) décanteur, b) membrane.
 A : alimentation, S : sortie, G : biogaz.

I.3.9.4.2. Les digesteurs à biofilm

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 microorganismes 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.

I.3.9.4.2.1. Réacteurs à lit fixe

Le réacteur est rempli d'un support inerte de nature variée (roche, verre, plastique,...) et pouvant se présenter sous différentes formes (lamelles, grille,...) sur lequel la biomasse peut se développer. L'alimentation se fait aussi bien par flux ascendant que descendant et l'effluent à traiter passe au travers du "filtre" formé par le support et la biomasse qu'il contient. Une grande partie de la biomasse présente est en réalité coincée entre les interstices du support plus que réellement attachée.

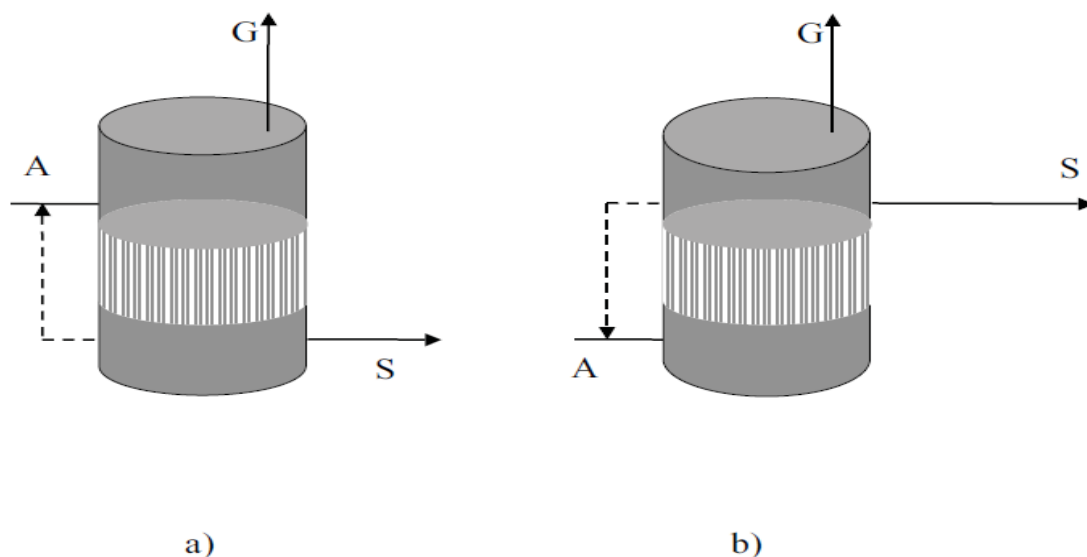


Figure (I-16): Schéma d'un digesteur à lit fixe : a) à flux descendant, b) à flux ascendant.
 A : alimentation, S : sortie, G : biogaz.

I.3.9.4.2.2. Réacteurs 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 la 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 les éliminer. Ceci tient principalement aux différences de conditions optimales de croissance des acidogènes et des méthanogènes

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.

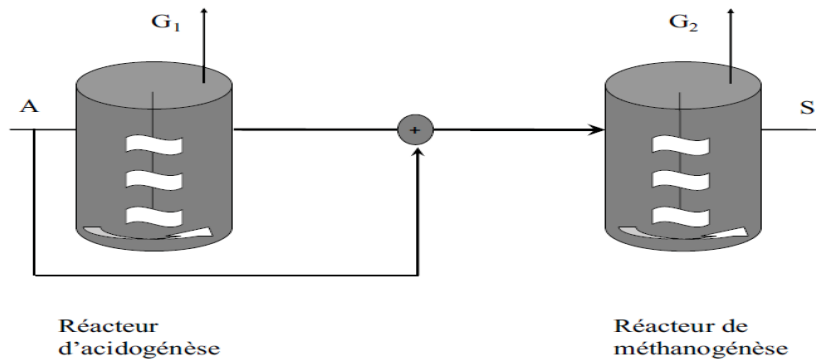


Figure (I-17) : Schéma d'un digesteur à deux étages. A : alimentation, S : sortie, Gi : composés gazeux.

Ces deux étapes sont séparées spatialement ; l'acidogénèse se déroule dans un premier réacteur qui alimente le réacteur de méthanisation. Lorsque l'influent contient de fortes proportions de matière particulaire, l'hydrolyse est l'étape limitante et le taux de dilution dans le premier étage doit être adapté en fonction. Pour la dégradation de matière soluble, c'est la méthanogénèse qui est l'étape limitante.

I.3.10.6. Paramètres techniques des digesteurs

Les fermenteurs sont caractérisés par des paramètres techniques présentés dans le Tableau (I-4) :

Paramètre	Définition	Unité
V	Volume utile du fermentateur	m ³
G	Biogaz produit par jour	m ³ /j
Q	Débit volumique de l'influent	m ³ /j
M	Charge initiale : concentration en Kg de MS, MO ou DCO dans l'effluent	Kg/ m ³
TRH	Temps de rétention hydraulique moyen de l'effluent dans le réacteur =V/Q	j
CV	Taux de charge : quantité d'effluent par m ³ de fermenteur et par jour=Q*(Me/V)	Kg/ m ³ .j
PV	Production volumique : production de biogaz par m ³ de fermenteur /jour=G/V	m ³ g/ m ³ .j

B	Production spécifique : production de biogaz kg d'effluent = $G/(Q*M)$	m ³ g/Kg
E	Taux d'épuration ou rendement : quantité dégradée par quantité d'effluent = $(Md/Me)*100$	%

Tableau (I-4) : paramètres techniques des digesteurs.

I.3.10.7. Les facteurs de contrôle d'un digesteur :

En général, on considère qu'un digesteur fonctionne de manière adéquate quand la réduction des solides organiques dans les boues de sortie est 40 à 60% plus faible que dans les boues d'entrée. Ceci est atteint en général, lorsque les réactions productrices d'acides et les réactions productrices de méthane sont en équilibre.

Ceci peut se vérifier en contrôlant les paramètres suivants :

- ✓ Alimentation (solides organiques) du digesteur;
- ✓ Température du digesteur ;
- ✓ Agitation du digesteur ;
- ✓ PH dans le digesteur ;
- ✓ Alcalinité dans le digesteur ;
- ✓ Concentration en acides gras volatiles ;
- ✓ Production et qualité du biogaz.

I.3.10.8. Principale cause d'un déséquilibre

La cause la plus fréquente de déséquilibre d'un digesteur anaérobie est directement reliée au fait que les bactéries productrices de méthane sont des organismes anaérobies très sensibles et ayant une croissance très lente. Aussi, il arrive qu'elles ne suivent pas le rythme de croissance des bactéries productrices d'acides. Le digesteur s'acidifie alors parce que la vitesse de transformation des acides est très basse.

I.4. Energie éolienne

I.4.1. Histoire des éoliennes

Ce sont les pêcheurs qui furent les premiers à utiliser l'énergie du vent afin de déplacer leurs embarcations sur les mers. Au Vème siècle, les Perses se servaient des éoliennes pour irriguer leurs champs (roues à aube). Il faut attendre le VIIème siècle pour voir apparaître des moulins à vent pour moudre le blé.

I.4.2. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut

être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire

I.4.4. Principe de l'éolienne

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées.

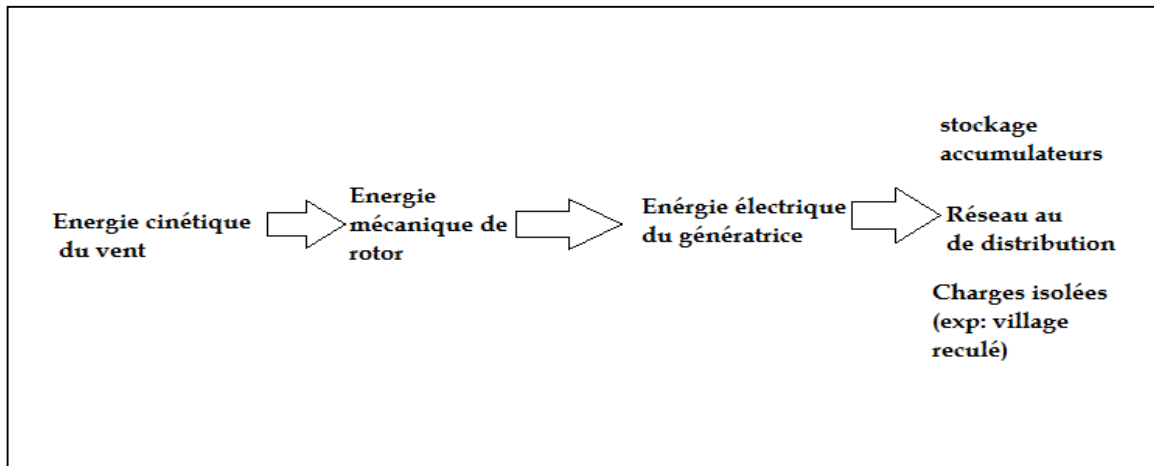


Figure (I-19) : Principe de l'aérogénérateur.

I.4.5. Constitution d'une éolienne

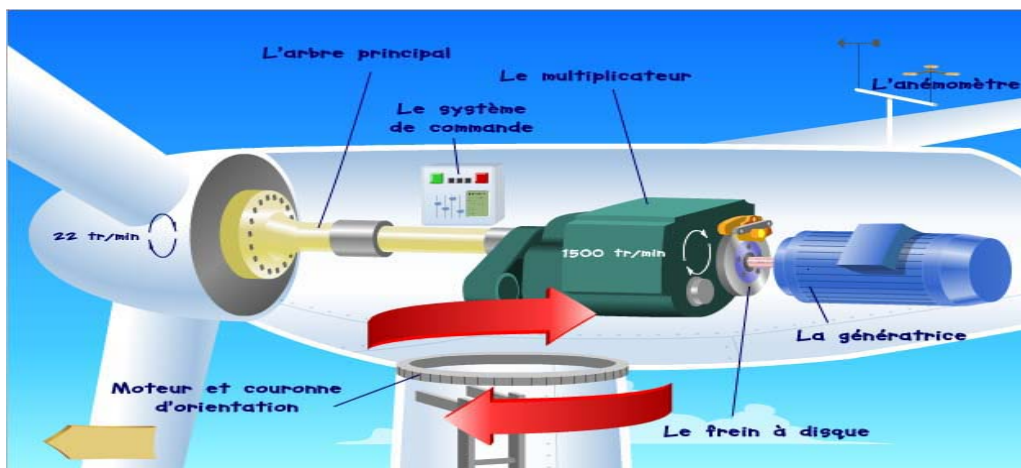


Figure (I-20): composante d'une éolienne

1. **Les pales** : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor. Elles sont en fibres de verre et matériaux composites. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes.
2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. **L'arbre primaire** (ou arbre lent) : il relie les pales au multiplicateur.

- 4. Le multiplicateur** : il permet d'augmenter la vitesse de rotation. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
- 5. L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- 7. Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- 10. Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- 9. Le système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- 10. Les fondations** : elles permettent la fixation du mat ; c'est sur elles que repose le poids de l'éolienne.
- 11. L'armoire de couplage au réseau électrique** : elle est généralement située au pied de l'éolienne et on trouve à l'intérieur les armoires électriques qui contrôlent le fonctionnement de l'éolienne et son rattachement au réseau électrique.
- 12. Mécanisme d'orientation** : Utilisé pour tourner la turbine contre le vent. On dit que l'éolienne possède une erreur d'orientation lorsqu'elle n'est pas tournée perpendiculairement au sens du vent. Une telle erreur implique qu'une part plus restreinte de l'énergie contenue dans le vent passera au travers du rotor.
- 13. Boite de vitesse**: La puissance provenant de la rotation du rotor est transmise au générateur par le biais de 2 arbres de transmission et de la boite de vitesse. La solution pratique utilisée, en parallèle avec l'industrie automobile, est la mise en place d'une boite de vitesse. Ainsi la rotation lente et puissante de l'arbre en amont sera transformée en rotation rapide à bas couple en aval de la boite de vitesse, mieux à même d'être utilisée par le générateur.
- 14. Anémomètre et girouette**: La mesure de la vitesse du vent est habituellement effectuée à l'aide d'un anémomètre. Possédant un axe vertical et 3 coupoles captant le vent et entraînant sa rotation, le nombre de révolutions effectuées est décompté électroniquement. Généralement couplé à une girouette permettant de déterminer la direction du vent, les informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.
- 15. Système de refroidissement**: Les générateurs nécessitent la mise en place d'un système de refroidissement pour leur bon fonctionnement. Dans la plupart des éoliennes, le refroidissement se fait en plaçant le générateur dans un conduit d'air frais. Certains fabricants utilisent en refroidissement par eau. Cela présente l'avantage d'être plus compact mais nécessite la mise en place d'un radiateur dans la nacelle pour évacuer la chaleur contenu dans le liquide de refroidissement.

I.4.6. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production énergie électrique.

I.4.6.1. Eolienne à axe vertical

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

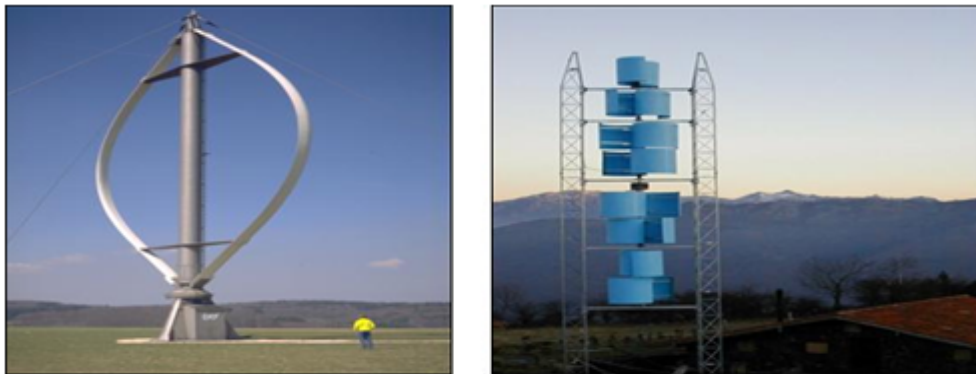


Figure (1-21) : Eoliennes à axe vertical : rotor de Darrieus (gauche) et rotor de Savonius (droite)

Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- **Le rotor de Savonius** dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

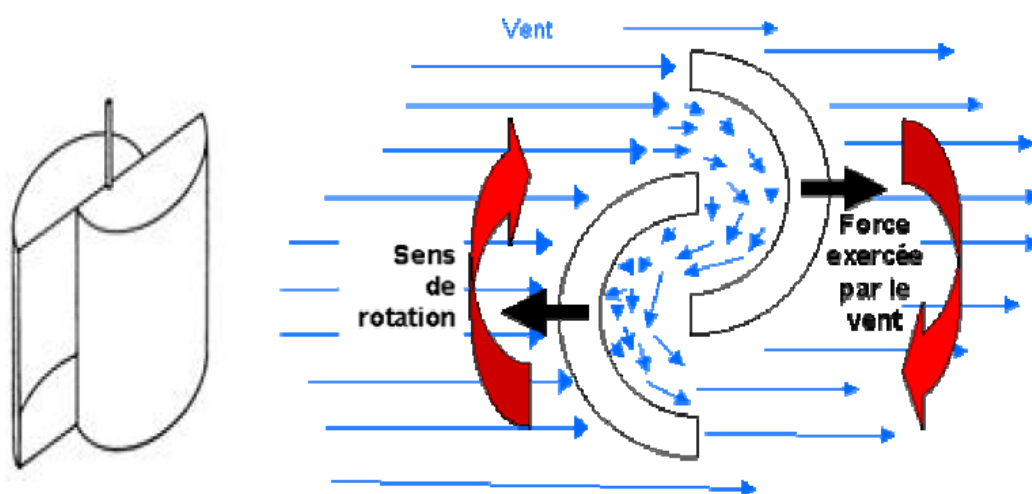


Figure (1-22): Schéma de principe du rotor de Savonius [9].

- **Le rotor de Darrieus** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces

d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.



Figure (1-23): Schéma du rotor de Darrieus [10].

On peut classer les éoliennes de type a Darrieus aux différents types qui se montre dans la figure suivante :

Eolienne Darrieus

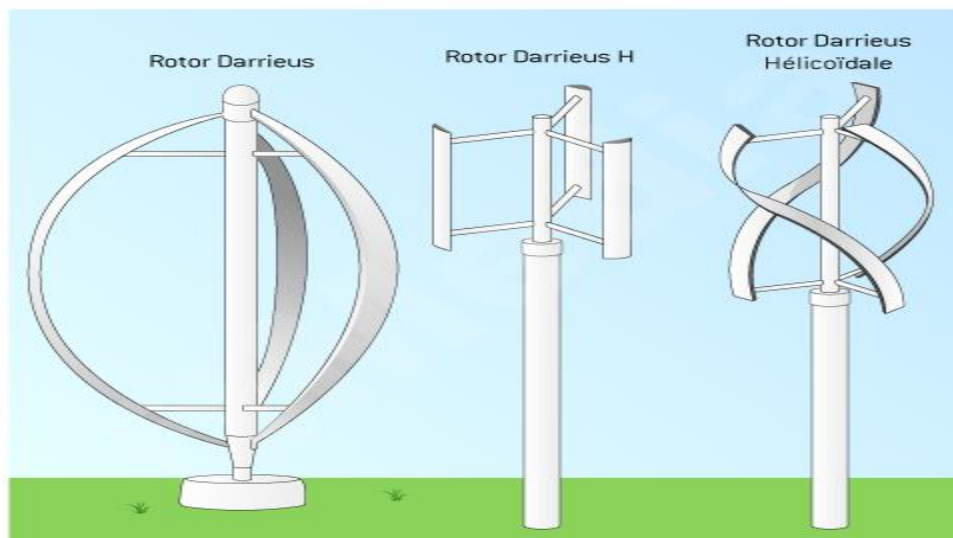


Figure (1-24) : Différents types de rotor Darrieus

I.4.6.2. Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamique. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pâles constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable.

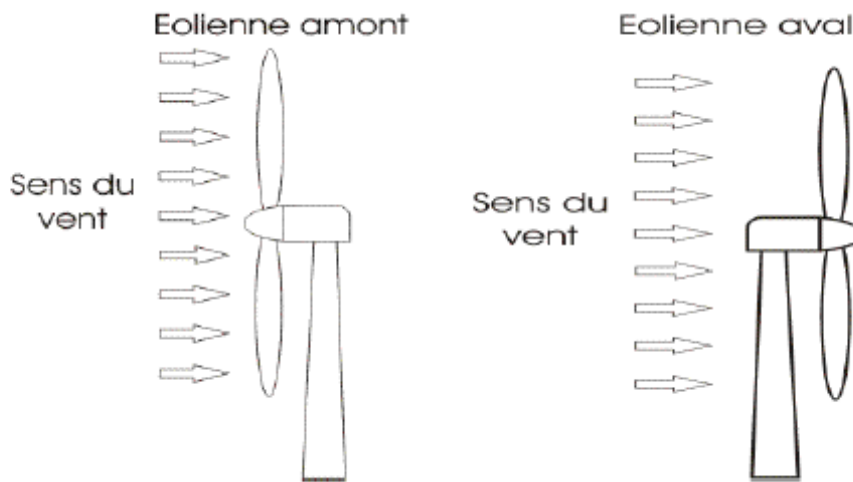


Figure (1-25): Types d'éoliennes à axe horizontal [9].

I.4.7. Les différents d'éolienne en fonction de la vitesse

I.4.7.1. Eoliennes à vitesse lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales, leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau.

La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante :

$$P = \frac{1}{2} * \rho * \frac{\pi D^2}{4} * V^3$$

Avec :

P : Est La puissance étant exprimée en Watts,

D : Le diamètre exprimé en mètre,
V : La vitesse du vent en m/s.

I.4.7.2. Eoliennes a vitesse rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible. Le tableau 2 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. Dans la figure (1-5) représente les différences turbine éoliennes :

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW

Tableau (I-5) : classification des turbines éoliennes [11]

Chaque mode de fonctionnement des éoliennes, à vitesse fixe ou variable présente les avantages présentés dans le tableau suivant :

Eolienne à vitesse fixe	Eolienne à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> • Système électrique plus simple • Plus grande fiabilité • Pas besoin d'un système électrique de commande 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation du rendement énergétique • Génération de puissance électrique d'une meilleure qualité • Réduction des efforts subis par le train de puissance

Tableau (I-6): Avantage des modes de fonctionnement

I.4.8. Principe de fonctionnement d'une pale d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme grâce à sa connexion avec le rotor en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

I.4.8.1. Modélisation du vent

Avant de considérer le fonctionnement propre de la machine, il convient de définir la source d'énergie de l'éolien : le vent. Celui-ci peut être modélisé par une simple loi exponentielle jusqu'à des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente.

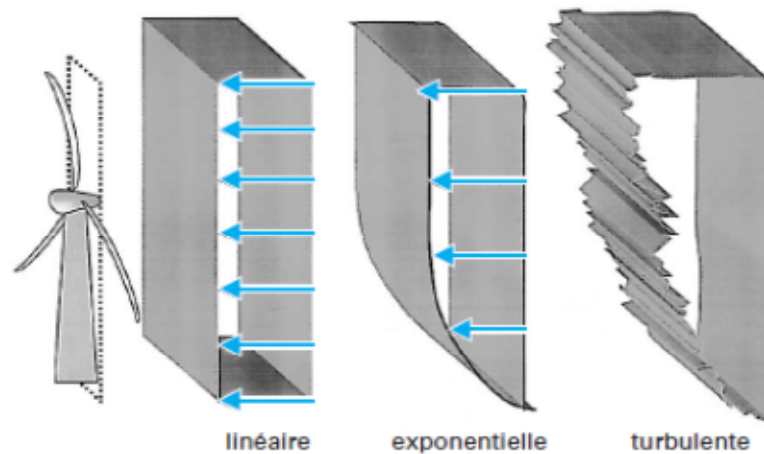


Figure (1-27) : Différentes approches du vent

I.4.8.1. Comment le vent se forme-t-il ?

Le vent est créé par les différences de pression atmosphérique dues aux différences de température de l'air. Ces écarts de température sont naturels, étant donné la distribution inégale d'énergie solaire reçue à la surface de la Terre. Lorsque les températures de régions voisines sont différentes, l'air chaud (léger) monte dans l'atmosphère, puis redescend quand il devient plus froid (lourd).

I.4.8.3. Système de mesure de vent

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories :

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m ²)
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Tableau (1-7) : échelle Beaufort**I.4.8.4. Principales utilisations du vent**

Le vent est principalement utilisé comme source d'énergie. Pour exploiter l'énergie du vent, on utilise deux types d'éoliennes : les éoliennes pour le pompage de l'eau et les éoliennes pour la production d'électricité (appelées aérogénérateurs) d'environ 60 m de hauteur, munies de trois grandes pales. Dans les deux cas, l'énergie éolienne est captée par les pales qui actionnent un système d'engrenage : s'il est relié à une pompe, l'énergie éolienne est transformée en énergie mécanique et s'il est relié à un générateur, l'énergie éolienne est transformée en énergie électrique (électricité).

I.4.8. 5.Critères de choix de l'implantation éolienne :

- **Le vent**

L'efficacité d'une éolienne dépend de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, et les sites sont d'abord choisis en fonction de la permanence de vents de force suffisante. Un site avec des vents d'environ 30 km/h de moyenne sera environ 8 fois plus productif qu'un autre site avec des vents de 15 km/h de moyenne.

Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence du vent. En effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à une valeur comprise entre 10 et 20 km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient soit à la destruction de l'éolienne.

Même avec un système d'orientation de la nacelle performant, il est donc préférable d'avoir une direction de vent la plus stable possible pour obtenir un rendement optimal.

- **L'effet tunnel ou effet Venturi**

Au niveau des cols, entre deux montagnes comme entre deux grands bâtiments, le vent est souvent plus fort. L'air est comprimé entre les montagnes ou les bâtiments.

Pour garder un débit d'air constant, la vitesse augmente donc considérablement. De plus, le vent garde généralement une direction constante. Ces lieux sont donc très appropriés pour les éoliennes. Ils sont cependant le plus souvent des surfaces restreintes et il est difficile d'y placer une grande quantité d'éoliennes.

- ✓ Suivant le même principe, l'air est comprimé au sommet des collines et le vent y est donc accéléré.
- ✓ La mer et les lacs sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse importante. La proximité d'une côte escarpée, créera également des turbulences à éviter.

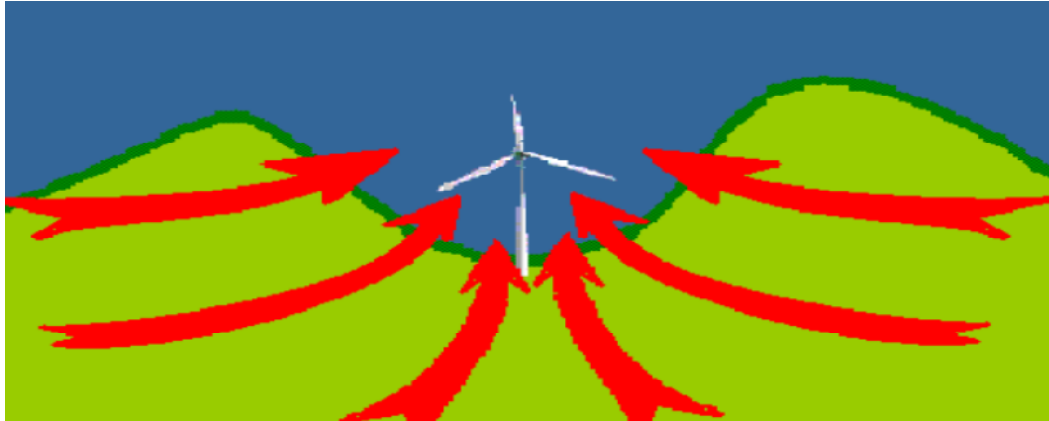


Figure (I-28) : photo effet de tunnel.

- **Altitude :**

L'altitude est un critère avéré pour l'implantation des éoliennes. Ainsi, celles qui sont installées sur les côtes ou en bordure de mer bénéficient de vents puissants et réguliers, car la surface de l'eau ne constitue pas un obstacle (faible rugosité), et parce que la différence de température mer/terre favorise des vents thermiques.

Hauteur	Vitesse moyenne estimée
90 m (vent orographique)	6,8 m/s
80 m	6,5 m/s
70 m	6,3 m/s
60 m	6,0 m/s
50 m	5,7 m/s
40 m	5,3 m/s
30 m	4,9 m/s
20 m	4,3 m/s
10 m	3,5 m/s

Table (I-8) : les vitesses de vent moyen en fonction de la hauteur [11].

- **Effet de colline :**

Suivant le même principe, l'air est comprimé au sommet des hauteurs et le vent y est donc accéléré, et lorsqu'il arrive à l'autre côté, il devient lent et faible, comme les eaux qui coulent dans l'océan à travers un canal étroit. En général, il est préférable d'installer les éoliennes sur les collines ou une chaîne de hauteurs qui sont plus élevées que le paysage environnant, et ainsi il est tout de même important d'avoir une vue aussi dégagée que possible dans la direction des vents dominants.

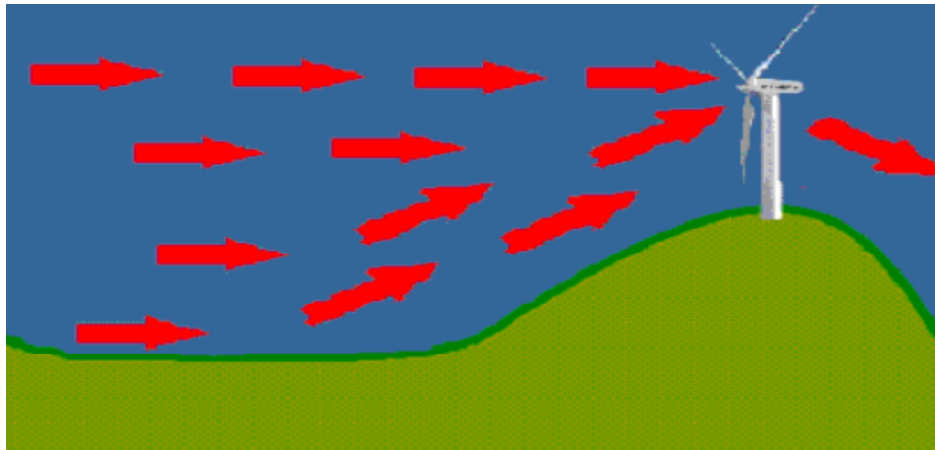


Figure I-29 : photo, effet de colline

I.4.9. Description d'une pale d'éolienne

Les **pales** sont une partie très importante de l'aéromoteur. Le rendement, le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine dépendront de leur conception. Lorsqu'elles sont assemblées on parle d'hélice ou de Rotor. Il existe très peu de fabricants dans le monde capables de construire ces pales qui sont maintenant en fibre de verre et en fibre de carbone. Du fait de leur longueur (30 à 40 mètres) il faut des convois exceptionnels pour les transporter sur le site. Les pales sont caractérisées par :

- ✓ Leur longueur ;
- ✓ Leur largeur ;
- ✓ Leurs matériaux de construction ;
- ✓ Leurs nombre.

Il existe 3 principaux matériaux pour les pales d'éolienne :

- **Fibre de verre** : matériau le plus efficace. En effet, il est résistant et léger. Mais, le bois reste plus simple à mettre en œuvre et moins onéreux. Construire une pale en fibre de verre implique une certaine technicité, à commencer par la création d'un moule dans lequel elle sera coulée.
- **Bois** : une bonne alternative, car il est plus simple à mettre en œuvre. Par contre, si vous optez pour le bois, la vigilance est de mise. En effet, le bois est plus sensible à l'humidité et plus fragile s'il présente des défauts. Ainsi, pour des pales en bois, il faut :
 - ✓ Choisir une essence adaptée,
 - ✓ Un bois sec,
 - ✓ Un bois sans nœuds et sans fissure.
- **Aluminium** : une bonne solidité ainsi qu'une longévité très appréciable.

Matériau	Fibre de verre	Bois	Aluminium
Résistance	Bonne résistance aux intempéries	Moyenne. Demande un traitement régulier	Très bonne résistance

Poids	Léger	Léger (selon l'essence)	Léger si utilisé sous forme de tôles fines
Sensibilité à l'humidité	Imputrescible	Résistance à l'humidité limitée	Imputrescible
Facilité de mise en	Difficile, nécessité de réaliser un moule, temps de séchage.	Facile	Très difficile. Demande un outillage et une technique adaptés.
Longévité	Bonne longévité	Moyenne	Bonne longévité
Prix	Élevé	Peu élevé	Très élevé

Tableau (I-9) : tableau comparatif des pales d'éolienne.

I.4.10. Systèmes de Régulation de vitesse d'une éolienne

I.4.10. 1.Système à Décrochage Aérodynamique " Pitch "

Ce système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment .C'est à dire il faut que varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

I.4.10. 2.Système à Décrochage Aérodynamique "Stall"

C e type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique.

I.4.10. 3.Système à Décrochage Aérodynamique "Active Stall"

C e dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation « stall » et de la régulation « pitch » afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances.

I.4.11. Système de régulation et de protection

C'est un élément essentiel de la survie d'une éolienne, afin d'éviter la destruction de l'aéromoteur lorsque le vent est trop violent. Il est nécessaire d'équiper l'éolienne d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine en cas de survitesse du rotor. Ces systèmes peuvent être plus ou moins fins, et plus ou moins automatiques.

La plupart des accidents survenus sur un aérogénérateur sont la cause d'un sous-freinage de ces machines. On cherche donc à installer sur une éolienne au moins deux systèmes de freinage afin de protéger le générateur électrique contre la surproduction et la surchauffe et d'éviter une casse mécanique importante de l'éolienne elle-même. On appelle **vitesse de régulation** la vitesse du vent à laquelle le mécanisme de régulation est pleinement activé

I.4.11.1. Systèmes de freinage manuel

C'est le moyen le plus simple pour éviter la destruction d'une machine, lorsque le vent atteint une certaine vitesse un opérateur immobilise l'éolienne, cette immobilisation peut être effectuée de plusieurs manières :

- ✓ A l'aide d'un frein,
- ✓ En changeant l'orientation de l'hélice : l'hélice est placée parallèlement au vent (mise en drapeau),
- ✓ En modifiant le calage des pales afin d'obtenir un couple moteur nul.

I.4.11.2. Systèmes de freinage automatique

I.4.11.2.1. Régulation et freinage par basculement de l'éolienne

Le basculement de l'éolienne entraîne une réduction de la surface effective balayée par le rotor. Pour réduire cette surface il faut augmenter l'angle formé par l'axe de rotation du rotor et la direction du vent dominant soit en faisant basculer l'hélice vers le haut soit en le faisant pivoter sur le côté. Lorsque le rotor est "effacé" vers le haut ou sur le côté, le rendement du rotor diminue considérablement et la puissance produite chute rapidement [12].

I.4.11.2.2. Régulation et freinage par gouvernail articulé

À partir d'un certain niveau de vent, jugé excessif pour la sécurité mécanique de l'éolienne, le gouvernail se replie progressivement et automatiquement en travers de l'axe du vent. Non seulement il freine l'écoulement, ralentissant la vitesse, mais il détourne l'éolienne de la perpendiculaire au vent. Celle-ci devient alors de moins en moins efficace et sa vitesse ne peut augmenter même si le vent force. On parle généralement d'effacement latéral ou de "furling" dans ce cas précis, ceci est très utilisé pour les petites éoliennes car c'est un système très simple à mettre en œuvre.

I.4.12. Les générateurs éoliens

L'aéromoteur peut entraîner, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un multiplicateur, 3 types de générateurs électriques sont chargés de transformer l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique :

- ✓ Une génératrice à courant continu (dynamo),
- ✓ Une génératrice synchrone à courant alternatif (alternateur),
- ✓ Une génératrice asynchrone à courant alternatif.

I.4.13. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

- **Avantages**

- ✓ Non polluante.
- ✓ Inépuisable (énergie du vent).
- ✓ Peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés).
- ✓ Peut être complémentaire des filières traditionnelles.
- ✓ Energie renouvelable et gratuite.

- **Inconvénients**

- ✓ Aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent).
- ✓ Bruit des pales et impact visuel.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les types de digesteurs et d'éoliennes que l'on rencontre dans la littérature spécialisée.

Nous avons vu que la fabrication de biogaz carburant peut provenir de différents déchets organiques. Une fois ces déchets traités, ils doivent passer par différentes transformations et différents procédés afin d'avoir du biogaz carburant.

La récupération et la valorisation de ce biogaz permettrait de se substituer à l'énergie fossile, de réduire nos déchets organiques, de réduire leur impact sur l'effet de serre.

Et nous avons donné aussi une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation.

Chapitre II :

*Les besoins énergétiques d'une
ferme*

II.1. Introduction

Comme nous l'avons précisé précédemment, l'énergie est présente partout autour de nous et nous ne pourrions pas vivre sans elle. Nous l'utilisons au quotidien, sous des formes différentes, et depuis ces dernières années un fort intérêt apparaît pour les énergies renouvelables. En effet, la prise en compte du réchauffement climatique et l'épuisement des réserves des énergies fossiles incite l'ensemble de la population, notamment les éleveurs, à investir dans les énergies renouvelables.

Cependant, avant d'investir trop rapidement sur ce type d'énergies, il est utile d'apprendre à maîtriser leur consommation. Ainsi, le simple fait de limiter le gaspillage énergétique va générer, dans le cas de l'exploitation d'une ferme par exemple, d'importantes économies financières.

Les énergies renouvelables déjà utilisées dans des fermes concernent :

- ✓ Les récupérateurs de chaleur (différents échangeurs et pompes à chaleur) ;
- ✓ Le biogaz ;
- ✓ L'énergie éolienne et l'énergie solaire.

II.2. Objectif de l'énergie renouvelable dans la ferme

Un grand nombre d'agriculteurs dans le monde s'intéressent actuellement de plus en plus aux sources d'énergies renouvelables.

L'objectif principal de cette étude consiste à réaliser un digesteur anaérobie et une éolienne pour obtenir une certaine autonomie énergétique de la ferme.

II.3. Présentation de la ferme qui fait l'objet notre étude

II.3.1. Description de la ferme

La ferme qui fait l'objet de notre étude, la coopérative agriculture D.B.K, est située à Draâ Ben Khedda, à environ dix kilomètres à l'ouest de Tizi Ouzou ; elle s'étend sur plus de 235 ha. Elle est composée de trois petites fermes, chacune d'elles ayant plus de six hangars.

II.3.2. Etude des besoins énergétiques de cette ferme

L'objectif est de parvenir à ce que énergie renouvelable couvre les besoins de l'exploitation agricole (bâtiments, installations, etc.) ainsi que les besoins liés à ses activités (séchage, pompage d'eau, production de froid, transport, etc.) comme dans [13].

Les besoins d'énergie sur la ferme sont évalués sous des différentes formes (électricité, gaz, froid, chaleur), pour chacun des usages identifiés sur l'exploitation. L'étude porte sur la situation actuelle de:

- ✓ Caractéristiques thermiques et données techniques de base des bâtiments d'élevage ;
- ✓ Dispositifs de production d'électricité et biocarburant ;
- ✓ La totalité de consommations énergétiques actuelles ;
- ✓ Estimation des rendements de l'installation actuelle pour la production d'énergie ;
- ✓ Détermination des besoins énergétiques prévisionnels annuels et de la puissance énergétique à installer.

II.3.3. Les différentes formes d'énergies consommées sur la ferme

Les flux d'énergie non renouvelables comptabilisés en entrée sont de deux types :

- ✓ Les énergies directes, consommées sur le site de production.
- ✓ Les énergies indirectes.

II.3.3.1. Les énergies directes, consommées sur le site de production :

- ✓ Le fioul des tracteurs et automoteurs, y compris celui consommés plus de 80% dans l'exploitation, est la consommation varier en temps de fonctionnement et la puissance mise en œuvre.
- ✓ L'électricité qui s'alimente directement.
- ✓ Les autres produits pétroliers comme gazole et essence utilisé pour le transport dans la ferme.

II.3.3.2. Les énergies indirectes :

Regroupent les dépenses d'énergie réalisées en amont de l'exploitation, lors de la fabrication des aliments destinés aux animaux et des engrais minéraux, et lors de leur transport jusqu'à la ferme. Elles intègrent également l'énergie de procédé des bâtiments et du matériel qui englobe toutes les énergies mobilisées pour produire un matériel (salle de traite, tracteurs, charrue, semoir...) ou un bâtiment ainsi que l'énergie nécessaire pour leur traitement ou recyclage en fin de vie.

II.3.4. Différents appareils utilisés dans la ferme

De nombreux moyens permettent de réduire davantage la consommation d'énergie dans une ferme. Selon nos observations dans la ferme dont nous avons choisi d'étudier la consommation énergétique, les domaines d'activités sont:

- ✓ Le tank a lait.
- ✓ Les pompes à vide.
- ✓ Le chauffage de l'eau.
- ✓ L'éclairage.
- ✓ La ventilation.
- ✓ Véhicule
- ✓ Groupe électrogène

- **Groupe électrogène**

Les groupes électrogènes sont constitués d'un moteur thermique 2T, 4T, essence ou diesel qui entraîne une génératrice. Les plus petits peuvent délivrer une puissance de moins de 1 kW/h (quelques moteur 2T). Dès que l'on atteint 4 à 5 KW/h on ne trouve plus que des moteurs diesels.

- **Chauffage**

Le chauffage est le plus important poste consommateur d'énergie dans une exploitation agricole. Le mode de chauffage utilisable dans cette ferme est le chauffage à gazole et à gaz.

- **Ventilation**

La ventilation, représente elle aussi un poste important de consommation d'énergie. Le niveau de consommation va dépendre des caractéristiques des ventilateurs en place, de leur nombre et de leur régulation.

- **Eclairage**

L'éclairage est aussi un poste consommateur. Son utilisation se fait surtout en soirée pendant un minimum de 8 heures par jour. Et pour réduire la consommation d'énergie on favorise l'éclairage des salles à partir de la lumière naturelle, ce qui permettrait de limiter les consommations électriques.

On rencontre différents types d'éclairage : fluorescent, halogénure métallique ou encore sodium à haute pression. Certains sont plus performants que d'autres en termes de durée de vie et de consommation différents de chacune.

- **Tracteur dans la ferme**

Le tracteur est le véhicule consommant le plus d'énergie dans la ferme, pour la mise en œuvre des pratiques d'élevage :

- ✓ L'alimentation qui correspond à la distribution des fourrages aux animaux ;
- ✓ Le transfert des déjections des animaux ;
- ✓ Le raclage c'est-à-dire le transfert des déjections vers les ouvrages de stockage ;
- ✓ Le paillage qui est l'apport de litière aux animaux.

- **D'autres véhicules**

Les autres véhicules sont utilisés pour le transport à l'intérieur et à l'extérieur de la ferme ; leur consommation en énergie varie selon leur fonctionnement.

- **Le tank à lait**

Il permet le refroidissement du lait de 35°C à 4°C et son stockage pendant 1 à 3 jours. Sa consommation d'énergie électrique varie selon les besoins de l'utilisation et le nombre selon la quantité de lait disponible.

- **La Pompe**

Son rôle est de pomper et distribuer de l'eau aux bâtiments d'élevage. Le choix du système de pompage doit être fait en prenant en compte non seulement les contraintes techniques (type de pompe, énergie, hauteur de refoulement, débit), mais aussi les contraintes liées au contexte socio-économique (système de pompage accepté, disponibilité des pièces détachées, facilité de maintenance des pompes).

Quelque soit le type de pompe choisie, celle ci est constituée de 3 parties distinctes:

- ✓ La partie motrice qui fournit la puissance nécessaire au pompage
- ✓ L'accouplement qui transmet cette puissance à la partie hydraulique
- ✓ La partie hydraulique qui transmet cette puissance à l'eau pour la déplacer (l'aspirer et/ou la refouler).

II.3.5. Le choix des équipements et pratiques associées aux dépenses d'énergie

Les appareils ou équipements qui consomment de l'énergie sur un élevage peuvent être répartis en plusieurs catégories selon la source d'énergie à laquelle ils font appel et à la fréquence de fonctionnement (**Tableau II-1**).

Catégorie d'équipement	Source d'énergie	Type de fonctionnement (permanent, quasi-permanent, fréquent, ponctuel)
Ventilation	Electrique	permanent
Chauffage	Electrique, fioul ou gaz	quasi-permanent
Préchauffage des salles	Electrique, fioul ou gaz	ponctuel
Eclairage	Electrique	permanent
Distribution d'aliments	Electrique et fioul	fréquent
Pompe de lavage	Electrique	fréquent
Pompe à eau	Electrique, fioul ou gaz	Permanent
Equipements de bureaux	Electrique, fioul ou gaz	fréquent
Fabrique d'aliments à la ferme	Electrique	fréquent
Groupe électrogène	fioul	Permanent
Tracteur et d'autres	fioul	Permanent
Tank a lait	Electrique	Permanent

Tableau II-1 : Description des principaux équipements consommateurs d'énergie dans la ferme

Dans les fermes, l'électricité est utilisée pour différents usages : le fioul, essentiellement employé pour le chauffage ; l'alimentation du groupe électrogène et les pompes; le gaz strictement utilisé pour le chauffage des bâtiments, occupe la troisième place de la consommation énergétique totale.

II.3.6. La réduction d'énergie dans la ferme

On peut réduire les consommations énergétiques par:

- ✓ L'amélioration des outils de production : isolation, étanchéité ;
- ✓ L'optimisation des réglages et la bonne coordination du couple chauffage-ventilation ;
- ✓ L'entretien du matériel et le choix d'équipements économes en énergie ;
- ✓ La récupération d'énergie : échangeurs thermiques, pompes à chaleur ;
- ✓ L'utilisation des énergies renouvelables : chaudières à biomasse, solaire thermique, éolienne et biogaz.

II.3.7. Bilan de consommation d'énergétique dans cette ferme

Une méthodologie a été mise au point pour réaliser de manière homogène le bilan des consommations d'énergie présente sur cette ferme.

❖ Bilan de la consommation d'électricité

L'électricité est la forme d'énergie qui permet de faire fonctionner la plupart des objets de notre quotidien dans la ferme.

Date	débit
31/01/2011	27581,86 DA
30/04/2011	22307,66 DA
31/07/2011	26419,58 DA
31/10/2011	109737,29 DA
Solde : 186046,39 DA/an	

Tableau II-2: la quantité consommé d'électricité annuelle [14]

Cette consommation augmente de plus en plus, selon la demande d'utilisation dans la ferme. Elle atteint son maximum en hiver et en été.

La totalité d'énergie électrique consommée par an dans la ferme est :

$$E_T = \frac{\text{prix totale durant l'année}}{4.17}$$

$$E_T = 186046.39 / 4.17$$

$$E_T = 44615.44 \text{ KWh/an}$$

D'où :

E_T : énergie totale d'électricité.

4.17 : Le prix de l'électricité (DA/kWh).

❖ Bilan de consommation de gazole

	Débit
Gazole	1991230,18 DA/an

Tableau II-3 : la quantité consommé de carburant annuelle [14]

La totalité de gazole consommée par an dans la ferme est :

$$Q_C = \frac{\text{prix totale durant l'année}}{13.7}$$

$$Q_C = \frac{1991230,18}{13.7}$$

$$Q_C = 145345,26 \text{ Litre/an}$$

D'où :

Q_C : La quantité consommée.

13.7 : Le prix de gazole (DA/litre) [15].

- **Analyse les facteurs**

La puissance dont nous avons besoin est directement liée à la consommation d'énergie dans la ferme. Il convient donc de faire une petite étude de notre consommation d'énergie pour déterminer la puissance adaptée à la consommation. Pour déterminer nos besoins, il faut calculer la consommation de chaque appareil en kWh.

Pour cela on utilise la formule suivante :

Énergie consommée (kWh/jour) = puissance d'un appareil (kW) x nombre d'heures d'utilisation (h)/jour.

II.3.8. Estimation de l'énergie produite par l'éolienne et le digesteur anaérobie

Avant d'envisager l'installation d'une éolienne et d'un digesteur anaérobie dans la ferme, rappelons les besoins énergétiques de la ferme. Et pour arriver à satisfaire cette ferme en énergie électrique et carburant, il est préférablement de déterminer des besoins énergétiques prévisionnels annuels et de la puissance énergétique à produire ; et on a besoin aussi d'avoir combien d'éolienne installée, le nombre de digesteur et leur volume selon la quantité de la matière organique disponible. Notre estimation de production d'énergie est :

- ✓ Pour éolienne on a besoin plus de **50000 KWh/an** d'électricité à produire.
- ✓ Pour le digesteur anaérobie il faut avoir plus de **150000 Litre/an** de gazole à produire.

II.4. Le digesteur anaérobie dans la ferme

II.4.1. L'objectif de digesteur anaérobie dans l'exploitation agricole

La production de biogaz par la digestion anaérobie permet également de traiter les rejets organiques et ainsi de réduire la charge polluante des déchets industriels. Elle contribue à une revalorisation de l'image des fermes en réduisant les odeurs et les pathogènes, en détruisant les mauvaises herbes des fumiers et en produisant un fertilisant amélioré plus facilement assimilable par les plantes.

II.4.2. Système de La méthanisation à la ferme

La méthanisation à la ferme favorise la production de biogaz à partir de substrats agricoles (déjections, résidus de culture,...). Pour cela, les matières organiques sont placées dans une cuve (appelée digesteur) fermée, brassée et sans oxygène. Le biogaz généré est ensuite récupéré pour produire de l'énergie (chaleur et électricité), la matière restante (appelée digestat) est stockée avant d'être épandue ou de subir un traitement.

La figure suivante représente différentes étapes de méthanisation dans la ferme.

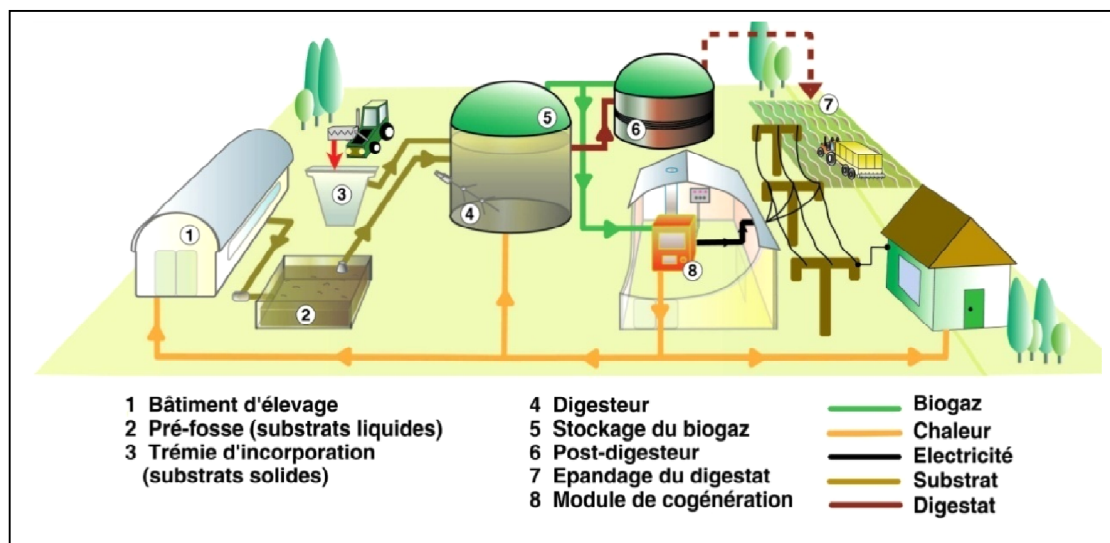


Figure II-1 : Différentes étapes de la méthanisation à la ferme.

Le digestat est la matière restante après la digestion anaérobie. Il est stocké dans une cuve, qu'il est conseillé de couvrir afin de limiter les pertes en azote et de récupérer le biogaz encore produit. Après la digestion, la caractéristique et le principe de digestat est :

- ✓ Amélioration de la valeur fertilisante des engrais de ferme ;
- ✓ Diversification des activités des exploitations agricoles et production de chaleur directement disponible ;
- ✓ Valorisation optimale des sous produits issus des exploitations ;
- ✓ Réduction des nuisances olfactives et des insectes ;
- ✓ Réduction des nuisances, production d'énergie propre, traitement de déchets ;
- ✓ Production de chaleur et d'électricité en remplacement des énergies fossiles ;
- ✓ Réduction de l'achat d'engrais minéraux.

II.4.3. Description d'une installation de digesteur anaérobie dans la ferme

Une installation de biométhanisation comprend les principaux composants suivants :

- Une fosse d'alimentation qui assure les fonctions :
 - ✓ De collecte des déjections issues des bâtiments d'élevage;
 - ✓ De stockage (volume tampon d'au moins deux jours de production de lisier) ;
 - ✓ De prétraitement éventuel (hachage, dilution, ...) ;
 - ✓ De préparation au bon taux de matières sèches de pH.
- Le digesteur proprement dit (le plus souvent en acier ou en béton, voire en fibres de verre ou polyester pour les plus petits), son isolation thermique (laine de verre ou de roche, polystyrène expansé, mousse de polyuréthane, ...), son système d'agitation et d'injection des matières.
- Un système de chauffage pour maintenir le contenu du digesteur à bonne température, le plus souvent 30 à 45°C. Les systèmes les plus fréquents sont : les échangeurs internes à eau chaude (serpentins ou chemises immergées dans le digesteur), et les

échangeurs de chaleur externes. Dans ce cas, l'alimentation peut être chauffée, avant son introduction dans le digesteur, par un échangeur où circule, soit la sortie du digesteur, soit de l'eau chaude.

- Une fosse de stockage de l'effluent méthanisé, appelé post digesteur et d'un système d'évacuation. Le post digesteur peut être chauffé (mais l'est rarement), couvert d'une bâche de récupération du biogaz, d'un système d'agitateur. Le post digesteur doit être dimensionné en tenant compte de la législation en matière de stockage des effluents liquides (capacité de stockage peut avoir jusqu'à 6 mois).
- Un système d'épuration du biogaz qui peut être intégré au digesteur. Le système de stockage de biogaz peut être un ballon souple, cas fréquent à la ferme, ou un gazomètre à cloche métallique ou encore un réservoir du type butane-propane.
- Un système de valorisation de la chaleur (réseau de chaleur, sécheur de digestat, de plaquettes de bois, de céréales,...).

II.4.4. Le choix de digesteur installé :

Le choix de digesteur à installer est **le digesteur discontinu**. Ce mode présente l'avantage d'être souvent peu coûteux et évite les problèmes techniques liés au pompage du substrat. Ils représentent de plus un intérêt pour la gestion des engrais de ferme sur l'exploitation. Une fois l'anaérobiose réalisée, la production gazeuse évolue de façon régulière, mais elle est limitée dans le temps. Pour obtenir un débit régulier de biogaz il faut disposer de plusieurs réacteurs en batterie, remplis et vidés à intervalles réguliers.

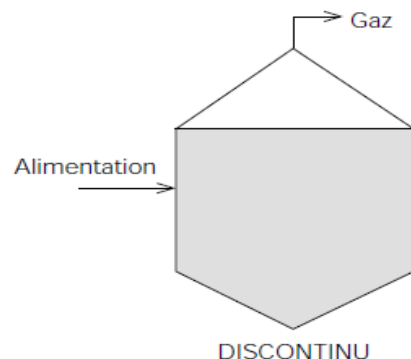


Figure II-2: digesteur discontinu.

II.4.5. Dimensionnement le volume de digesteur a installé

La taille du digesteur ou le volume de construction (V_c) est conditionnée par le temps de rétention (TR) et par la quantité du substrat disponible (S_d). La valeur du substrat disponible se compose de matière à digérer et de l'eau de mélange [18].

Le volume de digesteur (V_d) est calculé par la relation suivante :

$$V_d = S_d / \text{jour} * TR (\text{jour})$$

$$V_d = 0.95 * V_c$$

$$V_c = S_d / \text{jour} * TR(\text{jour}) / 0.95$$

II.4.6. Les déchets à méthaniser

Le choix de la biomasse qui va être fermentée est important. Pour maximiser la production de biogaz, il est souhaitable d'utiliser des produits riches en graisses, en hydrates de carbone et en protéines. Les produits ligneux (bois, branchage) ne sont pas utilisables car non dégradés par les bactéries.

1 tonne de...	m ³ de biogaz	de	Equivalent litre de fioul	KWh élec.
Lisier	16		11	30
Fumier	60		35	100
Paille	220		120	350
Graisse	450		350	1000

Tableau II-4: la quantité de biogaz produire.

II.4.7. Valorisation de biogaz dans la ferme

❖ Valorisation thermique :

Le biogaz peut être utilisé sur l'exploitation soit pour chauffer de l'air (brûleur en veine d'air ou récupération sur gaz d'échappement moteur ou chaudière) nécessaire au séchage des céréales par exemple, soit pour chauffer de l'eau chaude (chaudière) nécessaire au lavage des installations laitières. La chaleur ainsi produite peut aussi être exportée vers des consommateurs externes (industries, réseaux de chaleur, etc.) proches de l'exploitation.

❖ Valorisation électrique:

Le biogaz peut alimenter un moteur à gaz (ou turbine) qui produit de l'électricité avec un rendement de 30% environ. C'est à dire que **1 m³ de biogaz produit 2 kWh**. Cette électricité peut être consommée sur place ou exportée vers le réseau électrique.

❖ Valorisation de chaleur et de l'électricité (cogénération) :

La chaleur générée par le moteur nécessaire à la production d'électricité, est utilisée pour chauffer le digesteur (20 à 30% du biogaz permet de maintenir la température nécessaire au procédé) et de l'eau chaude. Ainsi, pour 1 kWh électrique produit, on peut récupérer 1,5 kWh de chaleur.

II.4.8. Les avantages et les inconvénients de production de biogaz dans la ferme

• Avantages

- ✓ Le potentiel énergétique par unité de surface est très important.
- ✓ Le recyclage des effluents d'élevage, des déchets verts, des marcs.

- ✓ Un bon bilan énergétique et diminution des odeurs d'effluents.
- ✓ On récupère la vidange de la fosse pour la fertilisation.

- **Inconvénients**

- ✓ Le coût, car le retour sur investissement est très long avec le tarif d'achat.

II.5. L'éolien dans la ferme

II.5.1. Le rôle d'une éolienne dans l'exploitation agricole

Pour satisfaire les besoins d'énergie électrique dans la ferme, il est important de choisir des éoliennes qui peuvent compenser un éventuel déficit énergétique. Leur installation se fait en choisissant l'endroit le plus venteux de la ferme. La viabilité économique de l'installation d'une éolienne sur la ferme dépend grandement de la qualité du vent. En règle générale, une vitesse annuelle moyenne du vent d'au moins **4 à 5 m/s** est nécessaire pour qu'une éolienne produise suffisamment d'électricité pour être rentable.

II.5.2. Comment choisir l'emplacement d'une éolienne dans la ferme ?

Il faut tenir compte de :

- ✓ La quantité de vent exploitable durant l'année.
- ✓ La qualité du vent : régularité d'écoulement, l'absence de turbulence...
- ✓ L'altitude : c'est un atout ; le vent est plus fort en altitude.
- ✓ Des obstacles : l'éolienne doit être installée à l'écart des obstacles dans une position ouverte aux vents dominants pour éviter des perturbations dues à des turbulences.

II.5.3. Le choix de type d'éolienne pour l'installation :

Dans notre projet, nous avons choisi l'**éolienne à axe horizontal** qui reste la plus répandue, Cette dernière a l'avantage d'être très rentable, sa puissance peut aller jusqu'à 100 kW. Toutefois, elle demande un terrain exigeant. L'éolienne horizontale perd en performance s'il y a des obstacles sur le terrain : arbre, maison et d'éviter les endroits de turbulence causée par le vent.



Figure II-3: Eolienne à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal présentent toutefois quelques inconvénients :

- ✓ Leur implantation nécessite une zone dégagée et sans obstacle, car elles sont assez volumineuses et leur surface de balayage est importante.
- ✓ Elles sont adaptées aux zones ventées, mais sans turbulence, car si le vent est trop fort, le système s'arrêtera automatiquement. De même en cas de vent trop faible, elles ne fonctionneront pas, car leur seuil de déclenchement est assez élevé.
- ✓ Leur sensibilité aux vents forts entraîne une maintenance importante.
- ✓ Elles sont plus chères que les éoliennes verticales.

II.5.4. L'énergie annuelle délivrée par éolienne

Pour obtenir une estimation préliminaire de l'énergie produite par une éolienne particulière, on utilise la formule suivante :

$$E_{pr} = \eta_{éol} * \frac{1}{2} * C_p * \rho * S * V_{moy}^3 * T(h)$$

D'où :

V : la vitesse moyenne à l'altitude de 30m.

S : La surface balayée par les pales d'éolienne par m^2 .

ρ : La masse volumique d'air (Kg/m^3).

C_p : le coefficient de puissance maximale théorique qui égale à 0.59.

E_{pr} : L'énergie électrique annuelle.

$\eta_{éol}$: Rendement globale de l'installation éolienne.

$T(h)$: est la période de validité de la distribution du vent respective. $T(h) = 1$ an.

II.5.5. Production Optimale d'énergie

La figure suivante représente la puissance d'éolienne en fonction de la vitesse vent :

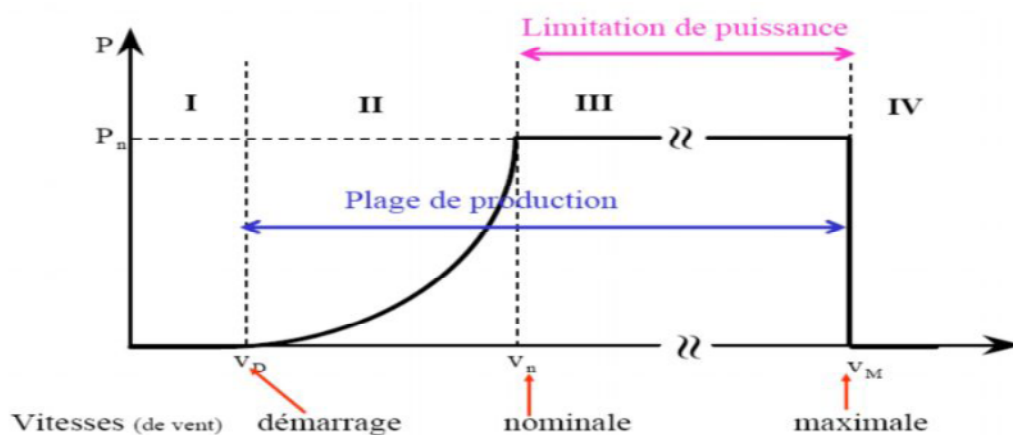


Figure II-4: Régulation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [16].

Pour garantir un captage maximal de l'énergie incidente, il faut adapter en régularité la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent et l'angle d'incidence des pales. Sur la caractéristique d'exploitation d'une éolienne de la Figure (II-4). Il existe quatre zones principales qui sont :

- ✓ La **zone 1**, où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage V_d de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas.
- ✓ La **zone 2**, dans laquelle la vitesse du vent est comprise dans le domaine $[V_d, V_n]$ correspond à la conversion d'énergie éolienne. La zone où il est possible d'optimiser.
- ✓ La **zone 3**, où la puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale P_n . En effet, au-delà de la « vitesse nominale » V_n du vent, le surcoût de dimensionnement (puissance du générateur, résistance mécanique des structures) ne serait pas amorti par le gain de production.
- ✓ La **zone 4** lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_M . Dans ce cas, la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence [17].

II.5.6. Avantages et inconvénients d'une éolienne

- **Inconvénients de l'éolien :**

- ✓ L'électricité éolienne est une énergie intermittente.
- ✓ Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit
- ✓ L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

- **Avantages de l'éolien:**

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- ✓ L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- ✓ La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- ✓ L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.

II.6. Conclusion

Dans le contexte actuel de l'augmentation de la production de déchets, la digestion anaérobie et la valorisation du biogaz ainsi produit, apparaissent comme des solutions d'avenir pour le traitement des déchets dans un esprit de développement durable ainsi que la production de l'électricité à partir des éoliennes représente un rôle important dans les fermes et les endroits isolés.

*Chapitre III : Dimensionnement
d'un digesteur anaérobie et une
éolienne*

III.1. Introduction

L'objet de notre travail dans ce chapitre est l'étude de l'alimentation en énergie thermique d'un digesteur de production du biogaz par un chauffe-eau en assurant une température mésophile. Et nous présentons le modèle mathématique qui décrit l'évolution de la température du substrat à l'intérieur du digesteur (partie échangeur de chaleur) pour une période donnée.

Comme aussi on présentera l'étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Pour ce faire, on s'intéresse à l'étude aérodynamique de ces systèmes éoliens.

III.2. Etude théorique d'un digesteur

III.2.1. Installation expérimentale

L'étude consiste à utiliser l'énergie thermique provenant d'un chauffe-eau pour chauffer un digesteur de production de biogaz.

III.2.2. Description de l'installation

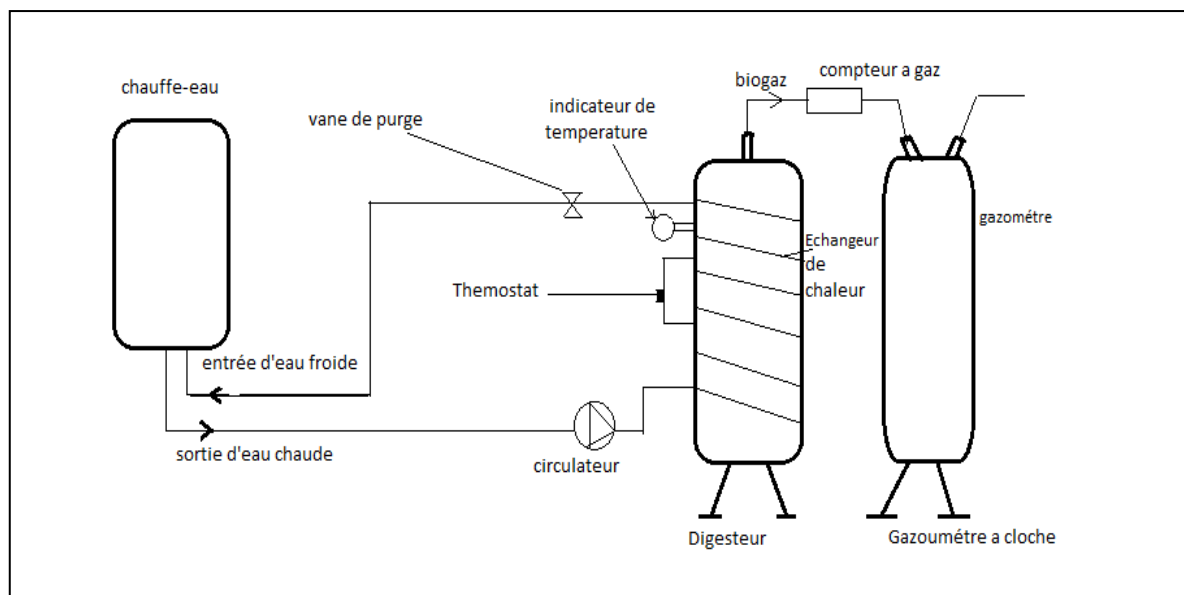


Figure III-1: Schéma de l'installation

III.2.3. Modélisation du bilan thermique à l'intérieur du digesteur

❖ Hypothèses

Les hypothèses simplificatrices du modèle reposent sur des considérations expérimentales :

- Le digesteur est considéré de type discontinu,
- Le volume du substrat dans le digesteur reste constant malgré qu'il y ait une dilatation de celui-ci,
- La pression de la cuve de digestion reste égale à la pression atmosphérique,
- La chaleur dégagée par la réaction exothermique du substrat est négligeable,
- Le modèle adopté sera du type unidirectionnel,

- Quelle que soit l'évolution de la température dans la zone de l'échangeur, le coefficient d'échange est supposé constant sur toute la longueur de l'échangeur,
- La géométrie de l'échangeur en serpentin est assimilée à une chemise en forme d'un cylindre creux de faible épaisseur,
- Le bilan thermique concerne la zone (A) représentée par le fluide (substrat) + l'échangeur de chaleur.

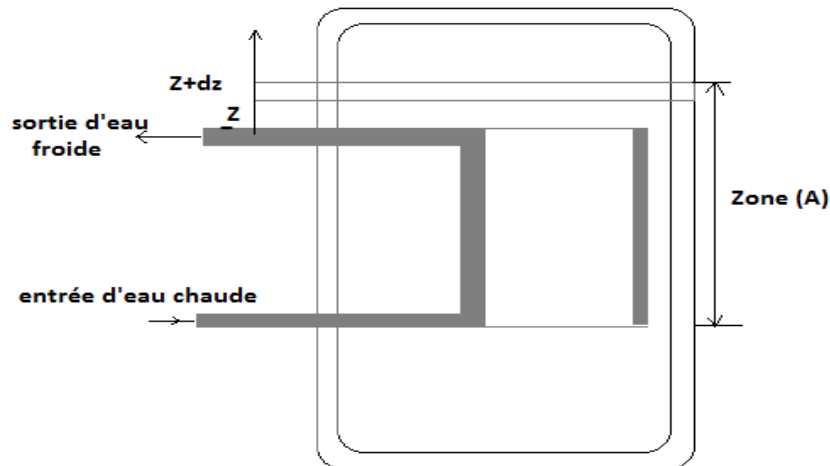


Figure III-2 : Schéma du digesteur muni d'un système de chauffage

III.2.4. Formulation mathématique

La méthode est basée sur le bilan thermique

- **Bilan thermique sur le digesteur**

Le bilan thermique est établi sur un élément de volume du fluide, de section (A_f) et d'épaisseur (dz). Il exprime l'égalité entre la variation de l'énergie interne et les différents flux traversant la frontière de cet élément [18].

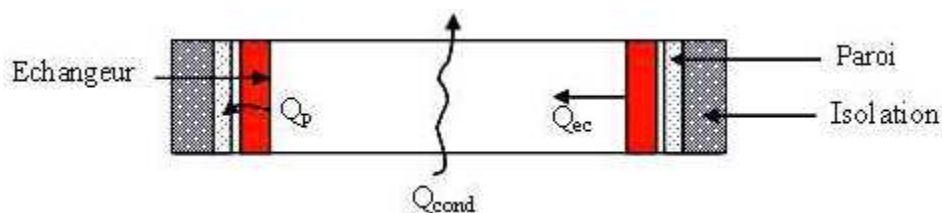


Figure III-3: Une tranche de fluide dans le digesteur

Le bilan thermique s'écrit :

$$\Delta u_f = Q_{ec} + Q_{cond} - Q_p$$

$$\text{Tel que : } \left\{ \begin{array}{l} \Delta u_f = \frac{M_f C_f \partial T_f}{\partial t} \\ Q_{cond} = \frac{\lambda_f A_f dz \partial^2 T_f}{\partial Z^2} \\ Q_{ec} = U_{ec} A_{ec} (T_{ec} - T_f) \\ Q_p = h_p A_p (T_f - T_p) \end{array} \right.$$

D'où

Δu_f : variation de l'énergie interne stockée.

Q_{cond} : transfert conductif à travers le fluide.

Q_{ec} : puissance fournie par l'échangeur de chaleur au fluide (substrat).

Q_p : les échanges de chaleur par convection à travers les parois latérales.

$$\frac{M_f C_f \partial T_f}{\partial t} = \frac{\lambda_f A_f dz \partial^2 T_f}{\partial Z^2} - h_p A_p (T_f - T_p) + U_{ec} A_{ec} (T_{ec} - T_f)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{a \partial^2 T_f}{\partial Z^2} - \frac{h_p A_p (T_f - T_p)}{M_f C_f} + \frac{U_{ec} A_{ec} (T_{ec} - T_f)}{M_f C_f} \quad (\text{III-1})$$

Avec : $a = \frac{\lambda_f}{\rho_f C_f}$; a : diffusivité thermique

L'équation est associée à la condition initiale et aux limites suivantes

➤ **Condition initiale :**

$$t=0, \quad T_f(0, i) = T_a$$

➤ **Condition aux limites :**

Type adiabatique : $\frac{\partial T_f}{\partial Z} = 0$; $T_p = T_a$

On effectue le bilan thermique correspondant a : $H_{ec} = Z$

• **Résolution numérique**

L'équation aux dérivées partielles (III-1) est résolue numériquement en utilisant la méthode explicite aux différences finies avec l'aide de Matlab.

En utilisant la description, l'équation (III-1) devient :

$$T_{fi}^{t+1} = \left[\left(1 - \left(\frac{U_{ec} A_{ec}}{M_f C_f} \right) + \left(\frac{h_p A_p}{M_f C_f} \right) + \left(\frac{2a}{\Delta Z^2} \right) \right) \Delta t \right] T_{fi}^t + \left(\frac{a \Delta t^2}{\partial Z^2} \right) [T_{fi-1}^t + T_{fi+1}^t] + \left(\frac{\Delta t}{M_f C_f} \right) [(U_{ec} A_{ec} T_{ech}) + (h_p A_p T_p)] \quad (\text{III-2})$$

III.2.5. Echangeur de chaleur

Échangeurs thermiques sont nécessaires dans plusieurs types : Chauffage et Froid, Pétrochimie, Chimie, Distillerie, Agroalimentaire, Papeterie, Environnement, ...

Pour ces types d'échangeurs, l'échange thermique se fait généralement entre deux fluides.

Les échangeurs à fluides séparés permettent le transfert de chaleur d'un fluide à un autre sans mélange. Les mécanismes de transfert thermique utilisés sont :

- la convection forcée entre fluide primaire et paroi,
- la conduction à travers la paroi,
- la convection libre ou forcée entre paroi et fluide secondaire.

❖ **Hypothèses :**

Les deux fluides (eau, substrat) ne subissent pas de changement d'état.

Avec :

Le fluide chauffant : l'eau, a une température indiquée par T .

Le fluide chauffé : eau plus déchets ménagers, a une température indiquée par θ .

- Les deux fluides sont à courant parallèle et de même sens (Co-courant).
- On désigne les deux températures extrêmes du fluide chauffant par T_0 et T_1 ($T_0 > T_1$), et celles du fluide chauffé par θ_0 et θ_1 , dans tout les cas, l'indice 0 correspondra à la section d'entrée du fluide chauffant et l'indice 1, à la section de sortie de ce fluide.

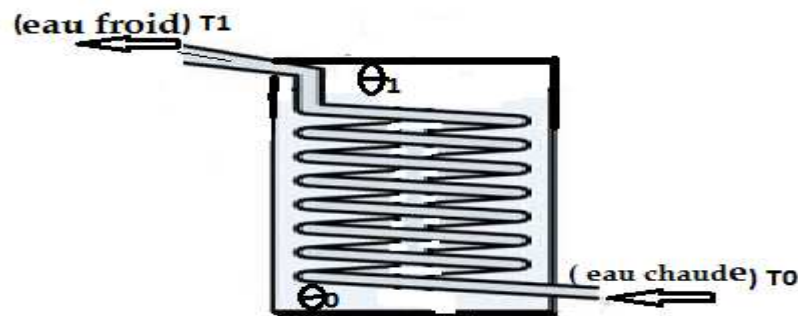


Figure III-4 : température d'entrée et sortie de l'échangeur

Dans toute section droite de l'échangeur, la température de chacun des sections est uniforme, ces deux température (T et θ), ainsi que la quantité de chaleur depuis la section d'entrée chauffant jusqu'à la section considérée, ne dépendent que de la surface d'échange S comprise entre ces deux sections. Pour un élément de surface, la quantité de chaleur échangée par unité de surface est donnée par :

$$d\phi = U_{ec}(T - \theta)ds$$

Avec :

U_{ec} : Étant le coefficient de transmission thermique.

On désigne respectivement par q et C le débit de masse et la chaleur massique du fluide chauffant, et par q' et C' les mêmes grandeurs pour fluide chauffé, nous avons donc:

$$d\phi = -qCdT = q'C'd\theta$$

$$D'où : \frac{dT}{(T-\theta)} = -\left(\frac{U_{ec}}{qC}\right) ds$$

$$Et : \frac{dT}{(T-\theta)} = -\left(\frac{U_{ec}}{q'C'}\right) ds$$

Admettons que les chaleurs massique C et C' ne dépendant pas de la température, et posons que :

$$\left(\frac{U_{ec}}{qC}\right) = \beta \quad \text{et} \quad \left(\frac{U_{ec}}{q'C'}\right) = \beta'$$

Après intégration, nous obtenons la relation :

$$T - \theta = (T_0 - \theta_0)e^{-(\beta+\beta')s}$$

Ce qui permet d'écrire séparément les expressions de dT et dθ et d'en tirer les deux équations suivantes fixant la variation de T et θ avec s :

$$T = \frac{\beta'T_0 + \beta\theta_0 + (T_0 - \theta_0)e^{-(\beta+\beta')s}}{\beta' + \beta} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\beta'T_0 + \beta\theta_0 + (T_0 - \theta_0)e^{-(\beta+\beta')s}}{\beta' + \beta} \quad (4)$$

Cette variation est représentée par les deux courbes de la figure (III-3). Les relations (3) et (4) montre que, si S croit indéfiniment, les grandeurs T et θ tendent vers la même limite, qui est la température que l'on obtiendrait par un mélange des deux fluides.

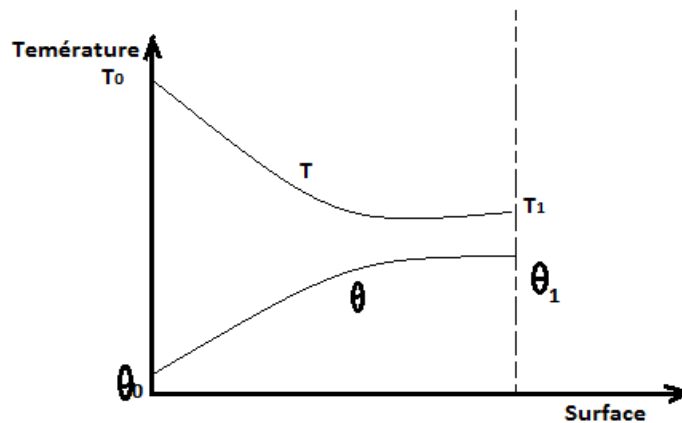


Figure III-5 : évolution des températures dans un échangeur à courant parallèles de même.

D'où, l'équation donnant la variation de la température de l'échangeur T_{ec} pour chaque itération i est :

$$T_{eci} = T = \frac{\beta'T_0 + \beta\theta_0 + (T_0 - \theta_0)e^{-(\beta+\beta')s}}{\beta' + \beta}$$

Avec: $S(i) = S(i-1) + ds$

III.2.6. Evaluation du coefficient d'échange global d'un échangeur à serpentin

❖ Méthode DTLM :

DTLM représente la différence de Températures Logarithmiques Moyennes entre deux fluides. Si l'on admet les hypothèses suivantes :

- ✓ La capacité thermique des deux fluides (eau, substrats) reste sensiblement constante pendant leur traversée de l'échangeur.
- ✓ Le coefficient d'échange local reste constant tout long de l'échangeur.

On démontre que le flux total échangé peut s'écrire :

$$\Phi = U_{ec} A_{ec} DTLM$$

Avec :

$$DTLM = \frac{\Delta T - \Delta \theta}{\ln \frac{\Delta T}{\Delta \theta}}$$

U_{ec} : Le coefficient d'échange moyen pour l'ensemble de l'échangeur.

Pour un échangeur à courants parallèles :

$$\Delta T = T_1 - T_0$$

$$\Delta \theta = \theta_1 - \theta_0$$

Les indices 0 et 1 désignent l'entrée et la sortie de l'échangeur.

$$\Phi = qC(T_1 - T_0)$$

La connaissance des températures des deux fluides à l'entrée et à la sortie de l'échangeur permet de calculer le coefficient d'échange U_{ec} :

$$U_{ec} = \frac{qC(T_1 - T_0)}{A_{ec} DTLM}$$

❖ Evaluation théorique du coefficient d'échange à partir des corrélations :

Le transfert de chaleur entre l'eau circulant dans l'échangeur et le substrat dans le digesteur est due à la convection forcée entre le fluide caloporteur et la paroi interne de l'échangeur puis à la conduction à travers la paroi et enfin à la convection libre qui assure les échanges thermiques entre la paroi extérieure de l'échangeur et le substrat.

L'évaluation du coefficient d'échange global nécessite la détermination des termes suivants :

- ✓ h_1 : coefficient d'échange par convection forcée à l'intérieur de l'échangeur.
- ✓ h_2 : coefficient d'échange par convection libre entre la paroi extérieure de l'échangeur et le substrat.
- ✓ λ_{ec} : conductivité thermique de la paroi de l'échangeur.

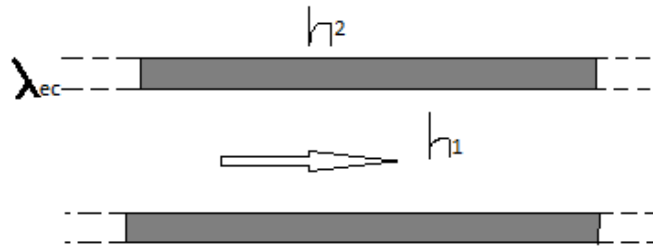


Figure III-6 : transfert de chaleur dans un tube

❖ Coefficient d'échange par convection forcée :

L'échange de chaleur entre l'eau et la paroi interne de l'échangeur est un échange par convection forcée suivant un régime laminaire ou turbulent déterminé par le nombre de Reynolds[20].

$$R_e = \frac{\rho v d_1}{\mu_1}$$

Le coefficient d'échange h_1 est obtenu par le nombre de Nusselt :

$$N_u = \frac{h_1 d_1}{\lambda_1}$$

Avec :

λ_1 : est la conductivité de l'eau à la température de film

Nous avons effectuée la corrélation de SEBAN et MAC LAUGHLIN [19] destinée aux tubes horizontaux :

$$N_u = 0.026 R_e^{0.8} P_r^{0.4}$$

D'où :

$$h_1 = \frac{\lambda_1}{d_1} 0.026 R_e^{0.8} P_r^{0.4}$$

$$\text{Avec : } P_r = \frac{v}{a} \quad a = \frac{\lambda_f}{\rho_f c_f} \quad \text{et } v = \frac{\mu}{\rho}$$

❖ Coefficient d'échange par convection naturelle :

En convection naturelle, le nombre de Reynolds est remplacé par le nombre de Grashof qui sera, dans le cas d'un cylindre rapporté au diamètre extérieur d_2 :

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T d_2^3}{\nu_2}$$

ΔT : est la différence de température entre la paroi extérieur du tube et l'eau :

Le coefficient d'échange h_1 est obtenu par le nombre de Nusselt construite sur le diamètre extérieur du tube :

$$N_u = \frac{h_2 d_2}{\lambda_2}$$

D'après la recherche bibliographique, nous a conduits à utiliser la corrélation de CHAPMAN [20].

$$N_u = 0.525(G_r P_r)^{0.25}$$

D'où :

$$h_2 = \left(\frac{\lambda_2}{d_2}\right) 0.525(G_r P_r)^{0.25} .$$

III.3. Etude théorique d'une éolienne :

III.3.1. Énergie fournie par le vent

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

m : masse du volume d'air (en kg)

V : vitesse instantanée du vent (en m/s)

E_c : énergie cinétique (en joules)

La puissance correspondante s'écrit :

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot V_0^2$$

Ainsi, la puissance de la masse d'air noté P_v , qui traverse une surface équivalente a la surface active S de l'éolienne avec $\dot{m} = \rho \cdot S \cdot V_0$:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_0^3$$

III.3.2. Énergie théorique récupérable par le rotor :

Toute utilisation de cette énergie « freine » le flux, c'est-à-dire, provoque un ralentissement. C'est comme une rivière, qui ralentit quant une centrale hydroélectrique utilise une partie de son énergie cinétique. Ce simple raisonnement montre que l'éolienne ne pourra donc jamais récupérer la puissance

cinétique fournie par le vent, donc la puissance récupérée par le rotor éolienne est déterminé par BETZ.

❖ Théorie de Betz :

La théorie générale du moteur éolienne a axe horizontale dite aussi théorie de Betz, indique que l'énergie cinétique du vent n'est pas entièrement récupérée, donc la vitesse du vent à en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval. Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortant. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

Selon Betz, les résultats qui suivent sont valable que sous des conditions idéales de rotor de vent, c'est-à-dire :

- ✓ Le rotor n'a pas de pertes mécaniques ou aérodynamique et un nombre infini de pales conçu de façon optimal,
- ✓ L'air est incompressible et sans frottement,
- ✓ Le flux avant et après le rotor est laminaire, c'est-à-dire les lignes de courant sont parallèles et perpendiculaires au plans du rotor. cela signifie que le rotor extrait de l'énergie du vent sans perturber son flux idéal.

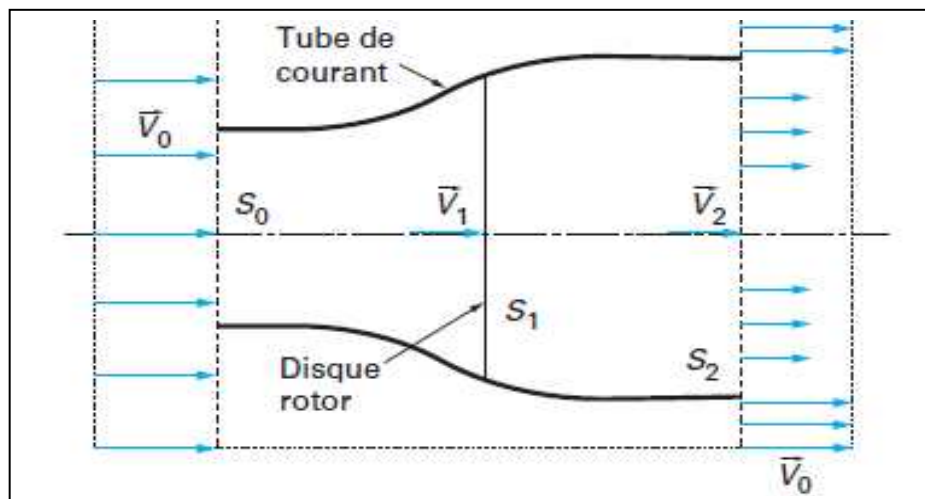


Figure III-7 : Principe de la théorie de Betz

Avec :

- V_0 : vitesse de l'air à l'amont du rotor
- S_0 : surface à l'entrée du tube de courant
- V_1 : la vitesse de vent à la traversée du rotor
- S_1 : la surface balayée par le rotor
- V_2 : la vitesse à l'aval de du rotor
- S_2 : la section de sortie.

L'effort que le vent exerce sur le rotor est donné par la relation suivante :

$$F = \dot{m} (V_0 - V_2) \quad (\text{III-3})$$

Selon la relation de conservation du débit massique :

$$\dot{m} = \rho \cdot S_0 \cdot V_0 = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 = \rho \cdot S_2 \cdot V_2$$

On remplace \dot{m} par sa valeur, on obtient :

$$F = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 (V_0 - V_2)$$

La puissance absorbée par l'éolienne dont le point d'application se déplace à la vitesse V_1 par rapport aux molécules d'air en mouvement est, dans ces conditions :

$$P = F \cdot V_1 = \rho \cdot S_1 \cdot V_1^2 (V_0 - V_2)$$

La variation de l'énergie cinétique, ΔE_c de la masse d'air qui traverse par second le rotor de la turbine est :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot t (V_0^2 - V_2^2)$$

Alors la puissance absorbée par le rotor éolienne est donnée comme suite :

$$P = \frac{\Delta E_c}{t} = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \cdot (V_0^2 - V_2^2)$$

En égalisant les équations de la puissance, et on tire :

$$V_1^2 (V_0 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot V_1 \cdot (V_0^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} (V_0 - V_2) \cdot (V_0 + V_2)$$

Ce qui donne :

$$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2}$$

III.3.3. La puissance maximale récupérable par l'éolienne

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

Remplaçant V_1 dans l'expression de la puissance P est on obtient :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S_1 \cdot \frac{V_0 + V_2}{2} \cdot (V_0^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \rho \cdot S_1 (V_0 + V_2)^2 \cdot (V_0 - V_2)$$

Puisque V_2 est inférieur à V_1 , on introduit le paramètre a , qui est le facteur d'induction axiale compris entre 0 et 1 :

$$\text{Avec : } a = \frac{V_2}{V_0}$$

$$\text{D'où : } P = \frac{1}{4} \rho \cdot S_1 V_0^3 \cdot (a - 1)^2 \cdot (1 - a)$$

Etudiant la variation de la puissance recueillie en fonction de facteur d'induction axiale a , c'est-à-dire nous allons étudier : $\frac{dP}{da} = 0$

$$D'où : \frac{dP}{da} = 0 = 2(a + 1) \cdot (1 - a) - (a + 1)^2 = 0$$

L'équation $\frac{dP}{da} = 0$ admet deux racines :

Une est négative ($V_0 = -V_2$), qui n'est aucun sens physique et l'autre égale à $\frac{1}{3}$ ($a = \frac{1}{3}$)

Ce qui veut dire que $V_2 = \frac{V_0}{3}$, c'est la valeur pour laquelle la puissance récupérée soit maximale.

En reporte cette valeur particulière V_2 dans l'expression de P , on obtient pour la puissance maximale susceptible d'être recueillie, la valeur :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^3$$

Donc le coefficient de puissance maximale théorique C_p^{opt} est défini par :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_V} = \frac{\frac{8}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_0^3}{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_0^3} = \frac{16}{27} = 0.59$$

La valeur 0.59, représente la valeur optimale du coefficient de puissance, est appelé aussi la limite de Betz.

Ainsi le coefficient de puissance C_p peut être exprimé avec le rapport de vitesse amont et aval du rotor, tel que $a = \frac{V_2}{V_0}$:

D'où :

$$C_p = \frac{1}{2} (a + 1) \cdot (1 - a^2)$$

La figure suivante représente le coefficient de puissance en fonction de rapport de vitesse :

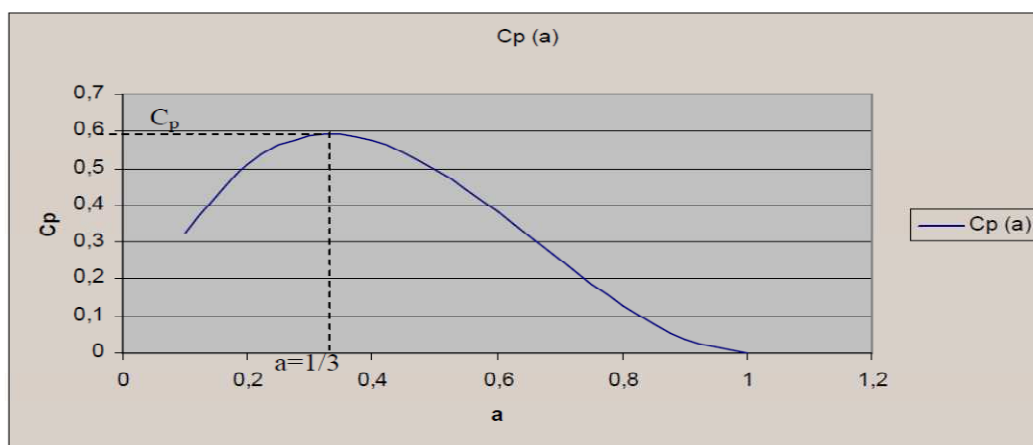


Figure III-8: Evolution du coefficient de puissance

Le vent opérant à des poussées supérieures (a faible) implique qu'une plus grande quantité d'air est déviée et donc une baisse de l'énergie totale potentiellement exploitable. En correction, lorsque le coefficient a augmente, la vitesse du vent passant à travers le rotor diminue et donc l'énergie exploitable fonction de la vitesse au cube.

Ainsi le rendement théorique maximal est donné comme suit :

$$\eta_{\max} = \frac{P_m}{P_v}$$

III.3.4. Rendement des composants d'une éolienne :

L'énergie fournie par l'Aérogénérateur étant toujours transformée, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations.

- Hélice : $0.20 < \eta < 0.85$
- Le multiplicateur ou le réducteur : $0.7 < \eta < 0.98$
- L'alternateur ou la génératrice continue : $0.8 < \eta < 0.98$
- Le transformateur : $0.85 < \eta < 0.98$
- Le redresseur : $0.9 < \eta < 0.98$
- Les batteries : $0.7 < \eta < 0.8$
- Les pertes de lignes : $0.9 < \eta < 0.99$

Les rendements de chaque élément varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, il semble difficile de dépasser 70% de la limite de Betz.

III.3.5. La vitesse spécifique

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ (Lambda) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre

- si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente
- si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide.

D'où :

$$\lambda = \frac{U}{V} = \frac{\omega \cdot R}{V}$$

λ : Vitesse spécifique (sans unité)

U: vitesse de l'extrémité des pales (en m/s)

V: vitesse du vent (en m/s)

R: longueur des pales ou rayon de la turbine (en m)

$\omega = 2\pi \cdot f$: La vitesse angulaire du rotor (tr/min).

III.3.6. Couple mécanique produit par l'éolienne

$$\Gamma = \frac{P}{\omega}$$

Γ : couple mécanique produit par l'éolienne (en N.m).

P : puissance mécanique (en W).

ω : fréquence de rotation du rotor (en rad/s).

III.3.7. Etude aérodynamique des pales

La partie la plus importante d'une éolienne est constituée par les pales car c'est sur elles que s'exercent les efforts aérodynamiques et donc dépend le rendement de la machine. La figure (II.) représente une coupe transversale d'une pale d'éolienne.

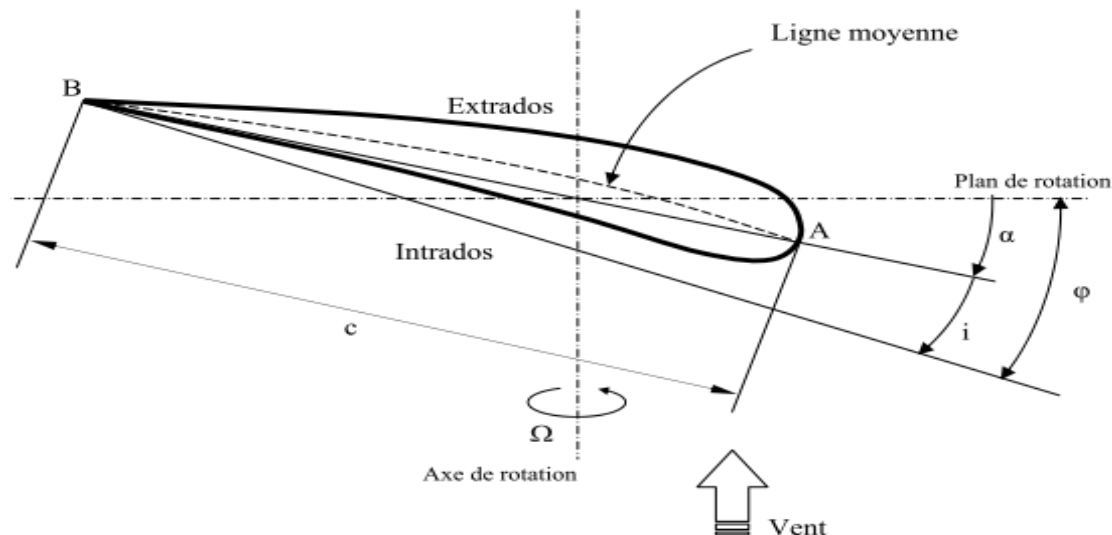


Figure III-9 : Caractéristiques géométriques de l'élément pale.

On définit l'élément pale par les caractéristiques géométriques suivantes :

A : Le bord d'attaque de l'élément pale.

B : Le bord de fuite de l'élément pale.

C ou AB : La corde de référence du profil.

i : Angle d'attaque, c'est l'angle que fait la corde de profil avec la direction de la vitesse relative.

α : Angle de calage, c'est l'angle que fait la corde de profil avec le plan de rotation de l'hélice.

φ : Angle d'inclinaison, c'est l'angle que fait la direction de la vitesse relative avec le plan de rotation de l'hélice.

❖ Bilan des forces exerçantes sur un élément de la pale

Pour l'étude des actions aérodynamiques, il est commode d'évaluer les projections de la force résultante dF sur un système d'axes liés à la vitesse relative W , ainsi sur un système d'axe liés au plan de rotation de l'hélice :

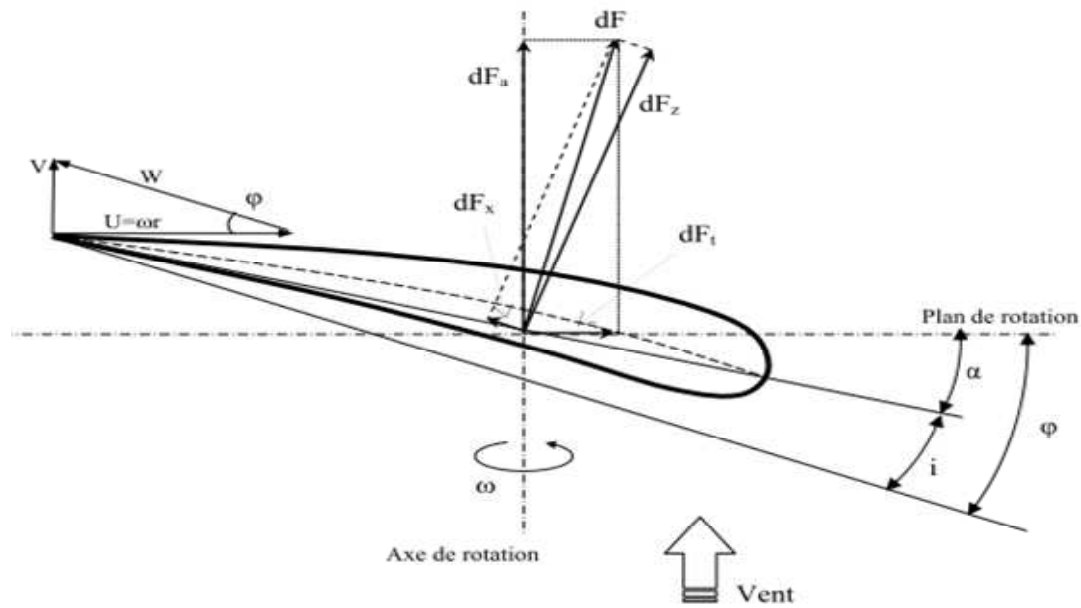


Fig. III-10 : Bilan des forces sur un élément de la pale.

- Une composante dF_z normale à la vitesse relative W orientée positivement de bas en haut et appelée portance.
- Une composante dF_x parallèle à la vitesse relative W appelée traînée.
- Une composante axiale dF_a normale au plan de rotation de l'hélice.
- Une composante tangentielle dF_t parallèle au plan de rotation de l'hélice.

➤ **La portance :**

Comme pour l'aile d'un avion, une pale d'éolienne utilise l'effet de portance. Cet effet est dû à l'écoulement de l'air autour du profil qui est plus rapide sur l'extrados (le dessus) que sur l'intrados (le dessous) de l'aile, ce qui entraîne une dépression sur l'extrados. Le flux d'air circule plus rapidement sur l'extrados car la longueur à parcourir est plus importante que sous l'intrados, l'écoulement d'air devant rester constant à l'avant et à l'arrière de la pale, l'air s'écoule donc plus rapidement.

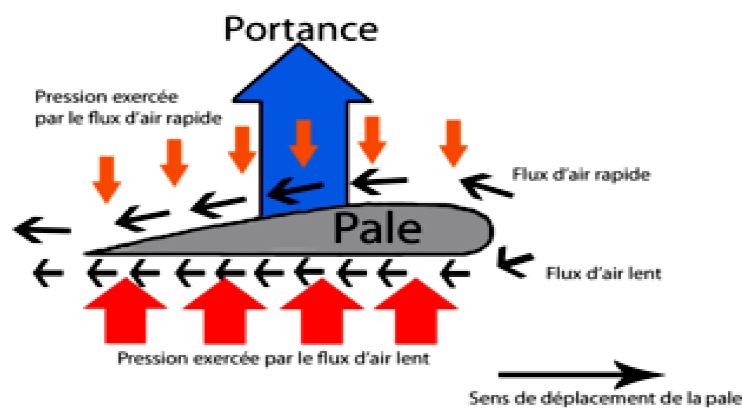


Figure III-11 : présente la portance

Alors la force de la portance est perpendiculaire à la direction de vent:

$$dF_z = \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_z$$

➤ **La trainée :**

En aérodynamique la traînée correspond à la résistance d'air, celle-ci augmente avec la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air.

La force de trainée est donnée par la formule suivante :

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_x$$

Avec :

ρ : La masse volumique de l'air.

W : vitesse relative de l'air (m/s).

dS_c : Surface de référence.

C_x : Coefficient de trainée.

C_z : Coefficient de portance.

Les coefficients de portance et de trainée dépendent de l'angle d'attaque i (fonctions de l'angle d'incidence φ du vent sur l'élément pale et de l'angle de calage α d la pale) et de type de profil de la pale. ($I = \varphi - \alpha$).

A partir des expressions de la portance et de la trainée, on calcul les forces des poussée axiale dF_a et tangentielle dF_t agissantes sur l'élément de la pale :

$$dF_a = dF_z \cdot \cos(\varphi) - dF_x \cdot \sin(\varphi)$$

$$dF_a = \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_z \cdot \cos(\varphi) - \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_x \cdot \sin(\varphi)$$

Et la force tangentielle dF_t , est donnée par la formule suivante :

$$dF_t = dF_z \cdot \sin(\varphi) - dF_x \cdot \cos(\varphi)$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_z \cdot \sin(\varphi) - \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_x \cdot \cos(\varphi)$$

III.3.8. Couple aérodynamique produit :

Le couple $d\Gamma$ dû à la force dF par rapport à l'axe de rotation de l'hélice est égal au produit du bras de levier r par la projection de la force dF sur le plan de rotation de l'hélice :

$$d\Gamma = r \cdot (dF_z \cdot \sin(\varphi) - dF_x \cdot \cos(\varphi))$$

III.4. CONCLUSION

En première lieu, je fais une étude a porté sur la régulation de température au niveau d'un digesteur alimenté par un chauffe-eau.

En deuxième lieu est détaillé le mode de fonctionnement des moteurs éoliens. On est arrivé à calculer l'énergie fournie par le vent, et l'énergie récupérée par les pales de la turbine éolienne, ainsi on a calculé la limite de Betz qui est de 59% par rapport à l'énergie cinétique du vent, et les paramètres caractéristiques de l'éolienne. Et on a passé à l'étude aérodynamique des pales de la turbine éolienne, pour cela on a établi le bilan des forces sur un élément pale tels que la force de traînée et de portance, pour aboutir au couple mécanique produit par le rotor de la turbine éolienne.

*Chapitre IV : Résultats et
discussions*

IV.1. Introduction

Le but de cette partie est de présenter une étude sur la production de biogaz et d'énergie électrique dans la ferme. Il s'agit de calculer la quantité d'énergie à produire par combinaison d'énergie éolienne et d'énergie biomasse par le biais d'un digesteur anaérobie. Une étude technique assez poussée, prenant en compte les spécificités d'un site potentiel, une ferme, permet d'évaluer les besoins énergétiques de celle-ci.

IV.2. Activités soutenues dans cette ferme :

- **Une comptabilité énergétique** permettant de constituer un outil de décision de gestion énergétique, d'établir des ratios de consommation, de vérifier le bon fonctionnement des installations et de permettre le contrôle de la consommation énergétique ;
- **Un audit énergétique**, méthode d'évaluation qui a pour objectif l'établissement d'un état des consommations en énergie d'un bâtiment d'élevage et l'identification des points d'améliorations de sa performance énergétique ;
- **Une étude de préfaisabilité** qui évalue l'intérêt d'installer une technologie particulière comme cogénération, système de chauffe-eau solaire, chaufferie au bois, éolienne;
- **L'installation d'une cogénération** de qualité ou exploitant une énergie renouvelable de type hydraulique, solaire, géothermique, biogaz, à partir de déchets organiques;
- **Les investissements** améliorant la performance énergétique du bâtiment d'élevage comme l'installation d'un réseau de chaleur, l'isolation thermique, l'amélioration du système de chauffage, d'éclairage, de ventilation, du refroidissement, etc.
- Réalisation d'un audit énergétique aboutissant à un plan global d'amélioration de l'efficacité énergétique dans la ferme.

IV.3. La quantité de biogaz à produire

IV.3.1. Description du substrat utilisé

Les déchets qui nous intéressent, sont les déchets organiques d'élevage qui sont collectés quotidiennement et qui se composent en général de lisier, bouse de vache et fumier...etc. L'ensemble des déchets fermentescibles est environ de 3465.75 kg/jour. Alors la charge utilisée pour le dimensionnement, en prenant 1kg de MO=1litre de MO, est de 3465.75 litre/jour, diluée dans 3465.75 litre d'eau qui donne un substrat de 6931.5litre/jour.

IV.3.2. Dimensionnement du digesteur installé dans la ferme

La taille du digesteur ou le volume de construction(V_c) est conditionnée par le temps de rétention(TR) et par la quantité du substrat disponible(S_d). La valeur du substrat disponible se compose de la matière à digérer et de l'eau de mélange. Le volume du digesteur (V_d) est calculé par la relation suivante :

$$V_d = S_d(\text{l})/\text{jour} * \text{TR} (\text{jour})$$

$$V_d = 6931.5 \text{ L/jour} * 20 \text{ jours} = 138630 \text{ litre (138.63 m}^3\text{)}$$

$$V_c = V_d / 0.95$$

$$V_c = 138.63 / 0.95 = 145.92 \text{ m}^3$$

Ce volume nous paraissant trop imposant par rapport à la taille de la ferme, nous avons choisi d'installer deux(2) digesteurs de moindre capacité qui doivent avoir chacun un volume de 69.31 m³. Etant donné la quantité de substrat disponible, le temps de rétention devrait être au moins de 20 jours.

IV.3.3. La quantité de biogaz produite

Les données techniques de l'installation sont reportées ci-dessous :

- ✓ Les déchets qui nous intéressent sont les bouses de vache et lisier qui sont collectées quotidiennement.
- ✓ Temps de séjour dans le digesteur est de 20 jours.
- ✓ Température à l'intérieur de digesteur est 30 °C à 40 ° C.
- ✓ Ph optimal est situé entre 6,7 et 7,3.

Certains digesteurs produisent 20 m³ de biogaz par tonne de rejets organiques tandis que d'autres digesteurs peuvent récolter jusqu'à 300 m³ de biogaz par tonne de matière organique, et que tout dépend de la qualité de la matière organique utilisée, du design du digesteur ainsi que du mode opératoire du système. Dans notre cas le digesteur produit 83m³ par tonne de matière organique [21].

Capacité chacun des deux digesteurs	72.96 m ³
Déchet utilisable	2530 tonnes/an
Production de biogaz	2530 tonne/an de MO ce qui donne 210000m ³ /an du biogaz [22]
Production électrique	1 m ³ de biogaz =6KWh, l'électricité produit est de 1,26MWh/an [23]

Tableau IV-1 : donnée technique de digesteurs de production de biogaz.

Sachant que le PCI du méthane vaut 9,94 kWh/m³ dans les conditions normales de température et de pression, à 60 % de méthane, il vaudra 6 kWh/m³.

La combustion de biogaz dans un appareil de cogénération produit 2 kWh de chaleur par m³ de biogaz. La chaleur récupérée est donc de 0.42MWh/an.

IV.3.4. Equivalent du biogaz produit à différentes énergies classiques utilisées dans la ferme

La quantité de biogaz dépend à la fois de la nature et de la concentration des matières organiques ainsi que de la température au sein du digesteur. Selon notre étude du besoin

d'énergie électrique et carburant dans la ferme, et d'après la conversion le biogaz, on obtient les différents carburants qui se montrés dans le tableau suivant :

	Electricité (MWh/an)	Gazole (litre/an)	Gaz naturel (litre/an)	Essence (litre/an)	Charbon (kg/an)
La quantité de biogaz produire est : 210000m ³ /an	1,26	210000	197400	241500	273000

Tableau IV-2 : quantité de biogaz produire.

D'où :

1m³ de biogaz est équivalent à :

- ✓ 1 litre de gazole ;
- ✓ 0,94 litre de gaz naturel ;
- ✓ 1,3 kilogramme de charbon ;
- ✓ 1,15 litre d'essence.

IV.3.5. valorisation et conversion du biogaz dans la ferme

❖ La cogénération

La cogénération consiste à produire en même temps et dans la même installation de l'énergie thermique à flamme et de l'énergie mécanique. La chaleur est utilisée pour le chauffage et la production d'eau chaude à l'aide d'un échangeur.

L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique grâce à un alternateur. Les installations fonctionnent au gaz, au fioul, avec toute forme d'énergie locale (géothermie, biomasse...) ou liée à la valorisation des déchets (incinération des ordures ménagères...). Elles ont un excellent rendement énergétique, mais elles doivent produire au plus près des lieux de consommation en raison des pertes pendant le transport de chaleur.

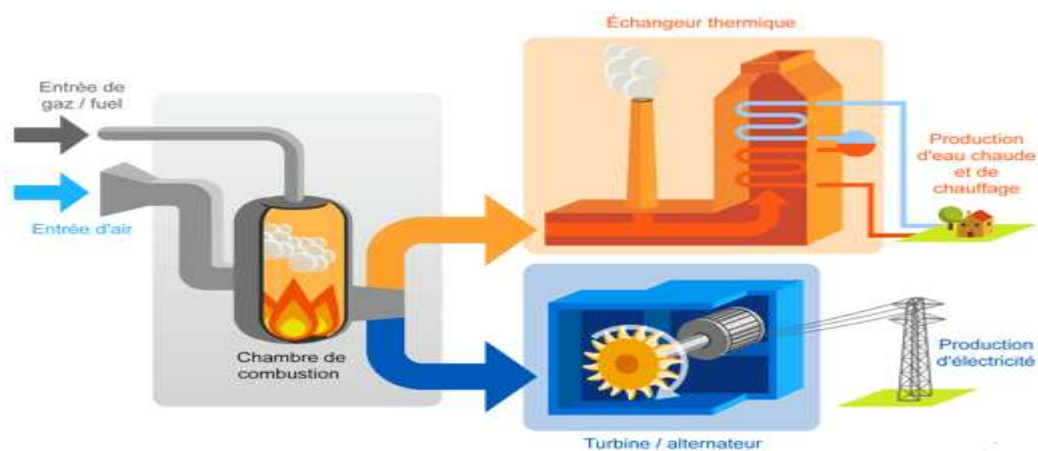


Figure IV-1 : centrale de cogénération

IV.3.6. L'utilisation de biogaz comme carburant pour les véhicules ou dans un réseau

Une fois purifié, le biogaz peut être utilisé comme équivalent au gaz naturel, soit comme carburant pour les véhicules fonctionnant au gaz naturel, soit en étant injecté dans un réseau de distribution de gaz naturel. Les concentrations admissibles des différents composants du biogaz sont fixées par les fabricants des moteurs ou par les gestionnaires des réseaux de distribution, selon le mode de valorisation envisagé.

IV.3.7. Les obligations qu'il faut prendre pour une installation de biogaz [24]

Le projet, les calculs, la construction, la mise en place, l'équipement et le fonctionnement de l'installation doivent tenir compte des contingences techniques.

Pour que l'installation fonctionne sans danger, il est impératif de respecter les règles de fonctionnement et d'entretien.

Le risque d'incendie et d'explosion ainsi que l'interdiction de fumer doivent être signalés par des panneaux bien visibles.

IV.3.7.1. Protection contre l'explosion

Les mesures nécessaires de protection contre les explosions doivent être appliquées dans les installations de biogaz et sur leur emplacement.

Elles comprennent :

- ✓ La prévention des explosions (éviter les mélanges explosifs par exemple en prenant les mesures d'aération qui s'imposent et prendre les mesures de sécurité pour supprimer tout risque d'incendie ;
- ✓ La protection constructive contre les explosions (p. ex. mesures de neutralisation via des dispositifs coupe-feu).

Les locaux ou les zones qui abritent des installations de biogaz ou des éléments de l'installation sont considérés comme des zones à risque d'explosion.

IV.3.7.2. Mesures d'aération

Les locaux qui abritent des installations de biogaz ou des éléments de l'installation, ou qui peuvent contenir du biogaz, doivent être suffisamment aérés. Les locaux en sous-sol doivent être obligés d'un système d'aération artificiel.

Les ouvertures d'aération et les bouches de sortie des canaux d'évacuation d'air doivent être conçues de telle manière que les substances puissent être évacuées sans risque.

IV.3.7.4. Fonctionnement et entretien

- ✓ Le fonctionnement et l'entretien des installations de biogaz ne doivent être confiés qu'à des personnes fiables, habituées à ce travail.
- ✓ Le constructeur doit fournir un mode d'emploi et un guide de maintenance précis.
- ✓ Les dispositifs de sécurité doivent être contrôlés périodiquement. Avec les systèmes qui fonctionnent avec de l'eau, il faut éviter la formation de glace en plaçant les installations en conséquence ou en abaissant le point de congélation de l'eau.

- ✓ Lorsque la cuve de fermentation est ouverte pour évacuer les boues ou pour des réparations, elle doit être ventilée à fond avant que quiconque y pénètre.
- ✓ Pour tous travaux de soudure, il convient de prendre les mesures de sécurité nécessaires.
- ✓ En période de fonctionnement, la cuve de fermentation ne doit être vidangée que dans la mesure où dans le stockage, il y a toujours assez de gaz pour remplir le volume qui se libère dans la cuve.

IV.4. Description d'une installation d'une éolienne dans la ferme

Critères pris en compte pour le choix d'un site éolien:

- **La nature du sol :**

Il doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne. La résistance du sol est variable. Elle résulte de sa résistance au cisaillement, c'est-à-dire de la résistance des particules du sol qui empêchent de glisser l'une sur les autres. La résistance au cisaillement dépend du type de sol et de son taux d'humidité. Elle est maximale dans la roche et minimale dans les sols vaseux [25].

Donc en classés la résistance des sols au cisaillement dans deux catégories :

- ✓ **Les sols cohésifs :** Ce sont des sols qui ont une forte teneur en argile, dans ce cas les particules s'accrochent l'une aux autres. Leur résistance au cisaillement est très élevée.
- ✓ **Les sols non cohésifs :** Sont ceux qui ont généralement une forte teneur en sable, leurs particules glissent facilement l'une sur les autres. Leur résistance au cisaillement est très faible par rapport aux sols argileux.

- **L'accessibilité du site :**

Il doit permettre le transport des éléments de l'éolienne (pales, tour, nacelle) et des grues nécessaires au montage.

- **La connexion au réseau électrique :**

Pour cela, les petites fermes d'éoliennes sont le plus souvent situées à proximité d'un poste de transformation haute tension afin de diminuer le coût de raccordement qui est directement fonction de la distance à ce poste. Pour les grosses fermes d'éoliennes, le réseau doit être en mesure de supporter l'énergie produite, et son renforcement est parfois nécessaire (renforcement ou création de poste de transformation).

IV.4.2. Description du climat éolien :

IV.4.2.1. Mesure du vent :

Le vent se caractérise par deux variables : la vitesse et la direction. Aujourd'hui, il existe plusieurs systèmes de mesure et d'enregistrement de la vitesse et la direction du vent. Selon les normes internationales, le vent se mesure à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol et on enregistre sa vitesse moyenne toutes les 10 minutes.

IV.4.2.2. Le vent en Algérie :

L'Algérie à un régime du vent modéré (2 à 6 m/s), selon la carte des vents, la (figure. IV.1) montre différentes vitesses en Algérie.

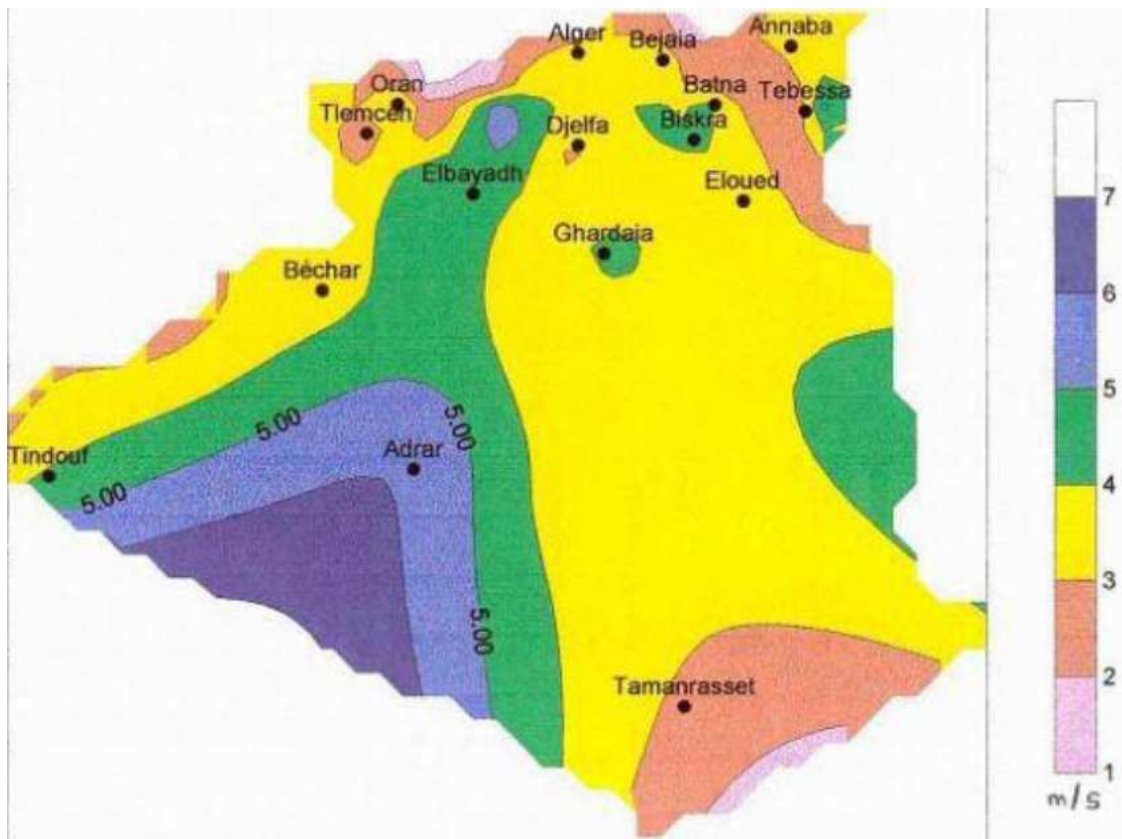


Figure. IV.2 : Carte des vents en Algérie

IV.4.3. Potentiel éolien:

Le potentiel du vent est proportionnel à l'énergie cinétique que constitue une masse d'air en mouvement, en supposant un rendement de 100%.

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3$$

Cette relation montre que la quantité d'énergie transférée au rotor est dépende de trois variables :

- ✓ De la masse volumique de l'air ρ , sa valeur égale à $1,202 \text{ kg/m}^3$, dans des conditions de température et de pression, 20°C et 1 bar. La valeur moyenne de la masse volumique de l'air adoptée pour les calculs des éoliennes est habituellement de $1,225 \text{ kg/m}^3$ [26].
- ✓ De la surface balayée par les pales du rotor S , en effet la quantité d'énergie récupérée par la turbine est proportionnelle à la surface du rotor.

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

IV.4.4. Estimation de la vitesse moyenne du vent en fonction de l'altitude:

La vitesse du vent varie avec l'altitude, pour cela nous allons utiliser la loi de puissance pour estimer la vitesse de vent V à une hauteur H , est donnée comme suite :

$$V = V_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$

Avec :

- V : Vitesse moyenne du vent a la hauteur H .
- V_0 : Vitesse moyenne du vent à la hauteur de référence H_0 .
- α : Coefficient caractéristique du lieu.

Le coefficient α compris entre 0,01 et 0,4, à sensiblement les valeurs suivantes :

- ✓ En mer $\alpha = 0.013$
- ✓ En rivage : $\alpha = 0.16$
- ✓ En plaine : $\alpha = 0.2$
- ✓ Petite ville, banlieues : $\alpha = 0.3$
- ✓ Grande ville, centre urbain : $\alpha = 0.4$

Dans notre cas, nous avons pris $\alpha = 0.3$ correspondant aux conditions d'une surface de terrain plat. Pour déterminer la variation de la vitesse moyenne annuelle en fonction de la hauteur nous avons procédé comme suit :

- ✓ Nous avons calculé la constante $\left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$ pour les différentes hauteurs.
- ✓ La hauteur de référence est $H_0=8\text{m}$
- ✓ Vitesse moyenne du vent à la hauteur de référence est de $V_0= 3.1\text{m/s}$ [29].

Les résultats trouvés sont représentés par le tableau suivant :

H(m)	8	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha$	1	1.31	1.48	1.62	1.73	1.83	1.91	1.99	2.06	2.13
V (m/s)	3.1	4.06	4.58	5.02	5.35	5.67	5.92	6.16	6.38	6.60

Tableau IV-3 : Variation de la vitesse moyenne annuelle du vent en fonction de la hauteur.

Le tableau montre que la vitesse moyenne annuelle du vent est proportionnelle à la hauteur. Ainsi, nous constatons que la vitesse moyenne du vent croît régulièrement et rapidement jusqu'à la hauteur de 30 m environ. A partir de cette hauteur la vitesse du vent varie peu avec l'altitude. Donc, il est important de placer la nacelle à des hauteurs élevée pour que le rotor capte le maximum d'énergie disponible.

IV.4.5. Dimensionnement du système éolien à installer :

Une éolienne est caractérisée par une vitesse de démarrage, une vitesse nominale et une vitesse d'arrêt spécifique, données par le constructeur.

Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne choisie, sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Modèle de l'aérogénérateur utilisé	Standard 23-10
Axe de rotation de la turbine	Horizontal
nombre de pales de la turbine	3
Puissance nominale : (Watts)	10 000
Vitesse de démarrage : (m/s)	3
Vitesse nominale : (m/s)	10
Vitesse d'arrêt : (m/s)	25

Tableau IV-4 : Caractéristiques de l'éolienne.

IV.4.5.1. Choix de la taille du mât (pylône) :

Le choix de la taille du mât est très important dans un projet éolien. Dans notre étude on retient un pylône en acier en treillis d'une hauteur de 30 m au-dessus de sol, qui nous permet de placer la nacelle à cette hauteur où la vitesse moyenne annuelle est de l'ordre 4.58 m/s.

IV.4.5.2. Diamètre du rotor :

Le rotor sert à transformer, en partie d'énergie cinétique de vent en énergie mécanique. La puissance fournie par une éolienne est toujours proportionnelle à la surface balayée par les pales, soit :

$$P_n = \frac{1}{2} \cdot 0.59 \cdot 1.225 \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right) \cdot V^3$$

Avec :

P_n : La puissance nominale égale à 10 000 Watts.

V : La vitesse moyenne annuelle du vent au niveau de la nacelle 30 m, égale à 4.5 m/s

D : Diamètre du rotor.

Le diamètre minimal est :

$$D = \sqrt{\frac{P_n}{\frac{1}{2} \cdot 0,59 \cdot 1,225 \cdot 0,25 \cdot 3,14 \cdot 4,58^3}} = 19,15 \text{ m}$$

Alors le diamètre du rotor est égal à 19.15 m, ce qui veut dire que la longueur des pales de l'aérogénérateur à installer est égale à 9.57 m.

IV.4.5.3. Vitesse de rotation de l'hélice :

La vitesse de rotation du rotor, ω [tr/min] dépend de la vitesse du vent V [m/s], de la vitesse spécifique du rotor λ , et de diamètre du rotor D [m]. Sa valeur est donnée par la relation suivante :

$$\omega = \frac{60 \cdot V \cdot \lambda}{\pi \cdot D}$$

Avec :

ω : Vitesse de rotation de la turbine [tr/min].

λ : Vitesse spécifique.

V : Vitesse du vent [m/s].

D : Diamètre du rotor [m].

La vitesse spécifique de la turbine éolienne est liée fortement au nombre de pales de celle-ci, tel que la vitesse spécifique augmente lorsque le nombre de pales diminue. Dans notre étude, on a utilisé une éolienne dite rapide à tripale, Modèle (Standard 23-10) connecté au réseau électrique. Ainsi la vitesse spécifique correspondante est : $\lambda = 5$.

$$\omega = \frac{60 \cdot 5 \cdot 4,58}{3,14 \cdot 19,15} \approx 23 \text{ tr/min}$$

IV.4.5.4. Calcul du couple produit Γ :

Le couple produit par le rotor éolien est donné par la relation suivante :

$$\Gamma = \frac{P}{\omega} = \frac{\frac{1}{2} \cdot C_p \cdot S \cdot V^3}{\omega}$$

Avec :

Γ : Couple produit par le rotor éolien (N.m).

P : Puissance récupérable par le rotor éolien (W).

ω : Vitesse de rotation de l'hélice (tr/min).

D'où :

$$\Gamma = \frac{0.59 * 0.5 * 1.225 * 3.14 * 9.57^2 * 4.5^3}{23} = 411.73 \text{ N.m}$$

IV.4.5.5. Choix du rapport de multiplication :

Les éoliennes modernes, ayant des rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m, ont des vitesses de rotation trop faibles (20 à 40 tours par minute) par rapport à celle de l'arbre du générateur qui varie en fonction de nombre de pôles qu'il possède.

Un générateur devra tourner à 1500 tr/min s'il possède quatre pôles, 750 tr/min pour huit pôles... [27]. On constate qu'il y a une très forte différence entre la vitesse de rotation des pales de la machine et le régime de rotation nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

IV.4.5.6. Caractéristique de la machine électrique utilisée :

Les génératrices électriques sont conçues pour convertir l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice en énergie électrique utilisable.

Deux types de machines électriques sont utilisés dans l'industrie éolienne (machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes.).

On s'intéresse dans cette étude à la machine asynchrone à cage d'écureuil. En effet cette machine est robuste du point de vue mécanique et nécessite une faible maintenance.

Les caractéristiques nominales de la génératrice asynchrone choisie sont :

- ✓ 4 pôles, rotor à cage.
- ✓ Voltage : 220 V / 420 V - 50 Hz.
- ✓ vitesse nominale : $\omega_g = 1500$ tr/min.
- ✓ rendement nominal : $\eta_g = 80$ %.

La puissance de la génératrice asynchrone est alors donnée par l'expression suivante :

$$P_g = 2,86 * 10^{-4} * \eta_g * D^2 * V_n^3$$

Avec :

P_g : Puissance de la génératrice.

η_g : Rendement de la génératrice.

D : Diamètre du rotor.

V_n : Vitesse nominale de l'éolienne.

En remplaçant le rendement de la génératrice, le diamètre du rotor D, et la vitesse nominale de l'éolienne par leurs valeurs, la relation donne :

$$P_g = 2.83 * 10^{-4} * 0.8 * 19.15^2 * 10^3 = 83KW$$

IV.5.7. L'énergie annuelle :

IV.5.7. 1. La puissance disponible

La puissance disponible le vent est une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air, elle donne par la relation suivante :

$$P_{\text{disp}} = \frac{1}{2} * \rho * S * V_{\text{moy}}^3$$

D'où :

V : la vitesse moyenne a l'altitude de 30m.

S : La surface balayé par les pales d'éolienne par m².

ρ : La masse volumique d'air (Kg/ m³).

Donc :

$$P_{\text{disp}} = \frac{1}{2} * 1.225 * \left(\frac{\pi * 19.15^2}{4} \right) * 4.58^3 = 16939.85W$$

IV.5.7. 2. La puissance récupérable

$$P_{\text{rec}} = 0.59 * P_{\text{disp}}$$

D'où :

$$P_{\text{rec}} = 0.59 * 16939.85 = 9994.51W$$

IV.5.7. 3. Energie récupérable

$$E_{\text{rec}} = P_{\text{rec}} * T(h)$$

D'où :

T [h] : est la période de validité de la distribution du vent respective. T(h) = 1 an.

Avec : 1 an = 365.25 jours * 24 heures = 8766 heures.

En remplaçant la période T(h) par ça valeur, et on trouve :

$$E_{\text{rec}} = 9994.51 * 8766 = 87611.18KWh/an$$

IV.5.7. 4. Énergie annuelle produite :

L'énergie électrique annuelle produite par cette éolienne est donnée en (KWh/an) par la relation suivante :

$$E_{pr} = \eta_{éol} * E_{réc}$$

Avec :

E_{pr} : L'énergie électrique annuelle.

$\eta_{éol}$: Rendement globale de l'installation éolienne.

$E_{réc}$: L'énergie mécanique récupérable à 30 m de hauteur.

Le rendement global de système de conversion d'énergie est donné comme suit :

$$\eta_{éol} = \eta_{hélice} * \eta_{multiplicateur} * \eta_{alternateur} * \eta_{transformateur} * \eta_{redresseur} * \eta_{batterie}$$

Avec :

- ✓ Hélice : $0.20 < \eta < 0.85$
- ✓ Le multiplicateur ou le réducteur : $0.7 < \eta < 0.98$
- ✓ L'alternateur ou la génératrice continue : $0.8 < \eta < 0.98$
- ✓ Le transformateur : $0.85 < \eta < 0.98$
- ✓ Le redresseur : $0.9 < \eta < 0.98$
- ✓ Les batteries : $0.7 < \eta < 0.8$

Le rendement d'éolienne est la valeur de rendement moyen du l'éolienne égale à 0.25, alors l'énergie électrique produite est :

$$E_{pr} = 0.25 * 87611.18 = 21902 \text{ KWh/an}$$

IV.5.8. Combien d'éolienne installée dans la ferme ?

L'installation d'une éolienne dans une ferme permettra de générer de l'électricité en autoproduction pour différentes utilisations. Pour couvrir tous les besoins énergétiques de la ferme nous devons installer **trois(3)** éoliennes.

Les trois éoliennes produisent **65706KWh/an**, soit plus que la consommation de la ferme est de 44615.44 KWh/an.

IV.5.9. Condition de sécurité :

Pour prendre en compte les problèmes de sécurité, la distance entre le bout de pale et le sol doit être supérieure ou égale à 15 m :

$$\frac{D}{2} + 15 \leq H_{mat}$$

Avec :

D : Diamètre du rotor (m).

H_{mat} : La hauteur du mât, pylône (m).

D'où :

$$19,15/2 + 15 = 24,57 < 30\text{m}$$

La relation est vérifiée, l'éolienne standard 23-10 qu'on doit être installé dans la ferme, vérifie les conditions de sécurité sans danger.

IV.5.10. Quelques conseils pratiques pour réussir ce projet dans cette ferme :

- ✓ Éviter les éoliennes à axe vertical : faible rendement et usures importantes.
- ✓ Ne pas utiliser un mât trop petit ; privilégier les hauteurs > 12 m.
- ✓ Préférer les pales les plus grandes et la « vitesse de vent à puissance nominale » la moins importante.
- ✓ La « vitesse de démarrage » doit être inférieure à 4 m/s.
- ✓ Prévoir un mât « basculant » pour la maintenance et des réparations éventuelles.
- ✓ Nuisance sonore : par principe, garder environ 100 m des voisins à l'éolienne et 50 m pour le propriétaire.

IV.5.11. Coût total de l'investissement d'une éolienne :

L'estimation du coût total de l'installation éolienne, est lié fortement aux coûts des composants du ce système de conversion d'énergie (éolienne, encrage et fondation, transport et réalisation), et aux conditions du site d'implantation. On se basera ici sur l'estimation de cout de l'installation.

IV.5.12. Distribution l'électricité

Une fois produit, il faut acheminer le courant électrique jusqu'aux lieux où il sera consommé (maison, école, usine, la ferme, etc..). Ce transport ne se fait pas sans pertes d'énergie, notamment en raison de l'effet joule qui transforme une partie de l'énergie électrique en chaleur. C'est pourquoi tout d'abord augmenter son voltage grâce à des transformateurs, puis employer des câbles haute tension constitue de câbles conducteurs renforcés d'acier, dans lesquels circule l'électricité. Avant que l'électricité ne parvienne chez l'utilisateur, elle passe à nouveau par un transformateur qui va, cette fois, réduire son voltage. C'est ainsi que le voltage du courant électrique d'une maison passe à 230 V.

IV.6. Résultat et discussion

En fonction des données statistiques de la consommation d'énergie électrique et carburant dans la ferme, on constate que :

Après la production de l'électricité théoriquement par les trois éoliennes qui doivent être installées dans cette ferme d'une puissance électrique égale a 65706KWh/an, ces trois éoliennes peuvent alimenter toute la ferme en toute besoins de cet énergie, ainsi que le biogaz qui produire par les deux digesteurs doivent satisfirent toute la ferme en tout besoins

de carburant. Par contre la production annuelle en électricité par le La quantité de biogaz produire reste insuffisant pour alimenté la ferme.

La quantité restante de carburant (gazole) qui est égal à 44.5% et 47% de l'électricité et la chaleur seront proposée pour la vente aux SONALGAZ ou bien aux habitants.

IV.7. Conditions de vente d'électricité et le carburant [28]

Le producteur dispose de deux possibilités pour vendre l'électricité et la chaleur produite à partir du biogaz, et l'éolienne :

La vente à un opérateur énergétique sur le marché de l'électricité (opérateur ayant déposé une déclaration pour exercer l'activité d'achat pour revente d'électricité. Il est important de noter que le producteur doit être rattaché à un responsable d'équilibre qui garantit contractuellement avec le gestionnaire du réseau de transport.

La vente dans le cadre de l'obligation d'achat par une entreprise locale de distribution. La puissance installée ne doit pas dépasser 12 MW. Il s'agit d'un droit pour le producteur qui est formalisé par l'obtention d'un certificat d'obligation d'achat :

- ✓ S'il s'agit d'une personne, son nom, prénom et domicile ou, s'il s'agit d'une personne morale, sa dénomination ou sa raison sociale, sa forme juridique, l'adresse de son siège social, son numéro d'identité au répertoire national des entreprises et des établissements (SIRET), ainsi que la qualité du signataire du dossier.
- ✓ La localisation de l'installation de production d'électricité et le carburant concerné.
- ✓ L'énergie primaire biogaz et la technique de production utilisées.
- ✓ La puissance installée, la capacité de production de l'installation de production d'électricité, carburant et le nombre prévisionnel d'heures de production annuelle.

IV.8. Impact sur l'activité économique

La maintenance, la surveillance de l'unité de la production du biogaz, et la création d'une petite entreprise de ramassage des déchets a l'extérieur de la ferme, et ainsi la surveillance les trois éoliennes, permettent de générer des emplois.

Conclusion générale

Dans ce travail, j'ai cherché à remplacer les sources d'énergie classique, la Sonelgaz et Naftal, par de l'énergie renouvelable en recourant notamment à l'énergie éolienne et à la digestion anaérobie pour couvrir les besoins en électricité et en carburant d'une ferme.

L'objectif que s'était fixé cette étude était répondre aux points suivants :

- ✓ Evaluer le potentiel de production de biogaz de l'exploitation selon différents utilisations (caractéristiques des substrats, modes de valorisation du biogaz).
- ✓ Evaluer le potentiel de production de l'électricité par éolienne pour l'exploitation.
- ✓ Eliminer l'achat des énergies.

Pour répondre aux besoins énergétiques de la ferme, nous avons commencé, dans un premier temps à préciser les facteurs de consommation de l'énergie en électricité et en carburant dans la ferme ; dans un second temps, nous avons évalué la proportion maximale d'énergie électrique et le carburant qui pourrait être produite par les éoliennes et les digesteurs anaérobies sur l'exploitation agricole. Pour cela nous avons d'abord présenté les éoliennes et les digesteurs anaérobies, puis on a expliqué les facteurs qui déterminent la puissance d'un aérogénérateur et la quantité de matière organique disponible, à partir de laquelle doit se calculer la proportion d'énergie productible. Finalement, nous avons apporté une réponse à nos besoins énergétiques : les énergies éoliennes et les digesteurs anaérobies peuvent produire suffisamment d'électricité et de carburant pour couvrir toute la consommation en énergétiques dans cette ferme agricole.

Ainsi donc, dans notre pays, les énergies renouvelables(en particulier l'éolien et la digestion anaérobie) n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social. L'installation des éoliennes et des digesteurs anaérobies est particulièrement indiquée au sein d'une exploitation agricole. Les énergies renouvelables apparaissent comme des solutions d'avenir pour la production des énergies dans un esprit de développement durable.

Comme pratiquement plus de 50% de la surface de la ferme reste sans utilisation, l'investissement dans ces énergies renouvelables, notamment les éoliennes et les digesteurs anaérobie, est possible.

Le coût de l'investissement est élevé mais il est vite amorti par :

- ✓ La réduction des odeurs et de la charge pathogène du fumier;
- ✓ La réduction des émissions de gaz à effet de serre par les fermes;
- ✓ La production d'énergie renouvelable;
- ✓ L'amélioration de la valeur fertilisante du fumier ;
- ✓ Création de postes d'emploi ;
- ✓ Mise sur pied d'une petite entreprise de recyclage des déchets à l'extérieur de la ferme.

Reference bibliographiques

[1] MOHAMMAD JAHANGIR KHAN «Dynamic Modeling, Simulation and Control of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System for Stand-Alone » Applications Seminar Faculty of Engineering & Applied Science Electrical Engineering.

[2] O. Gergaud, " Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Docteur de l'École Normale Supérieure de Cachan 2002.

[3] B. Robyns, P. Bastard, "Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques", La revue 3EI n°39, Décembre 2004.

[4] www.ets-net.org.

[5] A. Attar, "Les énergies renouvelables" ancien PDG de Sonatrach et ancien Ministre des Ressources en Eau.

[6] livre de biologie 7. B. Lagrange, Edisud /Energie alternatives. Biométhane : Tome 1. "une alternative crédible " Tome 2. (principe –technique –utilisation) ,1979.

[8] Léonard Angélique, Biomethanisation, faculté des sciences Appliquées, Département de chimie appliquée. Laboratoire de Génie chimique .université de liège –Haut Ecole charlemagne-Homes.

[9] Historique des éoliennes

<http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>

[10] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat à laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de L'ENSEEIH, Université de Toulouse 5 Avril 2005.

[11] Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.

[9] D. Seyoum, C. Grantham and F. Rahman Analysis of an isolated self-excited induction generator driven by a variable speed prim mover School of Electrical Engineering and Telecommunications the University of New South Wales March, 2003.

[12]<http://www.jeremy-goldyn.com/comment-fonctionne-une-eolienne/> (05-04-2010) publication du centre de développement des énergies renouvelables, (ISSN 1 112-2242).Revue internationale. "Biomasse, production et valorisation ", Alger 20-21juin 2001.

[13]Source : AGRESTE Guadeloupe n°10 - Recensement agricole 2010 : premières tendances - septembre 2011).

[14] : La ferme coopérative agriculture D.B.K.

[15] : donnée statistique de SONELGAZ.

[16] *Bernard MULTON, Xavier ROBOAM, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA, Olivier GERGAUD et Hamid BEN AHMED. Aérogénérateurs électriques.*

[17] *Bernard MULTON « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.*

[18] : thèse d'ingénieur, « étude et dimensionnement d'un digesteur » .2008.

[19] : T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C.Buthion, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.

[20] : D. Lafri, Thèse de magistère, « contribution a l'étude du comportement thermique d'une cuve de stockage d'une installation de chauffage.

[22] : chapitre 4 la filière biométhanisation.

[23] : Fiche info-méthanisation, nfographie/CAO.

[24] : Perrault, H. 2007. Journée sur la méthanisation des engrais de ferme. Rapport final.

[25] : LE GRAND LIVRE DE L'EOLIN. Paul Gipe. EDITIONS : LE MONITEUR.(2004).

[26] : DERBRY.J, « Énergie éolienne » ; édition SCM, Paris, 1980.

[27] : Technique d'ingénieur BM 4 640.

[28] : D'après l'étude réglementaire réalisée par APESA/BIOMASSE/RITTMO pour le compte de l'ADEME ; 2007.

[29]:centre de météorologie algérienne(BOUHKALEFA).

[30]: <http://quanthomme.free.fr/qhsuite/LaigretJeanPetroleFermentation.htm>.

[31] : Ferme coopérative agriculture Draà Ben Kheda.