

SOMMAIRE

REMERCIEMENT	i
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chap. I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	2
I. Déchets, Décharge, Centre et Gaz d’Enfouissement (Biogaz) :.....	2
1) Déchets :	2
2) Décharge :	3
3) Centre d’enfouissement technique :	4
4) Gaz d’enfouissement (biogaz) :	4
II. Cadre institutionnel et juridique :	5
III. Avantages de l’exploitation issu des décharges :	6
IV. Statistiques mondiales de génération d’électricité à partir du biogaz :.....	7
V. Récupération d’énergie à partir du biogaz et utilisation :	7
VI. Paramètres influençant la méthanisation et optimisation de la production de biogaz et énergie électrique :	8
VII. L’historique de modélisation de la production de biogaz :.....	9
1) Les avantages de la modélisation du biogaz :	10
2) Les paramètres L_0 et k :	10
3) Les modèles de quantification du biogaz disponible :	11
VIII. Mécanisme de Développement Propre (MDP) :	13
1) Définition de mécanisme de développement propre :	14
2) Secteurs concernés :	14
3) Les avantages pour les pays hôtes et l’investisseur :	15
4) Condition de l’éligibilité du projet MDP :	15
Chap. II: PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE	16
I. Présentation du groupe ECOMED :.....	16
1) Le Groupe ECOMED :	16
2) Organisation de l’entreprise ECOMED :	17
3) Les équipements de la décharge :	18
II. La décharge contrôlée de Fès :	19
1) Localisation du site :	19
2) Choix du site :	19

3) Les différents départements de la décharge de Fès :	20
a) Salle de pesage et de contrôle :	20
b) Le site d'enfouissement :	21
i. Tubes collecteurs :	22
ii. Tête de puits	22
iii. Puits d'extraction	23
c) Les bassins de lixiviats :	24
d) La centrale bioélectrique	25
III. La méthanisation	32
IV. Problématique et méthodologie.....	35
Chap. III: LA MODELISATION DU BIOGAZ ET LA VALORISATION EN ENERGIE	
ELECTRIQUE	36
I. Modélisation de la production de biogaz :.....	36
1) Détermination de la quantité de déchets et sa composition :	36
2) Détermination des paramètres L_0 et k :	37
3) Estimations de la production du biogaz au cours du temps :	37
4) Application du modèle LandGEM	38
II. La valorisation de la production de l'énergie électrique.....	40
1) Estimation du volume valorisé et brûlé de méthane	40
2) Le volume de méthane stocké	42
3) L'énergie électrique.....	42
4) L'énergie électrique générée :	43
III. Nombre de moteurs :.....	44
IV. Eclairage public de Fès :.....	46
1) Le taux d'éclairage public :	46
2) Le pourcentage d'éclairage public :	47
V. Réduction d'émissions des GES	48
CONCLUSION GENERALE.....	50
REFERENCES	51
ANNEXES.....	53

Liste des figures :

Figure 1 : La génération et l'utilisation du biogaz	7
Figure 2: Facteurs affectant la génération du biogaz	8
Figure 3: Les groupes ECOMED au Maroc	17
Figure 4: L'organigramme de l'entreprise ECOMED au Maroc	17
Figure 5: L'organigramme de l'entreprise ECOMED au Fès	18
Figure 6: La décharge contrôlée de FES	19
Figure 7: La salle de pesage avec le pont-bascule.....	20
Figure 8 : Logiciel Transistor et le terminal.....	21
Figure 9: Casier d'enfouissement.....	21
Figure 10: Réseau de collecte du biogaz	22
Figure 11: Tube PEHD.....	22
Figure 12: Tête de puits.....	23
Figure 13: Puits horizontaux et verticaux	23
Figure 14: Bassins de lixiviat	24
Figure 15 : Unité de soutirage de la décharge et la torchère	25
Figure 16: Schéma de système de soutirage et la torchère.....	26
Figure 17: Générateur électrique et transformateur de la centrale	27
Figure 18: Stator et Rotor.....	28
Figure 19: Dégâts causés par le sulfure d'hydrogène sur un moteur bioélectrique après 10000h de fonctionnement	29
Figure 20 : Dégâts causés par les siloxanes sur les moteur et dépôts de silice sur les bougies d'allumage.....	29
Figure 21: Cycle du moteur Otto.....	30
Figure 22: Piston et vannes dans un moteur à combustion interne à quatre temps.....	31
Figure 23: De gauche à droite, l'évaporateur thermique, filtration par membrane biologique	31
Figure 24: Schéma récapitulatif de la méthanisation	32
Figure 25: Composition typique du biogaz après enfouissement des déchets	32
Figure 26: De gauche à droite, l'appareil GEM et l'analyseur de biogaz	34
Figure 27: Caractérisation des déchets solides.....	36
Figure 28: Evolution de la quantité du déchet de la décharge du Fès	37

Figure 29 : Evolution de la production du biogaz par deux modèles.....	38
Figure 30: Interface du modèle LandGEM	39
Figure 31: Evolution de la production et le collecte du biogaz.....	39
Figure 32: Evolution du volume de méthane valorisé.....	41
Figure 33 : Evolution du volume de méthane brûlé	41
Figure 34: Evolution du volume de méthane stocké	42
Figure 35 : Evolution de la production d'énergie électrique.....	43
Figure 36: Evolution de l'énergie électrique générée	44
Figure 37: Graphe de distribution du nombre de moteur	45
Figure 38: Le taux d'éclairage public avant et après SDL.....	46
Figure 39: Le pourcentage d'éclairage public.....	47
Figure 40: L'excès d'énergie.....	47
Figure 41: La réduction d'émissions de CO ₂	48

Liste des tableaux :

Tableau 1: Composition du biogaz.....	4
Tableau 2: Plage de COD recommandées selon la matière enfouie.....	10
Tableau 3: Fractions des déchets enfouies dans la décharge.....	10
Tableau 4: Plage de k recommandées selon le climat et la nature de la matière enfouie	11
Tableau 5: Résumé de la littérature appropriée sur la modélisation des émissions de gaz d'enfouissement.	13
Tableau 6: Fiche technique de l'entreprise ECOMED Fès	18
Tableau 7 : Caractéristique du moteur JENBACHER	27
Tableau 8 : avantages et inconvénients de ICE.....	29
Tableau 9: Les différentes phases de la méthanisation	33
Tableau 10: Résultats des valeurs L ₀ et k.....	37

Liste des abréviations :

RADEEF : Régie Autonome Intercommunale de distribution d'eau et d'électricité de Fès

GEM : Gas extraction monitor.

PCI : Pouvoir calorifique inférieur.

PEHD : Polyéthylène haute densité.

TP : Tête de puits.

MWe : Mégawatt électrique.

ICE : Internal combustion engine.

STEP : station de traitement et d'épuration des eaux usées.

TEP : Taux d'éclairage public.

COV : Composés organiques volatils.

GES : Gaz à effet de serre.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

LandGEM: Landfill Gas Emissions Model.

US EPA: Environmental Protection Agency of The United States

TAM : Température annuelle moyenne.

SDL : Société de Développement locale.

MDP : Mécanisme de Développement propre.

INTRODUCTION GENERALE

La nécessité de préserver l'environnement et l'urgence imminente d'être moins dépendants du pétrole et d'autres combustibles fossiles crée la nécessité de rechercher des sources d'énergie alternatives moins polluantes qui peuvent être exploitées comme une option pour la production d'une énergie produisant moins d'impact sur l'environnement.

L'utilisation accentuée des combustibles fossiles fait que les réserves mondiales de ces derniers commencent à tomber à des niveaux critiques, ce qui n'assure pas un approvisionnement énergétique à long terme. En outre, l'utilisation de ces carburants a des conséquences graves sur l'environnement.

Suite aux problèmes environnementaux liés à l'utilisation de combustibles fossiles, on peut prendre les énergies renouvelables comme solution, parmi les multiples sources d'énergies renouvelables (solaires, éoliens, thermiques), on peut indiquer le biogaz comme source d'énergie.

La mise en décharge de déchets divers engendre par biodégradation anaérobie des déchets organiques la production d'un gaz riche en méthane (de 45 à 60% de CH_4) appelé biogaz. Il est indispensable de récolter ce gaz son action sur l'effet de serre est 21 fois plus importante que celle du CO_2 , donc la meilleure manière pour se débarrasser du biogaz est bien entendu de le valoriser. En effet, le méthane est un excellent combustible (de point de vue énergétique, 1m^3 de CH_4 est l'équivalent d'un 1,15 litre d'essence).

Dans le sens de tirer profit de ces déchets ménagers, une nouvelle décharge de Fès a été construite. C'est une décharge contrôlée qui reçoit et traite chaque jour entre 750 à 1.000 tonnes de déchets solides pour générer le biogaz et le convertir en électricité.

A ce titre, ce projet de fin d'études qui a été réalisé au sein de la décharge contrôlée de Fès gérée par ECOMED vise à déterminer les quantités des déchets solides enfouis dans la décharge au cours du temps, après l'enfouissement, on applique une modélisation afin d'estimer le biogaz généré par ces déchets, et enfin, l'estimation de la production d'électricité à partir de ce biogaz avec la réduction des gaz à effet de serre.

Le présent manuscrit sera divisé en 3 grandes chapitres :

- Le premier chapitre s'articule sur une étude bibliographique.
- Le deuxième chapitre consiste à présenter la décharge contrôlée de Fès puis le positionnement du problème faisant objet de notre étude.
- Le troisième chapitre s'intéresse sur la partie expérimentale de notre projet dont la modélisation de biogaz et sa valorisation en énergie électrique font partie.

Chap. I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette étude bibliographique vise à définir quelques termes clés liés à la décharge puis l'importance d'exploitation issue dans les décharges contrôlées avec quelques statistiques mondiales de la production d'énergie électrique à partir de biogaz. Ensuite, la récupération du biogaz et comment optimiser ce dernier, et enfin, la présentation des différents modèles mathématiques adoptés pour les estimations des quantités de biogaz générer à partir des déchets solides.

I. Déchets, Décharge, Centre et Gaz d'Enfouissement (Biogaz) :

1) Déchets :

Généralement, un déchet (ordure, résidu, etc.) désigne la quantité perdue dans l'usage d'un produit, ce qui en reste après son utilisation. Ce terme tend à désigner tout objet ou substance ayant subi une altération d'ordre physique ou chimique, ou qui ne présente plus d'utilité et destiné à l'élimination ou au recyclage.

Le mot déchet désigne aussi les objets répandus dans la nature par l'être humain, le vent, etc., et notamment sur les fonds marins et parfois retrouvés dans les laisses de mer.

Dans le monde en l'année 2015, 7 à 10 milliards de tonnes de déchets urbains ont été produits. Selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, en Asie-Pacifique, 90 % des déchets solides urbains finissent en décharges sauvages et constituent l'une des premières sources de maladies. À Bombay, plus de 12 % des déchets solides urbains sont brûlés en pleine ville ou en dépotoirs en polluant gravement l'air et le sol. Dans le monde, 64 millions de personnes subissent la pollution de 50 des plus grandes décharges, le volume des déchets continue à croître en Europe et les experts estiment que le volume de déchets urbains pourrait encore doubler en Asie et en Afrique dans 15 à 20 ans.

➤ Types de déchets :

- Déchet dangereux : Les déchets dangereux sont les déchets issus de l'activité industrielle qui représentent un risque pour la santé ou l'environnement et qui nécessitent un traitement adapté (traitement thermique, traitement physico-chimique, traitement biologique, ...)
- Déchet non dangereux : Un déchet non dangereux ou DND (anciennement dénommé déchet banal) est, pour tous les États-membres de l'Union européenne, un type de déchet

répondant à la définition suivante : « tout déchet qui ne présente aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux »

- **Déchet inerte** : tout déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décompose pas, ne brûle pas, ne produit aucune réaction physique ou chimique, n'est pas biodégradable et ne détériore pas les matières avec lesquelles il entre en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.
- **Déchet ménager** : tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur est un ménage. Il est collecté par la collecte traditionnelle des ordures ménagères résiduelles et par les collectes sélectives (matériaux recyclables issus des emballages : verre, métal, matière plastique, carton, etc.)
- **Déchet d'activités économiques** : tout déchet, dangereux ou non dangereux, dont le producteur initial n'est pas un ménage.
- **Biodéchet** : tout déchet non dangereux biodégradable de jardin ou de parc, tout déchet non dangereux alimentaire ou de cuisine issue notamment des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, ainsi que tout déchet comparable provenant des établissements de production ou de transformation de denrées alimentaires.

2) **Décharge** :

Le plus souvent situé en dehors des grandes villes, une décharge, ou décharge publique, ou site d'enfouissement est un lieu dans lequel on élimine des déchets.

Des décharges existent depuis la préhistoire, mais elles se sont multipliées avec la révolution industrielle et la société de consommation. Souvent situées en plein air, ce qui présente des risques pour l'environnement naturel ainsi que la sécurité et l'hygiène des populations résidant à proximité. Les décharges sont divisées en 4 classes :

- Classe I : pour les déchets industriels dangereux, non toxiques.
- Classe II : pour les déchets industriels non toxiques et non dangereux et assimilés et pour les déchets ménagers et assimilés.
- Classe III : pour les déchets inertes.
- Classe IV : les déchets industriels non toxiques destinés à l'usage exclusif du producteur de déchets.

3) Centre d'enfouissement technique :

Un site d'enfouissement est une décharge contrôlée qui répond à des normes de protection de l'environnement (imperméabilisation, surveillance, traitement du méthane et des lixiviats ...) pour protéger l'air et la nappe phréatique, avec une couche étanche de verdure en fin d'activité.

4) Gaz d'enfouissement (biogaz) :

L'histoire de la production de biogaz a débuté avec la découverte du gaz de marais en 1776. La première usine de biogaz à grande échelle a été mise en service en 1859 en Inde. Dès 1907, le premier moteur à essence était alimenté par du biogaz à Bombay. Les gaz d'enfouissement ou biogaz sont créés à partir de la décomposition bactérienne aérobie et anaérobie des déchets organiques dans la décharge (site d'enfouissement). C'est un mélange de méthane et de dioxyde de carbone, ainsi que d'autres composants à l'état de traces. Le méthane est un gaz inodore, à effet de serre (21 fois plus puissant que le dioxyde de carbone) et lorsqu'il est combiné avec un composé organique appelé un thiol, produit une odeur désagréable (Voir tableau 1).

Pour la cellulose, principale source de gaz provenant des déchets mis en décharge, la réaction de conversion est la suivante :

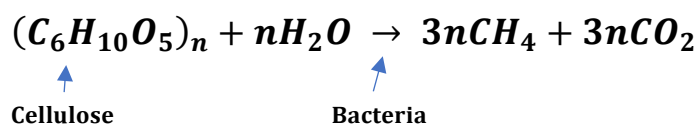


Tableau 1: Composition du biogaz

Composition du biogaz	Caractéristiques	Teneur
Méthane : CH ₄	Inodore et incolore. Principal gaz à effet de serre (GES)	50 à 70%
Dioxyde de carbone : CO ₂	Inodore et incolore. Gaz à effet de serre. La diminution du pouvoir calorifique, les propriétés antidétonantes des moteurs, la corrosion	30 à 50%
Hydrogène H ₂		0 à 5%
Azote N ₂	La diminution du pouvoir calorifique, les propriétés antidétonantes des moteurs	0 à 3%
Oxygène O ₂	La corrosion	0 à 3%
Sulfure d'hydrogène H ₂ S	Hautement toxique, détectable grâce à son odeur caractéristique « d'œuf pourri ». La corrosion.	0 à 2%
Mercaptans (thiols R-SH)	Malodorants et souvent toxiques	Traces

II. Cadre institutionnel et juridique :

La mise en place d'une décharge demande au préalable l'accord de plusieurs institutions et la satisfaction d'un certain nombre de conditions juridiques.

1) Cadre institutionnel :

La gestion des déchets fait intervenir plusieurs institutions. Chacune d'entre elles a un rôle bien défini. Les principales institutions sont l'Etat (le ministère de l'intérieur, le ministère de la santé, le ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, le ministère de l'industrie et du commerce), la région, les provinces, les communes et le département de l'environnement.

2) Cadre juridique :

a) La loi 28-00 :

L'établissement juridique marocain est renforcé en 2006 par l'adoption de la loi 28-00 relative aux déchets et leur élimination. Cette loi a deux objectifs principaux :

- Moderniser les processus de gestion en vigueur dans le secteur.
- Réduire autant que possible les impacts négatifs des déchets sur la santé de l'homme et l'environnement.

Cette loi sur les déchets a permis de :

- Définir les différents types des déchets.
- Introduire la planification comme outils de gestion des déchets : elle a fixé un délai de 5 ans pour élaborer des plans de gestion des déchets.
- Réglementer la gestion des différents types de déchets : déchets hospitaliers, inertes, industriels, ...
- Spécifier les conditions d'ouverture, de fermeture et de gestion des installations de traitement et de valorisation des déchets.

b) La loi 10-95 :

Cette loi définit les responsabilités des différents acteurs pour la gestion du secteur de l'eau et confère à l'autorité administrative des avantages pour la protection et la préservation des ressources en eau notamment en interdisant de déposer ou d'enfouir des déchets solides dans le domaine public hydraulique.

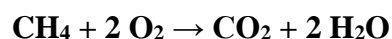
III. Avantages de l'exploitation issu des décharges :

Exploiter la puissance de l'énergie du biogaz apporte des avantages environnementaux et économiques aux décharges, aux utilisateurs d'énergie et à la communauté. Travaillant ensemble, les propriétaires de sites d'enfouissement, les fournisseurs de services énergétiques, les entreprises, les gouvernements locaux, les communautés et les autres parties prenantes peuvent développer un projet énergétique réussi qui :

- Réduit les émissions de GES qui contribuent au changement climatique mondial.
- Réduit l'utilisation des ressources non renouvelables.
- Aide à l'amélioration de la qualité de l'air local.
- Fournit des revenus aux décharges.
- Réduit les coûts énergétiques pour les utilisateurs de gaz naturel.
- Crée des emplois et encourage les investissements en entreprises locales.

Le méthane est un gaz de piégeage thermique puissant (son Potentiel de réchauffement global sur 100 ans ((PRG) est 20 à 25 fois supérieur à celui du CO₂)). La réduction des émissions de méthane provenant des décharges est l'un des moyens permettant de réduire l'impact humain sur le climat mondial. La réduction des émissions en méthane des décharges peut se faire par brûlage de celui-ci à la torchère ou par son utilisation pour la production d'énergie.

Au cours de sa durée de vie opérationnelle, un projet de gaz de décharge capturera environ 60 à 90% du méthane généré par une décharge, selon sa conception et son efficacité. Le méthane capté est converti en eau et en dioxyde de carbone lorsque le gaz est brûlé pour produire de l'électricité ou de la chaleur.



Les composés organiques non méthaniques (NMOC) qui sont présents en faibles concentrations dans les gaz sont détruits ou convertis lors de la combustion, ce qui réduit les risques éventuels pour la santé.

Pour les projets d'électricité, la prévention de la combustion de combustibles fossiles dans les centrales signifie que moins de polluants sont rejetés dans l'air, y compris le dioxyde de soufre SO₂ (un contributeur majeur aux pluies acides), les oxydes d'azote NO_x, et les traces de polluants atmosphériques dangereux.

IV. Statistiques mondiales de génération d'électricité à partir du biogaz :

La production mondiale d'électricité à partir du biogaz est en nette croissance avec plus de 50,5 GWh en 2012 et 130,3 GWh prévus pour 2025. L'Allemagne et les États-Unis sont les deux premiers producteurs mondiaux de biogaz avec dominance de l'Allemagne -du marché du biogaz- qui continuera assez longtemps selon les prévisions de Global Data.

La production d'électricité à partir du biogaz en Allemagne devrait passer de 18,244 GWh en 2012 à 28,265 GWh en 2025, faisant d'elle le premier pays producteur de biogaz. Quant aux États-Unis le second marché, la production devrait passer de 9,072 GWh en 2012 à 20,936 GWh en 2025.

De telles statistiques montrent l'intérêt porté au biogaz et l'évolution faite depuis pour son exploitation.

V. Récupération d'énergie à partir du biogaz et utilisation :

Il y a deux façons de récupérer de l'énergie à partir de déchets, soit par méthanisation soit par incinération.

La méthanisation ou encore digestion anaérobie est un processus de fermentation, entraînant la création du méthane qui est utilisé pour les mêmes applications que le gaz naturel et qui a aussi le potentiel d'être développé en tant que carburant pour véhicule, produire de l'électricité ou de la chaleur (Voir figure 1).

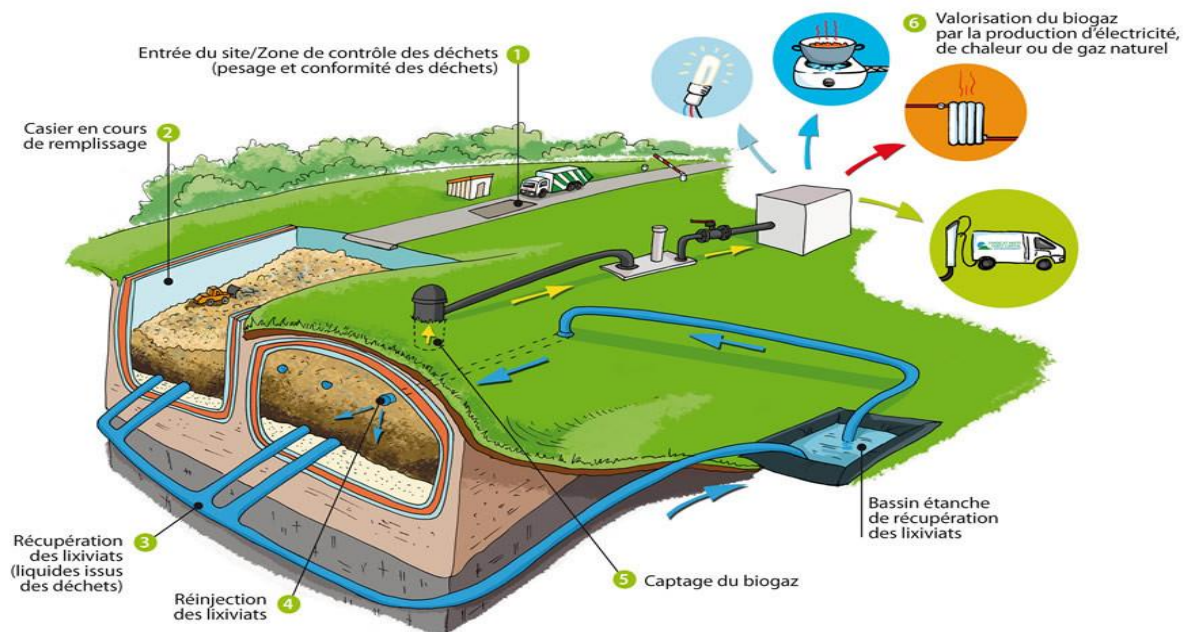


Figure 1 : La génération et l'utilisation du biogaz

VI. Paramètres influençant la méthanisation et optimisation de la production de biogaz et énergie électrique :

Les facteurs clés qui influent sur la production du biogaz dans les décharges comprennent (Voir figure 2) :

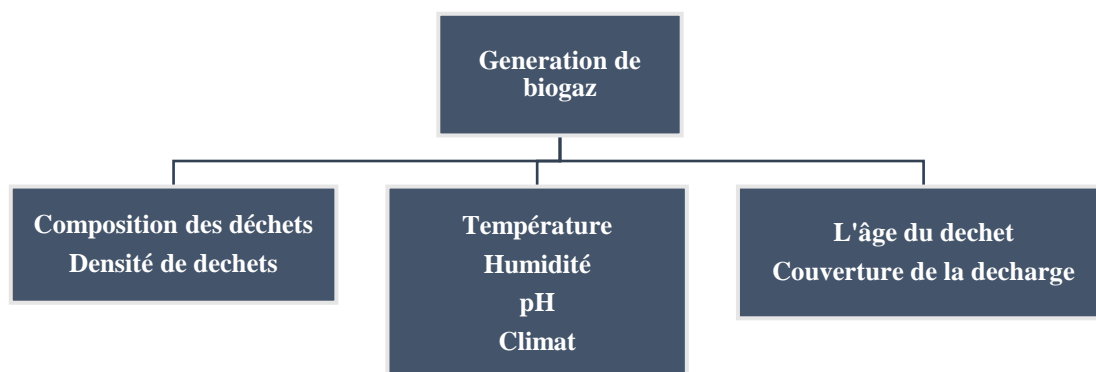


Figure 2: Facteurs affectant la génération du biogaz

- **Composition des déchets :**

La composition des déchets est le facteur le plus important dans l'évaluation du potentiel de génération du biogaz et du rendement total sur un site d'enfouissement. Le volume potentiel maximal du biogaz dépend de la quantité et du type de contenu organique dans la masse des déchets, car les déchets organiques en décomposition sont la principale source de production du biogaz.

- **Densité des déchets :**

La taille et la densité des particules influent sur les taux de génération de biogaz en affectant le transport des nutriments et l'humidité dans l'enfouissement. En outre, la plus petite taille de particules de déchets hachés augmente le taux de génération de biogaz.

- **La température :**

La température dans une décharge a tendance à être plus élevée que la température de l'air ambiant puisque la décomposition anaérobie qui se produit est un processus exothermique. Les conditions de température dans une décharge influencent le type de bactéries qui prédominent et le taux de production de gaz. Les taux de décomposition et de génération de gaz diminuent avec la baisse de température. La température de la décharge est influencée par la profondeur de la décharge.

- **L'humidité :**

La teneur en humidité peut varier considérablement dans différentes zones de la décharge. Une très faible teneur en eau peut empêcher la décomposition des déchets et ainsi limiter la

production de gaz. La teneur optimale en humidité pour maximiser la production de gaz est comprise entre 50 et 60%.

- **L'âge du déchet :**

Une fois que les conditions anaérobies sont établies, la génération de biogaz devrait être significative pendant 10 à 20 ans ou plus. Les décharges de plusieurs décennies sont moins susceptibles de produire de grandes quantités de biogaz car la majeure partie de la décomposition biologique des déchets aura déjà eu lieu.

Optimiser quelques paramètres préciter revient à optimiser la production de biogaz.

Lors de la digestion anaérobie, l'étape limitant la vitesse est l'hydrolyse. Afin de rendre cette digestion plus performante, l'une des possibilités est d'appliquer un prétraitement.

Le but du traitement est de solubiliser des composés organiques, afin de les rendre plus biodégradable. Le tri des déchets à la source afin d'être en présence d'une grande fraction organique biodégradable car un déchet ayant une teneur en cellulose plus élevée aurait un potentiel de génération de méthane (L_0) plus élevé, tandis que les déchets ayant une teneur en lignine plus élevée auraient une valeur de (L_0) inférieure, les techniques de collecte et d'extraction du biogaz qu'elle soit verticale ou horizontale, purification du méthane par des techniques de filtration et de lavage du biogaz afin d'utiliser un méthane pur pour atteindre les performances du moteur sans risque d'endommager certaines pièces, application de modèle performant de calcul de moteur fonctionnant au biogaz..., sont autant de sujets que nous retrouvons dans la littérature ayant fait objet de recherche afin d'améliorer la production de biogaz, impliquant directement une optimisation de la production de l'énergie (chaleur, électricité, carburant).

VII. L'historique de modélisation de la production de biogaz :

Le développement de modèles pour la prédiction de la récupération de biogaz a commencé avec l'augmentation de la mise en décharge sanitaire dans les années 1970. Des descriptions qualitatives du processus de production de gaz d'enfouissement ont été développées par FARQUHAR et ROVERS en 1973. D'autres chercheurs ont tenté des bases plus rationnelles pour la prédiction de biogaz ou de méthane sur la base de données disponibles mais limitées. À peu près au même moment, d'autres prédictions de modèles quantitatifs ont été expérimentées pour la première fois à Los Angeles aux États-Unis.

1) Les avantages de la modélisation de la production du biogaz :

La modélisation du biogaz est utilisée pour le dimensionnement des systèmes de collecte, de brûlage et d'utilisation d'énergie du biogaz et l'évaluation de la réduction potentielle des émissions de biogaz et des utilisations énergétiques.

2) Les paramètres L_0 et k :

a) Potentiel de production de méthane L_0 :

L_0 : C'est la quantité maximale de méthane qui pourrait être produite par un poids unitaire de déchets, compte tenu d'une période infinie pour se décomposer, en mètres cubes de méthane par tonne de déchets éliminés (m^3 / tonne).

$$L_0 = \frac{F \times COD \times COD_f \times FCM \times 16}{\rho \times 12}$$

COD : Le carbone organique dégradable (Voir tableau 2)

$$COD = \frac{\sum COD_i \times Fr_i}{\sum Fr_i}$$

Fr_i : La fraction du type de déchet (Voir tableau 3)

Tableau 2: Plage de COD recommandées selon la matière enfouie.

Nature du déchet	Plage recommandée de COD (kg C/kg déchet)
Nourriture	0,08 – 0,20
Rebuts de jardin	0,18 – 0,22
Papier	0,36 – 0,45
Bois et paille	0,39 – 0,46
Textiles	0,20 – 0,40
Déchets municipaux	0,12 – 0,28
Boues municipales	0,04 – 0,05
Déchets industriels	0,00 – 0,54

Tableau 3: Fractions des déchets enfouies dans la décharge

Type de déchet enfouie	Fr_i (%)
Papier, carton	12
Déchets alimentaire	64
Déchets de jardin	0,2

COD_f : Fraction du COD qui se dégrade réellement dans la décharge

$COD_f = TAM \times 0,014 + 0,28$ Avec TAM = Température annuelle moyenne (TAM de Fès = 18°C)

FCM : Facteur de correction du méthane

Pour une décharge contrôlée, la valeur par défaut de FCM est de 1.

ρ : La masse volumique du méthane

Rappelons que la masse volumique de méthane : 0,72 Kg/m³

F : Fraction du méthane dans le biogaz

La proportion du méthane dans le biogaz varie de 40 à 65% en volume, dans le cas de la décharge contrôlée de Fès, la fraction est de **60%**.

b) Taux de génération de méthane (K) :

$$K = \frac{\sum k_i \times Fr_i}{\sum Fr_i}$$

Fr_i : La fraction du type de déchet

k_i : Taux de génération du méthane de la fraction i du déchet.

k_i Dépend des conditions du milieu de la décharge. Dans notre cas, la décharge contrôlée se situe à Fès, une ville à climat tempéré et chaud (sec). Les valeurs de **k_i** seront prises dans le tableau suivant en tenant compte de la nature du déchet (Voir tableau 4).

Tableau 4: Plage de k recommandées selon le climat et la nature de la matière enfouie.

		Climat régional			
		Boréal et tempéré		Tropical	
		Sec	Humide	Humide	Très Humide
Vitesse de dégradation	Nature du déchet	Plage de k (an ⁻¹)	Plage de k (an ⁻¹)	Plage de k (an ⁻¹)	Plage de k (an ⁻¹)
Lente	Papier et textile	0,030 – 0,050	0,050 – 0,070	0,040 – 0,060	0,060 – 0,085
	Bois et paille	0,010 – 0,030	0,020 – 0,040	0,020 – 0,040	0,030 – 0,050
Modérée	Rebuts de jardin et autres putrescibles	0,040 – 0,060	0,060 – 0,100	0,050 – 0,080	0,150 – 0,200
	Déchets municipaux	0,040 – 0,060	0,080 – 0,100	0,050 – 0,080	0,150 – 0,200
	Déchets industriels	0,040 – 0,060	0,080 – 0,100	0,050 – 0,080	0,150 – 0,200
Rapide	Nourriture et boues municipales	0,050 – 0,080	0,100 – 0,200	0,070 – 0,100	0,170 – 0,700

3) Les modèles de quantification du biogaz disponible :

a) **Modèle de zéro-ordre :**

Dans un modèle à ordre zéro, la formation de gaz d'enfouissement (biogaz) est constante dans le temps et donc aucun effet de l'âge des déchets.

b) **Modèle de premier ordre :**

L'effet de l'âge des déchets sur la production de biogaz est incorporé dans le modèle de premier ordre. Pour chaque quantité unitaire de déchets, les taux de génération de biogaz diminuent de façon exponentielle.

c) Modèle multi-phase :

Un modèle multi-phase est basé sur le modèle exponentiel de premier ordre. Il distingue différentes fractions des déchets avec différents taux de biodégradation.

Nous avons des modèles mathématiques permettant d'évaluer la production de biogaz au cours du temps au niveau d'un centre de stockage. Entre autres nous pouvons citer : le modèle LandGEM et EPA. Ils en existent bien d'autres (Voir tableau 5)

➤ Le Modèle de LandGEM :

Largement utilisé à travers le monde de nos jours, LandGEM a été développé par l'US EPA dans le but d'estimer les composés organiques totaux du biogaz, du méthane (CH₄), du dioxyde de carbone (CO₂) et les composés organiques non-méthanique (NMOC) provenant des déchets des municipalités en utilisant le total des déchets éliminés annuellement pendant l'exploitation du site. LandGEM prédit les émissions de biogaz basées sur une équation de décroissance de premier ordre, l'équation est la suivante :

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{i,j}}$$

Où,

Q_{CH₄} : Génération annuelle de CH₄ après n années en (m³/an).

n : Année du calcul qui correspond à l'année initiale d'acceptation des déchets.

i : Incrément de temps de 1 an.

j : Incrément de temps de 0,1 an.

k : Taux de production de méthane (an⁻¹).

L₀ : Potentiel de production de méthane (m³/Tonne).

M_i : quantité de matière enfouie à l'année i (Tonne).

t_{i,j} : âge de la j e section de matière enfouie à la i e année (années décimales).

➤ Le Modèle EPA :

Développé par « l'Environmental Protection Agency of The United States (US EPA) », ce modèle a été conçu pour estimer la production de méthane. Il fait la somme des productions de gaz du site en considérant différentes couches de déchets mises en place à un taux constant par an. L'équation est la suivante :

$$Q_{CH_4} = L_0 R (e^{(-kc)} - e^{(-kt)})$$

Où,

Q_{CH_4} : Quantité de méthane générée en (m^3/an).

L_0 : Potentiel de production de méthane en ($m^3/Tonne$).

R : Taux moyen de déchets acceptés pendant la période d'activité du site (Tonne/an).

K : Taux de production de méthane en (an^{-1}).

t : Temps écoulé depuis la mise en place initiale des déchets en année

c : Temps écoulé depuis la fermeture du site en année ($c=0$ pour les sites en activité)

Tableau 5: Résumé de la littérature appropriée sur la modélisation des émissions de gaz d'enfouissement.

LA DECHARGE	LE MODELE UTILISE	K (an^{-1})	L_0 ($m^3/Tonne$)
Nauerna Landfill, Netherlands	TNO, Afvalzorg, LandGEM, GasSim, EPER Model France, EPER Model Germany	0,04	100
Chania, Greece	Triangular, Stoichiometric et LandGEM	0,02	100
Nine Landfill, Thailand	IPCC Waste Model	-	-
Bellolampo, Italy	LandGEM And Field Measurements	0,04	100
Kahrizak, Iran	LandGEM	-	-
Addis Ababa, Ethiopia	IPCC Waste Model	-	-
Three Chinese Landfills	LandGEM And Field Measurements	0,09-0,3	10
Rodan, Iran	LandGEM	-	-
Marvdasht, Iran	LandGEM	0,05	170
Jahrom, Iran	LandGEM	0,05	170
Six Metropolitan Cities In India	TNO, Afvalzorg, LandGEM, EPER Model Germany	0,04-0,06-0,03-0,07-0,08	46,07-47,66-33,72-40,49-44,23-44,3
Harmandali Landfill, Turkey	Multi-Phase, LandGEM And IPCC Waste Model	0,05-0,1-0,35	102
La Gabarre, France	LandGEM And Field Measurements	0,06	100
Regina And Saskatoon, Saskatchewan In Canada	LandGEM, Afvalzorg Simple, IPCC And Field Measurements	Valeur Par Défaut	Valeur Par Défaut
Shahrekd, Iran	LandGEM	0,7	96
Two Landfills in Odense, Denmark	Afvalzorg And Field Measurements	-	-
Saravan Landfill, Iran	LandGEM +LCA	0,02-0,04-0,05-0,7	96-100-170

VIII. Mécanisme de Développement Propre (MDP) :

L'intérêt d'un centre d'enfouissement technique est de stocké les déchets solides, cela permet de diminuer les émissions des gaz à effet de serre émis par le biogaz généré. Dans ce sens, on va parler du mécanisme de développement propre (MDP) du Protocole de Kyoto, ce projet vise

à réduire les émissions de gaz à effet de serre dans les pays en développement et, en même temps, à aider ces pays dans le développement durable. La majorité des projets de gestion des déchets du MDP se concentrent sur la production d'énergie en incinérant des déchets ou en capturant des gaz d'enfouissement, qui contiennent une grande quantité de méthane (un gaz à effet de serre fort). Le gaz d'enfouissement est soit brûlé, soit le méthane est capturé pour produire de l'électricité.

1) **Définition de mécanisme de développement propre :**

Le mécanisme de développement propre (MDP) est un mécanisme défini par le protocole de Kyoto (1992), qui se matérialise par la réalisation de projets, dont l'une des composantes est une réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

2) **Secteurs concernés :**

Quelques exemples de catégories de projets potentiellement éligibles au MDP sont fournis ci-après :

a) **Secteur énergétique :**

- Substitution de combustibles à fort contenu en carbone (tels que le charbon et le pétrole) par des combustibles à contenu en carbone plus faible (tels que le gaz naturel ou les énergies renouvelables).
- Cogénération : génération conjointe d'électricité et de chaleur, permettant un rendement énergétique très élevé.

b) **Secteur du traitement des déchets :**

- Capture de biogaz issu de déchets municipaux stockés dans des décharges contrôlées.
- Capture et valorisation du biogaz issu du traitement des eaux usées

c) **Secteur industriel :**

- Capture et utilisation du méthane provenant des équipements de traitement des effluents industriels.
- Amélioration de l'efficacité énergétique dans des projets industriels.

d) **Secteur agricole :**

- Amélioration de l'efficacité énergétique ou utilisation de sources d'énergie émettant peu de GES pour entraîner des pompes d'irrigation.
- Réduction des déchets animaux ou capture et utilisation du méthane provenant de déchets animaux.

3) Les avantages pour les pays hôtes et l'investisseur :

L'intérêt d'un développeur du projet ou d'un pays hôte à s'impliquer dans un projet MDP :

- Une participation au développement durable du pays hôte.
- Apporter des contributions positives à l'environnement local (déchets, pollution urbaine, etc.).
- Des bénéfices économiques pour le développeur de projet.
- Une source additionnelle de revenus pour le projet, liée à la génération puis à la vente des unités de réduction certifiée des émissions, plus généralement appelées « crédits carbone ».

4) Condition de l'éligibilité du projet MDP :

Les accords de Marrakech ont défini un certain nombre de critères d'éligibilité. La conformité à ces critères, devra être établie par le développeur de projet lorsqu'il devra remplir le Project Design Document (PDD), qui est le document pilier du processus de validation international par le Conseil exécutif du MDP. Les critères de Marrakech se répartissent entre aspects environnementaux du projet, approbation du pays hôte et d'autres critères.

Rappelons qu'il y a six GES éligibles : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les hydrofluorocarbures (HFC), les per fluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆). Un projet ne peut être éligible que s'il réduit les émissions d'un ou de plusieurs de ces GES.

Chap. II: PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE

Ce chapitre est divisé en 4 axes. Le premier axe consiste à présenter la société ECOMED qui gère la décharge et le deuxième présente le site d'enfouissement technique ou bien la décharge contrôlée de Fès. Le troisième axe décrit les étapes de la méthanisation, puis dernièrement, le positionnement du problème faisant objet de notre étude.

I. Présentation du groupe ECOMED :

1) Le Groupe ECOMED :

Le groupe ECOMED est un holding marocain créé par 2 sociétés américaines **EDGEBORO INTERNATIONAL Inc. (EII)** et **GLOBAL ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY, Inc. (GESI)**. Ce groupe est spécialisé dans la gestion des déchets solides plus particulièrement dans le domaine du traitement et de la valorisation des déchets solides. Il est implanté au Maroc depuis une quatorzaine d'années.

ECOMED est la première société privée au Maroc, managée par une trentaine d'employés, spécialisée dans la construction et l'exploitation des décharges contrôlées. Le groupe offre des services personnalisés par rapport aux besoins des différentes villes (Voir figure 3) et plus particulièrement par rapport aux sites des décharges choisis par les Communes, les groupements de Communes ou les Groupements des collectivités locales. Son expertise est mondialement reconnue dans tous les domaines qui sont en rapport avec le traitement et la valorisation des déchets.

ECOMED de Fès gère depuis 2004 la décharge contrôlée de la ville de Fès, dans le cadre d'un contrat de gestion déléguée de 30 ans avec la Commune Urbaine de Fès, elle traite tous les jours entre 750 à 1.000 tonnes de déchets solides. La décharge de Fès est de classe 2 et reçoit les déchets solides comportant : les ordures ménagères (OM) issues de l'activité domestique quotidienne des habitants de la ville de Fès, les déchets ménagers assimilés (DMA) issus des marchés, les déchets verts (DV), les déchets de tannerie (DT), les déchets d'abattoirs (DA), les déchets de démolition (DD) et non les déchets industriels ou les déchets médicaux. Le projet comprend en parallèle, la gestion de la décharge et la valorisation des déchets par la conversion du Biogaz en énergie électrique est aussi dotée d'un atelier et d'une station de service.



Figure 3: Les groupes ECOMED au Maroc

2) Organisation de l'entreprise ECOMED :

La structure organisationnelle du groupe ECOMED est présentée dans le schéma ci-dessous :

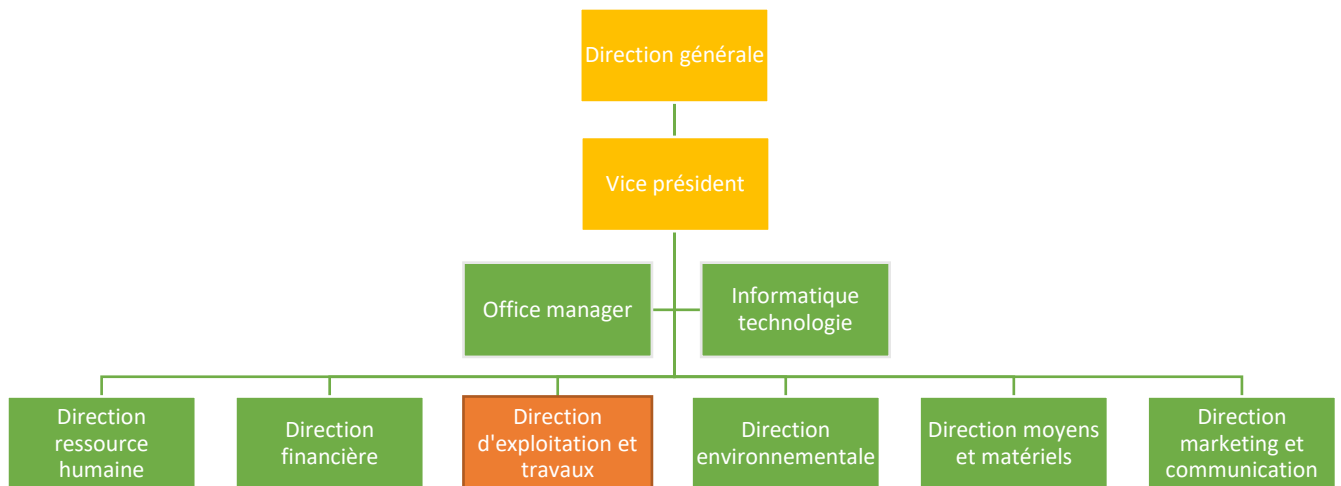


Figure 4: L'organigramme de l'entreprise ECOMED au Maroc

Le siège de l'organisation se trouve à Rabat. Cependant au niveau de chaque site de décharge, il y'a une direction d'exploitation et de travaux, composée d'ingénieurs, d'informaticiens, de techniciens... (Voir figure 5)

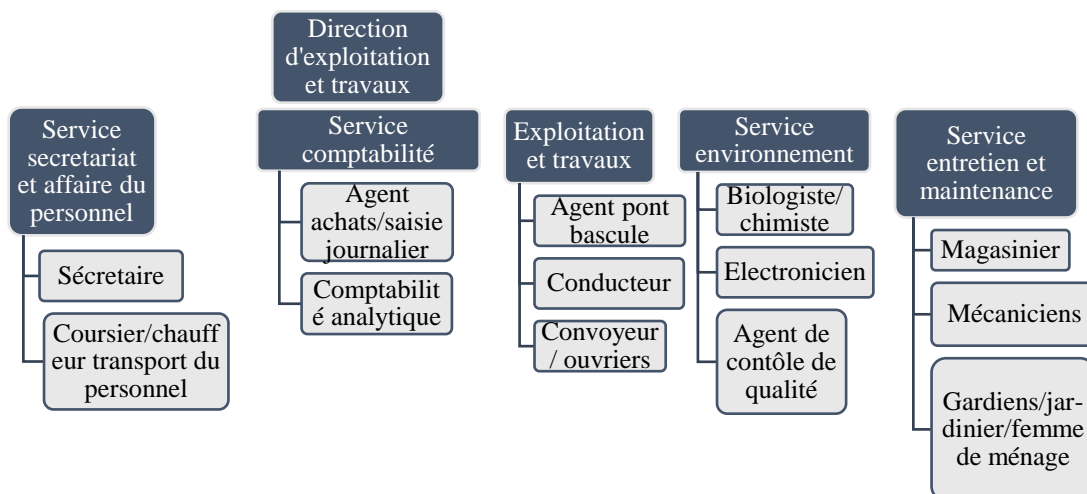


Figure 5: L'organigramme de l'entreprise ECOMED au Fès

Le site de la décharge contrôlée de Fès à pour fiche technique ci-dessous :

Tableau 6: Fiche technique de l'entreprise ECOMED Fès

Raison social	ECOMED
Date de création	2 Avril 2004
Statut juridique	Holding- SA
Secteur d'activités	Entreprise de la gestion de déchets
Domaines d'activités	Gestion de décharges et valorisation des déchets
Siège social – adresse	Appartement 1 Im. C3 Al Adarissa II Fès
Téléphone	05 35 60 25 61
Fax	05 37 74 82 24

3) Les équipements de la décharge :

Pour assurer la bonne marche des travaux d'exploitation, la décharge utilise les équipements suivants :

- 4 Bulldozers CAT.
- 1 Chargeur CAT.
- 1 Pelle hydraulique.
- 1 Camion Volvo
- 2 Pickups

II. La décharge contrôlée de Fès :

1) Localisation du site :

Le site de la décharge se situe dans la commune de Ain Bida, à 12 km du centre-ville et à 3 km du complexe sportif sur la route de SIDI HARAZEM, la décharge publique contrôlée de Fès s'étale sur une superficie de 110 ha et répond aux critères de « production propre » et de respect de l'environnement.



Figure 6: La décharge contrôlée de FES

Les travaux d'aménagement de la décharge et les ouvrages ont été faits sous l'encadrement et l'assistance technique d'EDGEBORO et de GESI, en utilisant la main d'œuvre locale. Ces travaux comprenaient la construction des routes d'accès au site, des casiers d'enfouissements des déchets, des bassins de collecte des lixiviats, des ouvrages de collecte et de traitement du biogaz, des ouvrages de collecte et d'évacuation des eaux de pluies et des bâtiments d'exploitation.

2) Choix du site :

Ce site offre tout d'abord une superficie très intéressante qui permet une exploitation de plus de 30 ans. Ce site a également l'avantage d'être loin des habitations mais juste suffisamment pour ne pas avoir à traverser de grandes distances pour acheminer les déchets. La nature géologique du sol a également joué en sa faveur. En effet, le site se trouve dans une cuvette à l'amont du bassin versant sur une couche d'argile de 80m d'épaisseur et donc le terrain de la décharge est imperméable et des sondages ont été effectués et ils ont montré que plus on va vers la profondeur, plus l'argile devient imperméable et cela est très important surtout qu'à quelques kilomètres de la décharge se trouve la source thermique de SIDI HRAZEM. La zone exploitée est couverte, en surface et sur les versants, par une couche de terre perméable de 15

cm, pour empêcher les envois notamment de sacs de plastique, le dégagement des odeurs et la prolifération des insectes. Quand le site a été choisi, les gestionnaires de SIDI HARAZEM ont protesté car ils avaient peur que le lixiviat, en s'infiltrant dans le sol, contamine les eaux minérales, mais une étude a été faite par l'entreprise EDGEBORO-ECOMED qui leur a assuré qu'ils ne risquaient rien. Ils ont quand même fait une contre étude qui a confirmé les rapports de l'entreprise américaine EDGEBORO-ECOMED.

3) Les différents départements de la décharge de Fès :

a) Salle de pesage et de contrôle :

Le terminal de pesage est composé d'une salle de pesage et d'un pont-bascule (Voir figure 7). Le pesage des déchets se fait à travers une bascule électronique dotée de six capteurs en dessous liés à un appareil appelé le terminal qui permet l'affichage de la masse sur la bascule électronique, sa capacité est de 60 tonnes et son incertitude est de 20kg par tonne, cette incertitude est considérée négligeable. Le terminal est lié à un ordinateur dans lequel est installé un logiciel dit Transistor (Voir figure 8) qui permet d'enregistrer les masses des déchets reçues chaque jour et qui sont entre 750 - 1000 tonnes par jour.



Figure 7: La salle de pesage avec le pont-bascule

Lorsque le véhicule arrive sur le pont-bascule, l'agent en service entre son numéro matricule pour obtenir les informations concernant le client/fournisseur, le type de déchet qu'il contient (par exemple : ordure ménagère (OM), les déchets verts (DV), ...). Le nom du transporteur, et le lieu de chargement. Puis enregistre le poids du véhicule chargé d'ordures. Après que celui-ci est vidé de son chargement dans le site, à son retour, le poids à vide du camion est pesé. La différence entre les deux poids donne la masse de déchets transportée.



Figure 8 : Logiciel Transistor et le terminal

b) Le site d'enfouissement :

Les déchets collectés par les camions sont déposés sur le site d'enfouissement et des Bulldozers D6 sont chargés de les répartir sur toute la surface du casier avant d'être recouvert d'une couche de terre de 15cm.



Figure 9: Casier d'enfouissement

Il est composé de trois casiers dont deux sont remplis à hauteur de 44m. Sous les déchets se trouvent des réseaux de collecte du biogaz et du lixiviat. Un réseau est installé toutes les 3 couches et est commun aux 3 casiers du site et chaque couche est 4 mètres environ ; ceci signifie qu'il y a un réseau de collecte tous les 12m. Le réseau de collecte des lixiviats et biogaz comprend un collecteur central et des ramifications sous forme « d'arête de poisson ». Les ramifications sont latérales vu que le compactage des déchets fait que le biogaz migre de façon latérale. Elles sont espacées de 75 m et sont reliées aux têtes de puits. Le collecteur du milieu

est le collecteur central dont les deux tiers sont occupés par le biogaz et le un tiers restant est occupé par les lixiviats. Il est connecté directement aux bassins de lixiviats. Pendant l'installation du réseau de collecte des lixiviats et biogaz, le collecteur principal est installé avec une pente de 2,5% pour faciliter l'écoulement des lixiviats vers les bassins.

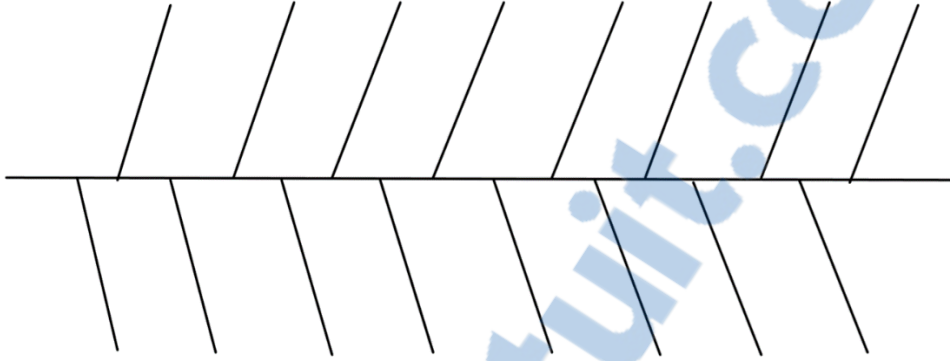


Figure 10: Réseau de collecte du biogaz

i. Tubes collecteurs :

Les collecteurs sont perforés faits en polyéthylène haute densité « PEHD ». Le PEHD est résistant à la corrosion chimique. Il peut être employé pour des pressions de quelques bars (canalisations sous pression) et résiste à une température maximale de 90°C. Il peut être nécessaire de poser des tuyaux sur un terrain plat pour atteindre la chute minimale requise.



Figure 11: Tube PEHD

ii. Tête de puits

Les Têtes de puits sont installées au sommet des puits de gaz pour contrôler l'extraction du gaz. Le matériau généralement utilisé pour fabriquer des têtes de puits est le polyéthylène (PE). Ils ont plusieurs fonctions. Ceux-ci inclus :

- Des mesures de débit, pour permettre de surveiller le débit des puits individuels.
- Régulateurs de débit.
- Déshydratation des têtes de puits.

Chaque tête de puits à un numéro qui est composé de deux nombres. Le nombre de gauche signifie l'ordre de la couche à laquelle appartient la ramification correspondante à la tête de puits, et, le nombre de droite indique l'ordre de la ramification.

On peut voir sur image., l'inscription « TP 3 17 », c'est l'une des têtes de puits de la 3^{ème} couches, et elle se situe sur la 17^{ème} ramification.



Figure 12: Tête de puits

iii. Puits d'extraction

Les puits d'extraction peuvent être installés à mesure que le remplissage du site progresse, ce qui permet de contrôler le gaz à un stade précoce du développement de l'enfouissement. Alternativement, les puits peuvent être forés après l'emplacement des déchets, Les puits d'extraction les plus courants sont :

- Puits de gaz verticaux : Se compose d'un trou de forage contenant un tuyau qui présente des perforations à travers la paroi sur la partie inférieure de la longueur du tuyau.
- Puits de gaz horizontaux : Se compose de tuyaux perforés placés horizontalement dans des tranchées placées dans les déchets ou dans la couche de gaz dans le système de capsulation finale.

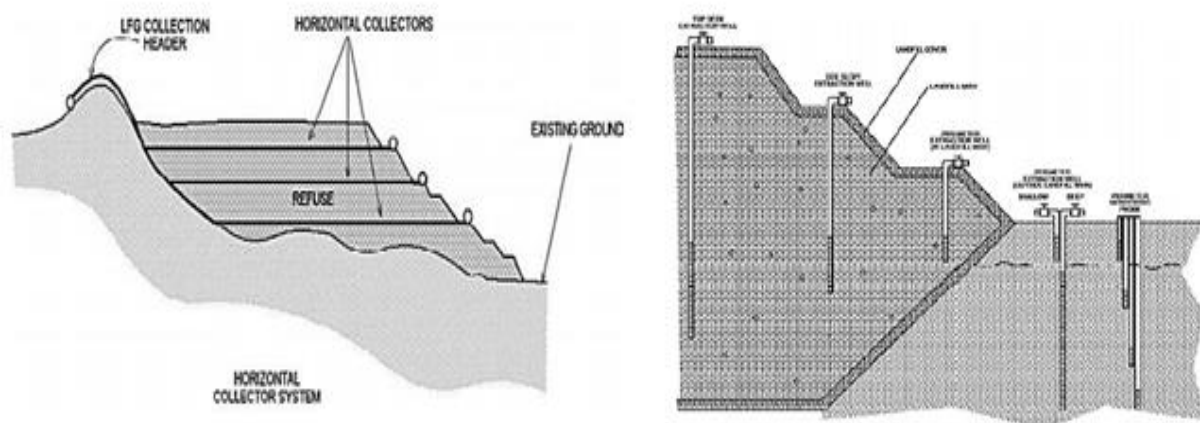


Figure 13: Puits horizontaux et verticaux

c) Les bassins de lixiviats :

Le lixiviat ou jus de décharge est issu de l'eau de pluie qui traverse les massifs de déchets. L'eau de pluie participe à la dégradation des déchets stockés, processus aboutissant à la méthanogénèse. Le lixiviat se charge de polluants organiques, minéraux et métalliques, par extraction des composés solubles (lixiviation facilitée par la dégradation biologique des déchets). Il est produit tout au long de la dégradation des déchets. L'enfouissement des déchets provoquent la production de lixiviats qui ne peuvent être rejetés directement dans le milieu naturel et doivent être soigneusement collectés et traités au préalable. La production des lixiviats varie selon :

- La nature du déchet (plus ou moins soluble, hétérogène et toxique, ...) ; il s'agit souvent d'ordures ménagères, de déchet industriel, de déchets de construction.
- La vitesse de percolation de cette eau, et selon le chemin parcouru par elle dans les déchets.
- La surface au sol, en effet pour le même tonnage un site étendu produira plus qu'un site avec une hauteur de déchet plus importante.
- La forme du site (qui facilite ou non le ruissellement et la stagnation des eaux).

La décharge est dotée de cinq bassins de lixiviats de 2000m² de surface environ chacun, et 2,7m de profondeur. Notons qu'un parmi les 5 bassins est dédié au lixiviat du chrome, la décharge reçoit des déchets provenant de la tannerie de Fès chargé en chrome. Celles-ci ont leur propre bassin car le chrome est difficile à traiter.



Figure 14: Bassins de lixiviat

d) La centrale bioélectrique

i. L'unité de soutirage du biogaz

Le système de soutirage est composé de deux aspirateurs dont le débit d'aspiration peut être contrôlé. Chaque aspirateur dispose d'une vanne qui permet de donner l'ordre d'aspirer le biogaz. Le système comprend aussi une torchère qui permet de brûler le gaz. Pour assurer sa combustion complète, la torchère opère jusqu'à une température de 1000 °C et comporte une vanne électronique pour régler le débit de biogaz à brûler. La torchère est réglée pour ne pas dépasser 1200°C. Le système dispose d'un filtre pour l'élimination des traces d'eaux présentes dans le biogaz. Un ensemble de débitmètres est installé sur le système pour mesurer les débits de biogaz brûlé dans la torchère, et celui utilisé par le moteur bioélectrique.



Figure 15 : Unité de soutirage de la décharge et la torchère

ii. Description du l'unité de soutirage et du système de brûlage du biogaz

Aspirateurs : L'aspirateur doit être capable de fonctionner dans une gamme de conditions pouvant résulter d'une modification de la composition et du débit du biogaz. L'aspirateur applique le vide requis sur le système de collecte du biogaz et fournit la pression de refoulement. Les aspirateurs peuvent être utilisés en série pour fournir une pression additive, ou en parallèle pour fournir une capacité de débit additif, pour répondre aux exigences du système.

Torchère : Dans une torchère fermée, la température de fonctionnement d'une unité de combustion dépend du matériau à brûler. La température de fonctionnement est au-dessus de la température d'auto-inflammation du biogaz (540 à 760 °C), donc une température de fonctionnement minimale de 760 °C est souvent spécifiée.

Automatisation des contrôles : Une bonne conception de système d'instrumentation et de contrôle garantira que les composants individuels du système de collecte et de contrôle de biogaz sont coordonnés et fonctionnent efficacement. Au minimum, les composants de contrôle de processus suivants sont requis :

- Indicateurs de pression et d'écoulement pour chaque puits ;
- Soupape de décharge ou interrupteur à vide pour effectuer l'arrêt du surpresseur ;
- Indicateurs de pression à l'entrée et à la sortie de l'aspirateur ;
- Interrupteur / alarme de haut niveau pour le système de collecte des condensats

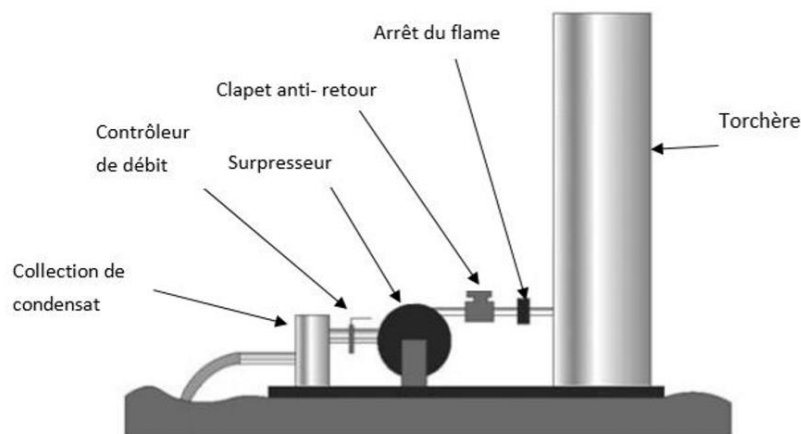


Figure 16: Schéma de système de soutirage et la torchère

iii. L'unité de valorisation énergétique du biogaz

Les moteurs à gaz GE JENBACHER (fabriqués dans la ville de JENBACH, en Autriche) sont disponibles dans la gamme de sortie électrique 0.3-3.5MW pour une unité individuelle. Ces moteurs sont réputés pour des performances robustes dans des conditions difficiles et des gaz combustibles difficiles. Ils sont des moteurs assez spéciaux, le système de contrôle de combustion installé sur tous les moteurs garantit le rapport air-carburant dans toutes les conditions de fonctionnement afin de minimiser les émissions de gaz d'échappement tout en maintenant un fonctionnement stable. Ils sont réglés pour ne pas dépasser un certain seuil d'émissions de gaz à effet de serre. Au-delà de cette limite le moteur s'arrête automatiquement. Ils régulent automatiquement le débit de biogaz en fonction de la teneur en méthane.

La décharge de Fès dispose d'un générateur électrique de 1063kw et d'un transformateur de 20kV qui permet l'injection de l'électricité produite dans le réseau de la RADEEF. Le générateur fonctionne avec un débit de 524Nm³/h. Le transformateur élévateur de tension, joue un rôle important dans le transport et la distribution de l'énergie électrique. Le courant généré à partir du biogaz valorisé est livré à LA RADEEF via une ligne enterrée de 1,5 km. Le poste

source et le poste de livraison permettent de livrer en nominal 1 MWe en 20 kV. Il est racheté par LA RADEEF en vertu de la loi du 10 février 2013 relative à la modernisation et au développement du service public de l'électricité au prix de 0.78 DH/KWe.

L'alternateur est couplé avec le générateur électrique. Il est constitué d'un rotor et d'un stator. Le rotor, comme son nom l'indique est une partie tournante (car associé au mouvement) mais pas n'importe laquelle : c'est un aimant. Le stator, lui est constitué d'un enroulement de fil c'est-à-dire d'un circuit dans lequel va apparaître le courant électrique : c'est une bobine. On l'appelle alternateur car il fournit un courant alternatif : les électrons voyagent dans un sens puis dans un autre, selon les pôles de l'aimant qui se présentent devant la bobine.



Figure 17: Générateur électrique et transformateur de la centrale

Tableau 7 : Caractéristique du moteur JENBACHER

Nom de moteur	JENBACHER	Rendement totale	84,2
Type	3-J320 GS	Nombre de cylindres	20
Puissance électrique	1063 KW	Vitesse	1500 rpm (50 Hz)
Rendement électrique	40,8	Largeur	5200 mm
Puissance thermique	1165 KW	Profondeur	1800 mm
Rendement thermique	43,9	Hauteur	2300 mm
Débit de biogaz	524 Nm³/h	Poids	10500 kg

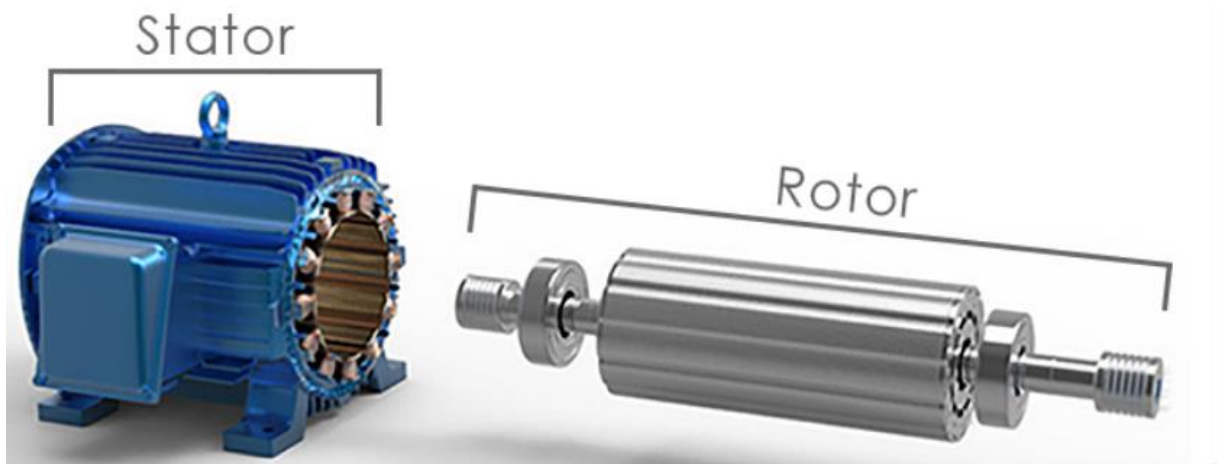


Figure 18: Stator et Rotor

iv. **Moteurs alternatifs à combustion interne (ICE).**

Le principe d'un moteur à combustion interne est basé sur la combustion interne qui transforme l'énergie chimique en énergie mécanique.

Le moteur à combustion interne est constitué :

- D'un ou plusieurs cylindres pour contenir les combustions ;
- D'un piston coulissant alternativement au sein de chaque cylindre ;
- D'un vilebrequin portant autant de bielles le relie aux pistons, que de cylindres ;
- D'une culasse fermant les cylindres et portant les soupapes et les collecteurs d'admission et d'échappement (Une soupape, qui est de l'ordre deux par cylindre, sert pour l'admission du carburant et l'évacuation des gaz)

Le biogaz de qualité moyenne peut être utilisé comme carburant pour les moteurs à gaz alternatifs qui, à leur tour, entraînent les générateurs pour produire de l'électricité. Les moteurs alternatifs qui utilisent du biogaz à faible teneur en carburant sont facilement disponibles en unités modulaires ou en groupes générateurs parallèles complets avec des sorties électriques allant de moins de 0,5 MW à plus de 3,0 MW par unité.

Les moteurs alternatifs ont un coût en capital relativement faible par kW et un rendement supérieur à celui de la plupart des turbines à gaz. La nature modulaire des systèmes de moteurs alternatifs offre une flexibilité pour une expansion qui peut être requise en raison de la génération future de biogaz. Les inconvénients de cette technologie incluent une exigence pour le personnel de maintenance qualifié afin d'assurer un fonctionnement efficace continu et des coûts de maintenance relativement élevés, une consommation élevée d'huile lubrifiante. Un autre avantage pour l'utilisation de moteurs alternatifs est le potentiel d'utilisation de la chaleur

résiduelle des moteurs pour une serre à l'aide d'échangeurs de chaleur et pour le chauffage local sur le site.

Tableau 8 : avantages et inconvénients de ICE

<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
Fiabilité éprouvée si correctement entretenue	Les moteurs à gaz sont sensibles au siloxane et H₂S
Faible coûts initiaux	La teneur en méthane du biogaz doit être plus de 38%
Bonne efficacité électrique et installation facile	Corrosion des pièces du moteur et l'émission de polluants



Figure 19: Dégâts causés par le sulfure d'hydrogène sur un moteur bioélectrique après 10000h de fonctionnement



Figure 20 : Dégâts causés par les siloxanes sur les moteur et dépôts de silice sur les bougies d'allumage

Il existe deux types de moteurs de combustion :

- Allumage par étincelles (moteur Otto).
- Allumage par compression (moteur diesel).

Les composants mécaniques essentiels du cycle Otto et diesel sont les mêmes. Dans les systèmes d'utilisation des gaz d'enfouissement, les deux types de moteurs peuvent être utilisés.

Moteur Otto :

Le cycle Otto (Le cas de notre moteur bioélectrique) est un ensemble de procédés utilisés par la combustion interne à allumage par étincelles (cycles 2 temps ou 4 temps). Les différents processus sont présentés dans les figures 22 et 23 suivantes :

1. **Trait d'admission** : biogaz et air aspirés dans le moteur (5-1).
2. **Trait de compression** : la pression et la température augmentent (1-2).
3. **Trait de combustion** : (étincelle), temps court, volume essentiellement constant (2-3).
4. **Trait d'expansion ou détente** (3-4).
5. **Trait d'Echappement** : ouverture de la soupape, échappement de gaz, rejet de la chaleur à des températures T_4 à T_1 et le piston pousse les produits de combustion restants hors de la chambre (4-1-5).

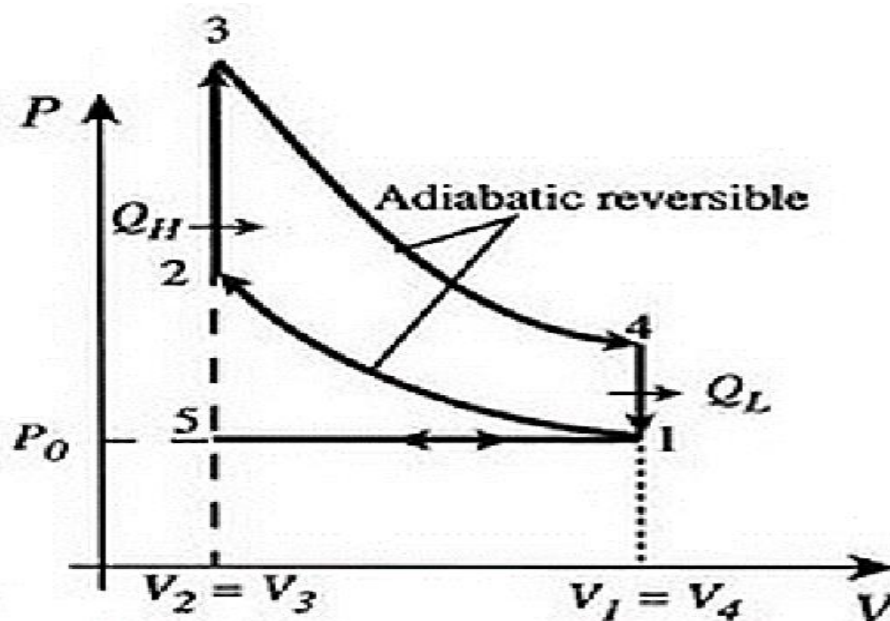


Figure 21: Cycle du moteur Otto

On peut schématiser le cycle par la figure ci-dessous :

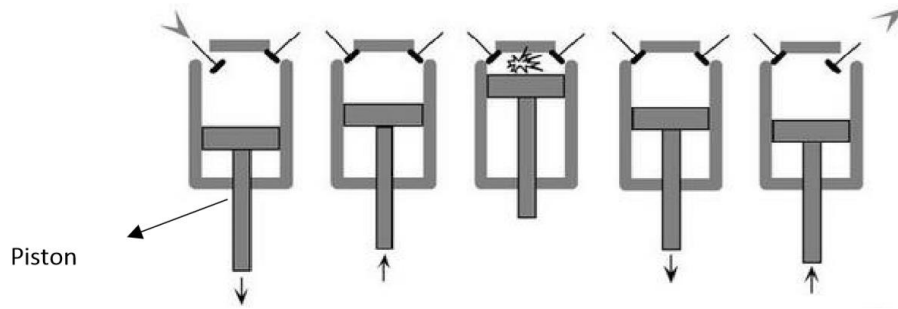


Figure 22: Piston et vannes dans un moteur à combustion interne à quatre temps

Légende :

1. Admission
2. Compression
3. Combustion
4. Expansion ou détente
5. Echappement

v. Unité de traitement du lixiviat

Jusqu'à maintenant la décharge ne dispose pas d'unité de traitement des lixiviats. Cependant, certaines études dans ce sens ont été faites. C'est le cas de l'évaporateur thermique qui fonctionnait grâce au biogaz de la décharge et qui n'a pas été jugé économique pour l'heure et est hors fonction en ce moment. D'autre par contre sont en cours d'expérimentation. C'est le cas du projet pilote de la filtration biologique du lixiviat (Voir figure 24) mené par des étudiants et doctorant sous la coupole du responsable Pr. MERZOUKI MOHAMMED de la Faculté des Science et Technique DHAR EL MAHRAZ de Fès. Lorsque les bassins de lixiviat sont remplis, des camions citerne sont chargés et versés à la STEP ou bien l'arrosage du site d'enfouissement.



Figure 23: De gauche à droite, l'évaporateur thermique, filtration par membrane biologique

III. La méthanisation

La méthanisation est un processus biologique naturel qui permet de convertir la matière organique (glucides, lipides, protéines) en éléments simples (CH_4 , CO_2 , NH_3 et H_2S) grâce à l'action de bactéries anaérobies. Cette digestion anaérobie, processus biologique complexe, peut être décrite en quatre phases de dégradation : l'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse. Chaque phase fait intervenir un groupe de bactéries particulières (figure 25). Toutes les molécules qui ne seront pas dégradées par cette voie pour produire du biogaz (lignine par exemple) et les déchets de ces réactions anaérobies composeront le digestat.

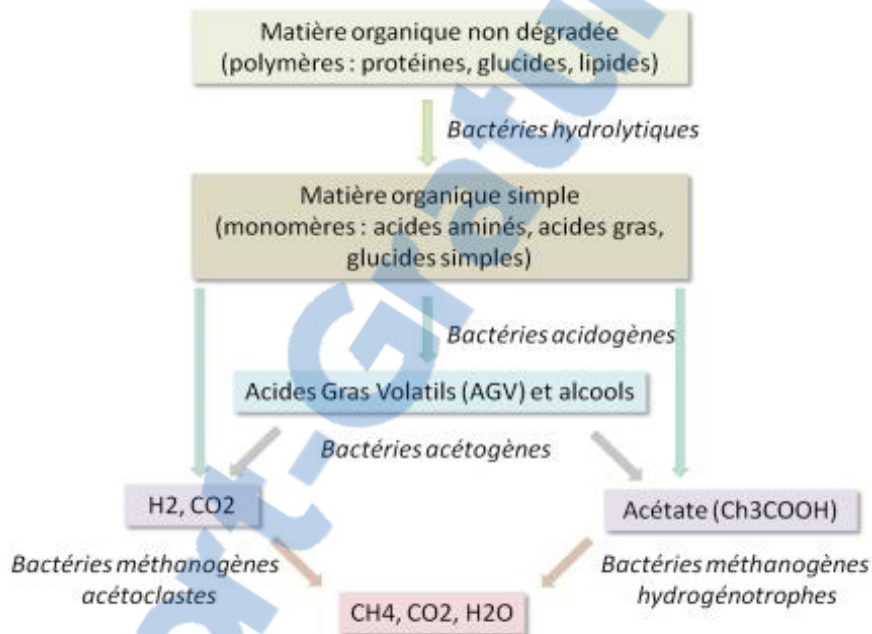


Figure 24: Schéma récapitulatif de la méthanisation

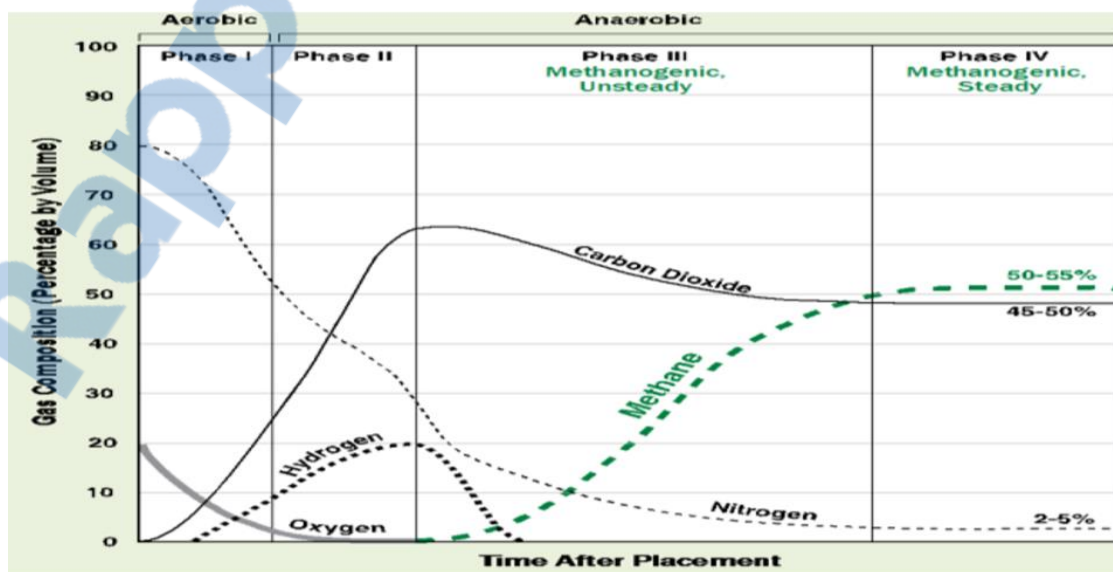


Figure 25: Composition typique du biogaz après enfouissement des déchets

Le tableau ci-dessous montre la durée de chaque phase de méthanisation

Tableau 9: Les différentes phases de la méthanisation

Phase	Nom de phase	Durée de la phase
I	Hydrolyse	5 à 15 jours
II	Acidogenèse	2-3 mois
III	Acétogenèse	3 mois-2 ans
IV	Méthanogenèse	2 ans et plus

Suivant ce mécanisme, la fermentation se divise en deux types, de conditions différentes : **La fermentation aérobie** (en surface) effectuée par des bactéries dites « bactéries aérobies », en présence de dioxygène : O_2 . Cette fermentation consiste l'oxydation de la matière organique par des bactéries aérobies. Elle est caractérisée par une forte augmentation de la température des déchets de l'ordre de $60^\circ C$. Les produits de cette réaction sont : le dioxyde de carbone : CO_2 , l'eau : H_2O et la chaleur. Le produit de l'eau contribue à la formation de lixiviat.

La fermentation anaérobie (en profondeur) se déroule en absence de O_2 par des bactéries anaérobies. Elle permet la production du lixiviat et du biogaz. Cette fermentation se déroule en quatre phases successives, chaque étape est réalisée par un type de bactéries différent :

1. **L'hydrolyse** : effectuée par des bactéries dites hydrolytiques qui cassent les polymères de sucres, protéines ou lipides et les décomposent en monomères de sucres, d'acides aminés ou d'acides gras. Donc, cette étape consiste à la décomposition de la matière organique complexe en des composés (molécules) plus simples qui seront utiles pour l'étape suivante. L'hydrolyse représente le passage de la matière organique fraîche vers une matière organique solubilisée.

Macromoléculaires complexes + H_2O → molécules simples (monomères)

2. **L'acidogenèse ou fermentation acide anaérobie** : les monomères obtenus après la phase d'hydrolyse sont transformés par les bactéries acidogènes en acides gras volatils tels que l'acide acétique : CH_3COOH , l'acide propanoïque : $C_3H_6O_2$, l'acide butanoïque : $C_4H_8O_2$, l'acide valérique : $C_5H_{10}O_2$ ou en alcools. L'acidogenèse permet la transformation des monomères en acides gras volatils.

Monomères → AGV + alcool + acide acétique

3. **L'acétogenèse ou Méthanisation instable anaérobie** : consiste à la conversion des produits de l'acidogenèse en acétate : CH_3COO^- (ester de l'acide acétique), en dihydrogène : H_2 et en dioxyde de carbone : CO_2 par les bactéries acétogènes.

L'acétogénèse permet la conversion des acides gras volatils en acétate, dioxyde de carbone et en dihydrogène.

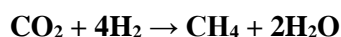


Acide organique \rightarrow acétate

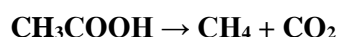
4. **La méthanogénèse ou Méthanisation stable anaérobie** : assurée par les bactéries méthanogènes qui sont des bactéries anaérobies strictes. Ces bactéries consomment une quantité d'acétate issu de la phase précédente pour leur croissance qui est lente et pour leur développement. Cette dernière étape aboutit à la production de méthane : CH_4 . La méthanogénèse est le dernier processus de la fermentation anaérobie, elle permet la production du méthane ainsi que le lixiviat et le biogaz.

Cette dernière est réalisée par deux voies possibles et les deux voies consistent à des réductions :

- L'une des deux voies est à partir de l'hydrogène et du dioxyde de carbone par les espèces dites hydrogénotrophes telle que :



- L'autre à partir de l'acide acétique par les espèces acétotrophes telle que :



a. **Composition du biogaz de la décharge**

A la décharge contrôlée de Fès, chaque mois, le contrôle du biogaz est fait soit avec un appareil appelé GEM ou bien un analyseur lié à la station de soutirage, ce qui permet de suivre les pourcentages de CH_4 , de CO_2 , d' O_2 et la pression de chaque tête de puit. Rappelons que le taux moyen de méthane à la décharge contrôlée de Fès est de 60%.



Figure 26: De gauche à droite, l'appareil GEM et l'analyseur de biogaz

IV. Problématique et méthodologie

1) La problématique :

Après enfouissement des déchets que reçoit la décharge contrôlée de Fès, la digestion anaérobie se met en marche pour produire du biogaz, un biogaz contenant 60% de méthane, combustible est utilisé pour la production de l'électricité. La puissance à terme de la centrale devra atteindre 5 MW. Pour ce faire, des générateurs de 1 MW devront être installés. Pour l'heure, la centrale dispose qu'un seul générateur de 1,063 MW, soit environ 1 MW.

Quand faudrait-il ajouter les autres générateurs ? C'est est la principale question autour de laquelle s'articulera notre travail.

Notre travail consistera donc à déterminer la mise en place des générateurs, en tenant compte de la capacité de production de biogaz de la décharge.

2) La méthodologie

Pour se faire, nous devons tout d'abord faire une prédiction de la production de biogaz en utilisant le modèle approprié à la décharge contrôlée de Fès.

Car, en effet, plusieurs modèles existent dans la littérature, nous devons donc opter pour le modèle qui cadre le mieux avec la réalité, et dont les caractéristiques sont disponibles au niveau de la décharge. C'est La modélisation de la production de biogaz par les modèles de LandGEM et EPA.

Ensuite, déterminer l'équivalent en électricité des quantités de biogaz de chaque période et définir le rendement de la centrale bioélectrique, ce qui nous permettra de savoir s'il faudrait ajouter ou pas un nouveau générateur.

Enfin, le calcul de la réduction des gaz à effet de serre qui est un projet lié au mécanisme de développement propre MDP.

Chap. III: LA MODELISATION DU BIOGAZ ET LA VALORISATION EN ENERGIE ELECTRIQUE

Dans cette dernière partie du travail, on va appliquer une modélisation de la production de biogaz avec les deux modèles LandGEM et EPA et une comparaison entre eux pour choisir le modèle le plus fiable, après, on va estimer la génération de biogaz et le stock obtenu au cours du temps et aussi la valorisation de ce biogaz en énergie électrique, puis, on va calculer le rendement de la centrale bioélectrique et le stock de biogaz généré pour voir quand on va ajouter les autres moteurs, et enfin, on va décrire le pourcentage d'éclairage publique à Fès et la réduction des gaz à effet de serre qui est un projet lié au MDP.

I. Modélisation de la production de biogaz :

1) Détermination de la quantité de déchets et sa composition :

La société ECOMED valorise les déchets solides reçus dans la décharge contrôlée de la ville de Fès en énergie électrique. Une analyse des échantillons d'un flux de déchets pour déterminer sa composition donne les résultats suivants :

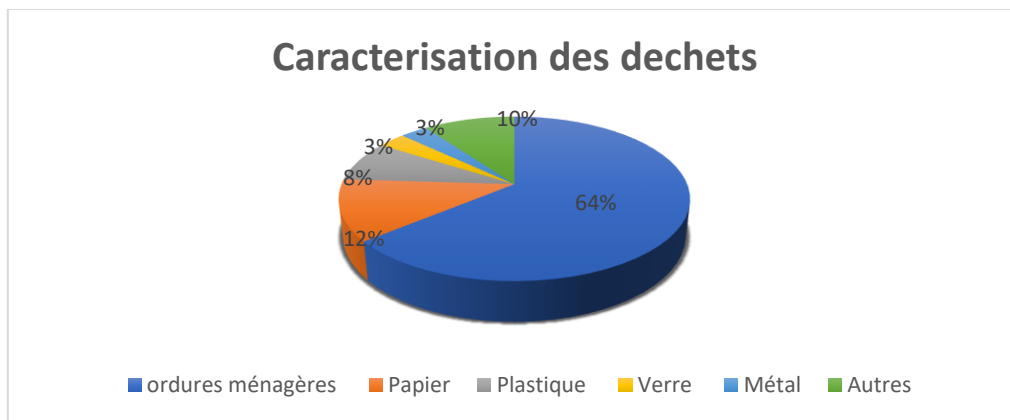


Figure 27: Caractérisation des déchets solides

Le site d'enfouissement de Fès reçoit tous les déchets solides municipaux de Fès, l'enfouissement a commencé à 2004 jusqu'à maintenant. La quantité moyenne de déchets éliminés sur le site est d'environ 800 (tonnes / jour). Afin d'estimer les déchets entrants de 2017 vers 2040, on s'est basé sur les données de l'historique de déchets entre 2004 et 2017 et la population de Fès de 2014 à 2030, et on a fait une prédiction de la quantité de biogaz qui sera produite en utilisant un tableur Excel. (Figure 28)

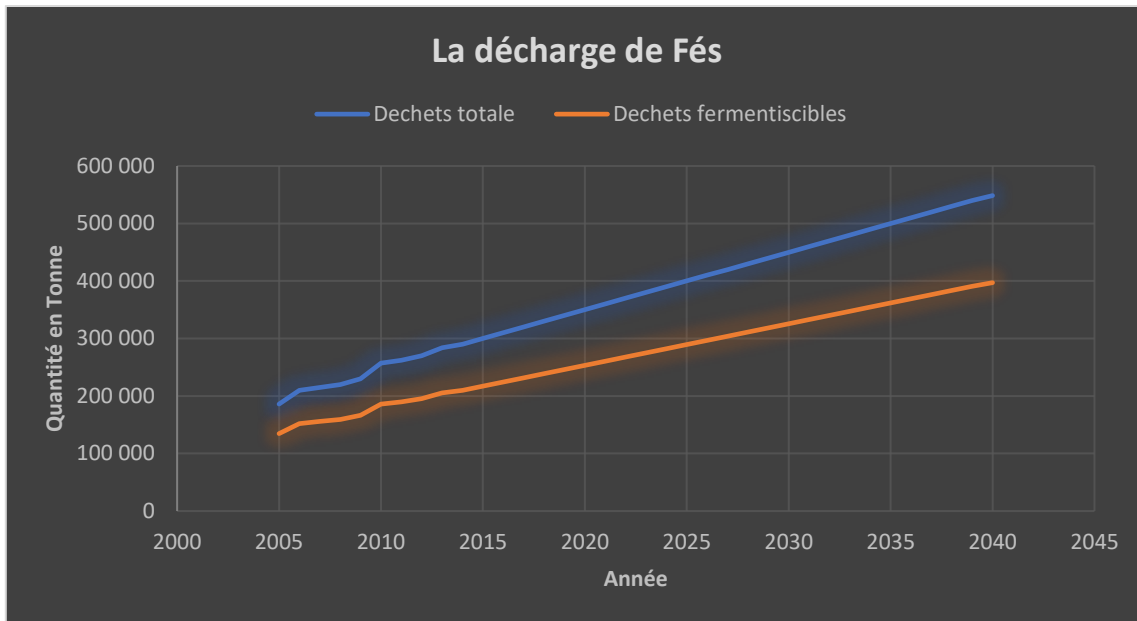


Figure 28: Evolution de la quantité du déchet de la décharge du Fès

➤ **Discussion des résultats :**

Le graphe du figure 28 montre l'évolution de la quantité du déchet responsable de la production du biogaz avec un taux moyen annuel de déchets de 374 236 tonnes, sachant que les déchets biodégradables contiennent les fermentescibles (déchet vert +déchet du nourriture) et le papier. On est arrivé en 2017 à 3,5 millions tonnes du déchet enfouis, et on prédit une valeur de 13 millions tonne vers 2040 la date de fermeture du site.

2) Détermination des paramètres L_0 et k :

En utilisant la méthode mentionnée dans la partie étude bibliographique (les paramètres L_0 et k), les valeurs de L_0 et k sont données dans le tableau 10 :

Tableau 10: Résultats des valeurs L_0 et k .

Paramètre	Valeur
L_0 (m ³ /Tonne)	107,635
K (an ⁻¹)	0,061

3) Estimations de la production du biogaz au cours du temps :

Après avoir déterminé les paramètres entrants nécessaires, on va calculer le volume du biogaz généré chaque année, à l'aide du tableur Microsoft Excel, en utilisant les deux modèle EPA, et LandGEM. (Figure 29)

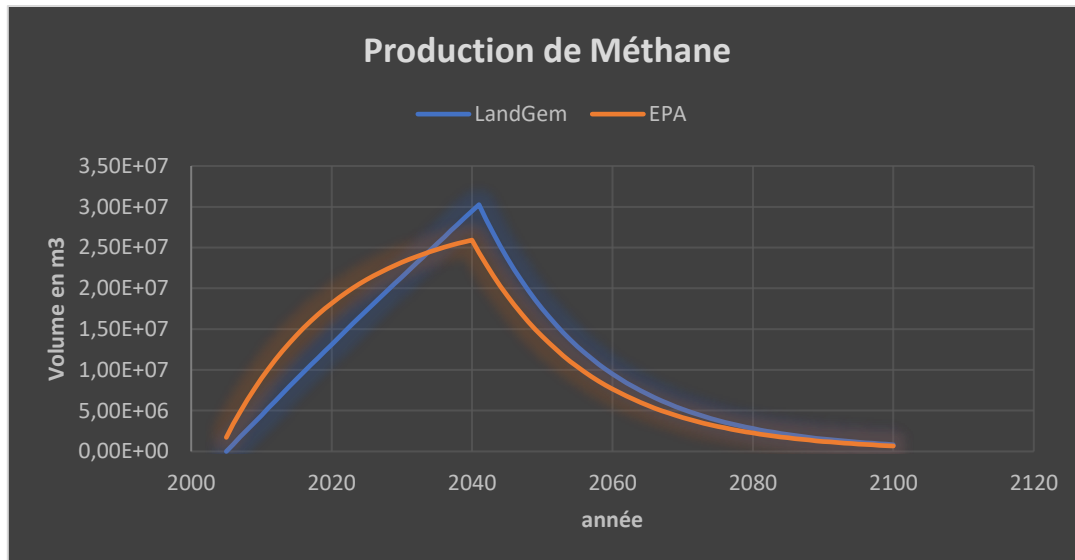


Figure 29 : Evolution de la production du biogaz par deux modèles

➤ **Discussion des résultats :**

La figure 29 montre que les 2 modèles donnent des résultats très proches et surtout que la production de biogaz continue bien après la fermeture prévue de la décharge. On peut cependant supposer que le modèle LandGEM est plus juste puisqu'il prend en compte l'ajout de déchets annuellement alors que le modèle EPA considère un taux constant de déchets par an. En plus, plusieurs pays considèrent le modèle de LANDGEM une référence de calcul du biogaz, et surtout dans leur valorisation (Tableau 5). Dans notre projet, on va garder les résultats du LandGEM.

4) Application du modèle LandGEM

a) Interface du modèle LandGEM

Le modèle LandGEM est configuré dans le tableur Excel de Microsoft sous forme de chiffrier interactif. Il exécute l'équation décrite et il considère les quantités enfouies des déchets sur plusieurs années consécutives et peut prédire la génération de CH₄ jusqu'à 140 ans. La version courante (3.02) du logiciel, mise à jour en 2005, a été améliorée par rapport à sa version précédente (3.01) sur les points principaux suivants : l'équation de génération de CH₄ de premier ordre considère maintenant des incréments de dixième d'année, ce qui augmente le niveau de précision du calcul. LandGEM permet à l'utilisateur d'entrer des données spécifiques au site d'enfouissement comme L₀ et k et la fraction de CH₄ dans le biogaz. Dans le cas où ces informations ne seraient pas disponibles, le logiciel offre par défaut des valeurs par défaut de k et de L₀ basées sur les recommandations du US EPA.

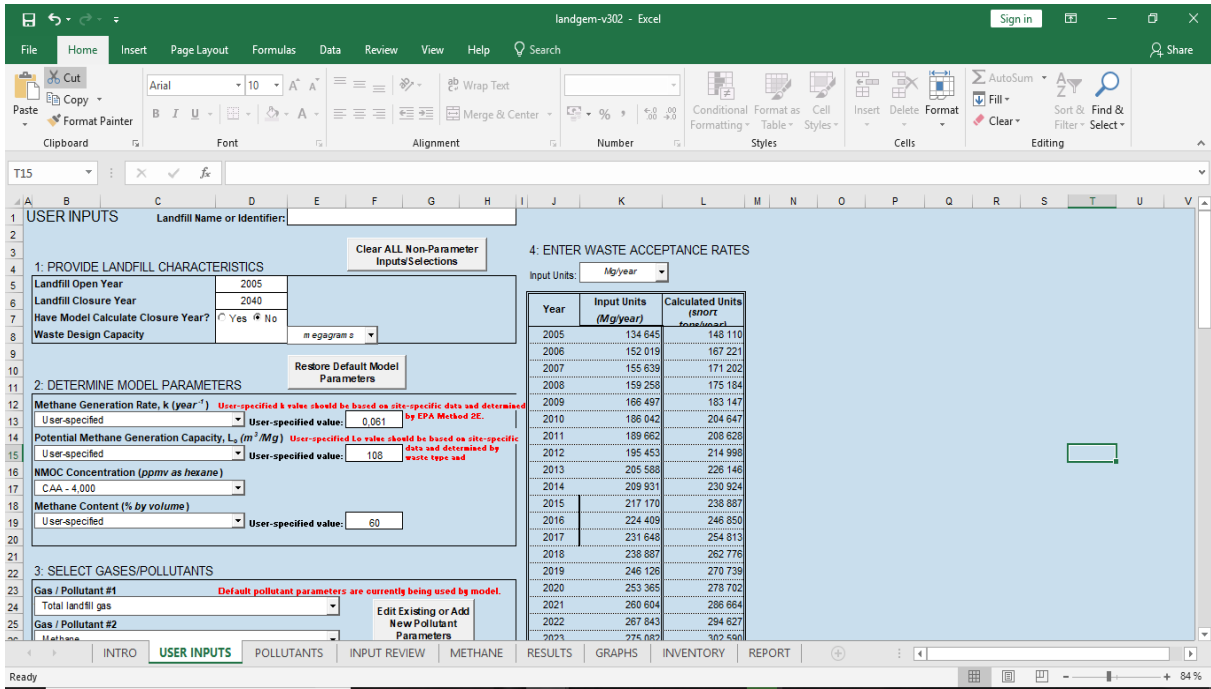


Figure 30: Interface du modèle LandGEM

b) Résultats de modèle LandGEM

Dans notre cas, le taux de récupération de biogaz de 65%, le graphe suivant montre la quantité du biogaz récupérable, vers 2017 on a un stock de biogaz d'environ 40 millions m³ et va augmenter vers l'année de la fermeture 2040 du site à 137 million m³.

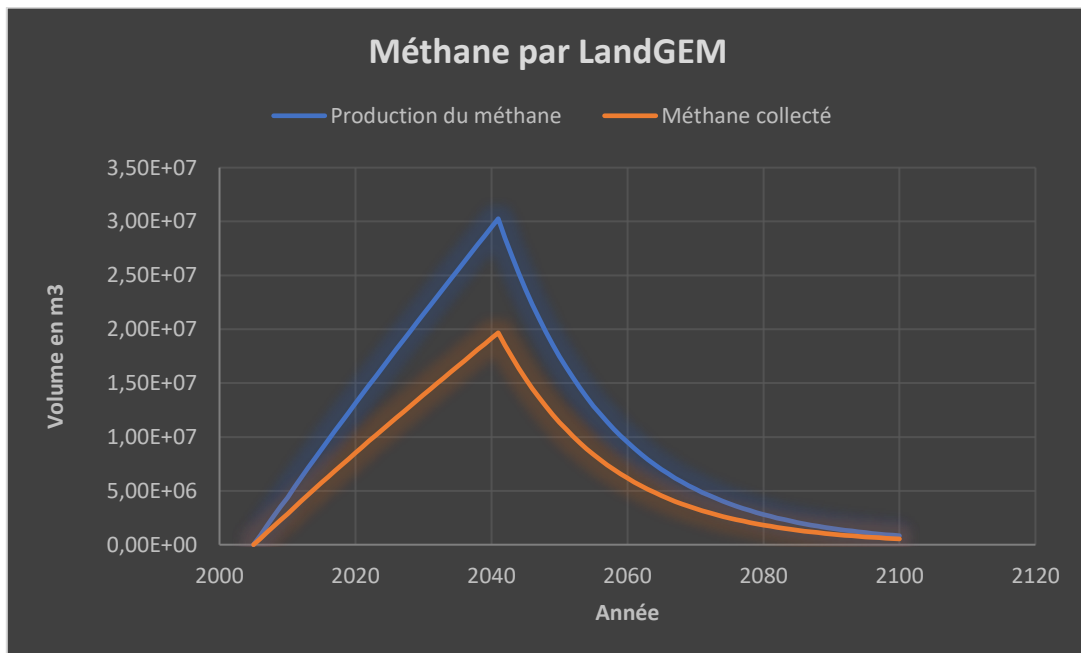


Figure 31: Evolution de la production et le collecte du biogaz

➤ **Discussion des résultats :**

En ce qui concerne la quantité de méthane collectée, nous remarquons qu'elle a la même allure que celle du méthane produit, mais rétrécit de 65% puisque la décharge n'arrive pas à collecter tout le méthane produit et cela dû à plusieurs critères (la pression atmosphérique, les précipitations, la surveillance du puits et les systèmes de la canalisation.....)

II. La valorisation de la production de l'énergie électrique

1) Estimation du volume valorisé et brûlé de méthane

Le débit nominal de biogaz pour un moteur bioélectrique est de 524 (Nm³/h), la production de l'énergie électrique a débuté la valorisation en juin 2015, notons que la valorisation de biogaz dépend du nombre de moteur, la relation est la suivante :

$$V_{\text{valorisé}} = (D_{\text{biogaz}} \times \text{CH}_4\% \times 365 \times 24 \times Nb)$$

Avec :

V_{valorisé} : Le volume valorisé annelle du méthane d'une décharge en m³.

D_{biogaz} : Le débit de biogaz soutiré en m³/h.

CH₄ % : Pourcentage du méthane dans le biogaz 60%

Nb : Le nombre de moteur dans la décharge.

Les résultats de calcul du volume valorisé sont donnés dans la figure 32.

Lorsque le moteur est en arrêt à cause de maintenance ou vidange, la torchère est en marche pour éviter la dépression du biogaz dans les puits. Pour le volume brûlé de méthane, on a un manque au niveau du volume de méthane brûlé annuellement mais la torchère contient un débitmètre qui permet d'enregistrer tout le méthane brûlé dès le début de brûlage jusqu'à présent, donc on peut faire un moyen pour estimer la quantité brûlé chaque année.

$$V_{\text{brûlé}} = (V_{\text{biogaz tot}} \times \text{CH}_4\%) / 12$$

Avec :

V_{brûlé} : Le volume brûlé annelle du méthane en m³.

V_{biogaz tot} : Le volume totale de biogaz brûlé dans la torchère en m³/an.

CH₄ % : Pourcentage du méthane dans le biogaz 60%.

12 = La durée comprise entre 2006 et 2018.



Figure 32: Evolution du volume de méthane valorisé



Figure 33 : Evolution du volume de méthane brûlé

➤ **Discussion des résultats :**

Selon la figure 32, nous constatons que le volume de méthane valorisé dépend du nombre de moteur et donc de leurs consommations, c'est pourquoi ce volume croit en rajoutant un moteur et décroît lors de son retraitage. Pour la figure 33, nous avons remarqué que la torchère fonctionne seulement lors d'arrêt du moteur pour une entretien mais dès 2019, elle ne va pas être utile puisqu'on va disposer de plusieurs moteurs. Donc, on n'aura pas une phase d'arrêt totale, notons qu'on peut augmenter ou bien diminuer la pression de soutirage selon le besoin.

2) Le volume de méthane stocké

Le volume de méthane stocké est calculé par la formule suivante :

$$\text{Stock (i)} = \text{V Produit (i)} - \text{V Extrait (i)} + \text{Stock (i-1)}$$

Le stock est en m³ avec $\text{V Extrait} = (\text{V Brulé} + \text{V Valorisé})$

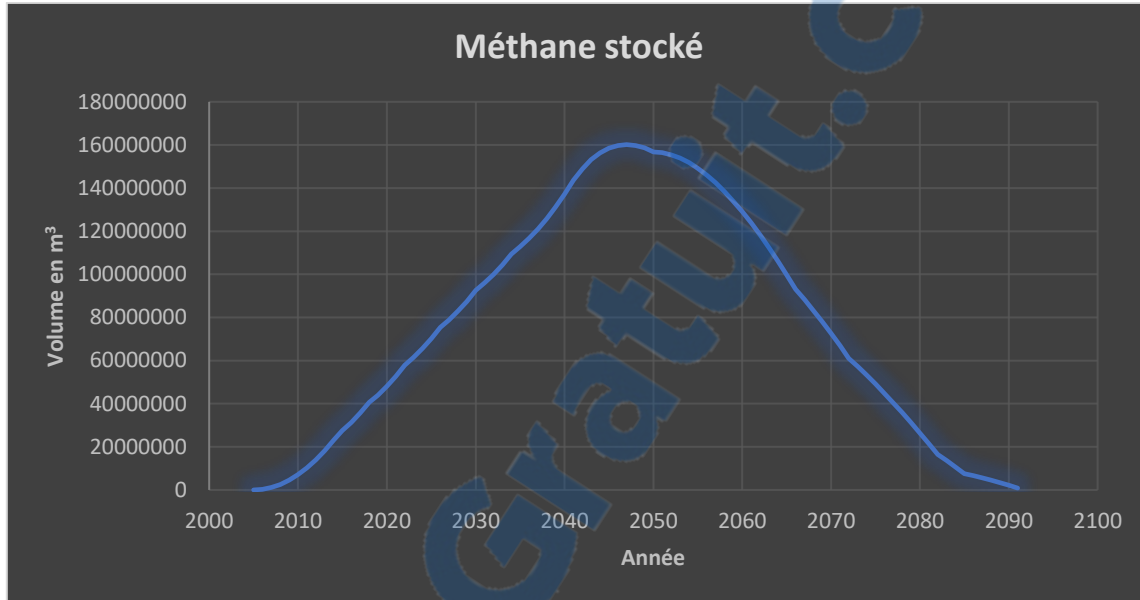


Figure 34: Evolution du volume de méthane stocké

➤ Discussion des résultats :

En ce qui concerne le volume de méthane stocké, on observe qu'il y a une augmentation en fonction de la quantité produite et enfouisse des déchets, et il va absolument diminuer après avoir ajouté de moteurs qu'ils vont bénéficier à la fois de méthane produit et du stock. En fait, après arrêter l'enfouissement, le stock reste une source principale d'alimentation. Donc, il va baisser jusqu'à l'épuisement.

3) L'énergie électrique

a) Potentiel calorifique

$$E_{\text{calorifique}} = V_{\text{biogaz collecté}} \times \text{CH}_4 \% \times \text{PCI} (\text{CH}_4) \times 10^{-6}$$

Avec :

$E_{\text{calorifique}}$: Energie calorifique annuellement du méthane d'une décharge en GWh.

$V_{\text{biogaz collecté}}$: Volume de biogaz collecté en m³/an.

$\text{CH}_4 \%$: Pourcentage du méthane dans le biogaz 60%

PCI : pouvoir calorifique inférieur du méthane 9.94 KWh/m³

10^{-6} : Coefficient de conversion de KWh à GWh.

b) Le rendement du moteur bioélectrique

Le moteur bioélectrique de la décharge admet un rendement énergétique maximal de 40.8% (rendement fourni par le constructeur). Dans le cas de décharge contrôlée de Fès, La puissance nominale du moteur est de 1063 KW et le débit nominal de biogaz est de 524 Nm³/h, donc on peut calculer le rendement de notre moteur :

$$\eta = \frac{\text{Puissance électrique}}{\text{Puissance calorifique}} = \frac{1063}{524 \times 60\% \times 9,94} = 34\%$$

c) Energie électrique

Nous avons : $E_{\text{électrique}} = E_{\text{calorifique}} \times \eta$

Avec $E_{\text{calorifique}} = V_{\text{méthane collecté}} \times \text{PCI}(\text{CH}_4) \times 10^{-6}$ et $\eta = 34\%$.

Les résultats sont donnés par la figure 35 :

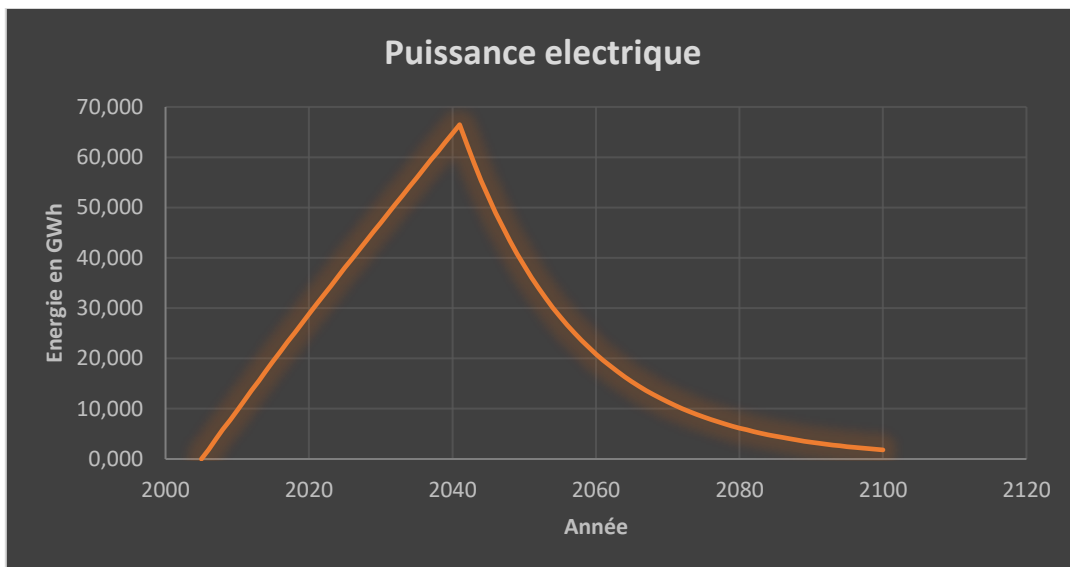


Figure 35 : Evolution de la production d'énergie électrique

➤ Discussion des résultats :

Selon la figure 35, nous distinguons que l'énergie électrique est proportionnelle à la quantité du méthane stocké, c'est pourquoi ils ont les mêmes allures, ce qui apparaît juste et logique.

4) L'énergie électrique générée :

La puissance nominale d'un moteur bioélectrique est de 1063 KW. Le rendement de performance du moteur est de 80% vu que le biogaz contient du H₂S qui endommage les pièces du moteur (Voir les figures 19 et 20). L'énergie électrique valorisé chaque année est :

$$E_{\text{générée}} = (P_{\text{ele}} \times \eta_{\text{perf}} \times 365 \times 24 \times 10^{-6} \times \text{Nb})$$

Avec :

$E_{\text{générée}}$: L'énergie électrique générée annuellement par le moteur bioélectrique en GWh.

P_{ele} : La puissance électrique nominale du moteur en MW.

η_{perf} : Le rendement de performance du moteur (moteur sans procédés de traitement de H_2S).

N_b : Le nombre de moteur dans la décharge.

10^{-6} : Coefficient de conversion de KWh à GWh.

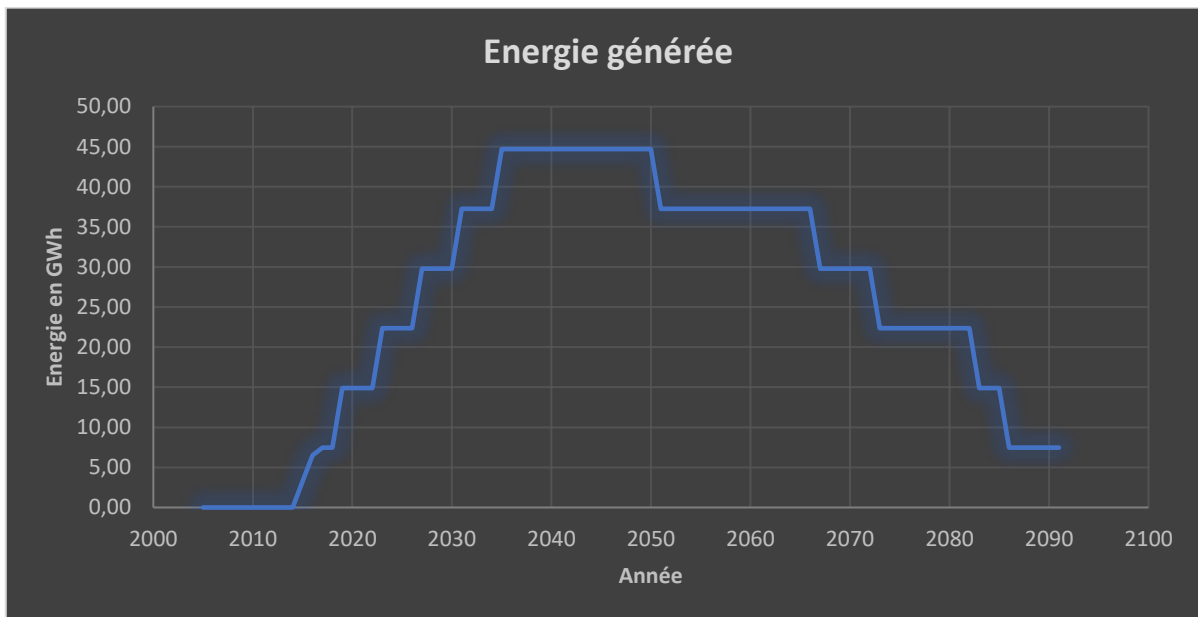


Figure 36: Evolution de l'énergie électrique générée

➤ **Discussion des résultats :**

D'après la figure 36, nous remarquons que l'énergie générée dépend du nombre de moteurs. Donc, elle augmente lorsqu'on ajoute un moteur et diminue lors de son retraitage.

III. Nombre de moteurs :

Pour augmenter le nombre de moteurs qu'on peut installer dans la décharge de Fès, il faut prendre en considérations plusieurs critères :

- La durée de vie du moteur (60000 heures pour le moteur JENBACHER).
- La rentabilité du projet.
- Le contenu du contrat signé avec La RADEEF.
- La disponibilité du biogaz.
- Les limites financières de la société.

Une étude économique sur le projet montre que la rentabilité a lieu si la durée de fonctionnement du moteur est supérieure à 6 ans, donc la société ne peut pas installer un moteur

qui va fonctionner moins de 6 ans , la RADEEF exige de ne pas injecter dans le réseau plus de 2 MW jusqu'à 2022 à cause des problèmes techniques dans le système de distribution , en plus on ne peut pas installer un moteur sans assurer la disponibilité du biogaz de 8 ans minimum , enfin les limites financières de la société impose une durée de 4 ans pour l'installation entre deux moteurs. Le besoin énergétique pour un seul moteur est de 7,45 GWh avec une durée de vie du moteur de 6-10 ans et selon le stock énergétique, la décharge peut installer plus de 30 moteurs de 1 MW de 2015 jusqu'à 2091. L'étude technique et économique du projet donne les résultats suivants :

- 2015-2018 : production avec 1 moteur ($3,26 + 7,45 + 7,45 + 7,45 = 25,61$ GWh).
 - 2019-2022 : production avec 2 moteurs ($14,9 \times 4 = 59,6$ GWh).
 - 2023-2026 : production avec 3 moteurs ($22,35 \times 4 = 89,4$ GWh).
 - 2027-2030 : production avec 4 moteurs ($29,80 \times 4 = 119,2$ GWh).
 - 2031-2034 : production avec 5 moteurs ($37,25 \times 4 = 149$ GWh).
 - 2035-2050 : production avec 6 moteurs ($44,70 \times 16 = 715,2$ GWh).
 - 2051-2066 : production avec 5 moteurs ($37,25 \times 16 = 596$ GWh).
 - 2067-2072 : production avec 4 moteurs ($29,80 \times 6 = 178,8$ GWh).
 - 2073-2082 : production avec 3 moteurs ($22,35 \times 10 = 223,5$ GWh).
 - 2083-2085 : production avec 2 moteurs ($14,9 \times 3 = 44,7$ GWh).
 - 2086-2091 : production avec 1 moteur ($7,45 \times 6 = 44,7$ GWh).
- Une production totale de 2245,71 GWh. (Figure 37)

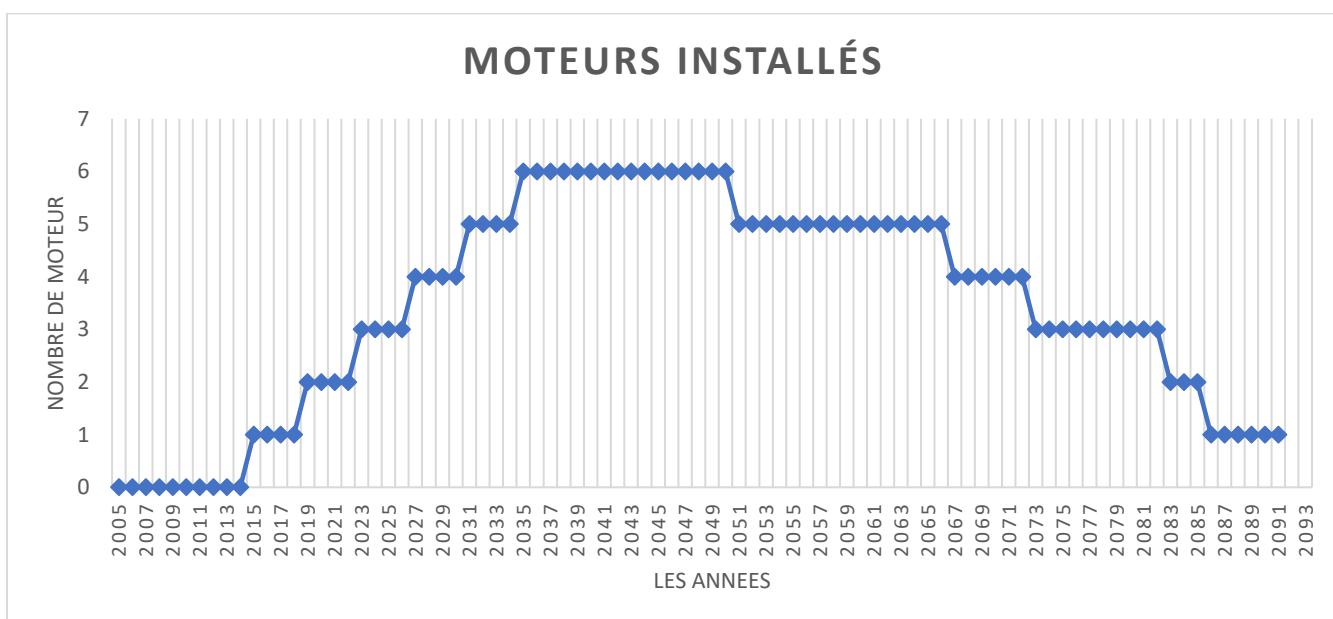


Figure 37: Graphe de distribution du nombre de moteur

Nous avons pris 20% du jours d'année pour l'entretien et la maintenance du moteur. La justification de la baisse valeur de 2015 par rapport à la valeur prévue de 2016 que le constructeur a conseillé de travailler avec un rendement de performance de 70% pour les six premiers mois pour des raisons de sécurité. L'utilisation de la torchère va arrêter dès que le deuxième moteur est installé car la dépression dans les puits ne pose pas un problème puisque nous pouvons décaler les périodes de maintenance et d'entretien des moteurs. Mais quand la quantité du biogaz va être négligeable càd on ne peut pas le valoriser dans le moteur on va utiliser la torchère.

IV. Eclairage public de Fès :

1) Le taux d'éclairage public :

À Fès, l'éclairage public coûte pour la commune plus de 49 millions DH, dont 42 millions pour la consommation et 7 millions pour l'entretien. Dans ce sens, la commune urbaine de Fès et la société ECOMED se mettent d'accord de diriger la totalité de la production électrique vers l'éclairage public, pour économiser l'énergie et diminuer les frais de maintenance. De 2014 jusqu'à 2017, la capacité totale de l'éclairage public de Fès selon Mr. BENNIS HADAF, le responsable de l'éclairage publique de la commune de Fès, a augmenté de 28,22 vers 34,49 GWh. Pour cela, une gestion qui se fera dans le cadre d'une nouvelle « société de développement local » (SDL) en charge de ce secteur a pour but de réduire la consommation et la facture énergétique de la ville d'au moins 50%. En ce sens, la ville est en négociations « avancées » avec 4 sociétés pour créer une SDL de gestion de l'éclairage public (Société Philips, Groupement Cteliun/Nabilum, Groupement Engie/SDCL, Société SECE).

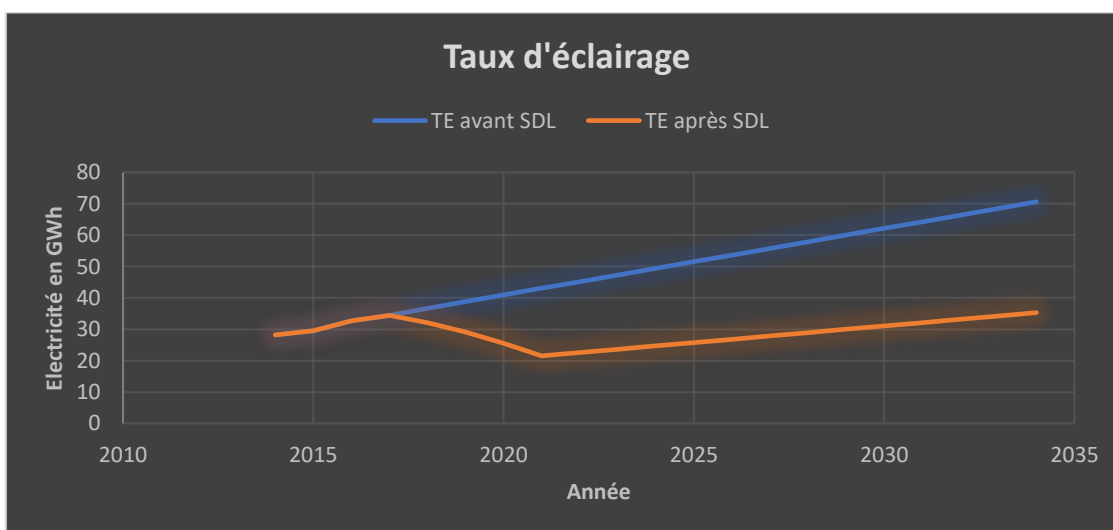


Figure 38: Le taux d'éclairage public avant et après SDL

➤ **Discussion des résultats :**

D'après la figure 38, nous remarquons que le taux d'éclairage public va diminuer après l'application du SDL, ce projet va se diviser selon les estimations en 4 ans (2018-2021) pour aboutir à une réduction de 50% en consommation énergétique pour l'éclairage public.

2) **Le pourcentage d'éclairage public :**

Le pourcentage d'éclairage public est :

$$\%TEP = \frac{\text{Energie générée}}{\text{Energie électrique pour alimenter L'éclairage public}} \times 100\%$$

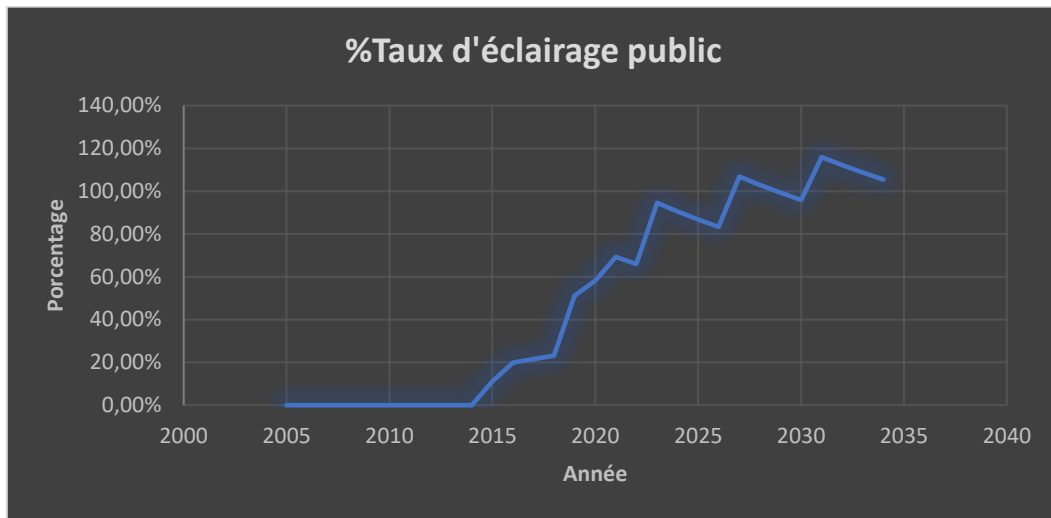


Figure 39: Le pourcentage d'éclairage public

Pour l'excès d'énergie = (Energie électrique générée annuellement – Energie électrique nécessaire pour alimenter 100% d'éclairage public)

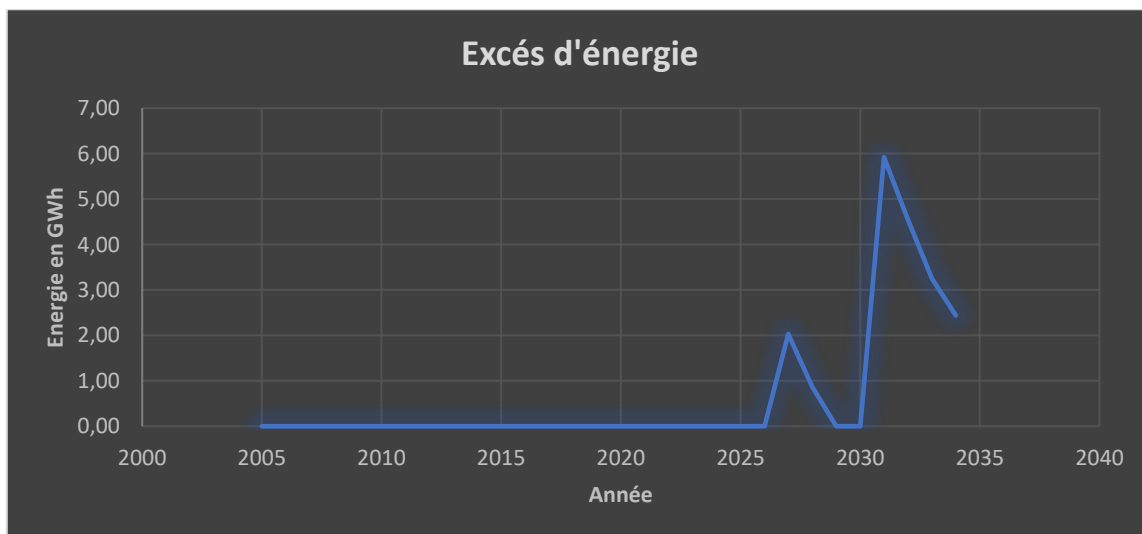


Figure 40: L'excès d'énergie

➤ **Discussion des résultats :**

Selon la figure 40, nous constatons que l'excès d'énergie prend des valeurs non négligeables quand l'énergie générée dépasse la quantité nécessaire d'injection au réseau, en ce sens, le système autonome de l'éclairage public va durer 8 ans de 2027 à 2034 (selon le contrat signé avec la commune Fès) avec un excès de 0,87% à 5,92%. On peut garantir un système autonome basé sur les énergies renouvelables pendant l'installation du 4ème moteur en ajoutant un système de l'éclairage solaire. Pendant la production en excès, ces quantités vont diriger pour alimenter les établissement public (hôpitaux, écoles, ...).

V. Réduction d'émissions des GES

Le premier but de ce MDP est de réduire les émissions de GES au niveau mondial. L'équation suivante, donnée par EARTH HOOD, c'est un Bureau d'étude agréé mondialement au niveau de réduction des émissions de GES, représente le calcul de RE de CO₂ :

$$RE = ((B + V) \times (1 - AF) \times \frac{\rho}{1000}) \times 21) + \left(\frac{\text{Energie générée}}{1000}\right) \times 0,72$$

Avec :

RE = Réduction d'émission en TeqCO₂ (Tonne CO₂ équivalent)

B et V = Le volume brûlé et le volume valorisé en m³

AF = Facteur d'ajustement (pour la destruction de CH₄), sa valeur est constante 3%

21 = Equivalent de potentiel de tCO₂ en tCH₄

ρ : La masse volumique de méthane (0,72 Kg/m³)

0,72 = Potentiel électrique de CO₂ dégagé lors de combustion

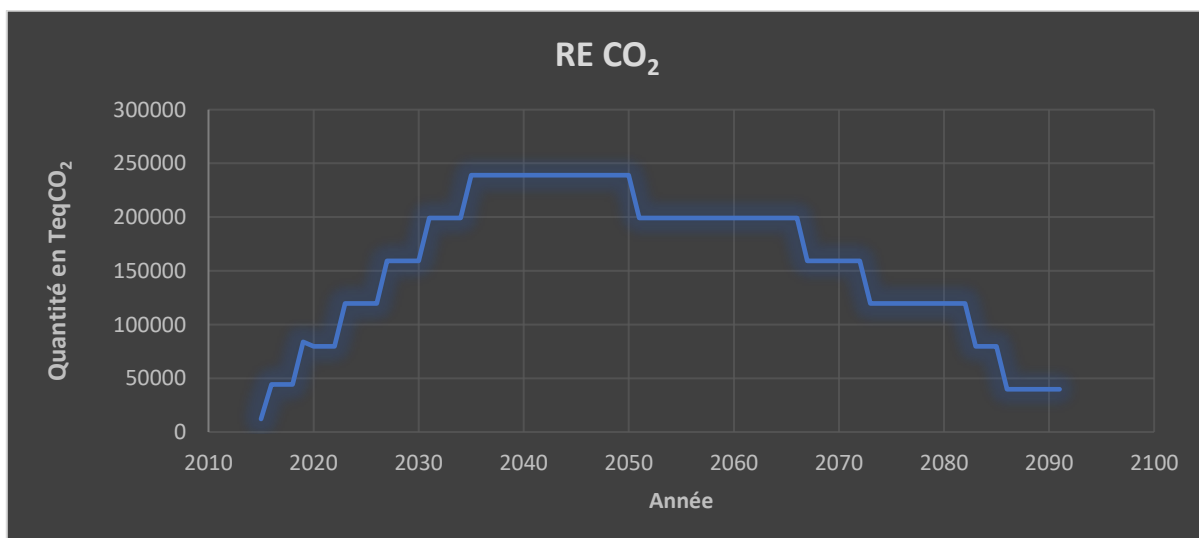


Figure 41: La réduction d'émissions de CO₂

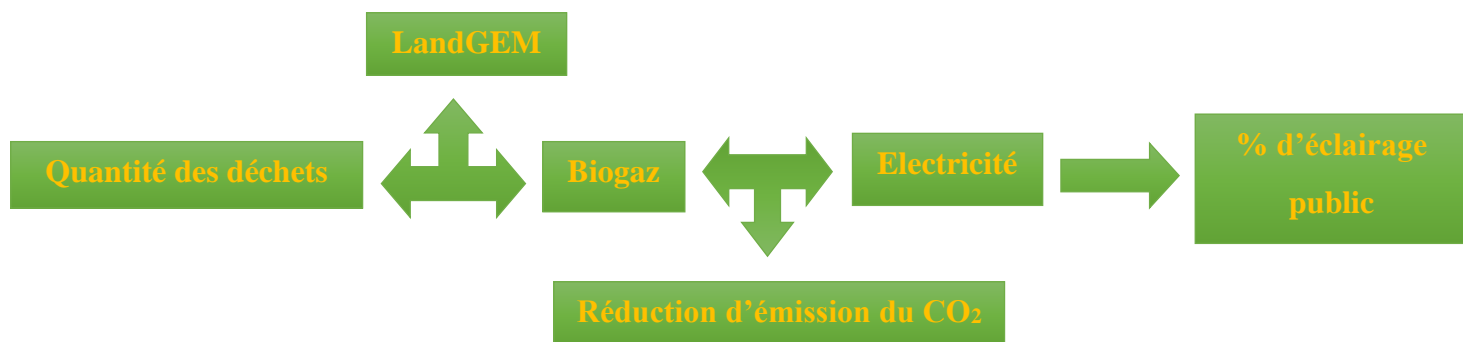
➤ **Discussion des résultats :**

D'après la figure 41, nous voyons que la réduction d'émission de CO₂ s'accroît et diminue au même titre que la valorisation de CH₄, le projet de MDP est donc un projet qui vise à atteindre les deux volets : l'équilibre environnemental et financier. La décharge rejette normalement à l'atmosphère millions de tonne de CO₂ pendant leur durée de vie, pour ECOMED, le méthane collecté grâce au projet de valorisation du biogaz est ensuite brûlé, et donc détruit et aussi une source additionnelle de revenus pour la décharge, liée à la génération puis à la vente des unités de réduction certifiée des émissions, plus généralement appelées « crédits carbone ».

CONCLUSION GENERALE

Les enjeux des énergies renouvelables sont vastes, elles permettent d'une part de limiter l'augmentation des émissions des gaz à effet de serre. Parmi les multiples sources d'énergies renouvelables (solaire, éolien, thermique) le biogaz produit par digestion anaérobie, occupe une place particulière ; l'utilisation contrôlée de cette digestion permet de valoriser les déchets organiques en produisant du biogaz qui pourra être utilisé pour produire de l'électricité, L'énergie chimique contenue dans le biogaz est transformée en énergie électrique grâce à un moteur bioélectrique couplé à un alternateur. Le moteur transforme l'énergie chimique en énergie mécanique et l'alternateur transforme cette dernière en énergie électrique. Grâce à ce projet, la ville de Fès sera la première ville au Maroc à s'allumer à partir de ses déchets. La décharge contrôlée gérée par le groupe ECOMED, est très engagée aujourd'hui et aide à résoudre les problèmes dus aux changements climatiques sachant que ce projet permet une réduction des tonnes de CO₂, ce qui a un rôle à jouer pour réussir la prochaine COP24 (conférence des parties), dans laquelle le projet sera présenté.

Tout au long de ce rapport, on est attaché à développer des solutions aux problèmes relatifs à la valorisation des déchets organiques, on a fixé comme objectif d'une part d'étudier les méthodes de la modélisation de la production de biogaz à partir des déchets ménagers, et d'autre part, de traiter le système de valorisation de biogaz en énergie électrique. Les conclusions de cette partie montraient qu'un seul moteur produira 7.45GWh/an et en justifiant que le système de l'éclairage public de Fès sera autonome à partir des déchets enfouis dans la décharge, enfin de montrer la possibilité d'intégrer un programme de développement propre (MDP) en exposant le taux de réduction des GES dans l'atmosphère et alors préserver l'environnement ainsi que le gain d'argent grâce à notre dépollution.



REFERENCES

BIBLIOGRAPHIE

Cresson R., l'Institut National de la Recherche Agronomique, Biotechnologies pour le traitement de l'eau et des déchets, 2011.

DANIEL A., LAGOS H., thèse doctorat : optimisation du modèle de génération de méthane du lieu d'enfouissement du complexe environnemental de Saint-Michel, Université de Sherbrooke, 2014.

DELFOSE P., CENTRE DE RECHERCHE PUBLIC GABRIEL LIPPMANN, l'Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France, Microbiologie De La Digestion Anaérobie, 2010.

FARQUHAR G. J. and ROVERS F. A. Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, Gas Production During Refuse Decomposition, 1973.

Jens E. Frøiland Jensen and Al., National Greenhouse Gas Inventories, CH₄ EMISSIONS FROM SOLID WASTE DISPOSAL,

Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide, EPA-600/R-05/047 May 2005.

Loi n° 28-00 relative à la gestion des déchets et à leur élimination.

LORNAGE R., thèse de doctorat : Comparaison de trois filières de stockage d'ordures ménagères Etude du comportement des déchets en pilotes semi industriels et caractérisation des émissions liquides et gazeuses associées, L'UNIVERSITE LYON I – CLAUDE BERNARD, 2006.

Systèmes vivants existent à grande échelle : écosystèmes et biosphère, Les organismes vivants sont utilisés par l'Homme comme agents de dépollution ou de production.

WEBOGRAPHIE

http://www.biogaz-energie-renouvelable.info/biogaz_composition.html

<http://www.earthood.in>

<http://www.ecomed.ma>

<https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/emissions-estimation-tools>

<http://frswc.ca/fr/education/gaz-denfouissement/>

<https://fr.climate-data.org/location/3570/>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9chet>

[https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9charge_\(d%C3%A9chet\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/D%C3%A9charge_(d%C3%A9chet))

<https://www.ge.com/power/gas/reciprocating-engines/jenbacher/type-3>

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/content/2015/production-deelectricite-et-de-chaleur-par-cogeneration>

https://hcp.ma/Les-projections-de-la-population-et-des-menages-entre-2014-et-2050_a1920.html

<http://kidiscience.cafe-sciences.org/articles/comment-produit-t-on-leelectricite-partie-ii/>

<http://www.leconomiste.com/article/1021698-fes-eclairage-public-ce-qui-changera-avec-une-sdl>

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000024357158>

<https://www.medias24.com/MAROC/SOCIETE/164944-Fes-Quand-la-decharge-devient-une-source-inepuisable-de-production-de-l-electricite.html>

www.planetoscope.com/Source-d-energie/1575-production-mondiale-de-biogaz.html

ANNEXES

Annexe 1 : Quantité (déchets totale, déchets fermentescibles, Méthane généré et récupéré).

Année	Déchets (tonne)	Déchets fermentescibles (tonne)	Méthane (m ³)	Méthane Récup par LandGEM (m ³)	Méthane Récup par EPA (m ³)
2005	1,86E+05	1,35E+05	0,00E+00	0,00E+00	1,12E+06
2006	2,10E+05	1,52E+05	8,60E+05	5,59E+05	2,18E+06
2007	2,15E+05	1,56E+05	1,78E+06	1,16E+06	3,17E+06
2008	2,20E+05	1,59E+05	2,67E+06	1,73E+06	4,10E+06
2009	2,30E+05	1,66E+05	3,53E+06	2,29E+06	4,98E+06
2010	2,57E+05	1,86E+05	4,38E+06	2,85E+06	5,81E+06
2011	2,62E+05	1,90E+05	5,31E+06	3,45E+06	6,59E+06
2012	2,70E+05	1,95E+05	6,21E+06	4,04E+06	7,32E+06
2013	2,84E+05	2,06E+05	7,09E+06	4,61E+06	8,01E+06
2014	2,90E+05	2,10E+05	7,98E+06	5,19E+06	8,66E+06
2015	3,00E+05	2,17E+05	8,85E+06	5,75E+06	9,26E+06
2016	3,10E+05	2,24E+05	9,71E+06	6,31E+06	9,84E+06
2017	3,20E+05	2,32E+05	1,06E+07	6,87E+06	1,04E+07
2018	3,30E+05	2,39E+05	1,14E+07	7,43E+06	1,09E+07
2019	3,40E+05	2,46E+05	1,23E+07	7,98E+06	1,14E+07
2020	3,50E+05	2,53E+05	1,31E+07	8,53E+06	1,18E+07
2021	3,60E+05	2,61E+05	1,40E+07	9,08E+06	1,22E+07
2022	3,70E+05	2,68E+05	1,48E+07	9,62E+06	1,26E+07
2023	3,80E+05	2,75E+05	1,56E+07	1,02E+07	1,30E+07
2024	3,90E+05	2,82E+05	1,65E+07	1,07E+07	1,34E+07
2025	4,00E+05	2,90E+05	1,73E+07	1,12E+07	1,37E+07
2026	4,10E+05	2,97E+05	1,81E+07	1,18E+07	1,40E+07
2027	4,20E+05	3,04E+05	1,89E+07	1,23E+07	1,43E+07
2028	4,30E+05	3,11E+05	1,98E+07	1,28E+07	1,46E+07
2029	4,40E+05	3,19E+05	2,06E+07	1,34E+07	1,48E+07
2030	4,50E+05	3,26E+05	2,14E+07	1,39E+07	1,51E+07
2031	4,60E+05	3,33E+05	2,22E+07	1,44E+07	1,53E+07
2032	4,70E+05	3,40E+05	2,30E+07	1,50E+07	1,55E+07
2033	4,80E+05	3,47E+05	2,38E+07	1,55E+07	1,57E+07
2034	4,90E+05	3,55E+05	2,46E+07	1,60E+07	1,59E+07
2035	5,00E+05	3,62E+05	2,55E+07	1,65E+07	1,61E+07
2036	5,10E+05	3,69E+05	2,63E+07	1,71E+07	1,63E+07
2037	5,20E+05	3,76E+05	2,71E+07	1,76E+07	1,64E+07
2038	5,30E+05	3,84E+05	2,79E+07	1,81E+07	1,66E+07
2039	5,40E+05	3,91E+05	2,87E+07	1,86E+07	1,67E+07
2040	5,49E+05	3,97E+05	2,95E+07	1,92E+07	1,68E+07

Annexe 2 : Puissance calorifique et électrique, Volume valorisé, brûlé et stocké, Energie produite et le nombre des moteurs installés.

Année	P calo (GWh)	P ele (GWh)	V val (m3)	V bru (m3)	Stock (m3)	E prod (GWh)	Nb mot
2005	0,0	0,0	0,00E+00	0	0	0,00	0
2006	5,6	1,9	0,00E+00	3,00E+05	2,59E+05	0,00	0
2007	11,5	3,9	0,00E+00	3,00E+05	1,12E+06	0,00	0
2008	17,2	5,9	0,00E+00	3,00E+05	2,55E+06	0,00	0
2009	22,8	7,7	0,00E+00	3,00E+05	4,54E+06	0,00	0
2010	28,3	9,6	0,00E+00	3,00E+05	7,09E+06	0,00	0
2011	34,3	11,7	0,00E+00	3,00E+05	1,02E+07	0,00	0
2012	40,1	13,6	0,00E+00	3,00E+05	1,40E+07	0,00	0
2013	45,8	15,6	0,00E+00	3,00E+05	1,83E+07	0,00	0
2014	51,6	17,5	0,00E+00	3,00E+05	2,32E+07	0,00	0
2015	57,2	19,4	1,38E+06	3,00E+05	2,75E+07	3,26	1
2016	62,8	21,3	2,75E+06	3,00E+05	3,13E+07	6,52	1
2017	68,3	23,2	2,75E+06	3,00E+05	3,57E+07	7,45	1
2018	73,8	25,1	2,75E+06	3,00E+05	4,06E+07	7,45	1
2019	79,3	27,0	5,51E+06	3,00E+05	4,39E+07	14,90	2
2020	84,8	28,8	5,51E+06	0	4,80E+07	14,90	2
2021	90,2	30,7	5,51E+06	0	5,27E+07	14,90	2
2022	95,6	32,5	5,51E+06	0	5,79E+07	14,90	2
2023	101,0	34,3	8,26E+06	0	6,15E+07	22,35	3
2024	106,4	36,2	8,26E+06	0	6,56E+07	22,35	3
2025	111,8	38,0	8,26E+06	0	7,02E+07	22,35	3
2026	117,1	39,8	8,26E+06	0	7,54E+07	22,35	3
2027	122,4	41,6	1,10E+07	0	7,89E+07	29,80	4
2028	127,7	43,4	1,10E+07	0	8,29E+07	29,80	4
2029	133,0	45,2	1,10E+07	0	8,75E+07	29,80	4
2030	138,3	47,0	1,10E+07	0	9,26E+07	29,80	4
2031	143,5	48,8	1,38E+07	0	9,60E+07	37,25	5
2032	148,8	50,6	1,38E+07	0	9,99E+07	37,25	5
2033	154,0	52,4	1,38E+07	0	1,04E+08	37,25	5
2034	159,2	54,1	1,38E+07	0	1,09E+08	37,25	5
2035	164,5	55,9	1,65E+07	0	1,13E+08	44,70	6
2036	169,7	57,7	1,65E+07	0	1,17E+08	44,70	6
2037	174,9	59,4	1,65E+07	0	1,21E+08	44,70	6
2038	180,0	61,2	1,65E+07	0	1,26E+08	44,70	6
2039	185,2	63,0	1,65E+07	0	1,31E+08	44,70	6
2040	190,4	64,7	1,65E+07	0	1,37E+08	44,70	6

Annexe 3 : Quantité réduite de CO₂, l'éclairage public avec SDL, Besoin d'électricité garanti par la décharge, l'excès d'électricité lors d'un ajout des autres moteurs.

Année	RE (TeqCO ₂)	SDL (GWh)	Besoin d'ele	Excès d'E (GWh)
2005			0,00%	0,00
2006			0,00%	0,00
2007			0,00%	0,00
2008			0,00%	0,00
2009			0,00%	0,00
2010			0,00%	0,00
2011			0,00%	0,00
2012			0,00%	0,00
2013			0,00%	0,00
2014		28,22	0,00%	0,00
2015	1,21E+04	29,59	11,01%	0,00
2016	4,42E+04	32,68	19,95%	0,00
2017	4,42E+04	34,49	21,60%	0,00
2018	4,42E+04	32,11	23,20%	0,00
2019	8,40E+04	29,11	51,17%	0,00
2020	7,97E+04	25,59	58,23%	0,00
2021	7,97E+04	21,53	69,20%	0,00
2022	7,97E+04	22,59	65,95%	0,00
2023	1,19E+05	23,65	94,49%	0,00
2024	1,19E+05	24,71	90,43%	0,00
2025	1,19E+05	25,77	86,71%	0,00
2026	1,19E+05	26,83	83,28%	0,00
2027	1,59E+05	27,89	106,82%	2,03
2028	1,59E+05	28,96	102,91%	0,87
2029	1,59E+05	30,02	99,27%	0,00
2030	1,59E+05	31,08	95,89%	0,00
2031	1,99E+05	32,14	115,90%	5,92
2032	1,99E+05	33,20	112,20%	4,54
2033	1,99E+05	34,26	108,73%	3,25
2034	1,99E+05	35,32	105,46%	2,44
2035	2,39E+05			
2036	2,39E+05			
2037	2,39E+05			
2038	2,39E+05			
2039	2,39E+05			
2040	2,39E+05			

Année Universitaire : 2017-2018

Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom : BOUAICHE ZAKARIA

Titre : La modélisation de la production du biogaz à partir des déchets solides et la valorisation de cette production en énergie électrique.

Résumé :

Compte tenu de la situation énergétique de Maroc, où ses principales sources d'énergie proviennent de l'énergie hydroélectrique et thermique des combustibles fossiles, il est important de considérer d'autres sources d'énergie telles que le biogaz.

La récupération de biogaz est un système de gestion des déchets solides qui aboutit à une utilisation appropriée et durable des déchets qui ne peuvent être recyclés ou réutilisés efficacement. Ce rapport décrit les différentes étapes de production et valorisation du biogaz par les déchets de la décharge contrôlée de Fès.

La décharge de Fès est la première décharge contrôlée du Maroc. Elle reçoit 750 à 1000 tonnes de déchets par jour. L'exploitation est assurée par le groupe ECOMED, spécialisé dans le traitement en la valorisation des déchets solides. La décharge dispose d'un réseau de collecte de biogaz, d'une unité de soutirage de ce biogaz, d'une torchère fermée et d'un générateur électrique. Actuellement la puissance produite (1.063 MW) au sein de la décharge couvre environ de 30% des besoins en éclairage public de la ville de Fès. Cependant, une puissance de 5 MW est prévue à long terme alors que les besoins en éclairage public de la ville de Fès sont de l'ordre de 3,5 MW.

Mots clés : Déchets, Décharge, Méthanisation, Biogaz, Energie Electrique, Gaz à effet de Serre, Eclairage public.

