

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : BERRABAH Razika
HAMZA CHERIF Nadir

Thème

**Simulation de la production d'électricité à partir du
biogaz issue d'un Centre d'enfouissement: Cas proposé
Remchi**

Soutenu publiquement, le 06 / 07 / 2023 , devant le jury composé de :

M BOUKLI HACENE Fouad	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
Mme GHOMRI Amina	Professeur	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Mme KHERBOUCHE Djamila	MCA	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M MEGNAFI Hicham	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M KAZI TANI Nabil	Professeur	ESSA. Tlemcen	Invité

Année universitaire : 2022 /2023

Remerciement

*Nous remercions **Dieu ALLAH** tous puissant qui nous a donné le courage de confronter ce nouveau domaine, et la force de terminer ce mémoire*

*Nous tenant à remercier **Mme. GHOMRI Amina** en tant que Encadreur, qui a toujours été à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, et **Mme. KHERBOUCHE Djamila** comme co encadreur pour son direction*

*Nous remercions **M BOUKLI HACENE Fouad** d'avoir accepté de présidé le jury de ce mémoire.*

*Nous remercions aussi **M MEGNAFI Hichem** de nous avoir fait l'honneur par leur présence et d'avoir accepté d'évaluer ce travail qui nous l'espérons, répondra à leurs attentes.*

*Nous sincères remerciement vont à tous ceux et celle, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences, et **M KAZI TANI Nabil** d'avoir accepté d'être présent avec nous.*

Enfin, nous remercions tout le corps professoral de l'école supérieur en sciences appliqué de Tlemcen ESSAT pour le travail énorme qu'il effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études

Dédicace

Mon cher père, source de joie et de bonheur, Aucune dédicace ne peut vous exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez accomplis pour mon éducation et mon bien-être

À la source de mes efforts ma mère, je te remercie pour tout le soutien et l'amour que tu m'as donné depuis mon enfance et j'espère que ta grâce m'accompagnera toujours

À mes chères sœur Amina, zahira, Rahima, mon frère Mohamed & Amine, mes chère amies Osmaa, fedwa, Salima, pour leur amour, conseils, aides et encouragements.

À toutes les personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, les encouragements et le soutien moral que vous m'avez apportés.

Berrabah Razika

Dédicace

Avant tous, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail, avec un grand bonheur et un grand plaisir que je tiens à dédier ce travail à:

toute ma famille.

tout particulièrement mes parents et mes frères

qui m'ont toujours aidés, soutenus

et encouragés au cours de mes études

et, bien évidemment, de cet mémoire

qui sans leur soutien n'aurait

pu être réalisée.

À mon binôme

À tous mes chers amis

À la fin merci À chaque être qui a été là pour moi, à tous ceux qui m'ont encouragé, soutenu et conseillé tout le long de mes études.

À tous les étudiants en Master et Ingénieur en

Électrotechnique, Automatique et Génie

Industriel Promotion 2022-2023.

Kamza cherif Nadir

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.....	3
Chapitre I : Généralité sur la digestion anaérobie	5
I.1 la digestion anaérobie.....	6
I.1.1 définition	6
I.1.2 les étapes de la digestion anaérobie (figure I.1).....	6
I.1.2.1 Hydrolyse	6
I.1.2.2 Acidogenèse	7
I.1.2.3 Acétogenèse	7
I.1.2.4 Méthanogenèse	8
I.1.3 - les paramètres influençant la digestion anaérobie	9
I.1.3.1 La température	9
I.1.3.2 Taille particules	10
I.1.3.3 Teneur en matière sèche	10
I.1.3.4 Taux de charge et temps de séjour	10
I.1.3.5 Type du substrat	11
I.1.4 Les technologies de la digestion anaérobie	11
I.1.4 .1En voie humide	11
I.1.4 .2 En voie sèche	12
I.1.5 Le digesteur	13
I.1.5.1 le mode d'alimentation	14
I.1.5.2 Type de substrats	15
I.1.5.3 Le nombre d'étapes	15
I.1.5 Le biogaz	16
I.1.5.1 le traitement de biogaz	16
I.1.6 stockage de biogaz	19
I.1.6 .1 Le stockage sous terrain	19
I.1.7 valorisation de biogaz	21
I.1.7.1 valorisation thermique	21
I.1.7.2 valorisation électrique	21
I.1.7.3 valorisation par alimentation au réseau	22
I.1.8 conclusion	22
Chapitre II : Les turbines à Gaz.....	26
II.1 Historique	27

Table des matières

II.2 définition turbine à gaz	27
II.3 le principe de fonctionnement d'une turbine à gaz	28
II.4 les composants de turbine à gaz	29
II.4.1 Section compression	29
II.4.2 Section combustion	30
II.4.3 Section turbine	30
II.5 classification turbine à gaz	31
II.5.1 Selon le mode de construction:	31
II.5.2 Selon le mode de travail:	32
II.5.3 Selon le mode de fonctionnement thermodynamique	33
II.6 Domaines d'application	33
II.7 Avantages et Inconvénients des turbines à gaz	34
II.7.1 Avantages :	34
II.7.2 Inconvénients	34
II.8 centre d'enfouissement technique (CET)	34
II.8.1 définition	34
II.8.1.1 CET de Classe I	34
II.8.1.2 Les CET de Classe II	35
II.8.1.3 Les CET de Classe III	35
II.8.2 Principe de fonctionnement d'un CET :	36
Chapitre III : Estimation et simulation d'une turbine à gaz	39
III.1 Logiciel utilisé GSP 12	40
III.1.1 Définition	40
III.2 Estimation des quantités de déchets au centre proposé de Remchi	42
III.3 Application sur le logiciel GSP12	42
III.4 Résultats et interprétations	49
III.5 les avantages	54
III.6 les impacts	55
III.6.1 Les impacts environnementaux	55
III.6.3 Les impacts	57
III.7 CONCLUSION	58

Introduction générale

Introduction générale

Ce mémoire se focalise sur la simulation de la production d'électricité à partir du biogaz issu d'un centre d'enfouissement, en se basant sur le cas spécifique du centre d'enfouissement de Remchi. L'utilisation du biogaz, qui est généré par la dégradation des déchets organiques, présente un potentiel important en tant que source d'énergie renouvelable.

Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux. Dans le premier chapitre, nous abordons la digestion anaérobie et le biogaz. Nous exposerons en détail le processus de fermentation qui se produit dans les centres d'enfouissement. Nous examinons les différentes étapes de la digestion anaérobie, ainsi que les facteurs qui influencent la production de biogaz. Nous mettons également en évidence les avantages environnementaux et énergétiques de l'utilisation du biogaz comme une alternative durable.

Le deuxième chapitre se concentre sur la turbine à gaz, qui est l'élément central utilisé pour convertir le biogaz en électricité. Nous examinons en détail le principe de fonctionnement de la turbine à gaz, mettant l'accent sur la conversion de l'énergie chimique du biogaz en énergie mécanique. Nous passons en revue les différents types de turbines à gaz disponibles sur le marché, en analysant leurs caractéristiques, leurs avantages et leurs inconvénients.

Le troisième chapitre est dédié à la simulation de la quantité d'électricité pouvant être produite à partir de la quantité de déchets disponibles. Nous élaborons un modèle de simulation pour estimer la capacité de production d'électricité du système, en prenant en compte les caractéristiques du biogaz, les paramètres de la turbine à gaz et la quantité de déchets traités. Cette simulation nous permet d'évaluer la performance énergétique du système et d'optimiser les processus de production d'électricité.

L'objectif principal de ce mémoire est de proposer une approche intégrée pour la production d'électricité à partir du biogaz des centres d'enfouissement. Nous cherchons à démontrer la viabilité technique et économique de cette méthode, en se basant sur une étude de cas spécifique à Remchi. Les résultats obtenus à travers la simulation fourniront des informations précieuses pour les décideurs et les parties prenantes afin d'envisager la mise en place de systèmes de production d'électricité à partir du biogaz dans les centres d'enfouissement.

Chapitre I : Généralité sur la digestion anaérobie

I.1 la digestion anaérobie

I.1.1 définition

La digestion anaérobie est un processus microbiologique de conversion de la matière organique, faisant intervenir essentiellement des populations bactériennes, ainsi que des protozoaires et quelques champignons anaérobies. Le principe de la digestion anaérobie est décrit comme la conversion de la matière organique en biogaz, composée essentiellement de méthane (CH_4) et de gaz carbonique (CO_2). On peut différencier trois types de digestion anaérobie selon les zones de températures dans lesquelles s'opère le processus soit basse, moyenne ou élevée, les limites variant d'un auteur à l'autre [1]

Cette opération se déroule à l'intérieur d'une cuve cylindrique et hermétique que l'on appelle méthaniseur ou digesteur en absence d'oxygène, présence de la chaleur donner par le chauffage dans des conditions précises pour activer l'opération et soumis à une action microorganismes (en présence des bactéries de type méthanogènes) qui vas aider à la dégradation de la matière[2]

- Digestion psychrophile : basse température 15 à 25°C,
- digestion mésophile : température moyenne 30 à 45°C,
- digestion thermophile : température élevée 50 à 65°C

I.1.2 les étapes de la gestion anaérobie (figure I.1)

La dégradation anaérobie de la matière organique est divisée en quatre étapes distinctes : l'hydrolyse, l'acidogenèse, l'acétogenèse et la méthanogenèse. Chacune de ces étapes contribue à la production de produits intermédiaires qui serviront d'entrées pour l'étape suivante, aboutissant finalement à la production de biogaz.

I.1.2.1 Hydrolyse

L'hydrolyse est la phase initiale de la dégradation anaérobie, où les molécules complexes de matière organique sont décomposées en composés plus simples tels que les sucres, les acides aminés, les acides gras et les osides. Cette décomposition est réalisée par des bactéries hydrolytiques qui sont spécialisées dans la conversion de ces substances. Les bactéries hydrolytiques peuvent être de type anaérobie strict ou facultatif, ce qui signifie qu'elles peuvent fonctionner dans des environnements avec ou sans oxygène.

Le processus d'hydrolyse est crucial dans la digestion anaérobie des matériaux complexes, car il permet de décomposer les composés organiques en constituants plus simples. Cependant, il

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

peut être une étape limitante par rapport aux autres phases de la digestion anaérobie. Cela signifie que la vitesse et l'efficacité de l'hydrolyse peuvent avoir une influence sur l'ensemble du processus de dégradation anaérobie. Si l'hydrolyse est lente ou inefficace, cela peut entraîner un ralentissement global de la dégradation de la matière organique.[3]

I.1.2.2 Acidogenèse

L'étape d'acidogenèse est réalisée par des micro-organismes similaires à ceux rencontrés lors de l'hydrolyse. Cette étape permet le métabolisme des produits issus de l'étape précédente au sein des cellules bactériennes. Les métabolites finaux produits lors de l'acidogenèse comprennent des acides gras à courtes chaînes, également appelés acides gras volatils (AGV), tels que l'acide acétique, l'acide butyrique et l'acide valérique. En plus des AGV, d'autres produits tels que des alcools, de l'azote ammoniacal, du dihydrogène et du dioxyde de carbone peuvent également être générés.

L'acidogenèse joue un rôle essentiel dans la dégradation anaérobie des matières organiques complexes. En convertissant les produits de l'hydrolyse en métabolites spécifiques, cette étape contribue à la production de composés qui seront ensuite utilisés lors des étapes ultérieures du processus de digestion anaérobie.

La production d'acides gras volatils est particulièrement importante, car ces composés peuvent servir de substrats pour les étapes suivantes de la méthanogenèse, qui conduisent à la production de méthane (CH_4), le principal composant du biogaz. De plus, l'azote ammoniacal, le dihydrogène et le dioxyde de carbone générés lors de l'acidogenèse peuvent également être utilisés par d'autres groupes de micro-organismes dans les étapes ultérieures de la dégradation anaérobie.[4 5]

I.1.2.3 Acétogenèse

Au cours de cette étape, des bactéries réductrices acétogènes et des bactéries sulfatoréductrices entrent en jeu pour transformer certains produits générés lors des phases précédentes, tels que les acides gras volatils et les alcools. Ces micro-organismes convertissent ces composés en dihydrogène (H_2), dioxyde de carbone (CO_2) et acétate. En présence de sulfate, cette transformation conduit également à la production d'hydrogène sulfuré (H_2S).

Les bactéries réductrices acétogènes sont responsables de la conversion des acides gras volatils et des alcools en acétate, un composé organique important. Parallèlement, les bactéries sulfatoréductrices utilisent le sulfate présent dans l'environnement pour métaboliser les

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

substrats organiques et produire de l'hydrogène sulfuré. Ces réactions biochimiques sont essentielles pour la suite du processus de digestion anaérobie.[6,7]

L'étape d'acétogénèse joue un rôle clé dans la production de biogaz, car l'acétate formé peut être utilisé comme substrat par les bactéries méthanogènes lors de l'étape suivante, la méthanogénèse. De plus, la production d'hydrogène et de dioxyde de carbone est également importante, car ces gaz peuvent être convertis en méthane (CH_4) par les bactéries méthanogènes, contribuant ainsi à la formation du biogaz.

Il convient de noter que la présence de sulfate dans l'environnement peut influencer le processus d'acétogénèse en favorisant la production d'hydrogène sulfuré. Cela peut avoir des implications sur la qualité du biogaz produit et nécessite une gestion appropriée pour minimiser les effets néfastes.

I.1.2.4 Méthanogénèse

La méthanogénèse constitue la dernière étape de la méthanisation, au cours de laquelle le biogaz est produit à partir d'hydrogène, de dioxyde de carbone et d'acétate. Cette étape implique la présence de bactéries méthanogènes acétoclastiques, qui réagissent avec l'acétate, ainsi que de bactéries méthanogènes hydrogénéophiles, qui utilisent l'hydrogène et le dioxyde de carbone pour produire du biogaz.

Les bactéries méthanogènes acétoclastiques jouent un rôle clé en dégradant l'acétate et en le convertissant en méthane et en dioxyde de carbone. D'autre part, les bactéries méthanogènes hydrogénéophiles utilisent l'hydrogène et le dioxyde de carbone comme substrats pour produire du méthane. Le biogaz résultant de cette étape se compose principalement de méthane et de dioxyde de carbone, ainsi que de faibles proportions d'hydrogène, d'ammoniac et de sulfure d'hydrogène.

La méthanogénèse est un processus essentiel dans la valorisation des déchets organiques, car elle permet de convertir la matière organique en une source d'énergie renouvelable, à savoir le biogaz. Le méthane présent dans le biogaz est une ressource précieuse qui peut être utilisée comme combustible pour produire de la chaleur, de l'électricité ou du biocarburant. De plus, la méthanogénèse contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, car le méthane produit lors de cette étape est capturé et utilisé, évitant ainsi son rejet dans l'atmosphère où il aurait un impact négatif sur le climat [8]

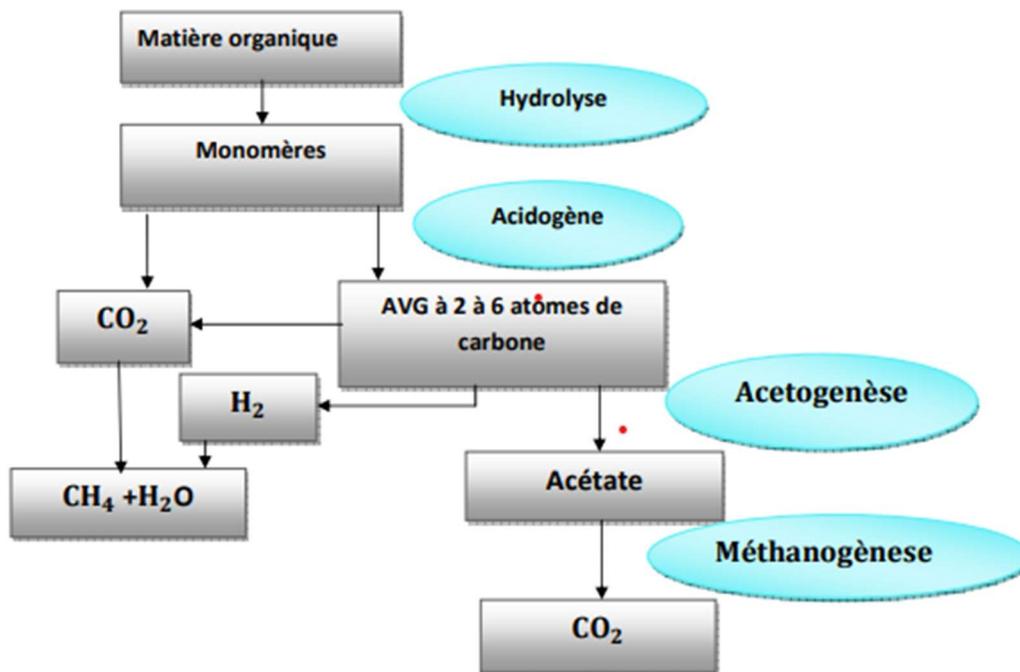


Figure I. 1 les quatre étapes de la méthanisation

I.1.3 - les paramètres influençant la digestion anaérobie

Le principal facteur pour le déroulement de la méthanisation est l'absence de l'oxygène, mais il existe d'autres paramètres qui détermineront la performance de ce processus et par conséquent la quantité de biogaz qui peut être produit [9]

I.1.3.1 La température

La température est l'un des paramètres les plus importantes parce qu'elle influence directement sur la cinétique chimique de la dégradation de la matière organique. Les bactéries issues de la formation du méthane peuvent se développer entre les 10 et les 65°C (Abbasi and Tauseef, 2012). Généralement, la digestion anaérobie des déchets organiques se déroule dans deux plages de température : le rang thermophile et le rang mésophile (MataAlvarez, 2003). La plage mésophile se déroule dans de températures entre 35 et 40 °C. Cette plage de température est utilisée dans la plupart de processus de digestion anaérobie (Harzevili and Hiligsmann, 2017) parce qu'elle dépense moins d'énergie pour le fonctionnement du digesteur et donne de conditions plus stables qui peuvent être contrôlées. Ici, la production du biogaz se déroule à de vitesses modérées. La plage thermophile comprend de températures entre 50 et 55°C, dans lesquelles l'activité de bactéries augmente et mène une formation plus vite du méthane. Cette plage est utilisée plus souvent pour la digestion anaérobie des déchets ménagers (Mata-Alvarez, 2003), parce que ces températures aident à l'inactivation de pathogènes et parce qu'il y a une

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

production plus rapide de biogaz. Néanmoins, les bactéries du processus de méthanisation sont plus sensibles aux changements hors de ce rang de température, cela demande un contrôle plus strict pour maintenir ces conditions.

I.1.3.2 Taille particules

La matière organique possède de formes très hétérogènes et pourtant la taille de ses particules est aussi variée, cette taille affecte au déroulement du processus de méthanisation. De tailles trop grandes rendent plus difficile la fragmentation de la matière organique dans l'étape de l'hydrolyse ce qui ralentisse le développement des étapes subséquentes. Une taille minimale donne aux particules une surface spécifique plus adéquate pour l'action des bactéries lors de la transformation de la matière organique (Harzevili and Hiligsmann, 2017). Il n'existe pas de taille spécifique pour les particules lors le procédé de digestion anaérobie parce celle-ci dépend directement des conditions de fonctionnement du digesteur utilisé ; sur base de références des technologies existantes, cette taille est comprise entre 15 et 40 mm. (Abbasi and Tauseef, 2012)

I.1.3.3 Teneur en matière sèche

La teneur en matière sèche est aussi interprétée comme l'inverse à l'humidité, cela est défini par les caractéristiques de la matière organique utilisé comme substrat. Ce paramètre détermine le type de technologie à utiliser pour réaliser la digestion anaérobie. La matière organique ayant une teneur jusqu'à 10% est considérée comme de la biomasse humide, tandis celle qui présente une teneur entre 10 et 50% est considérée comme de la biomasse sèche (Harzevili and Hiligsmann, 2017). La présence de l'eau permet un meilleur flux du substrat dans le digesteur et aussi mène la dilution des nutriments ce qui favorise leur disponibilité pour les bactéries pendant le procédé de méthanisation (Harzevili 17 and Hiligsmann, 2017). Mais ce De références comme (Beevi et al. 2013), lesquelles analysent la digestion anaérobie de déchets ménagers, indiquent que la production de biogaz augmente tant que la teneur en matière sèche diminue.

I.1.3.4 Taux de charge et temps de séjour

Ces sont deux paramètres qui sont toujours analysés ensemble étant donné leur corrélation. Le taux de charge indique la quantité du substrat qu'est introduit dans le digesteur par unité de temps. Le temps de séjour indique le temps que la matière organique reste à l'intérieur du digesteur. Le nombre de bactéries issus au processus de méthanisation commence à doubler environ 10 jours après l'introduction du substrat dans le digesteur (FNR, 2013), cela indique que la matière organique doit rester un minimum de temps à l'intérieur du digesteur pour

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

permettre la formation du méthane, sinon il risque de perturber l'activité des bactéries et de réduire la production du biogaz. Généralement, le temps de séjour varie entre 10 et 40 jours, ce dépend des caractéristiques et de la composition du substrat, mais aussi de la technologie utilisée pour le procédé de méthanisation. Si le substrat demande beaucoup de temps pour se dégrader, la quantité de matière qui est introduite dans le digesteur chaque jour se réduit. Dans l'autre sens, du substrat avec un temps de séjour court, le taux de charge augmente, ce permet d'introduire dans le digesteur plus de matière organique par jour.

I.1.3.5 Type du substrat

Bien que la plupart de matières organiques soient capables de se dégrader et de produire du méthane, de certains possèdent plus de potentiel que par rapport à des autres. La composition du substrat va définir la quantité de biogaz qui peut être produite par action des bactéries anaérobies. La biomasse lignocellulosique peut se dégrader et former du méthane, mais la vitesse à laquelle se produise sa décomposition est lente en raison de la configuration de ses molécules, lesquelles sont plus résistantes à l'action des bactéries (Mata-Alvarez, 2003). La matière grasse contient plus de molécules de carbone et d'hydrogène qui peuvent produire du biogaz avec une teneur plus riche en méthane, ce type de substrat demande aussi de long temps de séjour pour sa dégradation (FNR, 2010). Les résidus d'origine animale peuvent aussi produire du biogaz mais leur potentiel est limité étant donné qu'ils contiennent plus d'azote que par rapport à des autres types de biomasse utilisées, une teneur élevée de cet élément perturbe l'activité de bactéries pendant la digestion anaérobie et diminue la formation du biogaz (Abbasi, Tauseef, & Abbasi, 2012).

I.1.4 Les technologies de la digestion anaérobie

I.1.4.1 En voie humide

Voici une reformulation plus concise et simplifiée des différentes techniques de réacteurs utilisées dans la méthanisation des déchets :

- ❖ Réacteurs à cellule libre : les déchets organiques sont maintenus en suspension dans des réacteurs à mélange infini, sans support solide. Le jus méthané est recyclé, augmentant ainsi la concentration en biomasse active. Ce type de réacteur offre un taux élevé de réduction de la pollution par les matières organiques [10]
- ❖ Réacteurs à lit fixe : la biomasse est fixée sur un support dans le réacteur. Les bactéries se développent sous forme de biofilms offrant une résistance élevée aux perturbations

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

et aux agents toxiques. Ces réacteurs conviennent à la méthanisation de déchets liquides, mais ne sont pas adaptés aux effluents riches en matières en suspension [11]

- ❖ Réacteurs à lit fluidisé : un support mobile est utilisé pour créer un milieu uniforme et favoriser le contact entre les micro-organismes et le substrat. Ce type de réacteur convient au traitement des eaux usées à forte teneur en matières en suspension [12]
- ❖ Réacteurs à lit de boues (UASB) : basés sur la formation de granulés par les micro-organismes anaérobies. Ils nécessitent un démarrage progressif pour favoriser la granulation. Les réacteurs UASB peuvent traiter des charges de déchets plus élevées, mais sont sensibles aux surcharges et aux sous charges à long terme.[13]

I.1.4 .2 En vois sèche

La fermentation sèche est une technique qui permet de conserver le résidu intact sans ajouter de l'eau. La teneur en matière sèche est typiquement de 20 à 40 %, ce qui rend le milieu de fermentation semi-solide au lieu de solide, avec peu d'eau libre. Comme dans le cas des technologies utilisées en voie humide, les technologies disponibles en voie sèche sont

- les réacteurs verticaux : Les réacteurs verticaux sont couramment utilisés pour traiter la fraction organique des déchets ménagers. La circulation au sein du réacteur est assurée par recyclage du digestat ou par recyclage du biogaz produit sous pression. Comme déjà mentionné, ce type de technologie permet l'utilisation de substrats avec une teneur en matière sèche de 20 à 40 %. La charge admissible est de 8-10 kg MO/(m³ j). Cette méthode présente l'avantage d'utiliser des substrats bruts sans ajout d'eau, mais il est souvent difficile d'obtenir une homogénéité au sein du méthaniseur. De plus, de grands gradients de température peuvent exister dans le méthaniseur [14]
- Les réacteurs horizontaux : Dans un réacteur à écoulement piston horizontal, les substrats entrant dans le réacteur poussent contre les substrats déjà en place pour assurer une progression régulière du matériau à travers le réacteur. La rotation de l'arbre vertical à pales assure l'enroulement du résidu

Ce type de technologie permet également l'utilisation de substrats avec une teneur en matière sèche de 20 à 40 % sans ajout d'eau. Le fonctionnement est continu, mais comme pour les réacteurs verticaux, l'homogénéité est souvent difficile à atteindre et des gradients de température importants peuvent se produire au sein du méthaniseur, c'est la technologie retenue par Vinci [14]

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

- les méthaniseur batch à percolation : Les méthaniseurs discontinus à percolation sont utilisés pour traiter la fraction organique des ordures ménagères, notamment les déchets à forte teneur en matière sèche supérieure à 40%. Les digesteurs discontinus se remplissent au fur et à mesure que les déchets
- sont produits et sont fermés lorsqu'ils sont pleins. Les déchets solides sont pulvérisés avec un percolat chauffé riche en bactérie qui agit comme un inoculum pour l'ensemencement. Après la fin de la digestion anaérobie plusieurs semaines, la matière digérée est extraite en une seule fois. Ce type de système nécessite l'installation de plusieurs méthaniseurs en parallèle pour obtenir un traitement régulier du substrat et une production stable de biogaz [15]
- La méthanisation en cellules : Il s'agit de procédés de méthanisation à grande échelle, impliquant des procédés où la simplicité de conception prime sur l'efficacité du traitement. A l'extrême, le processus le plus poussé est l'enfouissement, où le temps de décomposition des déchets est d'environ 20 ans. Il est enfoui dans des alvéoles pré-équipées et permet 3-4 ans d'exploitation minière, suivie d'une minéralisation et d'une valorisation des déchets après forage et tri. Pour une bonne efficacité du procédé, les étapes de prétraitement (broyage, homogénéisation, etc.) sont importantes et une recirculation des lixiviats doit être mise en place pour réensemencer les déchets entrants et le biogaz est récupéré pendant la période de décomposition [15]

I.1.5 Le digesteur

Le digesteur (**figure I.2**), encore appelé fermenteur ou bioréacteur - anaérobie est généralement constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolée thermiquement de l'extérieur dans laquelle différents microorganismes se cotoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les déchets et effluents organiques et produire du biogaz. Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application visée. On peut classer les digesteurs selon :

- le mode d'alimentation : batch, continu ou semi-continu ;
- le type de substrats : solide, semi-solide ou liquide ;
- le nombre d'étapes : mono- ou bi-étape selon que la méthanogénèse et l'acidogénèse se déroulent dans le même réacteur ou dans deux cuves séparées.

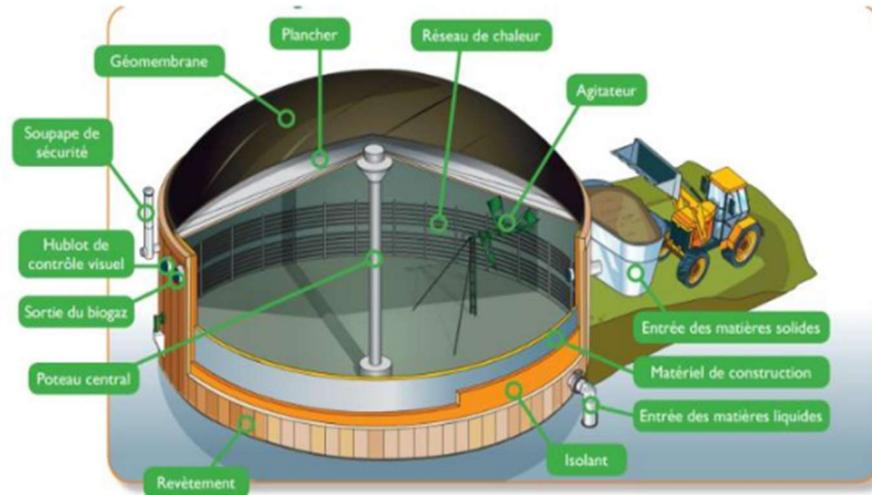


Figure I. 2 Schéma précis du digesteur

I.1.5.1 le mode d'alimentation

I.1.5.1.1 Le digesteur batch ou discontinu

Il a l'avantage d'être d'une construction simple. Le mode opératoire consiste à remplir le digesteur avec les substances organiques et laisser digérer, le temps de rétention étant fonction de la température et d'autres facteurs. A la fin de la digestion, le digestat est évacué et le processus peut recommencer. Ces systèmes, rustiques et d'une grande simplicité technique, sont avantageux pour traiter les déchets solides comme les fumiers, les résidus agricoles ou les ordures ménagères. La production de biogaz n'est pas régulière : au début du cycle, la fermentation du substrat ne venant que de commencer, la production de biogaz est lente. Elle s'accélère, et atteint un taux maximal au milieu du processus de dégradation et chute en fin de cycle lorsque seuls les éléments difficilement digestibles restent dans le digesteur

I.1.5.1.2 Le digesteur continu

Le substrat introduit de manière continue est digéré et déplacé soit mécaniquement, soit sous la pression des nouveaux intrants vers la sortie sous forme de digestat. Le fonctionnement en continu, est bien adapté aux installations de grande taille. Il existe trois principaux types de digesteurs continus : système à cuve verticale, système à cuve horizontale et système à « cuves multiples »

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

I.1.5.1.3 Le digesteur semi-continu

Fonctionne avec une combinaison des propriétés des deux précédents afin de tirer profit des avantages des deux extrêmes.

I.1.5.2 Type de substrats

Cette classification des digesteurs est fonction de la teneur en matière sèche des matières organiques qui affecte leur consistance.

- ✓ Solide : teneur en matière sèche > 15 % ;
- ✓ Semi-solide ou pâteux : teneur en matière sèche comprise entre 5 et 15 % ;
- ✓ Liquide : teneur en matière sèche inférieure à 5 %.

I.1.5.3 Le nombre d'étapes

Cette classification met en évidence le fait que l'hydrolyse et l'acidogénèse sont séparés ou pas de la phase suivante de méthanogénèse. Dans les procédés mono-étapes, toutes les étapes de la digestion ont lieu dans la même enceinte. Ils sont exploitables en continu ou en batch, et principalement appliqués pour des substrats allant jusqu'à 40% de MS. Les procédés bi-étape sont caractérisés par le fait que l'hydrolyse et l'acidification sont nettement séparées de la phase suivante de méthanisation. La recirculation de la phase liquide présente l'avantage de ne pas nécessiter constamment l'ajout d'eau réchauffée. L'avantage des procédés bi-étape réside dans les courts temps de décomposition de la matière solide, de l'ordre de quelques jours. Cette séparation des phases réduit le risque d'intoxication des cellules méthanogènes liée à la présence d'acides gras volatils lorsque l'étape d'acidogénèse n'est pas complètement terminée car trop rapide par rapport à la capacité d'assimilation des micro-organismes méthanogènes. Il y a eu beaucoup de recherche concernant la fermentation en une étape et celle à deux étapes. Mais en pratique, la fermentation en deux phases n'a jamais pu concrétiser les avantages qu'on lui reconnaît en théorie. Le coût d'investissement supplémentaire et la complexité du fonctionnement du système en deux étapes ont fait qu'il n'a pris qu'une part mineure du marché. Certains digesteurs sont dits mixtes ou intégrés. Plus exactement, c'est l'installation et non le digesteur qui est mixte. Le principe consiste à faire subir au substrat organique une digestion anaérobie et récupérer le sous-produit qui est ensuite stabilisé par l'étape de compostage. Ces procédés mixtes permettent la réduction des systèmes de traitement du liquide issu du digesteur anaérobie, ce dernier servant en grande partie pour l'humidification du compost. Le second avantage est la stabilisation quasi totale du substrat organique en raison de la complémentarité des deux systèmes [16]

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

I.1.5 Le biogaz

Le biogaz est principalement produit par le processus de méthanisation d'éléments organiques en l'absence d'oxygène, grâce à l'action de micro-organismes. Ces éléments organiques peuvent être des déchets courants et biodégradables. Le biogaz est composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone, mais il contient également des impuretés telles que de l'eau, du sulfure d'hydrogène, de l'ammoniac et de l'azote.

Le biogaz est une source d'énergie renouvelable précieuse qui peut être utilisée pour produire de l'électricité et de la chaleur. Grâce à des systèmes de cogénération, il est possible de tirer profit de la combustion du biogaz pour produire simultanément de l'électricité et de la chaleur. Cette utilisation efficace de l'énergie du biogaz contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la valorisation des déchets organiques

I.1.5.1 le traitement de biogaz

Le traitement est un procédé de nettoyage des composants dangereux, il est composé de trois étapes

I.1.5.1.1 Enrichissement du biogaz

Il existe plusieurs façons d'enrichissement, parmi eux la méthode de contre-lavage avec eau sous pression. Cette méthode a une meilleure flexibilité possible pour le traitement du biogaz, indépendamment de sa qualité et de sa quantité [17]. Le biogaz est comprimé à 7 bars et lavé dans une colonne de lavage à contre-courant d'eau. Le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène sont beaucoup plus solubles dans l'eau que le méthane afin qu'ils se dissolvent. L'eau de lavage est introduite dans le vase d'expansion pour réduire les pertes de méthane au cours du processus. Une partie du gaz dissous peut être à nouveau gazéifiée et à nouveau comprimée. Dans la colonne de désorption, l'eau de lavage est régénérée par séparation à contre-courant du dioxyde de carbone et du sulfure d'hydrogène pour minimiser la consommation d'eau douce. Cette méthode résulte un biogaz propre qui sèche, afin d'être utilisé dans d'autres domaines. De plus cette technologie contient plusieurs avantages :

La station est constituée de modules standards de différentes capacités et faciles à installer, elle ne consomme aucun produit chimique et nécessite aucune désulfuration préalable, de plus elle élimine le CO₂ du biogaz et permet de récupérer 99% du méthane.

I.1.5.1.2 Odorisation du biogaz

L'ajout d'une odeur distincte au gaz dans le réseau est essentiel pour faciliter la détection des fuites. Avant d'être injecté dans le réseau, le gaz est traité avec du tétrahydrothiophène pour lui

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

donner cette odeur caractéristique. Cette mesure de sécurité permet aux utilisateurs et aux professionnels de repérer facilement les fuites de gaz, ce qui est crucial pour prévenir les accidents et garantir la sécurité des personnes et des installations. La présence d'une odeur reconnaissable dans le gaz rend la détection des fuites plus rapide et plus efficace, permettant une intervention immédiate pour corriger les problèmes potentiels. Il s'agit d'une pratique standard dans l'industrie gazière pour assurer la sécurité et la tranquillité d'esprit des utilisateurs [17]

1.1.5.1.3 L'épuration du biogaz

Purification du biogaz pour éliminer tous les éléments, qui s'ont des traces ou non. Cela peut nuire aux consommateurs et endommager les conduites de gaz. De plus cette étape permet d'augmenter le pouvoir calorifique du biogaz et d'obtenir un gaz de qualité

a- L'élimination d'eau

Le biogaz contient différentes quantités d'eau en fonction de la température. Et à 35°C, le biogaz contient un peu après 5% d'eau. Celle-ci doit être éliminée avant l'introduction du biogaz dans le réseau de distribution. Pour enlever l'eau du biogaz, il y'a des différents procédés basés sur la condensation de l'eau ou le séchage des gaz.

- Elimination d'eau par condensation

Ce processus est basé sur la séparation du condensat là où l'eau s'égoutte .Il est capturé puis jeté. Il existe plusieurs des techniques manuelles ou automatisées sont utilisées pour éliminer l'eau, telles que l'utilisation d'un désembueur constitué d'un treillis métallique à trous fins ; utilisation d'un séparateur à cyclone d'une force centrifuge ; utilisation de collecteurs d'humidité en cas de condensation d'humidité due à la dilatation des gaz

- Elimination de l'eau par séchage

Ce procédé est basé sur le séchage du biogaz qui est saturé de vapeur d'eau, cela comprend plusieurs techniques comme le refroidissement du gaz sursaturé en eau dans l'échangeur. Les tuyauteries sont refroidis et le condensat est collecté, ainsi l'ajout d'un déshydratant permet l'élimination complète de la vapeur d'eau.

b- Elimination d'acide sulfhydrique

C'est un composé très odorant, corrosif et toxique .La combustion génère également du SO₂, qui est l'une des principales causes des pluies acides. Pour éliminer cet élément on utilise plusieurs technologies

- Le dosage de sels de fer

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

Les sels de fer sont introduits directement dans le substrat de fermentation dans le doseur solide ou le fermenteur dans le but d'atténuer la formation de ce contaminant

- Désulfuration biologique

Ce processus est basé sur l'oxydation aérobie biologique lors de la présence des bactéries thiobacillus. Il existe de types externe et interne, la désulfuration interne se fait lors d'injection d'air dans le fermenteur contrairement à la désulfuration externe qui se passe dans un bioréacteur séparé du digesteur

- Désulfuration physique

Il contient deux types, désulfuration fine fonctionne avec une filtration a haute pression en employant du charbon actif comme un catalyseur, cette méthode est la plus utilisé car les concentrations d'acide sulfhydrique ne peuvent généralement être atteintes qu'avec une désulfuration fine. Et la deuxième le contre-lavage à l'eau de pression qui permet de séparer le sulfure d'hydrogène sous haute pression d'eau

c- Elimination de Dioxyde de carbone

Il existe plusieurs méthodes d'éliminer le CO₂ du biogaz, Ces méthodes peuvent être utilisées individuellement ou en combinaison pour éliminer efficacement le CO₂ qui sont

- Absorption : Le biogaz passe à travers une solution de produits chimiques qui absorbent le CO₂. Cette méthode utilise généralement de l'eau ou de la soude caustique comme absorbant
- Adsorption : Le biogaz passe à travers des matériaux poreux tels que le charbon actif et les zéolithes qui adsorbent le CO₂.
- Cryogénie : Le biogaz est refroidi à très basse température pour liquéfier le CO₂ et le séparer du biogaz.
- Membrane : Le biogaz traverse une membrane sélective qui laisse passer le méthane et bloque le CO₂.
- Utilisation de bactéries : les bactéries méthanotrophes peuvent être utilisées pour oxyder le CO₂ en dioxyde de carbone et en eau.

d- Elimination d'ammoniac

Dans les grandes usines, l'ammoniac est souvent éliminé des gaz par un processus d'épuration utilisant de l'acide nitrique dilué ou de l'acide sulfurique dilué. Ce processus comprend l'équipement en acier inoxydable peut être très coûteux, cette technique n'est donc pas adaptée aux petites installations. L'ammoniac peut également être éliminé avec du charbon actif ou des procédés de concentration tels que l'adsorption ou le lavage à l'eau

e- Elimination d'azote

La filtration sur membrane, le lavage à l'acide, l'évaporation, la précipitation de la struvite et le traitement biologique sont quelques-unes des méthodes qui peuvent réduire considérablement la teneur en azote.

I.1.6 stockage de biogaz

Le biogaz est généralement utilisé dans les applications de cogénération où le biogaz est brûlé pour produire de l'électricité et de la chaleur. L'électricité est généralement générée directement à partir du biogaz produit. Mais lors d'une forte production du biogaz ou si la production dépasse la consommation, il peut être stocké pour une utilisation ultérieure. Il existe plusieurs méthodes pour stocker le biogaz, bien qu'il soit important de prendre en considération des facteurs tels que la quantité de gaz à stocker, le coût de l'équipement et l'utilisation prévue du gaz et l'espace disponibles

I.1.6 .1 Le stockage sous terrain

Le biogaz est stocké sous terre dans des réservoirs ou dans des formations naturelles telles que des gisements de gaz épuisés et des aquifères ainsi dans des cavités. Cette méthode nécessite une configuration et un équipement plus complexes, mais peut stocker de grandes quantités de gaz, ce qui en fait une bonne option pour le stockage à long terme [18]

I.1.6 .1.1 -Stockage en cavité saline

Le stockage dans les grottes de sel suppose la présence d'importants gisements de sel. Les cavités se forment en dissolvant du sel dans de l'eau douce. Mais ces cavernes souterraines ou artificielles sont créées en injectant de l'eau. Cette technique dissout progressivement le sel et le récupère sous forme de saumure. [18] Généralement, il a une forme allongée d'une hauteur de plusieurs centaines de mètres et d'un diamètre de plusieurs dizaines de mètres. Ils se trouvent généralement à des profondeurs de 200 à 2 000 mètres et peuvent atteindre des volumes de centaines de milliers de mètres cubes. Le gaz qui imprègne et est stocké à l'état gazeux sous haute pression occupera l'espace libre. La cavité saline imperméable et non poreuse assure une capture immédiate

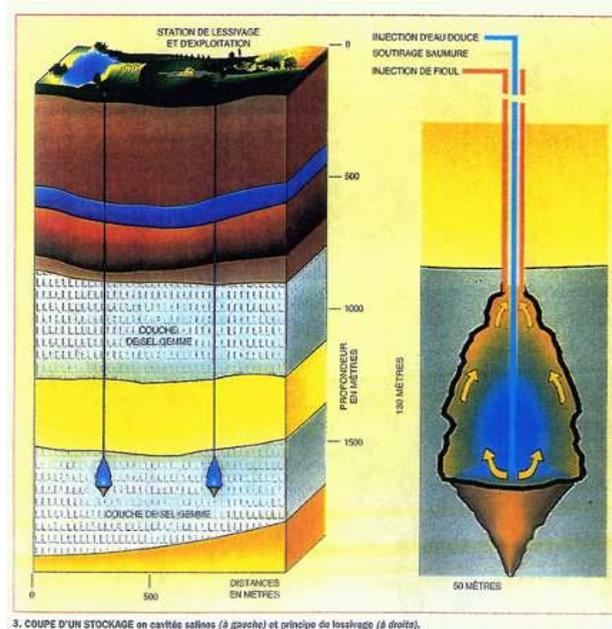


Figure I. 3 stockage en cavité saline

1.1.6.1.2 Stockage en nappes aquifères

Le stockage souterrain en milieu poreux fait appel à des formations poreuses et perméables comme les réservoirs aquifères qui sont surmontés d'un horizon imperméable et structurés sous forme de pièges.[18] Les réservoirs aquifères sont généralement situés à des profondeurs comprises entre 500 et 2000 m. Lors de l'étape de stockage, le gaz est comprimé et injecté à travers une série de puits de travail à l'état gazeux dans des formations souterraines de roche poreuse contenant de l'eau et des couches imperméables. Le gaz injecté sous pression comble le volume vide non occupé par l'eau dans le réservoir. Lors du retrait du stock, le gaz est aspiré par sa propre pression

1.1.6.1.3 Stockage en gisement épuisés

Du gaz sous pression est injecté dans un ancien champ essentiellement imperméable qui a été converti en stockage. Ce processus permet au gaz d'être efficacement stocké. Par ailleurs l'extraction de gaz est un flux continu avec peu de flexibilité et une vitesse lente

1.1.6.1.4 Stockage en cavité minée

Une cavité minée est un ouvrage souterrain constitué d'une ou plusieurs galeries creusées dans un massif rocheux. Les puits de mine sont généralement situés entre 50 et 200 m de profondeur. Les cavités étant généralement non revêtues, leur étanchéité repose sur le principe du confinement hydrodynamique, ainsi l'eau contenu dans la roche environnante s'écoule dans la direction de la cavité minière et assure le confinement du produit dans le stockage souterrain.

Chapitre I

généralités sur la digestion anaérobie

La technologie minière s'applique également au stockage des gaz dont le point de liquéfaction est inférieur à -10°C . Cette technique concerne le stockage souterrain de gaz naturel liquéfié ou le stockage de produits gaziers sous haute pression.

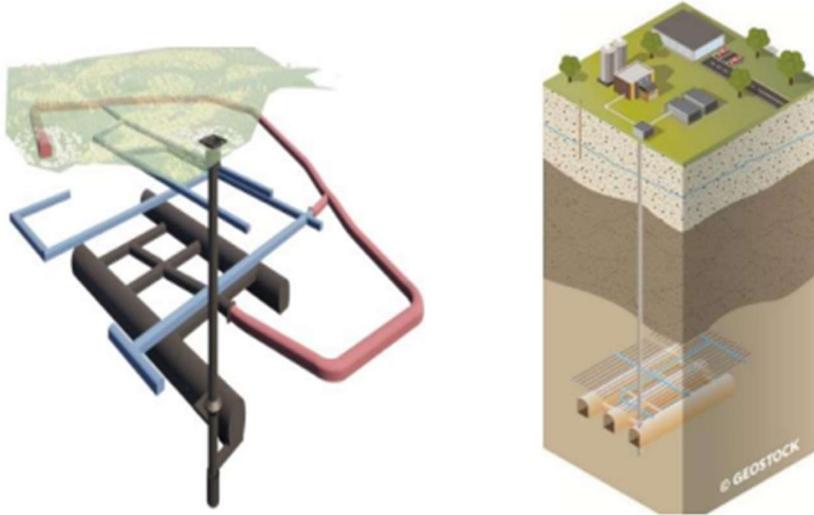


Figure I. 4 stockage en cavité minée

I.1.7 valorisation de biogaz

Outre sa valeur énergétique, la valorisation du biogaz a un double impact environnemental positif : en amont comme traitement des déchets et des effluents organiques, et en aval pour atténuer les risques climatiques globaux en particulier, son captage réduit les émissions de gaz à effet de serre, de méthane et d'oxydes d'azote. Le biogaz peut être valorisé de plusieurs manières possibles, en fonction du type de gisement, de la quantité et la qualité de méthane

I.1.7.1 valorisation thermique

Ce type de valorisation à utiliser le biogaz comme source d'énergie thermique, elle récupère le maximum d'énergie contenue dans le biogaz .La récupération de chaleur à partir de ce biogaz peut se faire de différentes manières. L'une des méthodes les plus courantes consiste à utiliser une chaudière à biogaz pour produire de la vapeur, qui est ensuite utilisée pour faire tourner une turbine afin de produire de l'électricité et la chaleur produite par la combustion du biogaz pour obtenir de la chaleur utile, comme pour chauffer de l'eau, chauffer des bâtiments ou sécher des matières premières, et utilise des sources d'énergie renouvelables pour réduire les coûts.

I.1.7.2 valorisation électrique

La production d'électricité est envisagée lorsque le volume de biogaz produit est important. Ce processus se déroule généralement en deux étapes : Tout d'abord, nous collectons le biogaz

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

généralités sur la digestion anaérobie

généralité par la décomposition de matières organiques telles que les déchets alimentaires, les déchets agricoles et les eaux usées. Le biogaz est ensuite purifié en éliminant toutes les impuretés. Dans une deuxième étape, le biogaz purifié est utilisé pour alimenter une turbine à gaz ou un moteur afin de produire de l'électricité, ensuite Elle peut réinjecter dans le réseau électrique. D'autre part une centrale de cogénération contient une chaudière au biogaz couplée à une turbine à vapeur ou à un moteur à gaz. Cette unité qui produit l'électricité et de la chaleur qui est récupérée au niveau du moteur et dans les gaz d'échappement. Le mécanisme de cogénération utilise une partie de la chaleur générée pour activer le moteur (combustion externe ou interne), la turbine ou la pile à combustible pour produire de l'électricité. La valorisation de l'électricité à partir du biogaz présente plusieurs avantages écologiques et économiques. Réduire les émissions de gaz à effet de serre en produisant de l'électricité à partir de sources renouvelables au lieu de combustibles fossiles. Il contribue également à la gestion des déchets en convertissant les déchets organiques en énergie utile

I.1.7.3 valorisation par alimentation au réseau

Il peut également alimenter le réseau de gaz naturel. C'est la solution qui permet le meilleur rendement énergétique lorsque le réseau est suffisamment proche du point de production

I.1.8 conclusion

La digestion anaérobie est un processus essentiel pour la gestion durable des déchets organiques. Grâce à ses étapes clés, telles que l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse, ce processus permet de décomposer les matières organiques en produisant du méthane, une source d'énergie renouvelable. Cependant, la réussite de la digestion anaérobie dépend de facteurs tels que la température et la composition des substrats.

La digestion anaérobie présente de nombreux avantages, offrant une alternative écologique à l'enfouissement des déchets et contribuant à la préservation de l'environnement. En produisant du biogaz, elle permet de valoriser les déchets organiques tout en générant une source d'énergie renouvelable.

Cependant, pour exploiter pleinement le potentiel du biogaz, il est essentiel de mettre en place des mesures appropriées de traitement, de stockage et de valorisation. Cela inclut des pratiques de contrôle de la qualité du biogaz, des systèmes de stockage sûrs et des technologies efficaces pour sa conversion en électricité, chaleur ou carburant.

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

En conclusion, la digestion anaérobie et la production de biogaz ouvrent la voie à une gestion durable des déchets organiques et à l'utilisation d'une source d'énergie renouvelable. Ce processus offre une opportunité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de valoriser les déchets et de contribuer à la transition vers un avenir énergétique plus durable

Références chap1:

- [1] Production Du Biogaz Par Digestion Anaerobie : Aspects Technologiques Et Environnementaux N. Hajjaji^{1,2}, M.N. Pons¹ , V. Renaudin¹ , A. Houas² ¹ Laboratoire Réactions et Génie des procédés – CNRS, Nancy-Université, 1, rue Grandville, BP 20451, 54001 Nancy cedex, France
- [2] Nieto Orellana, C.R., Valorisation par digestion anaérobie des déchets organiques ménagers de la ville de Cuenca, Équateur. 2019
- [3] Palmisano, A. C., Barlaz, M. A., Microbiology of solid waste, CRC Press (1996).
- [4]] MC CARTY, P. L., MOSEY, F. E., Modelling of anaerobic digestion processes a discussion of concepts, Water Science and Technology, 24 (1991), 17–33
- [5] MOSEY, F. E., Mathematical modelling of the anaerobic digestion process: regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile acids from glucose, Water Science and Technology, 15 (1983), 209–232
- [6] HALL, E. R., HULSHOFF, L. W., LETTINGA, G., MALINA, J. F., POHLAND, J. F. G., Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes, Water Quality Management Library, Technomic Publishing Company, 7 (1992)
- [7] BOONE, D. R., JONHSON, R. L., LIU, Y., Diffusion of The Interspecies Electron Carriers H₂ and Formate in Methanogenic Ecosystems and Its Implications in the Measurement of K_m for H₂ of Formate Uptake, Applied and Environmental Microbiology, 55 (1989) 1735–1741.
- [8]] BRAUN R., Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses, chap. anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental, management and rural development, Springer (2007), 335–416
- [9] Valorisation par digestion anaérobie des déchets organiques ménagers de la ville de Cuenca, Équateur)
- [10] Moletta, R., La digestion anaérobie des déchets municipaux. L'Eau, l'Industrie, Les Nuisances, 2002. 275: p. 75-82
- [11] Benyahia, B., Modélisation et observation des bioprocédés à membranes: Application à la digestion anaérobie. 2012, Montpellier 2

Chapitre I généralités sur la digestion anaérobie

- [12] Moletta, F.H.R., Inventaire moléculaire d'un écosystème microbien de digestion anaérobie
- [13] PETROCHIMIQUES, C.E., U.M. POTENTIEL, and P.L.D. ANAEROBIE, LE TRAITEMENT DES EFFLUENTS DE CERTAINES INDUSTRIES
- [14] Moletta, R., Technologies de la méthanisation de la biomasse Déchets ménagers et agricoles. La méthanisation, in French., 2011: p. 177
- [15] Hernandez-Shek, M.A., Développement et validation de méthodologies et d'outils opérationnels de caractérisation rhéologique de biomasses appliqués au procédé de méthanisation en voie solide, et conception de réacteurs de 0, 5 m3. 2020, Université de Technologie de Compiègne.
- [16] Réf PRODUCTION DU BIOGAZ PAR DIGESTION ANAEROBIE : ASPECTS TECHNOLOGIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX N. Hajjaji^{1,2}, M.N. Pons¹ , V. Renaudin¹ , A. Houas
- [17] Kadir, L. and M. Aziza, Traitement et valorisation du biogaz
- [18] Haddad, P., Recherche sur l'injection de nouveaux gaz dans les stockages souterrains (RINGS). 2021, Université de Pau et des Pays de l'Adour

Chapitre II : Les turbines à Gaz

II.1 Historique

L'idée des turbines à gaz à combustion interne et des turbines à air chaud est assez ancienne. En 1731, l'Anglais John Verber dépose une demande de brevet sur le sujet. Mais il a fallu environ 100 ans pour que la turbine à gaz démarre. Son développement fut longtemps retardé par le succès de la turbine à vapeur (turbine à action de Gustave Laval en 1883 et turbine à réaction de Charles Parsons en 1884). L'intérêt pour les turbines à gaz a conduit à une frénésie de brevets de 1880 à 1900 et à de nombreuses expériences de 1900 à 1910. Les projets de recherche les plus importants de cette période ont été commandés par :

- Stolze d'Allemagne a proposé une turbine à air chaud (1900-1904) composée d'un compresseur axial à plusieurs étages et d'une turbine axiale, mais la machine ne tournait pas.
- L'Allemand Holzworth (1906-1908) a proposé une turbine à gaz explosive. Il a été construit par Koerting puis par Brown Boveri (1909-1913) et comportait une turbine Curtis à deux étages basée sur une configuration proposée par le Français Karovadine (1906). Ce système a été abandonné en 1928.
- Allmanger et Roumare de France ont proposé une turbine à gaz à combustion (1903-1905) composée d'un compresseur centrifuge, d'une roue de turbine et d'un refroidisseur d'eau en aval pour permettre la génération de vapeur (turbine à gaz et principes de cogénération entre turbines à vapeur). Cette vapeur est dirigée vers les roues en mouvement pour extraire une puissance supplémentaire. Cependant, un choc thermique endommagea les disques et les aubes de la turbine et le projet fut abandonné en 1909 avec la mort d'Almangaard. [1]

II.2 définition turbine à gaz

Les turbines à gaz sont aujourd'hui les éléments les plus polyvalents des turbomachines. Il peut Utiliser dans divers modes d'industries importantes. La production d'électricité, le pétrole et le gaz, les usines de traitement et même l'aviation Industries d'État et petites industries connexes.

Une turbine à gaz collecte essentiellement de l'air et le comprime dans un module. Le compresseur et le carburant sont enflammés. Le gaz résultant se dilate à travers la turbine. L'arbre de cette turbine continue de tourner et entraîne le compresseur. Ils sont sur le même axe et peuvent fonctionner en continu. Une unité de démarrage séparée est utilisée pour le fonctionnement initial Faites tourner le rotor jusqu'à ce que la turbine atteigne et maintienne la

vitesse de conception. L'ensemble de l'unité fonctionne. Module compresseur, module de combustion, Une turbine reliée par un ou plusieurs arbres est collectivement appelée générateur de gaz. [2]

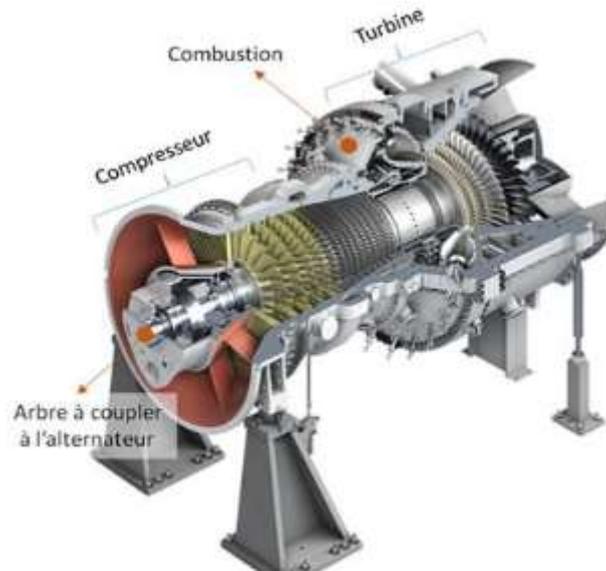


figure II 1: la turbine à gaz [<https://energieplus-lesite.be/techniques/cogeneration9/la-turbine/> dernier accès Août]

II.3 le principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

Une turbine à gaz fonctionne selon le processus suivant

- ✓ Elle aspire de l'air de l'environnement environnant.
- ✓ L'air est ensuite comprimé à une pression plus élevée par le compresseur.
- ✓ Le combustible est ajouté et brûlé dans une chambre de combustion, ce qui augmente l'énergie de l'air comprimé (gaz chaud).
- ✓ L'air à haute pression et haute température est dirigé vers la section de la turbine, où l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique pour faire tourner l'arbre (expansion).
- ✓ Cette énergie mécanique est utilisée d'une part pour alimenter le compresseur, qui est directement couplé à la section de la turbine, et d'autre part pour fournir de l'énergie utile à la machine entraînée, telle qu'un alternateur ou un compresseur centrifuge, à travers un accouplement.
- ✓ Les gaz à basse pression et basse température résultant de la transformation mentionnée ci-dessus sont évacués vers l'atmosphère (échappement)[3]

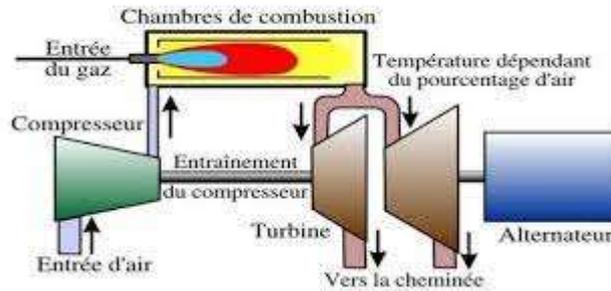


Figure II 2: principe de fonctionnement d'une turbine à gaz

II.4 les composants de turbine à gaz

Les principaux composants d'une turbine à gaz :

- ◆ Section compression
- ◆ Section combustion
- ◆ Section turbine

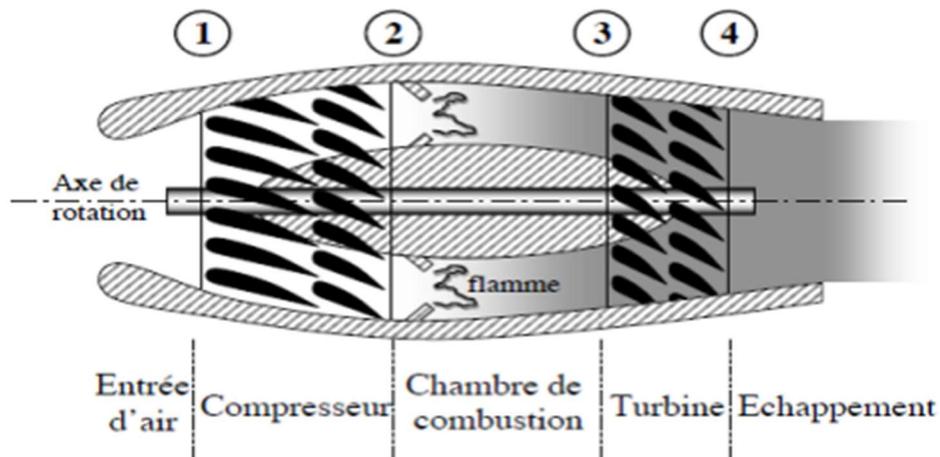


Figure II 3: les composants de turbine à gaz

II.4.1 Section compression

Le compresseur utilisé dans ce système est de type axial, ce qui lui permet de délivrer des débits d'air élevés, nécessaires pour obtenir une puissance utile importante, tout en occupant un espace réduit. Il remplit plusieurs fonctions essentielles, notamment :

- ✓ Fournir une source d'air pour le refroidissement des parois des directrices, des aubes et des disques de la turbine.
- ✓ Assurer l'approvisionnement en air nécessaire pour le refroidissement de la turbine.
- ✓ Fournir de l'air pour assurer l'étanchéité de l'huile de graissage des paliers.

Composants principaux du compresseur :

- Le rotor : il est responsable de la compression de l'air en le faisant passer à travers les aubes du rotor.
- Le stator : il guide l'écoulement de l'air après qu'il a été comprimé par le rotor.
- L'enveloppe d'admission : elle assure l'entrée de l'air dans le compresseur.
- Le corps du compresseur : il abrite les rotors et les stators, assurant leur alignement et leur fonctionnement correct.
- L'enveloppe d'évacuation du compresseur : elle permet la sortie de l'air comprimé vers la section de la turbine.
- Les tubes d'interconnexion : ils assurent la circulation de l'air entre les différents composants du compresseur

II.4.2 Section combustion

Dans cette section, la combustion du mélange air-gaz se produit en utilisant des bougies d'allumage. Lorsqu'une chambre est allumée, les gaz chauds de combustion se propagent à travers des tubes de foyer et enflamment le mélange dans les autres chambres

II.4.3 Section turbine

La section turbine est la partie où les gaz chauds venant de la section combustion sont convertis en énergie mécanique. Cette section comprend les éléments suivants : -

- Corps de turbine
- Tuyère 1ère étage
- Roue de turbine 1ère étage (roue HP)
- Tuyère 2ème étage (aubage réglable ou directrice)
- Roue de turbine 2ème étage (roue BP)

II.5 classification turbine à gaz

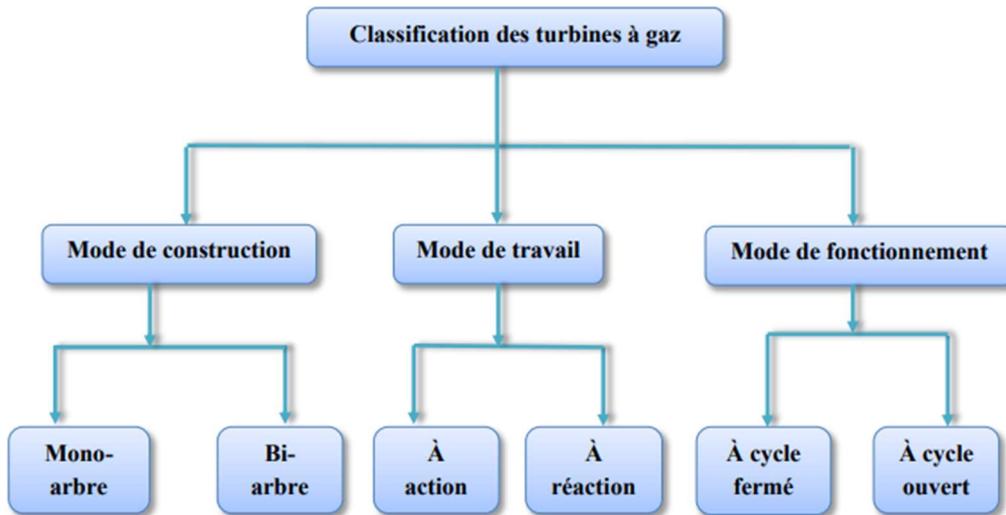


figure II 4:Classification turbine à gaz[4]

II.5.1 Selon le mode de construction:

a. Turbine-mono-arbre :

Les sections de la turbine et du compresseur sont assemblés ensemble, ce qui permet à l'ensemble de tourner à une même vitesse. Ce type de configuration est utilisé dans des applications où la variation de vitesse n'est pas nécessaire, comme l'entraînement des générateurs pour la production d'électricité. [5]

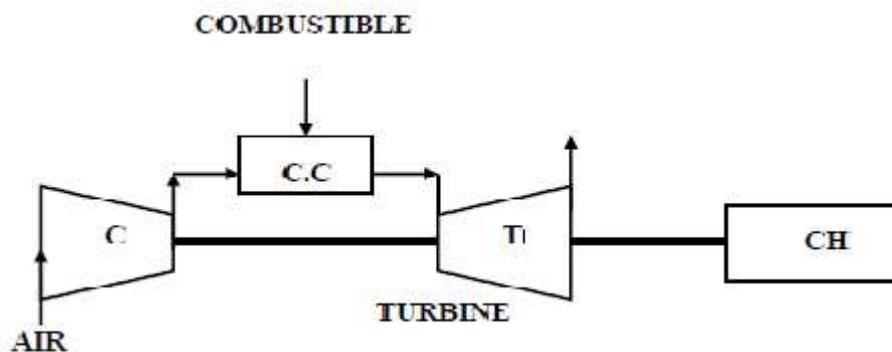


figure II 5:Schéma de Développement de turbine mono arbre.

a. Turbine bi-arbre :

La turbine à gaz est composée de deux roues turbines qui sont indépendantes sur le plan mécanique. La roue turbine haute pression (HP) entraîne le rotor du compresseur axial et les accessoires, tandis que la roue turbine basse pression (BP), (le deuxième étage) est utilisée pour entraîner l'organe récepteur.

L'objectif de ces roues turbines indépendantes est de permettre à chacune d'entre elles de fonctionner à des vitesses différentes, afin de répondre aux exigences de charge variable de l'organe récepteur [5]

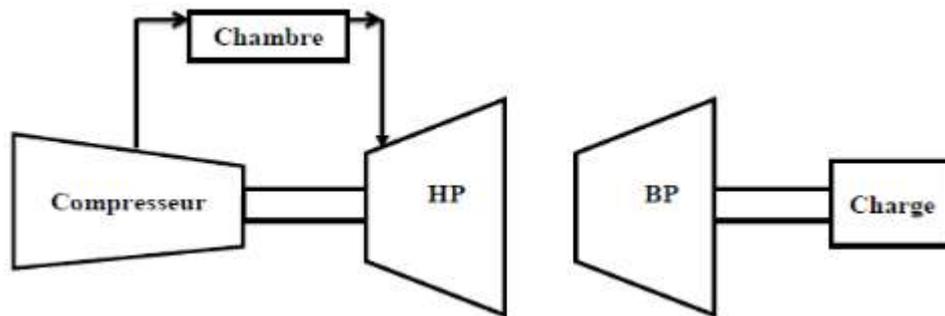


Figure II 6:Schéma d'une turbine à gaz bi-arbre.

II.5.2 Selon le mode de travail:

- a- Dans une turbine à action, l'énergie thermique est totalement convertie en énergie cinétique dans la directrice.
- b- Dans une turbine à réaction, une partie de l'énergie thermique est convertie en énergie cinétique et mécanique à l'intérieur de la roue.[6]

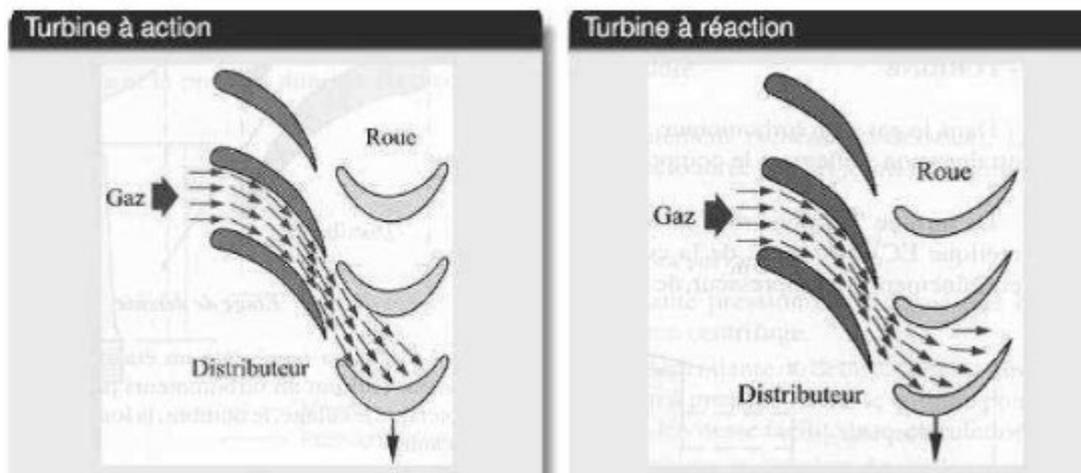


figure II 7:Schéma d'une turbine à action et à réaction.

MS7001EA au niveau du complexe GNL1K de Skikda, Spécialité : Energétique et

II.5.3 Selon le mode de fonctionnement thermodynamique

- ✓ Turbine à gaz à cycle fermé : Le même fluide est réutilisé après chaque cycle.

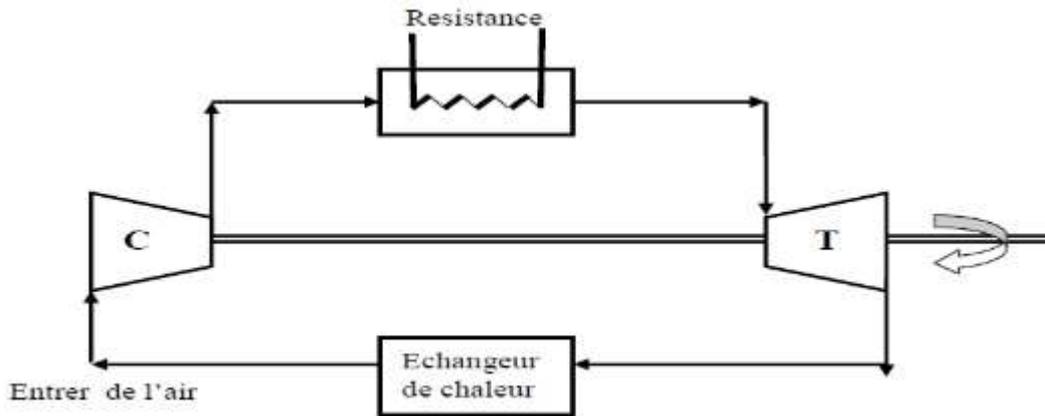


Figure II 8: Cycle irréversible fermé.

- ✓ Turbine à cycle ouvert :

Il s'agit d'une turbine où l'admission et l'échappement se font directement dans l'atmosphère.

Ce type de turbine est le plus courant et se divise en deux catégories :

- ❖ Turbine à cycle simple : Elle utilise un seul fluide pour produire de l'énergie mécanique. Après la détente, les gaz restants contiennent encore de l'énergie potentielle qui est perdue dans l'atmosphère à travers l'échappement.
- ❖ Turbine à cycle régénéré : Elle utilise plusieurs fluides moteurs dans son cycle thermodynamique afin d'augmenter le rendement de l'installation.

II.6 Domaines d'application

Les turbines à gaz sont largement utilisées dans l'industrie en tant qu'appareils de production d'énergie mécanique. Elles trouvent diverses applications dans les domaines suivants :

- Transmission électrique : Elles sont utilisées pour la production d'énergie électrique.
- Entraînement des compresseurs
- Entraînement des pompes.
- Procédés industriels particuliers : Elles peuvent être utilisées dans des applications spécifiques liées à des procédés industriels spécifiques.[8]

II.7 Avantages et Inconvénients des turbines à gaz

II.7.1 Avantages :

- Puissance massique et volumique élevée en raison du fonctionnement continu.
- Construction et équilibrage apparemment simples.
- Pollution limitée en NOx grâce à l'excès d'air et aux températures limitées.
- Capacité de récupération de chaleur.
- Longévité en marche stationnaire
- Potentiel d'utilisation de combustibles variés et de moindre qualité.[9]

II.7.2 Inconvénients

- Limite du taux de compression en raison du nombre d'étages de compression nécessaires.
- Baisse significative de l'efficacité des compresseurs centrifuges à des régimes inférieurs au régime nominal.
- Limite de température de combustion en raison de la résistance mécanique de la turbine.
- Forte diminution de l'efficacité à charge partielle, en particulier pour les turbines à simple arbre.
- Coût élevé de l'usinage des aubes, notamment pour la turbine.
- Inadaptation aux arrêts fréquents et aux démarrages peu progressifs.[9]

II.8 centre d'enfouissement technique (CET)

II.8.1 définition

Les Centres d'Enfouissement Technique (CET) sont des installations où les déchets sont éliminés en les déposant dans le sous-sol. Les CET sont classés en trois catégories en fonction de la nature des déchets acceptés et du coefficient de perméabilité K du substrat [10]

II.8.1.1 CET de Classe I

Ils sont autorisés à recevoir, en plus des déchets urbains et banals, certains déchets industriels spéciaux [11]. Ces CET peuvent accepter les types de déchets suivants :

- Déchets industriels spéciaux de catégorie A, tels que les résidus d'incinération, les résidus de la sidérurgie tels que les poussières et les boues d'usinage, les résidus de forage, les déchets

minéraux issus du traitement chimique tels que les sels métalliques, les sels minéraux et les oxydes métalliques.

- Déchets de catégorie B, tels que les résidus issus du traitement des effluents industriels et des eaux industrielles, les résidus de peinture comme les déchets solides de peinture et les résidus de résine de vernis, les résidus de recyclage des accumulateurs et des batteries, les résidus d'amiante, les matériaux réfractaires usagés et d'autres matériaux minéraux usés et souillés.

II.8.1.2 Les CET de Classe II

Sont des installations conformes à la loi française du 19 juillet relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, qui acceptent les déchets ménagers et assimilés. Les types de déchets admissibles dans ces décharges comprennent :

- Ordures ménagères
- Déchets ménagers encombrants
- Déblais et gravats
- Déchets commerciaux, artisanaux et industriels courants assimilables aux ordures ménagères
- Déchets agricoles ne présentant aucun danger pour la santé humaine et l'environnement
- Pneumatiques
- Cendres et résidus de traitement refroidis résultant de l'incinération des ordures ménagères
- Boues provenant de l'assainissement urbain.

II.8.1.3 Les CET de Classe III

Ces décharges de Classe III ne reçoivent que des déchets inertes d'origine domestique, tels que les déchets issus des travaux de bricolage familiaux, qui peuvent également être stockés dans les décharges de Classe II, ainsi que les déblais et gravats, qui peuvent également être stockés dans les décharges de Classe II. Elles acceptent également les déchets de chantiers et les déchets provenant de carrières [10 11]

II.8.2 Principe de fonctionnement d'un CET :

La gestion efficace des déchets implique la création de centres de stockage, qui complètent les autres méthodes de traitement des déchets. Un centre de stockage est un lieu où les déchets sont éliminés par dépôt ou enfouissement, sans intention de récupération ultérieure. L'amélioration de la sécurité de ces installations de stockage nécessite une optimisation de l'aménagement du fond et des flancs des sites de stockage de déchets

La réussite de l'étanchéité d'une décharge repose sur trois principaux éléments :

- Un fond étanche
- Le drainage des lixiviats au-dessus du fond
- l'étanchéité de la couverture

Le fond de la décharge doit permettre l'évacuation continue des lixiviats et des eaux météoriques. Il est essentiel que le fond et les parois soient imperméables. Pour confiner les produits polluants dans le centre de stockage, deux types de barrières sont utilisées : une barrière passive (géologique) et une barrière active (artificielle). Des aménagements tels que des couches drainantes, l'imperméabilisation du fond et des flancs, ainsi que des barrières, sont mis en place pour collecter les flux de déchets en vue de leur traitement

Ainsi, le fond de l'excavation est composé d'une couche d'argile compactée d'au moins 60 cm, agissant comme une "barrière passive". Une géomembrane en polyéthylène à haute densité (HDPE) d'une épaisseur de 1,5 mm est ensuite placée, faisant office de "barrière active". Sur toute la surface de la géomembrane, un géotextile protecteur est appliqué, également considéré comme une "barrière active". Enfin, un système multicouche est complété par une couche drainante de gravier. [10 11]

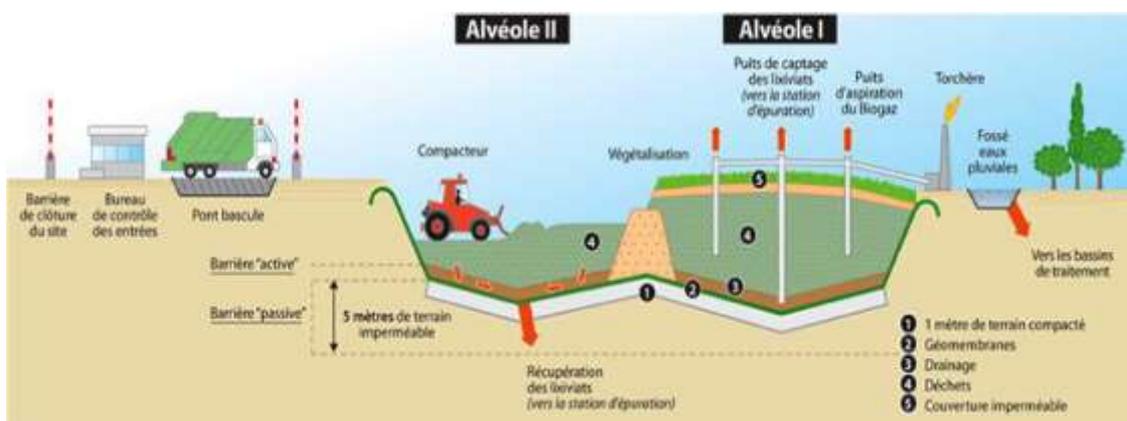


Figure II 9: principe de fonctionnement d'un CET



Références chapitre 2 :

- [1] Abed Ammr Khadraoui Ilham « révision générale sur turbine à gaz 5001P au niveau de la centrale de m'sila » Université de m'sila 2019
- [2] Claire M. Soares «gaz turbines in simple cycle & combined cycle applications»
- [3] André LALLEMAND, 1195, “Production d’énergie électrique par centrales thermiques”, Techniques de l’Ingénieur, D 4 002, pp.1-11.
- [4] SACI HADEF FARES «Amélioration des performances de la turbine à gaz par refroidissement d’air d’admission en amont de compresseur» Université badji mokhtar Annaba 2017
- [5] BEY SAID et YAZAG SAMIR, Thème: AMELLORATION DES
- [6] MS7001EA au niveau du complexe GNL1K de Skikda, Spécialité : Energétique et Environnement, Domaine : sciences et technologie, Filière : Génie mécanique,]
- [7]PERFORMENCES D’UNE TURBINE A GAZ M.S5002C PAR PRECHAUFFAGE, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU, Promotion : 2016/2017]
- [8][Boumediene Nour Elhouda,Nourine Amina : Calcul du rendement de turbine à gaz par la méthode de Chambadal à différentes températures]
- [9] [Boumediene Nour Elhouda,Nourine Amina : Calcul du rendement de turbine à gaz par la méthode de Chambadal à différentes températures]
- [10] Martin Pépin Aina. Expertises des centres d’enfouissement techniques de déchets urbains Dans les DEP: contributions a l’élaboration d’un guide méthodologique et a sa validation expérimentale sur sites. Docteur de l’université de limoges. 2006
- [11] Fadila MEZOUARI. SANDJAKDINE. Conception et exploitation des centres de stockage Des déchets en Algérie et limitation des impacts Environnementaux. Docteur de l’école polytechnique d’architecture et d’urbanisme. 2011

Chapitre III : Estimation et simulation d'une turbine à gaz

III.1 Logiciel utilisé GSP 12

III.1.1 Définition

Le logiciel GSP (Gaz Turbine Simulation Programme) est un environnement de modélisation basé sur des composants, Orienté objet flexible de GSP, utilisé pour simuler le fonctionnement des turbines à gaz, qui sont des dispositifs utilisés pour produire de l'énergie mécanique en brûlant du gaz combustible. [2]

L'architecture de GSP permet de simuler facilement et de manière complète les turbines à gaz, tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Son interface conviviale permet de glisser-déposer les éléments nécessaires et offre une assistance en ligne pour faciliter son utilisation. [1]

En utilisant le logiciel GSP, on peut modéliser et simuler les performances d'une turbine à gaz dans différentes conditions de fonctionnement, en prenant en compte des paramètres tels que la température d'entrée du gaz, la pression, le débit massique, le combustible utilisé et les caractéristiques de la turbine. Le logiciel effectue ensuite des calculs et des simulations pour estimer les performances de la turbine à gaz, y compris son rendement énergétique, sa puissance de sortie, sa consommation de carburant et les températures de sortie. [1]

Le programme de simulation de turbine à gaz peut être utilisé dans diverses applications, notamment la conception de turbines à gaz, l'optimisation des performances, l'analyse de scénarios de charge, l'évaluation des performances énergétiques et la formation des opérateurs. Il permet aux ingénieurs et aux professionnels de mieux comprendre le comportement d'une turbine à gaz dans différentes conditions et de prendre des décisions éclairées pour améliorer son fonctionnement et son efficacité.

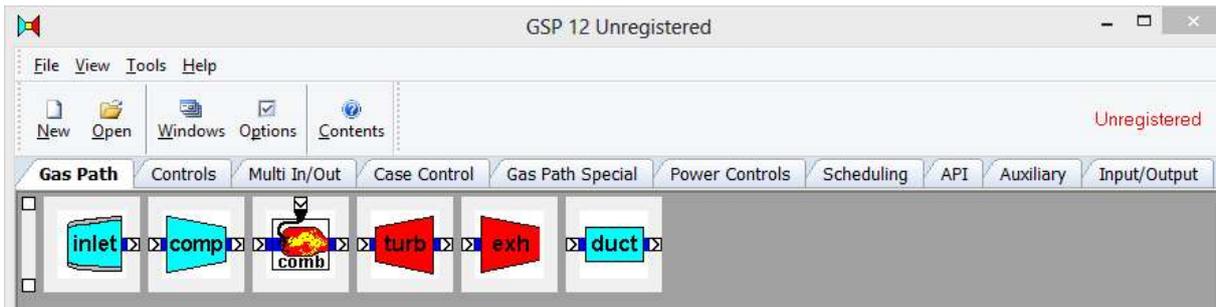


Figure III 1: La fenêtre principale du GSP 12

Le logiciel GSP 12 offre aux utilisateurs la possibilité de personnaliser leur simulation de turbine à gaz en construisant le moteur à turbine à gaz souhaité à partir d'une liste de composants disponible tels que le compresseur, la chambre de combustion, la turbine, les échangeurs de chaleur et les conduites. Cela permet une flexibilité dans la modélisation et l'adaptation du logiciel aux besoins spécifiques de l'utilisateur. [1]

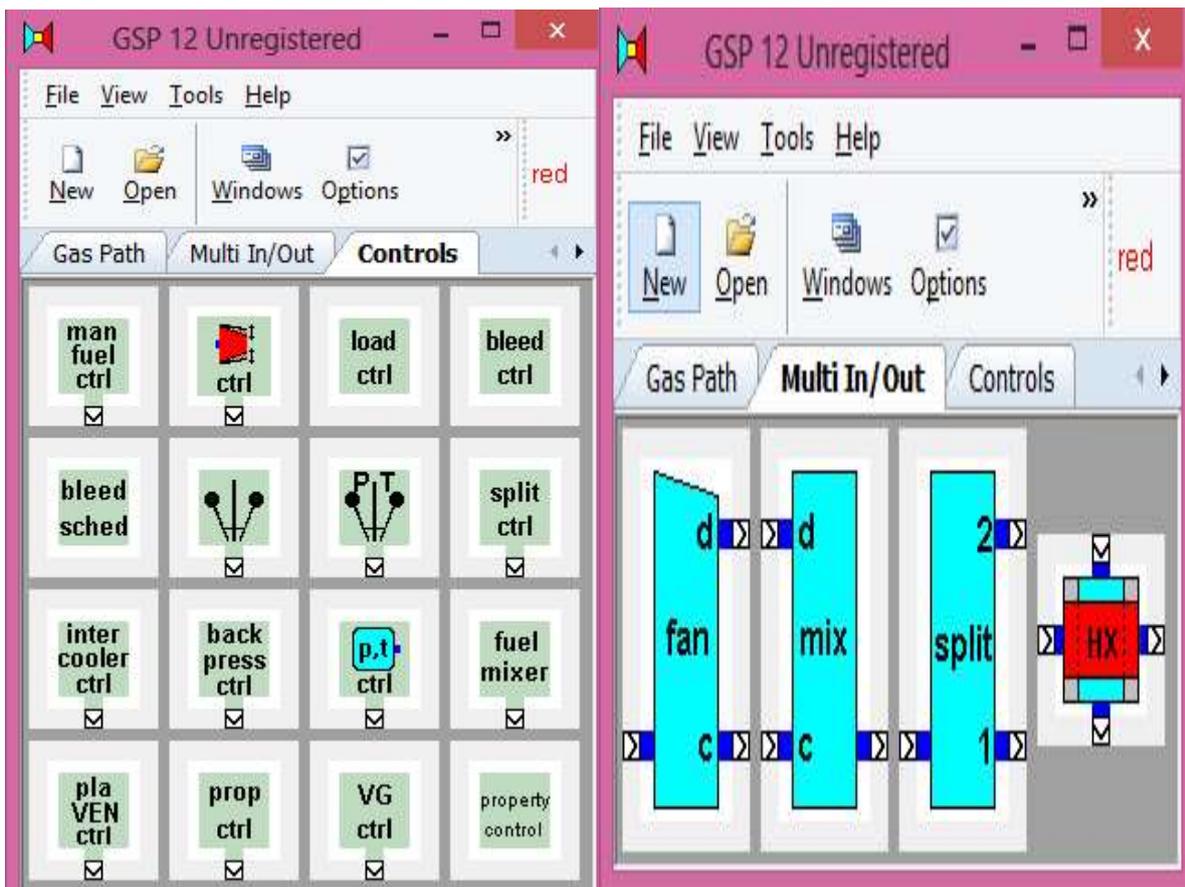




Figure III 2: Bibliothèque des composants de GSP 12

III.2 Estimation des quantités de déchets au centre proposé de Remchi

La quantité des déchets pour la région de Remchi est égale à 31,28 tonnes par jour. [3]
 Généralement pour la région de Remchi, environ 60 % des déchets sont composés de matière organique, ce qui signifie qu'il y a environ 18,77 tonnes par jour de matière organique. [5] [6]
 En convertissant cette matière organique en biogaz, il est possible d'obtenir environ 50 % de cette quantité, ce qui équivaut à 9,385 tonnes/jour [6] et Donc le débit massique est d'environ 0,11 kg/s.

III.3 Application sur le logiciel GSP12

Pour démarrer, il est nécessaire d'ouvrir le projet <TJET> à partir du modèle de turbine à gaz disponible dans le logiciel. Ce projet particulier est basé sur le modèle de turbine à gaz fourni dans l'exemple de projet appelé <Sampleprojects>. Dans ce modèle de turbine à gaz, Il est possible de modifier les paramètres de chaque composant en fonction des données relatives au biogaz produit dans la station. [8]

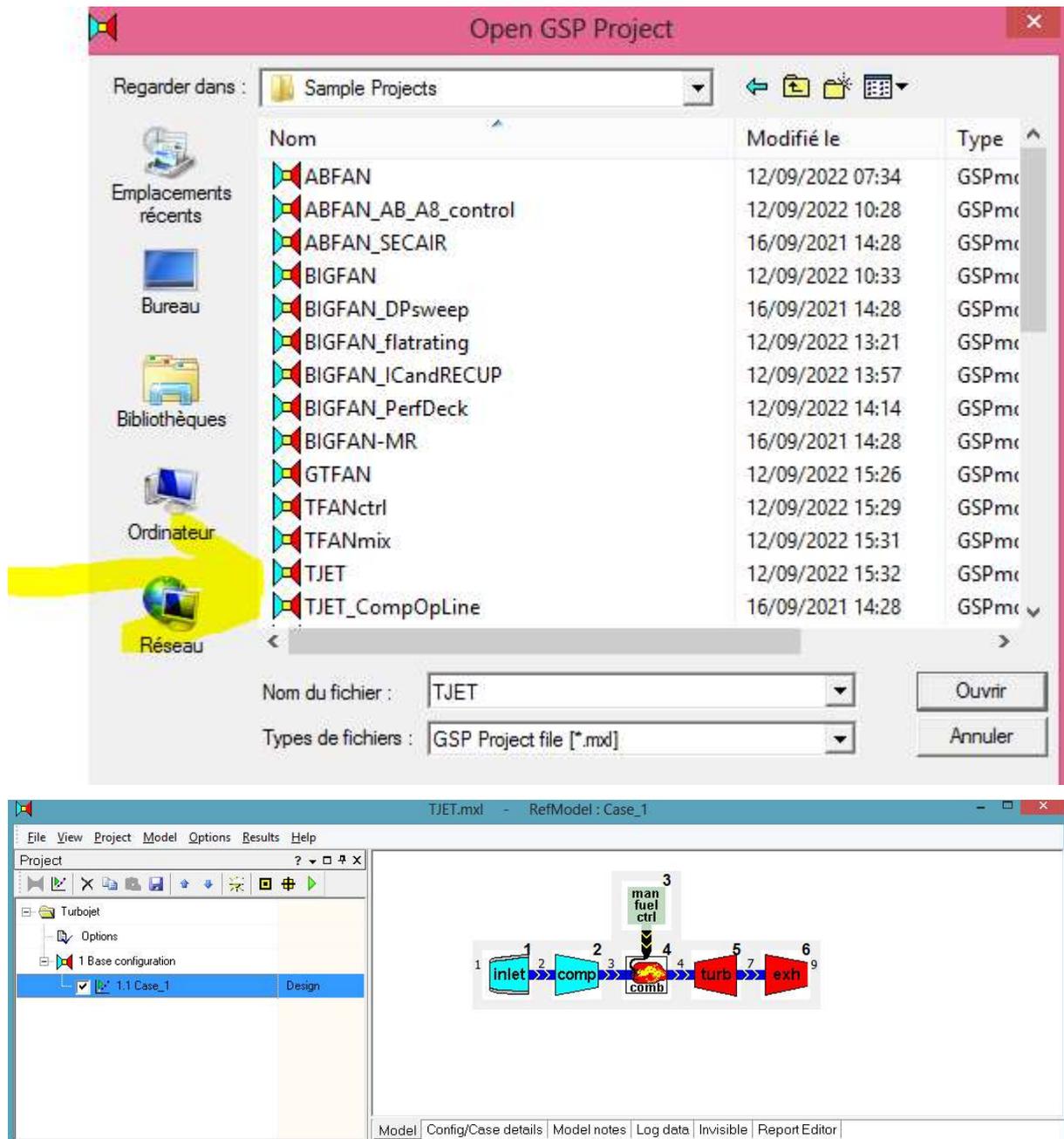


figure III 3:Modèle de turbine à TJET

1. L'entrée de turbine à gaz (Inlet) :

La quantité de méthane qui passe par l'entrée de la turbine à gaz, exprimée en débit massique est de 0.11 kg/s.

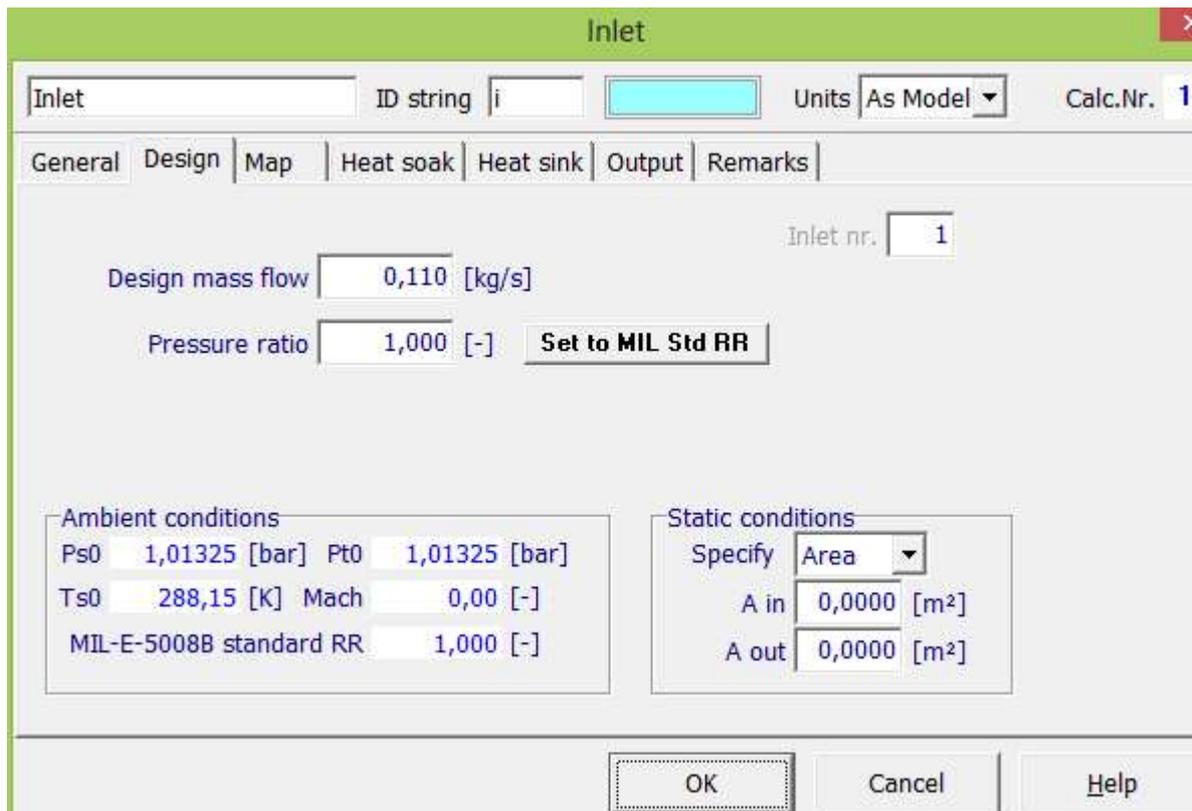


figure III 4:La fenêtre de l'entrée de la turbine à gaz

2. Le compresseur (compressor) :

La vitesse du rotor de la turbine à gaz a été maintenue à sa valeur par défaut qui est 16540

$$\text{rpm}(\text{rotation per minute})=16540 \text{ tr/min}= 16540 \frac{2\pi \cdot \text{rad}}{60 \cdot \text{s}}$$

figure III 5:Fenêtre de compresseur

3. Le contrôleur du carburant (man fuel ctrl) :

Le composant de contrôle du débit de carburant joue un rôle vital dans un système de combustion. Sa fonction principale est de réguler avec précision la quantité de carburant fournie au processus de combustion en fonction des exigences et des paramètres spécifiques du système.

4. La chambre de combustion (combustor) :

figure III 6:Fenêtre de la chambre de combustion

Le biogaz produit est un mélange de gaz comprenant principalement du méthane (CH_4), du dioxyde de carbone (CO_2), ainsi que quelques gaz traces tels que le dioxyde de soufre (SO_2), l'eau (H_2O), l'ammoniac (NH_3) et l'azote (N_2). La composition moyenne typique de ces molécules dans le biogaz est la suivante : [4]

- Méthane (CH_4) : environ 60 à 70%
- Dioxyde de carbone (CO_2) : environ 25 à 35%
- Dioxyde de soufre (SO_2) : présence de 100 à 5000 ppm (soit 0,01 à 0,5%)
- Azote (N_2) : environ 2 à 5%
- Traces d'eau (H_2O) et d'ammoniac (NH_3)

Les pourcentages indiqués sont approximatifs et peuvent varier en fonction de facteurs tels que les conditions de digestion, la nature des déchets traités, et d'autres variables. Il est essentiel de souligner que la teneur en méthane est un indicateur crucial de la valeur énergétique du biogaz, car le méthane constitue la principale source de combustible utilisée pour la production d'énergie. [7]

On va rentrer le débit massique de notre carburant et aussi choisis les éléments contenue dans le biogaz avec le pourcentage de chaque élément

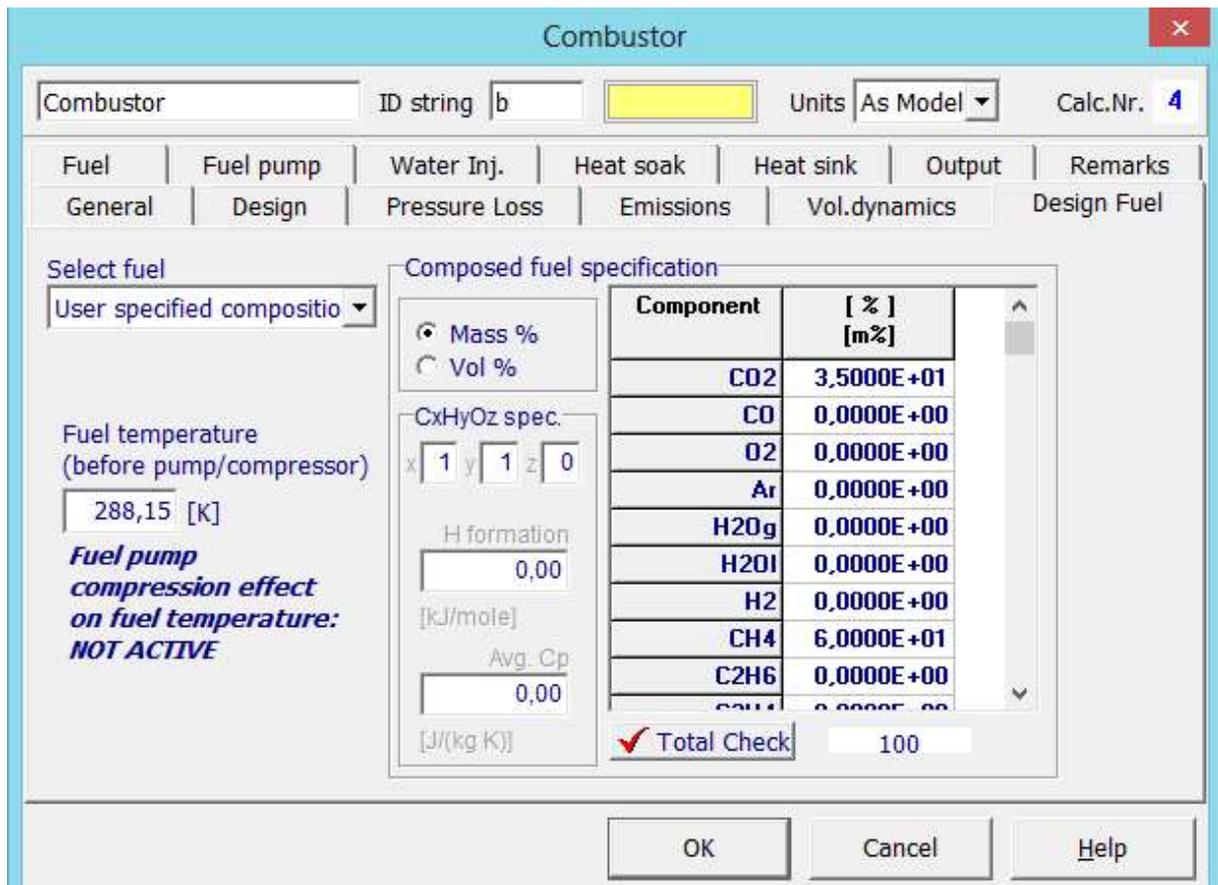


figure III 7:Le choix du carburant utilisé dans la chambre de combustion

La turbine :

Dans la fenêtre suivante on règle la vitesse de rotor et d'autres paramètres concernant l'entrée et la sortie de la turbine.

The screenshot shows the 'Turbine' software window with the 'Design' tab selected. The 'General' sub-tab is active, displaying the following parameters:

- Design rotor speed: 16540 [rpm]
- Design gear ratio: 1,000 [-]
- Design efficiency: 0,880 [-]
- Expansion heat loss fraction: 0,500 [-]
- Design External load / PTO: Calculate max. Design load (checked), Power: 0,00 [kW], Torque: 0 [N m]
- Exit static conditions: Specify Area (selected), Area: 0,0000 [m²]

figure III 8: Les paramètres d'entrée de la turbine

The screenshot shows the 'Turbine' software window with the 'Design' tab selected. The 'Output' sub-tab is active, displaying a large number of checkboxes for selecting output data:

- Pressure:** Total In, Total Out, Static In, Static Out, Total PR, Delta Ptotal
- Flows:** In, Out, Corrected in, Mach, Velocity, Cross Areas
- Temperature:** Total In, Total Out, Static In, Static Out, Total TR, Delta Ttotal
- Map:** Scale factors, Oper. curve pars, Unscaled, Map Beta
- Component performance:** N [rpm], N [%], Nc [%], PTO, Surplus pwr, ETAis, ETApoly, Werror, NGV exit Flow, P, T
- Other/rotor cooling:** per flow, Total Wcl, Exit avg. Hcl, Total dHW's
- Effects data:** Gas Vol. dyn., Heat soakage, Heat sink, Deterioration
- Variable Geometry:** Angle

figure III 9: Les paramètres de sortie de la turbine

5. L'échappement (exh) :

L'échappement de la turbine désigne les gaz qui sont rejetés par la turbine une fois qu'ils ont été utilisés pour générer de l'énergie mécanique. Dans le cas d'une turbine à gaz, l'échappement se

Chapitre III

Estimation et simulation d'une turbine à gaz

produit à la sortie de la turbine, où les gaz d'échappement chauds sont relâchés dans l'environnement.

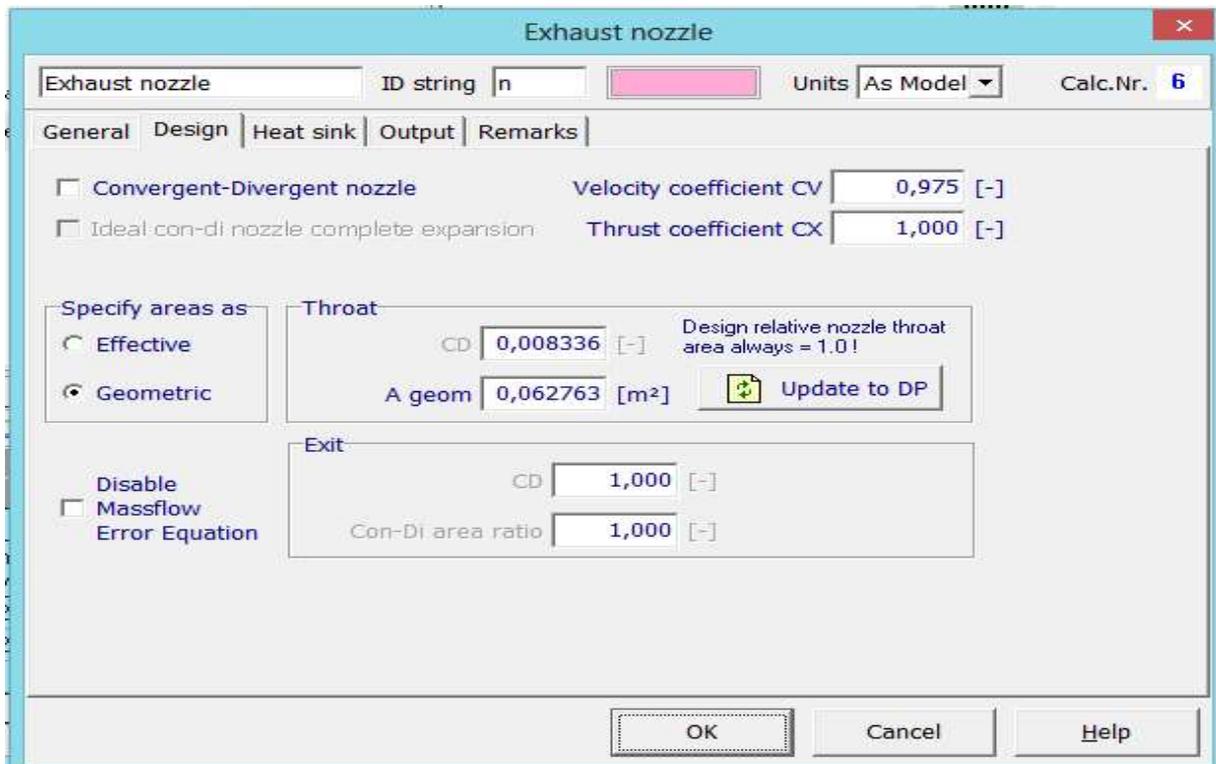


figure III 10:La fenêtre d'échappement

III.4 Résultats et interprétations

Inlet						
Tt1 [K]	Pt1 [bar]	W1 [kg/s]	Wc1 [kg/s]	Tt2 [K]	Pt2 [bar]	W2 [kg/s]
288,15	1,01325	0,110	0,110	288,15	1,01325	0,110

Combustor					
Tt3 [K]	Pt3 [bar]	W3 [kg/s]	Tt4 [K]	Pt4 [bar]	W4 [kg/s]
542,32	7,01169	0,110	2322,35	6,73122	0,220

Exhaust nozzle								
Tt7 [K]	Pt7 [bar]	W7 [kg/s]	Wc7 [kg/s]	Tt9 [K]	Ts9 [K]	Pt9 [bar]	Ps9 [bar]	W9 [kg/s]
2259,37	5,40723	0,220	0,1245	2290,85	2020,87	5,24316	2,99867	0,220

Compressor									
Wc2 [kg/s]	PR_c [-]	N1 [rpm]	N%1 [%]	N%_c [%]	Nc_c [%]	PWshaft_c [kW]	Eta_c [-]	TQ_c [N.m]	SM_c [%]
0,110	6,920	16540	100,00	100,00	100,00	28,44	0,8250	16,423	0,00

Turbine										
Wc4 [kg/s]	M7 [-]	PR_t [-]	dTt_t [K]	N%_t [%]	Nc_t [%]	PWshaft_t [kW]	Eta_t [-]	TQ_t [N.m]	Werror_t [-]	Wcompc_t [kg/s]
0,1015	0,000	1,2449	-62,98	100,00	100,00	28,73	0,8800	16,588	0,000	0,1015

Résultats obtenus par la simulation

Selon la simulation de la turbine à gaz, plusieurs paramètres ont été mesurés et sont indiqués sur la figure : la température, la pression, le débit du carburant, la vitesse du rotor et la puissance mécanique. Une augmentation de ces paramètres peut être un indicateur d'une conversion efficace de l'énergie thermique en énergie mécanique.

Global system performance data:							DesignPoint
FN	=	0,289	[kN]				
TSFC	=	1,36817	[kg/(N h)]				
Rotor speeds:							
N1	=	16540	[rpm]	=	100,00	[%]	
Engine station data:							DesignPoint
Station	W[kg/s]	Tt[K]	Ts[K]	Pt[bar]	Ps[bar]	Wc[kg/s]	
a	*****	*****	*****	*****	*****	*****	
1	0,11000	288,15	*****	1,013250	*****	0,11000	
2	0,11000	288,15	*****	1,013250	*****	0,11000	
3	0,11000	542,32	*****	7,011690	*****	*****	
4	0,22000	2322,35	*****	6,731222	*****	0,10154	
41	*****	*****	*****	*****	*****	*****	
7	0,22000	2259,37	*****	5,407227	*****	0,12454	
8	*****	*****	*****	*****	*****	*****	
9	0,22000	2290,85	2020,87	5,243156	2,998674	*****	
Station	H[kJ/kg]	Cp[J/(kg K)]	S[J/(kg K)]	FAR[-]	Mach[-]	V[m/s]	A[m ²]
a	*****	*****	*****	*****	0,000000	*****	*****
1	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
2	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
3	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
4	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
41	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
7	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
8	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
9	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

***** = parameter not added to data output set!

Rapport des résultats

Abréviation	Description	Dimensions de système international (SI)
A	Zone transversale d'écoulement	[m ²]
Aratio	Rapport gorge/zone de sortie	
Athr_rel	une gorge par rapport à une conception de gorge (Athr/Athrdes)	
BPR	Taux de contournement	
bld	écoulement de purge	
c	flux central (ventilateur, mélangeur)	

Cf	Facteur de correction pour un conduit ou un noyau de ventilateur efficace cartographier le débit massique	
cl	flux de refroidissement	
d	flux de conduit (ventilateur, mélangeur)	
delta	pression normalisée à ISA = p [bar] / 1,01325	
DP	Design Point (mode simulation / calcul)	
DHWin	changement de $H * W_{in}$	[kW]
DHWcl	puissance de l'arbre produite par le flux de refroidissement de la turbine	[kW]
DHWkincl	puissance d'arbre nécessaire pour augmenter le refroidissement de la turbine débit d'énergie cinétique DHWcl due à la rotation	[kW]
Droop	Gain proportionnel dans le régulateur de vitesse du rotor (P en contrôle PID)	
dTs	Écart par rapport à la température standard ISA	[K]
Elco	indice d'émission de monoxyde de carbone	[g/(kg carburant)]
Elnox	indice d'émission d'oxyde d'azote	[g/(kg carburant)]
Eluhc	indice d'émission d'hydrocarbures imbrûlés	[g/(kg carburant)]
Eta	Efficacité	
FAR	Rapport air-carburant	
Fbld	Fraction de saignement	
FG	Poussée brute	[kN]
FN	Poussée nette	[kN]
H	enthalpie spécifique	[kJ/kg]
Hbld	enthalpie spécifique au débit de purge	[kJ/kg]
ISA	Atmosphère standard internationale	
LHV	Pouvoir calorifique inférieur	[kJ/kg]
Mach, Macha	Numéro Mach de vol	
Mexit	vitesse de sortie en Mach	

N	vitesse du rotor	[rpm]
Nc	vitesse du rotor corrigée	[rpm]
Ndm	vitesse du rotor demandée	[rpm]
Nerror	signal d'erreur de vitesse du rotor dans le système de commande	[rpm]
Nsens	signal de vitesse du rotor détecté dans le système de commande	[rpm]
OD	Hors conception (mode simulation / calcul)	
Pacc	puissance d'accélération	[kW]
Pb	Pression dans la chambre de combustion. "pression du brûleur"	[bar]
Pbld	Pression du débit de purge	[bar]
PLA	Angle du levier de puissance	[°]
PR	Rapport de pression	
PS, Ps	Pression statique	[bar]
PSexit	Pression de sortie statique	[bar]
Pt, PT	Pression totale	[bar]
PWshaft	Puissance de sortie de l'arbre	[kW]
RD	Traînée de béliet	[kN]
RR	Facteur de récupération Ram	[RR]
SFC	Consommation de carburant spécifique à la puissance de l'arbre	[kg/(kW h)]
SN	nombre de fumées	
Tbld	température de flux de purge	[K]
Tcorr	température corrigée	[K]
theta	temperature normalisée à ISA = $T[K]/288.15$	
Time	temps	[s]
TRQ	couple	[N m]
TSexit	Temperature de sortie statique	[K]
TSFC	Consommation de carburant spécifique à la poussée	[kg/(N h)]

TT	Temperature totale	[K]
Vc	Vitesse d'air calibrée	[m/s]
Vt	Vitesse réelle de l'air	[m/s]
W	Débit massique d'air ou de gaz	[kg/s]
Wbld	Débit massique de purge	[kg/s]
Wc	Débit massique corrigée	[kg/s]
Wf	débit de carburant	[kg/s]
WfPb	Débit de carburant dévisé par la pression de brûleur	[(kg/s)/(bar)]
WfPblead	Signal de dérivation WfPb (terme différentiel dans le contrôle PID)	[(kg/s)/(bar)]
WfPbmax	Programme d'accélération maximale WfPb	[(kg/s)/(bar)]
WfPbmin	Programme de décélération minimum WfPb	[(kg/s)/(bar)]
WfPbtrim	Signal d'ajustement WfPb (terme intégrale dans le contrôle PID)	[(kg/s)/(bar)]
Zp	Altitude-pression	[m]

La turbine à gaz produit une puissance mécanique de 28.73 kW, qui peut être convertie en puissance électrique à l'aide d'un alternateur triphasé. En supposant que les pertes de l'alternateur soient négligeables et que le rendement de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique soit de 80% [8], la puissance électrique produite peut être calculée en multipliant la puissance mécanique par le rendement, soit 22.98 kW. Cela correspond à une production d'énergie électrique de 82728 kWh équivalant à 741.77 MWh/an

L'énergie électrique générée à partir du biogaz produit dans une station d'enfouissement peut être significative et contribue à réduire la dépendance aux réseaux électriques traditionnels.

III.5 Les avantages

- Valorisation des déchets organiques : La digestion anaérobie permet de transformer les déchets organiques tels que les résidus alimentaires, les boues d'épuration ou les déchets agricoles en une ressource précieuse. Plutôt que d'être simplement éliminés, ces déchets peuvent être utilisés comme matière première pour produire du biogaz.

- Production d'énergie renouvelable : Le biogaz produit lors de la digestion anaérobie est une source d'énergie renouvelable. Il est principalement composé de méthane, qui peut être brûlé pour produire de la chaleur ou converti en électricité. Cette production d'énergie verte contribue à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et aux émissions de gaz à effet de serre.
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre : L'utilisation du biogaz comme source d'énergie permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. En brûlant le méthane contenu dans le biogaz, on évite sa libération directe dans l'atmosphère, ce qui contribue à lutter contre le changement climatique.
- Gestion durable des déchets : La digestion anaérobie offre une solution de gestion durable des déchets organiques. Plutôt que d'être enfouis ou incinérés, ces déchets sont transformés en biogaz, ce qui réduit la quantité de déchets à traiter et permet de récupérer de l'énergie.
- Production d'électricité décentralisée : La production d'électricité à partir du biogaz permet de générer de l'énergie localement, ce qui réduit la dépendance aux réseaux électriques centraux. Cela peut être particulièrement avantageux dans les zones rurales ou isolées, où l'accès à l'électricité peut être limité.
- Production de chaleur : En plus de l'électricité, la combustion du biogaz peut également générer de la chaleur. Cette chaleur peut être utilisée pour le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire ou les processus industriels, ce qui améliore l'efficacité énergétique globale du système

III.6 les impacts

III.6.1 Les impacts environnementaux

- Réduction des émissions de gaz à effet de serre : La production de biogaz à partir de la digestion anaérobie permet de capturer le méthane, un gaz à effet de serre puissant, qui serait autrement libéré dans l'atmosphère lors de la décomposition des déchets organiques. En brûlant le biogaz pour produire de l'électricité, on évite la libération directe du méthane, ce qui contribue à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à atténuer le changement climatique.
- Valorisation des déchets organiques : La digestion anaérobie offre une solution efficace pour traiter et valoriser les déchets organiques. Au lieu d'être enfouis dans des

décharges, où ils peuvent produire du méthane et des lixiviats polluants, ces déchets sont transformés en biogaz, en récupérant ainsi une ressource énergétique précieuse.

- Réduction de la pollution de l'eau et des sols : En traitant les déchets organiques par digestion anaérobie, on réduit le risque de pollution de l'eau et des sols. Les déchets organiques sont décomposés de manière contrôlée, ce qui permet de limiter la formation de lixiviats potentiellement nocifs pour l'environnement.
- Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles : La production d'électricité à partir du biogaz contribue à réduire la dépendance aux combustibles fossiles. En utilisant une source d'énergie renouvelable, on diminue la consommation de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel, ce qui entraîne une réduction des émissions de gaz à effet de serre et une meilleure préservation des ressources naturelles.
- Gestion durable des déchets : La digestion anaérobie offre une alternative durable à la gestion traditionnelle des déchets organiques. Plutôt que de les enfouir ou de les incinérer, les déchets sont utilisés pour produire de l'énergie, ce qui réduit la quantité de déchets à traiter et contribue à une meilleure gestion des ressources.
- Amélioration de la qualité de l'air : La combustion du biogaz pour la production d'électricité génère des émissions plus propres par rapport aux combustibles fossiles traditionnels. Cela contribue à améliorer la qualité de l'air en réduisant les émissions de polluants atmosphériques tels que les oxydes de soufre, les oxydes d'azote et les particules fines.

III.6.2 Les impacts sociaux économique

- Création d'emplois locaux : La mise en place de systèmes de digestion anaérobie et de production d'électricité à partir de biogaz nécessite des compétences techniques et opérationnelles. Cela peut entraîner la création d'emplois locaux dans des domaines tels que l'ingénierie, l'installation, l'exploitation et la maintenance des installations de biogaz.
- Développement économique local : Les projets de digestion anaérobie et de production d'électricité à partir de biogaz peuvent stimuler le développement économique local. Ils peuvent attirer des investissements dans la région, soutenir les entreprises locales liées à la construction et à l'exploitation des installations, et favoriser la croissance économique grâce à la production d'électricité et à la vente de biogaz.

- Diversification des sources de revenus agricoles : Dans de nombreux cas, les installations de digestion anaérobie utilisent des déchets agricoles, tels que les résidus de cultures et le fumier animal, comme matières premières. Les agriculteurs peuvent donc bénéficier de revenus supplémentaires en vendant leurs déchets organiques pour la production de biogaz. Cela contribue à diversifier les sources de revenus agricoles et à renforcer la résilience économique des exploitations agricoles.
- Réduction des coûts énergétiques : Les installations de production d'électricité à partir de biogaz permettent aux sites de réduire leurs coûts énergétiques. En utilisant le biogaz produit localement comme source d'énergie, les entreprises, les exploitations agricoles ou les communautés peuvent réduire leur dépendance aux sources d'électricité traditionnelles et réduire ainsi leurs factures d'énergie.
- Amélioration de la sécurité énergétique : La production d'électricité à partir de biogaz contribue à renforcer la sécurité énergétique en diversifiant les sources d'approvisionnement en énergie. En utilisant une ressource locale, les sites de digestion anaérobie peuvent réduire leur dépendance aux importations d'énergie et améliorer leur autonomie énergétique.
- Avantages sociaux pour les communautés locales : Les installations de digestion anaérobie peuvent apporter des avantages sociaux aux communautés locales. Par exemple, la production d'électricité à partir de biogaz peut contribuer à l'accès à l'énergie dans les zones rurales ou éloignées, où l'approvisionnement en électricité traditionnelle peut être limité. Cela peut améliorer la qualité de vie, soutenir le développement des services publics et faciliter l'accès à l'éducation et aux soins de santé

III.6.3 Les impacts sur l'énergie

- Production d'énergie renouvelable : La production d'électricité à partir de biogaz est une source d'énergie renouvelable. Le biogaz est généré par la dégradation des déchets organiques, ce qui en fait une ressource continue et durable. En utilisant cette source d'énergie, on réduit la dépendance aux combustibles fossiles et on contribue à la transition vers un système énergétique plus propre et plus durable.
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre : L'utilisation du biogaz comme combustible pour la production d'électricité permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Lorsque le biogaz est brûlé pour générer de l'électricité, il libère principalement du dioxyde de carbone (CO₂) et de l'eau. Comparé aux combustibles

fossiles, le biogaz a une empreinte carbone nettement inférieure, car il provient de sources organiques et participe à la boucle du carbone.

- Valorisation des déchets organiques : La digestion anaérobie permet de valoriser les déchets organiques, tels que les résidus agricoles, les déchets alimentaires et les boues d'épuration. Plutôt que de les laisser se décomposer dans des décharges et de produire des émissions de méthane, ces déchets sont transformés en biogaz et utilisés comme source d'énergie. Cela contribue à réduire les impacts environnementaux liés à la gestion des déchets et permet de récupérer de l'énergie à partir de ressources précieuses.
- Flexibilité dans la gestion de l'énergie : Les installations de production d'électricité à partir de biogaz offrent une certaine flexibilité dans la gestion de l'énergie. Étant donné que le biogaz est produit en continu par la digestion anaérobie, il peut être utilisé pour répondre à la demande d'électricité en fonction des besoins. Cette flexibilité peut être particulièrement bénéfique pour les systèmes électriques, en contribuant à l'équilibrage de l'offre et de la demande, ainsi qu'à la gestion des pointes de charge.
- Production décentralisée d'énergie : Les installations de digestion anaérobie et de production d'électricité à partir de biogaz peuvent être mises en place à petite ou grande échelle, ce qui permet une production décentralisée d'énergie. Cela peut être avantageux pour les zones rurales ou éloignées, où l'accès à l'électricité provenant de réseaux traditionnels peut être limité. La production décentralisée d'énergie favorise l'autonomie énergétique et réduit les pertes d'énergie associées au transport sur de longues distances.

III.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation des turbines à gaz et la production d'électricité à l'aide du programme GSP12. Nous avons analysé divers paramètres des turbines à gaz tels que la température, la puissance et le débit de carburant afin de générer une énergie mécanique de haute qualité qui peut ensuite être convertie en énergie électrique.

Les résultats de simulation obtenus grâce au logiciel GSP12 sont nombreux, mais le plus important pour notre travail est la puissance mécanique de sortie, qui s'élève à 28,73 kW. En se basant sur le rendement proposé par le générateur, cela correspond à une production annuelle d'énergie électrique de 741,77 MWh/an. Cette valeur est considérable et démontre l'efficacité de notre système.

Liste de référence chapitre IV

1. Visser, W.P. and M.J. Broomhead, GSP A generic object-oriented gas turbine simulation environment. 2000.
2. Visser, W.P., Generic Analysis Methods for Gas Turbine Engine Performance: The development of the gas turbine simulation program GSP. 2015.
3. Mr. Kihal Mohammed, Contribution à l'étude de décharge de Saf Saf (Tlemcen)
4. M. RAZAFIMAHEFA Alexandre «modélisation d'une digestion anaérobie du lisier de porc » mémoire pour l'obtention du diplôme d'études approfondies (DEA) Université d'Antananarivo faculté des sciences
5. Damien, A., Guide du traitement des déchets. 2004: Dunod Paris.
6. Igoud, S., et al., Première approche de la caractérisation du biogaz produit à partir des déjections bovines. Revue des Energies Renouvelables, 2002. 5: p. 123-128.
7. HAOUAM, S.E. and S. HASSAINE, PRODUCTION D'ELECTRICITE A PARTIR DE LA COMBUSTION DU BIOGAZ ISSU DE BIOMASSE. 2020, Directeur: Mme. FARADJI Djamila Née KHERBOUCHE/Co-directeur: Mme. GHOMRI Amina.
8. HAOUAM, S.E. and S. HASSAINE, ETUDE DU POTENTIEL DE VALORISATION ENERGETIQUE DU BIOGAZ DE LA STATION D'EPURATION BARAKI. 2020, Directeur: Mme. FARADJI Djamila Née KHERBOUCHE/Co-directeur: Mme. GHOMRI Amina

Conclusion générale

Conclusion Général

Conclusion générale

Conclusion général

La production d'électricité à partir du biogaz généré dans les stations d'enfouissement offre une opportunité significative de réduire la dépendance aux réseaux électriques conventionnels.

Le processus de décomposition des déchets organiques dans les stations d'enfouissement engendre la production de biogaz, principalement composé de méthane et de dioxyde de carbone. Ce biogaz peut être collecté, traité et utilisé comme combustible pour alimenter des générateurs d'électricité.

En convertissant le biogaz en énergie électrique, les stations d'enfouissement peuvent générer leur propre approvisionnement en électricité et réduire leur consommation en provenance des réseaux électriques traditionnels. Cette électricité produite localement peut être utilisée pour alimenter les différentes opérations de la station d'enfouissement, telles que l'éclairage et les équipements de traitement des déchets. De plus, en cas de surplus de production, l'excédent peut être injecté dans le réseau électrique local, contribuant ainsi à l'approvisionnement en électricité de la communauté environnante.

Cette approche présente de nombreux avantages environnementaux et économiques. Tout d'abord, elle permet de valoriser le biogaz produit dans la station d'enfouissement, transformant ainsi un déchet en une source d'énergie précieuse. Deuxièmement, elle réduit la dépendance aux sources d'électricité traditionnelles, ce qui contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la lutte contre le changement climatique. Enfin, elle présente des avantages économiques en réduisant les coûts liés à l'achat d'électricité provenant du réseau électrique.

Il convient de souligner que la quantité d'électricité produite dépend de la quantité de biogaz générée dans la station d'enfouissement et de l'efficacité du système de conversion en électricité. Une évaluation précise de la quantité de biogaz disponible et une conception optimisée du système de production d'électricité sont essentielles pour maximiser les bénéfices environnementaux et économiques de cette approche.

En conclusion, l'utilisation du biogaz provenant des stations d'enfouissement pour produire de l'électricité représente une solution durable et prometteuse. Cela permet de valoriser les déchets organiques, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de renforcer l'indépendance

Conclusion générale

énergétique des installations de traitement des déchets. Cette approche contribue à la transition vers une économie circulaire plus respectueuse de l'environnement et offre des avantages à la fois sur le plan environnemental et économique.

Résumé :

Dans ce travail on se propose d'étudier, la possibilité de production d'électricité par digestion anaérobique des déchets organique, un centre d'enfouissement est proposé dans la daïra de Remchi pour valoriser les déchets, notre travail vise trois aspects un aspects énergétique qui comprend la production d'une énergie propre électricité, un aspect environnemental qui consiste en la valorisation des déchets, et un aspect socioéconomique qui comprend la création des postes de travail ainsi que la production d'électricité à partir de zéro dinar (les déchets). Notre étude montre bien que la production d'électricité à partir de biogaz est une méthode prometteuse qui pourra assurer l'autonomie des centres d'enfouissement. Ceci va bien avec la politique général du pays.

Mots clés : Digestion anaérobique, biogaz, PSG, électricité.

Summary :

In this work we propose to study, the possibility of electricity production by anaerobic digestion of organic waste, a landfill center is proposed in the daïra of Remchi to valorize the waste, our work aims at three aspects an energy aspect which includes the production of clean electricity, an environmental aspect which consists of the recovery of waste, and a socio-economic aspect which includes the creation of workstations as well as the production of electricity from zero dinar (waste). Our study shows that the production of electricity from biogas is a promising method that can ensure the autonomy of landfills. This goes well with the general policy of the country.

Keywords: Anaerobic digestion, biogas, PSG, electricity.

ملخص :

في هذا العمل نقترح دراسة إمكانية إنتاج الكهرباء عن طريق الهضم اللاهوائي للنفايات العضوية ، وقد تم اقتراح إنشاء مركز لطمر النفايات بدائرة رمشي لتتضمن النفايات ، ويهدف عملنا إلى ثلاثة جوانب وهي جانب الطاقة الذي يشمل الإنتاج النظيف. الكهرباء ، جانب بيئي يتكون من استعادة النفايات ، وجانب اجتماعي اقتصادي يشمل إنشاء محطات العمل وكذلك إنتاج الكهرباء من صفر دينار (نفايات). تظهر دراستنا أن إنتاج الكهرباء من الغاز الحيوي طريقة واعدة يمكن أن تضمن استقلالية مكبات النفايات. هذا يسير بشكل جيد مع السياسة العامة للبلد.

الكلمات المفتاحية: الهضم اللاهوائي ، الغاز الحيوي ، PSG ، الكهرباء.