



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie des Procédés et de l'Environnement  
Filière Génie des Procédés et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état  
en Génie des Procédés et Environnement

Station d'épuration à énergie positive par l'intégration de la digestion  
anaérobie : STEP BENI MERED

BELGACEM Fatima Zohra  
OUNISSI Chalabia Fatima Zohra

Sous la direction de :

M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur à l'ENP
M. Naceur WAHIB	Professeur à université Blida 1
M. Mohammed CHADOULI	Chef de laboratoire de la STEP Beni Mered

Présentées et soutenue publiquement le (06/07/2023) devant le jury composé de :

Président	M .KERCHICH Yacine	Professeur à l'ENP
Examinatrice	Mme. DJELLOULI Naima	Maitre de conférences B à l'ENP
Encadreur	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur à l'ENP
Encadreur	M. Naceur WAHIB	Professeur à université Blida1





المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



الديوان الوطني للتطهير  
Office National de l'Assainissement

Département de Génie des Procédés et de l'Environnement  
Filière Génie des Procédés et Environnement

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état  
en Génie des Procédés et Environnement

Station d'épuration à énergie positive par l'intégration de la digestion  
anaérobie : STEP BENI MERED

BELGACEM Fatima Zohra  
OUNISSI Chalabia Fatima Zohra

Sous la direction de :

M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur à l'ENP
M. Naceur WAHIB	Professeur à université Blida 1
M. Mohammed CHADOULI	Chef de laboratoire de la STEP Beni Mered

Présentées et soutenue publiquement le (06/07/2023) devant le jury composé de :

Président	M .KERCHICH Yacine	Professeur à l'ENP
Examinatrice	Mme. DJELLOULI Naima	Maitre de conférences B à l'ENP
Encadreur	M. Abdelmalek CHERGUI	Professeur à l'ENP
Encadreur	M. Naceur WAHIB	Professeur à université Blida1

# *Dédicaces*

*A ma famille ;*

*A tous mes ami (e)s et collègues ;*

*Et à toutes les personnes qui me tiennent à  
cœur, Merci*

*Fatima*

*A ma famille ;*

*A tous mes ami (e)s et collègues ;*

*Et à toutes les personnes qui me tiennent à  
cœur, Merci*

*Chalabia*

# *Remerciements*

*Nous tenons tout d'abord à remercier tous ceux qui nous ont aidés à réaliser ce travail. Nos remerciements s'adressent en premier lieu à nos, à nos promoteurs Ms. Abdelmalek CHERGUI et Ms. M. Naceur WAHIB pour leurs orientations et leur écoute.*

*Nous tenons aussi à remercier sincèrement notre tuteur de l'entreprise Amenhyd Mr. Abdelkader MEKLATI chef département étude process, et notre tuteur de l'entreprise ONA Blida Mr. Mohammed CHADOULI Chef de laboratoire de la STEP Beni Mered qui sont toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer.*

*Nous tenons à remercier avec plus grande gratitude KERCHICH Yacine, Professeur à l'ENP, pour l'honneur qu'il nous a accordé en acceptant de présider notre jury de ce travail. Nous remercions aussi, Mme. DJELLOULI Naima, Enseignant à l'Ecole National Polytechnique d'Alger d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Sans oublier nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*Merci à toutes et à tous.*

## الملخص

يقدم هذا البحث مشروعًا لمحطة لمعالجة مياه الصرف الصحي ذات طاقة إيجابية باستخدام الهضم اللاهوائي. يشتمل البحث على دراسة للأدبيات والمفاهيم النظرية وتصميم منشأة للهضم اللاهوائي مدمجة في محطة موجودة. يسلط البحث الضوء على فوائد ربط الهضم اللاهوائي والهضم الهوائي وإنتاج الغاز الحيوي. تم تطوير واجهة حاسبة تسمح بتوقع قدرة إنتاج الغاز الحيوي. تشير النتائج إلى أن تكامل المنشأة يمكن أن يغطي 12-15٪ من احتياجات الطاقة للمحطة. في الختام، يعزز هذا المشروع الانتقال الطاقوي لمحطات معالجة المياه عن طريق نهج بيئي واقتصادي. **الكلمات الرئيسية:** محطة معالجة مياه الصرف الصحي، طاقة إيجابية، هضم غير هوائي، تحجيم، غاز حيوي، طاقة متجددة.

## Abstract

This thesis presents a project on a positive energy wastewater treatment plant through anaerobic digestion. It covers the state of the art, theoretical concepts, and dimensioning of an anaerobic digestion facility integrated into an existing plant. The study highlights the benefits of coupling aerobic and anaerobic digestion, as well as biogas production. The developed calculator interface predicts biogas production capacity. Results indicate that integrating the facility could meet 12 to 15% of the plant's energy needs. In conclusion, this project promotes the energy transition of wastewater treatment plants through an environmentally and economically sustainable approach

**Keywords:** Wastewater treatment, positive energy, anaerobic digestion, sizing, biogas, renewable energy.

## Résumé

Ce mémoire présente un projet de station d'épuration à énergie positive en utilisant la digestion anaérobie. Il aborde l'état de l'art, les notions théoriques et le dimensionnement d'une installation de digestion anaérobie intégrée à une station existante. L'étude met en évidence les avantages du couplage de la digestion aérobie et anaérobie, ainsi que la production de biogaz. L'interface calculatrice développée permet de prédire la capacité de production de biogaz. Les résultats montrent que l'intégration de l'installation pourrait couvrir 12 à 15 % des besoins énergétiques de la station. En conclusion, ce projet favorise la transition énergétique des stations d'épuration grâce à une approche écologique et économique.

**Mots-clés :** Station d'épuration, énergie positive, digestion anaérobie, dimensionnement, biogaz, énergie renouvelable.

# Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale .....	13
Chapitre 01 : l'état de l'Art de la digestion anaérobie .....	17
Introduction.....	18
1.1. Etat de l'art de la digestion anaérobie en tant que procédé .....	18
1.2. Etat de l'art des installations de la digestion anaérobie dans le monde .....	20
1.3. Etat de l'art de la digestion anaérobie en Algérie .....	20
1.4. Valorisation énergétique des boues d'épuration en Algérie : une approche durable pour la gestion des déchets.....	21
1.5. La réglementation mondiale en matière d'assainissement et de gestion des boues d'épuration.....	23
Conclusion.....	23
Chapitre 02 : Fondements théoriques du traitement des boues des stations d'épuration.....	24
Introduction.....	25
2.1. Les processus de traitement des eaux usées .....	25
2.1.1. Les étapes de traitement des eaux usées .....	25
2.1.2. Les types des stations d'épuration .....	26
2.2. Les processus de traitement des boues des stations d'épuration.....	26
2.2.1. Caractérisation de la matière organique dans la boue .....	26
2.2.2. Types des boues .....	27
2.2.3. Risques sanitaires (infectieux, toxiques, écotoxiques) et écologiques des boues .....	27
2.2.4. Traitement des boues .....	28
2.3. Étude de stabilisation des boues en tant que procédés de traitement et valorisation : .....	29

2.3.1. Le couplage des deux méthodes de stabilisation .....	29
2.4. L'élimination ou la valorisation des boues : .....	30
Conclusion .....	31
Chapitre 03 : Fondements théoriques de la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration.....	32
Introduction.....	33
3.1. Définition de la digestion anaérobie .....	33
3.2. Les différentes étapes de la digestion anaérobie .....	33
3.3. Les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie .....	35
3.4. Les types de substrats digestibles .....	35
3.5. Les produits finaux de la digestion anaérobie .....	36
3.6. Les facteurs influençant le processus de digestion anaérobie.....	36
3.6.1. Les conditions optimales de la digestion anaérobie .....	37
3.7. Les différents modes de mise en œuvre de la digestion anaérobie .....	38
3.7.1. Les modes de fonctionnement en fonction de la température .....	38
3.7.2. Les modes de fonctionnement en fonction de mode d'alimentation de digesteur.....	39
3.8. Études antérieures sur la digestion anaérobie des boues des STEP .....	39
3.8.1. Revue des études antérieures sur la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration .....	39
3.8.2. Analyse des résultats et des principales conclusions des études antérieures .....	41
3.8.3. Identification des lacunes ou des aspects nécessitant une amélioration ...	42
3.9. Les digesteurs .....	43
3.9.1. Types de digesteurs anaérobies .....	43
3.9.2. Les formes des digesteurs.....	45
3.9.3. Les critères de choix de type de l'installation :.....	46
3.10. Technologie des digesteurs et leur principe de conception et de fonctionnement .....	46
3.10.1. Alimentation des digesteurs .....	46

3.10.2.	Le digesteur : Maintien des conditions optimales .....	47
3.10.3.	L'extraction des boues .....	48
3.10.4.	Construction de la cuverie : .....	49
3.10.5.	Brassage des digesteurs .....	50
3.10.6.	Chauffage et régulation de la température.....	55
3.10.7.	Stockage et utilisation du biogaz .....	60
3.11.	Prétraitement des boues pour la digestion anaérobie .....	62
3.12.1.	Composition du biogaz produit .....	63
3.12.2.	Potentiel de production de biogaz des boues d'épuration.....	64
3.12.3.	Valorisation du biogaz produit : .....	65
	Conclusion .....	66
	Chapitre 04 : Présentation de la STEP de Beni Mered .....	67
	Introduction.....	68
4.2.	Présentation de la STEP de Beni Mered .....	68
4.2.1.	Description générales sur la STEP .....	68
4.2.2.	Exploitation de la STEP : .....	73
4.2.3.	Prélèvement Et Echantillonnage .....	85
	Conclusion.....	86
	Chapitre 05 : Conception d'une installation de digestion anaérobie pour la STEP de Beni Mered.....	87
	Introduction.....	88
5.1.	Collecte des données de la STEP de Beni Mered .....	88
5.1.1.	Méthodologie : .....	88
5.1.2.	Analyse des données.....	89
5.1.3.	Les besoins de l'installation .....	91
5.2.	Contraintes techniques, économiques et environnementales.....	92
5.3.	Choix des techniques et des équipements .....	93
5.3.1.	Les équipements.....	93
5.3.2.	Choix de la typologie du digesteur.....	95

5.4. Modélisation anaérobie par bilan matière de la digestion .....	98
5.4.1. Cinétique biologique de la digestion anaérobie .....	98
5.4.2. Bilan de matière organique : .....	99
5.5. Dimensionnement de l'installation de digestion anaérobie .....	102
5.5.1. Équations de dimensionnement du digesteur .....	102
5.5.2. Les dimensions de digesteurs : .....	103
5.5.3. Équations de dimensionnement du gazomètre .....	104
5.5.4. Résultats de dimensionnement .....	105
5.5.5. Interprétation et recommandation : .....	110
5.6. Description technique de l'installation proposée pour Beni Mered.....	110
5.6.1 Localisation de l'installation .....	111
5.6.2. Les sections de l'unité de traitement .....	112
5.6.2.1. Section 1 : Alimentation, digestion et extraction .....	113
5.6.2.2. Section 2 : Brassage au biogaz .....	116
5.6.2.3. Section 3 : Stockage et utilisation du biogaz .....	118
5.6.2.4. Section 4 : Chauffage de la digestion.....	121
5.7. Les risques d'installation et préventions.....	124
5.7.1. La mise en place de mesures de sécurité adéquates .....	125
Conclusion .....	126
Chapitre 06 : Développement d'outils de dimensionnement .....	127
Introduction.....	128
6.1. Description de l'interface.....	128
6.1.1. Développement et exécution de l'interface .....	129
6.1.2. Discussion de l'aspect visuel et de l'ergonomie de l'interface .....	129
6.1.3. Fonctionnalités de l'interface .....	130
6.1.4. Tests et validation .....	134
6.2. Limitations et perspectives : .....	135
6.2.1. Limitations de l'interface : .....	135
6.2.2. Perspectives d'amélioration et d'extension : .....	135

Conclusion.....	136
Conclusion générale.....	137
Références bibliographiques .....	139
Les sites web.....	142
Annexes.....	143
Annexe 1 : Des images représentatifs d'exécution de l'interface.....	144
Annexe 2 : exécution de validation des calculs de l'interface.....	149
Annexe 3 : l'espace disponible pour l'intégration de l'installation dans la station	150
L'espace nécessaire pour une installation avec un digesteur, un gazomètre et un	
département de chauffage et brassage.....	150
Annexe 4 : Principe des vases communicants .....	151
Annexe 5 : Schéma de fonctionnement de cannes de brassage.....	152
Annexe 6 : Schéma représentatif des sections d'installation en P&ID (piping and	
instrument diagram) .....	153
Annexe 8 : schéma représentatif de la chaine des procédés de traitement des boues	
.....	155
Annexe 9 : les différentes étapes de la digestion anaérobie et les flux de carbones	
associés (en % de DCO).....	156

# Liste des tableaux

<i>TABLEAU 1 RISQUES SANITAIRES (INFECTIEUX, TOXIQUES, ÉCOTOXIQUES) ET ÉCOLOGIQUES DES BOUES(DARZY ET AL. 2002)</i>	<i>28</i>
<i>TABLEAU 2 COMPARAISON ENTRE LES DEUX TYPES DE DIGESTION (MERABET 2008)</i>	<i>29</i>
<i>TABLEAU 3 LES AVANTAGES ET LES INCONVÉNIENTS DE LA DIGESTION ANAÉROBIE</i>	<i>35</i>
<i>TABLEAU 4 LES CONDITIONS OPTIMALES DE LA DIGESTION ANAÉROBIE (BENYAHIA 2012)</i>	<i>37</i>
<i>TABLEAU 5 COMPARAISON ENTRE BIOGAZ ET G.N.(BOUCHAREB, MENEL; KADDECHE 2019)</i>	<i>64</i>
<i>TABLEAU 6 APPLICATIONS ET AVANTAGES DE L'UTILISATION DU BIOGAZ DANS LES INSTALLATIONS DE TRAITEMENT DES EAUX USEES (HAOUAM, SALAH EDDINE ET HASSAINE 2020)(RAHMANI, ABDRAHI, TAYEBI, HACHEMI 2016)</i>	<i>65</i>
<i>TABLEAU 7 : DONNÉES DE BASE DE LA STEP DE BÉNI MERED</i>	<i>73</i>
<i>TABLEAU 8 CARACTERISTIQUE DIMENSIONNELLES ET FONCTIONNELLE DU DECANTEUR PRIMAIRE</i>	<i>75</i>
<i>TABLEAU 9 CARACTERISTIQUE DIMENSIONNELLES DU BASSIN D'AERATION</i>	<i>76</i>
<i>TABLEAU 10 CARACTERISTIQUES DES CLARIFICATEURS</i>	<i>77</i>
<i>TABLEAU 11 CARACTERISTIQUES DIMENSIONNELLES ET FONCTIONNELLES DE L'OUVRAGE DE DESINFECTION</i>	<i>78</i>
<i>TABLEAU 12 LES DONNEES DE CARACTERISATION DE LA BACHE DE MELANGE</i>	<i>80</i>
<i>TABLEAU 13 CARACTERISTIQUES D'ÉPAISSISSEUR GRAVITAIRE</i>	<i>81</i>
<i>TABLEAU 14 LES CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS DE STABILISATION AÉROBIE</i>	<i>82</i>
<i>TABLEAU 15 CARACTERISTIQUES DES FILTRES A BANDE</i>	<i>83</i>
<i>TABLEAU 16 PREPARATION DE POLYMERES</i>	<i>84</i>

# Liste des figures

<i>FIGURE 1 DIFFERENTES GEOMETRIES DE DIGESTEUR DE BOUES D'EPURATION (METHANISATION DES BOUES DE STATIONS : REGLE DE L'ART ET ETAT DES LIEUX SUR LES BASSINS RHONE-MEDITERRANEE ET CORSE 2012)</i>	45
<i>FIGURE 2 LES TYPES DE BRASSAGE</i>	51
<i>FIGURE 3 SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UN POT DE PURGE</i>	53
<i>FIGURE 4 LES DIFFERENTS TYPES DE CHAUFFAGE</i>	57
<i>FIGURE 5 SCHEMA REPRESENTATIF DE PRINCIPE DE CHAUFFAGE DES BOUES DANS L'ECHANGEUR</i>	60
<i>FIGURE 6 SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE LA GARDE HYDRIQUE</i>	62
<i>FIGURE 7 HISTOGRAMME DE VARIATION DE PRODUCTION DES BOUES MENSUELLE ,2015</i>	70
<i>FIGURE 8 HISTOGRAMMES DE VARIATION DE PRODUCTION DES DÉCHETS MENSUELLE ,2015</i>	71
<i>FIGURE 9 PRÉSENTATION DES POURCENTAGES DES DIFFÉRENTS DÉCHETS GÉNÉRÉ À LA STATION ANNUELLEMENT, 2015</i>	71
<i>FIGURE 10 LES DÉFÉRENTES MATIÈRES ORGANIQUES ENVOYÉES À LA BÂCHE DE MÉLANGE</i>	80
<i>FIGURE 11 VARIATIONS DES CONCENTRATIONS EN MES AU COURS DE PROCESSUS DE TRAITEMENT DE LA STEP DE BENI MERED</i>	89
<i>FIGURE 12 VARIATIONS DE LA QUANTITE DES BOUES AU COUR DE TRAITEMENT</i>	90
<i>FIGURE 13 VARIATIONS DE TAUX DES MVS LORS DE TRAITEMENT</i>	90
<i>FIGURE 14 CONSOMMATION ENERGETIQUE DES EQUIPEMENTS DE LA STATION</i>	91
<i>FIGURE 15 LA VUE AÉRIENNE</i>	111
<i>FIGURE 16 SCHÉMA FONCTIONNEL DE LA STATION</i>	112
<i>FIGURE 17REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES 4 SECTIONS DE L'UNITÉ DE TRAITEMENT</i>	113
<i>FIGURE 18 UNE VASQUE D'ALIMENTATION</i>	115
<i>FIGURE 19 SCHÉMA DE L'ÉVACUATION DU BIOGAZ ET LE SCHÉMA DE L'ARRIVÉE DU BIOGAZ</i>	118
<i>FIGURE 20 PRINCIPE DES VASES COMMUNICANTS</i>	151
<i>FIGURE 21 INFLUENCE DE LA PRESSION</i>	151
<i>FIGURE 22 SCHEMA DE LA DISPOSITION DES CANNES DE BRASSAGE (VUE DE DESSUS), SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE CANNES DE BRASSAGE (VUE DE COTE)</i>	152

# Liste des abréviations

C/N	rapport carbone/azote
Csa	Classification de Köppen-Geiger pour le climat
DBO <sub>5</sub>	Demande biologique en oxygène
DCO	Demande chimique en oxygène
Eq.H	Équivalent habitant
G.N	Gaz naturel
Kg DBO <sub>5</sub> /Kg MVS /j	Kilogramme de Demande Biochimique en Oxygène sur 5 jours par kilogramme de Matières Volatiles en Suspension par jour
MES	Matière en suspension
MS	Matière Sèche
MVS	Matières Volatiles en Suspension
NTK	Azote total Kjeldahl
ONA	Office National de l'Assainissement
PR	Poste de relevage
PB	Prélèvement Brut
STEP	Station d'Épuration des Eaux Usées
TRH	temps de rétention hydraulique

# Introduction générale

La problématique d'optimisation de l'efficacité énergétique des stations d'épuration en Algérie en intégrant la digestion anaérobie, afin de transformer ces installations en stations d'épuration à énergie positive vise à répondre aux enjeux environnementaux et économiques liés à la gestion des boues d'épuration, tout en contribuant à la transition énergétique et à la durabilité des ressources.

La mise en place d'une station d'épuration à énergie positive par l'intégration de la digestion anaérobie présente plusieurs avantages. Tout d'abord, cette approche permet de réduire significativement la consommation d'électricité de la station d'épuration, voire de la rendre positive en produisant plus d'énergie qu'elle n'en consomme. Ainsi, la gestion des boues devient une opportunité pour produire de l'énergie renouvelable, contribuant ainsi à la réduction de l'empreinte carbone et à la transition vers des sources d'énergie durables. De plus, la digestion anaérobie permet de valoriser les déchets organiques présents dans les eaux usées en les transformant en biogaz, une source d'énergie propre, et en digestat, un fertilisant riche en nutriments. Cette double valorisation des déchets organiques offre des opportunités pour l'agriculture et d'autres utilisations, contribuant ainsi à une gestion circulaire des ressources et à la réduction des déchets.

En optimisant l'efficacité énergétique des stations d'épuration grâce à la digestion anaérobie, on vise également à améliorer leur autonomie énergétique. En réduisant la dépendance vis-à-vis du réseau électrique, ces installations deviennent plus résilientes aux fluctuations des prix de l'électricité et aux pannes de courant, assurant ainsi une continuité de service essentielle pour la préservation de l'environnement et la santé publique. Cependant, cette transition vers des stations d'épuration à énergie positive ne se fait pas sans défis. Il est essentiel de mener une analyse approfondie des caractéristiques des boues produites, des différentes filières de traitement disponibles et de leurs impacts environnementaux. Il convient également de s'assurer de la conformité du biogaz et du digestat produits aux normes internationales en termes de qualité et de sécurité.

Ainsi, la problématique centrale de ce projet consiste à trouver les moyens les plus efficaces d'intégrer la digestion anaérobie dans les stations d'épuration en Algérie, en mettant l'accent sur l'optimisation énergétique et la valorisation des boues d'épuration. L'objectif ultime est de fournir des orientations stratégiques aux acteurs concernés pour une gestion durable des boues d'épuration, en maximisant leur valorisation tout en minimisant leur impact sur l'environnement.

## Contexte :

Dans le cadre de la préservation de l'environnement et de la gestion durable des ressources, la gestion des boues d'épuration constitue un défi majeur en Algérie, ainsi que dans de nombreux pays. Les stations d'épuration, essentielles au traitement des eaux usées, génèrent inévitablement des boues d'épuration, ce qui présente des difficultés croissantes pour les municipalités. Face à l'augmentation continue du volume de ces boues, résultant de la croissance démographique et de l'urbanisation, il est impératif de trouver des solutions innovantes et durables pour leur gestion.

Actuellement, diverses options d'élimination des boues existent, mais le choix doit tenir compte du coût, de l'origine des boues, de la valeur ajoutée des produits issus du traitement et de leur impact sur l'environnement. Les méthodes traditionnelles telles que l'enfouissement en décharge sont peu valorisantes et souvent interdites dans de nombreux pays, tandis que l'incinération présente des risques environnementaux et un coût élevé. La valorisation énergétique des boues par le biais de la digestion anaérobie offre une solution prometteuse. Ce processus biologique permet la dégradation des matières organiques présentes dans les boues en l'absence d'oxygène, générant ainsi du biogaz riche en méthane. Ce biogaz peut être utilisé comme source d'énergie renouvelable, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles et contribuant à la transition énergétique vers des solutions plus durables.

Le projet vise à étudier et à mettre en œuvre une solution novatrice pour la valorisation énergétique des boues d'épuration dans la station d'épuration de Béni Mered en Algérie. Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- ✚ Intégrer efficacement la digestion anaérobie dans la station d'épuration de Béni Mered afin de la transformer en une station d'épuration à énergie positive.
- ✚ Évaluer la faisabilité technique de la production de biogaz à partir des boues d'épuration de la station.
- ✚ Quantifier les avantages environnementaux de la valorisation énergétique des boues par rapport aux méthodes traditionnelles d'élimination.

## Plan de travail :

Ce mémoire de fin d'étude aborde la valorisation énergétique des boues par digestion anaérobie en Algérie à travers plusieurs chapitres. Voici un aperçu du plan de travail :

Le premier chapitre présente un état de l'art sur la digestion anaérobie en tant que procédé, les installations existantes dans le monde, la situation de la digestion anaérobie en Algérie, les avancées du pays dans le domaine de l'assainissement, la valorisation énergétique des boues d'épuration en Algérie, et la réglementation mondiale en matière d'assainissement et de gestion des boues d'épuration.

Le deuxième chapitre explore les processus de traitement des eaux usées, les différentes étapes de traitement, les types de stations d'épuration, les processus de traitement des boues issues des stations d'épuration, la caractérisation de la matière organique présente dans les boues, les différents types de boues, les risques sanitaires et écologiques associés, ainsi que les méthodes de traitement des boues.

Le troisième chapitre se concentre sur la digestion anaérobie, en définissant le processus, en expliquant ses différentes étapes, en discutant de ses avantages et inconvénients, en examinant les types de substrats pouvant être digérés, les produits finaux de la digestion anaérobie, ainsi que les facteurs influençant ce processus. Il présente également des études antérieures portant sur la digestion anaérobie des boues d'épuration.

Le quatrième chapitre présente les entreprises impliquées dans l'étude, en particulier l'entreprise AMENHYD et la station d'épuration de Beni Mered. Il décrit leurs activités respectives, ainsi que les procédures de collecte et d'échantillonnage des données.

Le cinquième chapitre se focalise sur la conception d'une installation de digestion anaérobie spécifique pour la station d'épuration de Beni Mered. Il aborde la collecte des données provenant de cette station, les contraintes techniques, économiques et environnementales, le choix des techniques et équipements, la modélisation de la digestion anaérobie par bilan matière, le dimensionnement de l'installation, ainsi qu'une description technique détaillée de la proposition.

Le sixième chapitre présente une interface informatique développée pour faciliter le dimensionnement de l'installation de digestion anaérobie. Il décrit les fonctionnalités de l'interface, discute de son aspect visuel et de son ergonomie, et présente les résultats des tests et de la validation. Il met également en évidence les limitations de l'interface et propose des perspectives d'avenir.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principales conclusions de l'étude et souligne les perspectives futures dans le domaine de la valorisation énergétique des boues par digestion anaérobie en Algérie.

# Chapitre 01 : l'état de l'Art de la digestion anaérobie

# Introduction

Dans de nombreux pays, la digestion anaérobie est considérée comme une méthode efficace pour la valorisation énergétique des boues d'épuration. Elle permet non seulement de réduire les coûts de traitement des boues, mais aussi de générer des revenus grâce à l'exploitation d'énergie produite. De plus, la digestion anaérobie contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en évitant la libération de méthane dans l'atmosphère. Dans certains pays, la digestion anaérobie est également utilisée pour le traitement des déchets organiques autres que les boues d'épuration, tels que les déchets alimentaires et agricoles. Cette approche permet une valorisation plus globale des matières organiques et favorise la transition vers une économie circulaire et durable.

## 1.1. Etat de l'art de la digestion anaérobie en tant que procédé

La digestion anaérobie est une technique de valorisation énergétique des boues d'épuration. L'état de l'art de cette technique témoigne des progrès significatifs réalisés dans la compréhension et l'application de cette technologie prometteuse. La digestion anaérobie, processus biologique de dégradation des matières organiques en l'absence d'oxygène, permet de transformer les boues d'épuration en biogaz riche en méthane, une source d'énergie renouvelable.

Une des avancées majeures de la digestion anaérobie réside dans la caractérisation des boues d'épuration et leur adaptation aux conditions optimales pour le processus. Des études approfondies ont été menées pour comprendre la composition des boues, en termes de matières organiques, de nutriments et de contaminants. Cela a permis d'optimiser les paramètres de la digestion anaérobie tels que la température, le pH, la charge organique et la durée de rétention hydraulique, afin d'obtenir une production maximale de biogaz. De plus, des recherches ont été menées sur les différentes configurations de réacteurs utilisées pour la digestion anaérobie, notamment les réacteurs à voie liquide (continus ou discontinus), les réacteurs à voie sèche (lits fluidisés ou digesteurs en phases solide/liquide), ainsi que les systèmes hybrides combinant plusieurs types de réacteurs. Ces études ont permis de mieux comprendre les performances de chaque configuration en termes d'efficacité de la digestion, de production de biogaz et de stabilité du processus. (MOLETTA 2008)

Les avancées technologiques dans la surveillance et le contrôle des installations de digestion anaérobie ont également contribué à améliorer l'efficacité et la fiabilité de

ce processus. L'utilisation de capteurs avancés, de systèmes de surveillance en ligne et de modèles prédictifs permet de surveiller en temps réel les paramètres clés de la digestion et les indicateurs de stabilité du processus. Cela permet une gestion proactive des installations et une optimisation des performances. Par ailleurs, la valorisation des produits dérivés de la digestion anaérobie a également fait l'objet de nombreuses recherches. Le biogaz produit peut être utilisé pour la production d'électricité, de chaleur ou comme carburant pour les véhicules. De plus, la digestion anaérobie permet de produire un digestat, un résidu riche en éléments nutritifs, qui peut être utilisé comme fertilisant agricole ou comme amendement organique pour améliorer la qualité des sols. (MOLETTA 2008)

Il convient de souligner que malgré les nombreux avantages de la digestion anaérobie, des défis persistent. Des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité énergétique du processus, réduire les coûts de mise en œuvre, optimiser la gestion des sous-produits (comme les digestats) et minimiser les risques environnementaux potentiels, tels que les émissions de gaz à effet de serre et les polluants associés. De plus, des efforts sont déployés pour optimiser la gestion des résidus solides issus de la digestion anaérobie, tels que les déchets inertes ou les sous-produits non valorisables. En termes de recherche et développement, des études sont en cours pour explorer de nouvelles approches et technologies afin d'améliorer l'efficacité et la rentabilité de la digestion anaérobie. Parmi ces avancées, on compte l'utilisation de prétraitements pour augmenter la biodégradabilité des boues, l'intégration de réacteurs à haute performance et de technologies de récupération de chaleur pour maximiser la production d'énergie, ainsi que l'exploration de substrats alternatifs pouvant être codigérés avec les boues d'épuration.

Enfin, des efforts de normalisation et de réglementation sont en cours pour encadrer et promouvoir la digestion anaérobie en tant que solution durable de valorisation énergétique des boues d'épuration. Des normes et des directives sont élaborées pour garantir la qualité du biogaz produit, la sécurité des installations et la conformité environnementale. Ces initiatives visent à encourager l'adoption de la digestion anaérobie à plus grande échelle, tant dans le secteur municipal que dans l'industrie.

## 1.2. Etat de l'art des installations de la digestion anaérobie dans le monde

La digestion anaérobie est une technologie bien établie et largement utilisée dans le monde entier pour le traitement des déchets organiques. Les principales applications de la digestion anaérobie comprennent le traitement des eaux usées, la production de biogaz, la gestion des déchets organiques municipaux et industriels, et la production d'engrais organiques. (REVERDY, FERSTLER, BAUDEZ 2020)

En Europe, la digestion anaérobie est une technologie très répandue pour le traitement des eaux usées et la production de biogaz. L'Allemagne est l'un des principaux pays utilisant la digestion anaérobie pour la production de biogaz à partir de déchets agricoles, alimentaires et industriels. La France, le Royaume-Uni et les Pays-Bas sont également des acteurs importants dans le domaine de la digestion anaérobie en Europe. (REVERDY, FERSTLER, BAUDEZ 2020)

En Amérique du Nord, la digestion anaérobie est principalement utilisée pour le traitement des eaux usées, mais elle gagne également en popularité pour la production de biogaz à partir de déchets organiques municipaux et industriels. Les États-Unis sont le leader mondial de la production de biogaz à partir de déchets organiques, avec une augmentation significative du nombre de projets de production de biogaz ces dernières années. (REVERDY, FERSTLER, BAUDEZ 2020)

En Asie, la Chine est le principal utilisateur de la digestion anaérobie pour le traitement des eaux usées et la production de biogaz à partir de déchets agricoles. Le Japon et la Corée du Sud ont également des programmes de digestion anaérobie bien établis pour la production de biogaz.

En Afrique et en Amérique latine, la digestion anaérobie est encore relativement peu utilisée, bien qu'elle soit de plus en plus reconnue comme une technologie prometteuse pour la gestion des déchets organiques et la production d'énergie renouvelable.

## 1.3. Etat de l'art de la digestion anaérobie en Algérie

L'Algérie a réalisé des progrès significatifs dans le domaine de l'assainissement, visant à préserver l'environnement et à améliorer la santé publique. Elle a fait une expansion du réseau national d'assainissement avec une augmentation notable du taux de raccordement à l'assainissement public. Le pays dispose désormais de 177 stations d'épuration, dont 49 dans les grandes villes côtières, conformément aux objectifs de

l'accord de Barcelone visant à éliminer les rejets d'eaux usées dans la mer. Elle a met aussi d'autres progrès significatifs :

- Programme national d'assainissement (REVERDY, FERSTLER, BAUDEZ 2020)
- Coopération avec l'Union européenne (Ministère des Ressources en Eau 2023)
- Mesures pour une gestion efficace des eaux usées
- Engagement envers le développement durable (Ministère des Ressources en Eau 2023)

En Algérie, la digestion anaérobie est encore une technologie émergente, mais elle commence à être explorée et mise en œuvre pour le traitement des déchets organiques et la production d'énergie renouvelable. Dans le domaine du traitement des eaux usées, plusieurs stations d'épuration en Algérie utilisent la digestion anaérobie comme étape de traitement pour la réduction des boues d'épuration et la production de biogaz. (SEAAAL 2017)

Par exemple, la station d'épuration de BARAKI utilise la digestion anaérobie pour le traitement des boues d'épuration et la production de biogaz qui est ensuite utilisé proportionnellement pour alimenter la station elle-même. En ce qui concerne la valorisation énergétique des déchets organiques, quelques projets pilotes ont été réalisés en Algérie pour la production de biogaz à partir de déchets agricoles et de résidus agro-industriels.(HAOUAM, SALAH EDDINE et HASSAINE 2020)

Cependant, il convient de noter que la digestion anaérobie en Algérie est encore limitée et confrontée à des défis tels que le manque de sensibilisation, les contraintes financières et les lacunes en termes d'expertise technique. Néanmoins, le potentiel de la digestion anaérobie en Algérie est prometteur, compte tenu de la disponibilité des déchets organiques provenant de l'agriculture, de l'industrie agroalimentaire et des eaux usées.

#### 1.4. Valorisation énergétique des boues d'épuration en Algérie : une approche durable pour la gestion des déchets

L'Algérie se positionne comme pionnière dans la valorisation énergétique des boues d'épuration, en exploitant leur potentiel pour produire de l'énergie et les utiliser comme fertilisants dans le secteur agricole. Ces initiatives témoignent de l'engagement du pays envers une approche durable de la gestion des déchets et des ressources,

contribuant ainsi à la préservation de l'environnement et à l'amélioration de la production agricole (LADJEL Farid 2014). On peut décrire cette approche par les points suivants :

1. Exploitation du potentiel énergétique des boues d'épuration : L'Algérie s'est engagée à utiliser les boues générées par le traitement des eaux usées pour produire de l'énergie, en particulier à partir du biogaz, principalement du méthane, contenu dans ces boues. L'Office National de l'Assainissement (ONA) a lancé des initiatives pour produire de la chaleur et de l'électricité à partir de ce biogaz.

2. Installation de digesteurs pour la production de biogaz : Les premières installations de digesteurs ont été mises en place dans les stations d'épuration d'Alger et de Batna, permettant de générer du biogaz à partir des boues. Toutefois, il est nécessaire d'accélérer le déploiement de cette technologie dans les autres stations, identifiées par une étude en partenariat avec l'Union européenne.

3. Utilisation des boues comme fertilisants : En plus de la production d'énergie, les boues d'épuration peuvent être utilisées comme fertilisants dans le secteur agricole. L'ONA a commencé à fournir des engrais issus de la valorisation des boues aux agriculteurs de la région de Tizi Ouzou, et cette pratique devrait s'étendre à d'autres régions du pays.(LADJEL Farid 2014)

4. Cadre réglementaire pour le recyclage des boues : L'ONA a engagé une procédure auprès de l'Institut national de normalisation (IANOR) pour mettre en place un cadre réglementaire encadrant le recyclage des boues dans le secteur agricole.

5. Perspectives d'avenir : Avec la construction prévue d'une soixantaine de nouvelles stations d'épuration dans les prochaines années, l'Algérie vise à augmenter la production de boues et à développer une approche plus durable de la gestion des déchets et des ressources en valorisant ces boues pour la production d'énergie et leur utilisation comme fertilisants.

6. Avancées dans l'utilisation des boues d'épuration : L'état de l'art de la digestion anaérobie en Algérie met en évidence les progrès réalisés dans l'utilisation des boues des stations d'épuration, tant sur le plan énergétique que sur le plan agricole, et les efforts en cours pour développer cette filière industrielle respectueuse de l'environnement dans le pays.(LADJEL Farid 2014)

## 1.5. La réglementation mondiale en matière d'assainissement et de gestion des boues d'épuration

Il est principalement guidé par des normes et des directives internationales. Ces normes visent à promouvoir des pratiques durables, à prévenir la pollution de l'environnement et à protéger la santé publique. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) établit des lignes directrices pour la qualité de l'eau potable et pour la qualité des eaux usées traitées utilisées. Ces directives fournissent des critères et des recommandations pour garantir la sécurité sanitaire de l'eau et des boues traitées. (BLAIS, SASSEVILLE 1996)

L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a également établi des normes et des directives pour l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. Ces directives visent à garantir la sécurité alimentaire et la protection de l'environnement lors de l'utilisation des boues comme fertilisants. Par ailleurs, des accords internationaux, tels que l'Accord de Barcelone, ont été mis en place pour prévenir la pollution marine, y compris les rejets d'eaux usées dans la mer. Ces accords encouragent les pays à adopter des mesures pour le traitement adéquat des eaux usées afin de préserver la qualité des eaux côtières et marines. (Water 2017)

## Conclusion

Ce chapitre a présenté un état de l'art de la digestion anaérobie en tant que procédé, ainsi que des installations de digestion anaérobie à travers le monde. Il a également abordé la situation de la digestion anaérobie en Algérie, mettant en évidence les progrès réalisés dans le domaine de l'assainissement et la valorisation énergétique des boues d'épuration. Enfin, la réglementation mondiale en matière d'assainissement et de gestion des boues d'épuration a été soulignée, mettant en avant l'importance d'une approche durable pour la gestion des déchets.

## Chapitre 02 : Fondements théoriques du traitement des boues des stations d'épuration

# Introduction

Ce chapitre offre une base solide de connaissances pour comprendre les aspects théoriques liés à la digestion anaérobie des boues et fournit une introduction claire aux sujets abordés dans la suite du mémoire. En explorant les différents processus et en identifiant les risques et les opportunités liés aux boues des stations d'épuration, cette partie jettera les bases nécessaires pour examiner plus en détail l'intégration de la digestion anaérobie dans la conception et l'optimisation des installations de traitement des eaux usées. Le potentiel énergétique des boues d'épuration et de contribuer à une production durable de biogaz.

## 2.1. Les processus de traitement des eaux usées

Les stations d'épuration sont des installations conçues pour traiter les eaux usées afin d'en éliminer les polluants et de produire de l'eau propre qui peut être rejetée en toute sécurité dans l'environnement ou utilisée à des fins spécifiques. Ces installations utilisent une combinaison de processus physiques, chimiques et biologiques pour éliminer les matières solides, les contaminants organiques et inorganiques, les nutriments et les micro-organismes pathogènes présents dans les eaux usées.

### 2.1.1. Les étapes de traitement des eaux usées

Les étapes de traitement des eaux usées varient en fonction du type de station d'épuration et des normes réglementaires spécifiques. Chaque étape du processus de traitement des eaux usées est essentielle.

Cependant, les principales étapes impliquées dans le traitement des eaux usées (PAY DRECHSEL, CHRISTOPHER A. SCOTT, LIQA RASCHID-SALLY 2020) :

- Prétraitement
- Traitement primaire
- Traitement biologique
- Traitement avancé
- Traitement des boues
- Désinfection

### 2.1.2. Les types des stations d'épuration

Il existe différents types de stations d'épuration, chacune étant conçue pour répondre à des besoins spécifiques en matière de traitement des eaux usées. Les principaux types de stations d'épuration sont (HAMIDI 2017):

- Stations d'épuration biologiques à boues activées.
- Stations d'épuration à lit bactérien.
- Stations d'épuration à filtres à sable.
- Stations d'épuration à lagunage.
- Stations d'épuration à membrane.
- Stations d'épuration à digestion anaérobie.

## 2.2. Les processus de traitement des boues des stations d'épuration

### 2.2.1. Caractérisation de la matière organique dans la boue

La composition de la matière organique influence directement la production de biogaz ainsi que la qualité des effluents issus de la digestion. Sa caractérisation peut être effectuée grâce à diverses techniques analytiques.(LIU, B., & QIU 2015)

#### 2.2.1.1. Composition de la matière organique dans la boue :

La matière organique dans la boue est généralement composée de différents types de composés organiques tels que les lipides, les protéines, les glucides, les acides nucléiques, les composés phénoliques, les acides gras volatils et les polysaccharides. Ces composés peuvent avoir des structures et des propriétés différentes, ce qui peut affecter leur biodégradabilité et leur contribution à la production de biogaz lors de la digestion anaérobie. La connaissance de la composition de la matière organique dans la boue est donc importante pour comprendre et optimiser le processus de digestion anaérobie.(BAHRI, A. et HOUMANE 1987)

Les principales classes de composés organiques présentes dans la boue sont les protéines, Les lipides, Les glucides, Les acides et les composés humiques. La composition exacte de la matière organique dans la boue peut varier en fonction de différents facteurs, tels que le type de boue, la source de matières premières, la méthode de traitement, etc.(GHANEM, Aline, EINHORN, Jacques, LAURENT, Francois 2006)

### 2.2.1.2. Caractérisation de la matière organique soluble et particulaire dans la boue

Les différentes techniques d'analyse utilisées pour caractériser la matière organique soluble et particulaire dans la boue (STANDARD 2017) :

- Totale de carbone organique (TCO).
- Dosage de carbone organique dissous (DCO).
- Totale de carbone inorganique (TIC).
- Extraction de la matière organique.
- Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).
- Chromatographie liquide à haute performance (HPLC).

### 2.2.2. Types des boues

Il existe différents types de boues générées dans le processus de traitement des eaux usées. Leur composition peut varier en fonction de nombreux facteurs, tels que les caractéristiques des eaux usées traitées, les technologies de traitement utilisées et les conditions spécifiques de chaque station d'épuration. On peut citer quelques-uns des types courants de boues que l'on rencontre (KRAA 2017) :

- Boues primaires.
- Boues biologiques.
- Boues activées.
- Boues digérées.
- Boues d'épaississement.
- Boues de gâteau.

### 2.2.3. Risques sanitaires (infectieux, toxiques, écotoxiques) et écologiques des boues

Les boues peuvent présenter différents risques sanitaires et écologiques, ils peuvent varier en fonction de leur origine, de leur composition et des pratiques de gestion utilisées. Les risques courants associés aux boues sont présenté dans le Tableau 1 (DARSY et al. 2002) suivant :

Tableau 1 Risques sanitaires (infectieux, toxiques, écotoxiques) et écologiques des boues (DARSY et al. 2002)

<b>Risques sanitaires infectieux</b>	<b>Risques sanitaires toxiques</b>	<b>Risques écotoxiques</b>
<p><u>Contamination bactérienne :</u> Les boues peuvent contenir des bactéries pathogènes telles qu'Escherichia coli, Salmonella, Campylobacter, etc., qui peuvent causer des infections gastro-intestinales chez l'homme.</p> <p><u>Risque viral :</u> Certains virus, comme les norovirus ou les rotavirus, peuvent également être présents dans les boues et causer des maladies infectieuses.</p> <p><u>Parasites :</u> Des parasites tels que les vers parasitaires peuvent être présents dans les boues et provoquer des infections chez l'homme.</p>	<p><u>Métaux lourds :</u> Ces métaux peuvent être toxiques pour les organismes vivants et s'accumuler dans la chaîne alimentaire.</p> <p><u>Produits chimiques organiques :</u> Certains produits chimiques toxiques, tels que les pesticides, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les dioxines.</p>	<p><u>Pollution de l'eau :</u> L'épandage de boues non traitées ou mal traitées peut entraîner une pollution des eaux souterraines et des cours d'eau, affectant les écosystèmes aquatiques et la faune.</p> <p><u>Perturbation des sols :</u> L'utilisation de boues contenant des produits chimiques toxiques peut altérer la structure et la fertilité des sols.</p> <p><u>Effets sur la vie aquatique :</u> Les boues riches en nutriments peuvent provoquer une eutrophisation des plans d'eau, ce qui peut entraîner une prolifération excessive d'algues et une réduction de l'oxygène dissous, nuisant à la vie aquatique.</p>

#### 2.2.4. Traitement des boues

Les avancées technologiques permettent aujourd'hui de développer des méthodes plus durables et plus efficaces pour le traitement et la valorisation des boues, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources et à la réduction de l'impact environnemental. (MERABET 2008)

Les principaux procédés du traitement des boues sont l'épaississement, la stabilisation, la déshydratation et le conditionnement. (MERABET 2008)

## 2.3. Étude de stabilisation des boues en tant que procédés de traitement et valorisation :

La stabilisation des boues est une étape clé du traitement des boues générées lors du traitement des eaux usées. L'objectif principal de la stabilisation est de réduire la quantité de matières organiques présentes dans les boues, ce qui permet de minimiser les risques environnementaux et sanitaires associés à leur stockage et à leur élimination. Elle vise également à réduire les odeurs désagréables souvent associées aux boues non traitées. Aussi elle offre une opportunité de valorisation énergétique à partir de la production de biogaz lors de la digestion anaérobie, contribuant ainsi à la durabilité du processus de traitement des boues. (CAMACHO, PATRICIA ET PRÉVOT 2011)

Il existe différentes méthodes de stabilisation des boues, parmi lesquelles la digestion anaérobie et la digestion aérobie sont les plus couramment utilisées. (MERABET 2008) le tableau 2 présente une comparaison entre les deux méthodes :

*Tableau 2 Comparaison entre les deux types de digestion (MERABET 2008)*

<b>Types</b>	<b>Digestion Anaérobie</b>	<b>Digestion Aérobie</b>
<b>Avantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Production de biogaz</li> <li>- Réduction de volume</li> <li>- Destruction des micro-organismes pathogènes</li> <li>- Réduction des odeurs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dégradation rapide des matières organiques ;</li> <li>- Flexibilité des conditions de fonctionnement ;</li> <li>- Contrôle plus facile des odeurs.</li> </ul>
<b>Limites</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exigences de contrôle des conditions ;</li> <li>- Temps de séjour plus long</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Besoin d'apport</li> <li>- Volume des boues non réduit</li> </ul>

### 2.3.1. Le couplage des deux méthodes de stabilisation

Le couplage des deux méthodes de stabilisation, à savoir la digestion anaérobie et la digestion aérobie, en série est une approche intéressante pour optimiser le traitement des boues et en maximiser les avantages. Cette configuration permet de tirer parti des caractéristiques spécifiques de chaque méthode et de surmonter certaines de leurs limitations. Le processus de couplage consiste généralement à traiter les boues

initialement dans un digesteur anaérobie, suivi d'une étape de post-traitement en digestion aérobie. (GEBREEYESSUS, G., MEKONNEN, A., CHEBUDE, Y., ALEMAYEHU 2021)

Les avantages potentiels de ce couplage sont (GEBREEYESSUS, G., MEKONNEN, A., CHEBUDE, Y., ALEMAYEHU 2021) :

- Complémentarité des processus
- Réduction supplémentaire du volume des boues
- Amélioration de la qualité de l'eau traitée
- Flexibilité opérationnelle
- Réduction des odeurs

Cependant, il convient de noter que le couplage des deux méthodes nécessite une conception et une gestion appropriée du système, des essais pilotes et une surveillance continue est nécessaire pour optimiser les performances et maximiser les avantages du couplage en série des deux méthodes de stabilisation. (GEBREEYESSUS, G., MEKONNEN, A., CHEBUDE, Y., ALEMAYEHU 2021)

## 2.4. L'élimination ou la valorisation des boues :

L'élimination ou la valorisation des boues générées dans le processus de traitement des eaux usées est une considération importante pour garantir une gestion durable et respectueuse de l'environnement. Il est important de choisir la méthode d'élimination ou de valorisation des boues en fonction des caractéristiques spécifiques des boues, des réglementations locales, des considérations environnementales et des objectifs de durabilité. (ACTU-ENVIRONNEMENT 2010). Les options courantes pour l'élimination ou la valorisation des boues sont :

### 2.4.1. Élimination en décharge :

L'élimination des boues en les envoyant dans des décharges est une méthode traditionnelle mais de moins en moins utilisée en raison des préoccupations environnementales et de l'espace limité dans les sites d'enfouissement. Cette option est généralement considérée comme une solution de dernier recours.

### 2.4.2. Épandage agricole :

Les boues peuvent être traitées et utilisées comme amendement du sol dans l'agriculture. Les nutriments présents dans les boues peuvent être bénéfiques pour la fertilité des sols, fournissant des éléments nutritifs aux cultures. Cependant, il est

important de respecter les réglementations environnementales pour éviter toute contamination des sols et des eaux souterraines.

#### 2.4.3. Valorisation énergétique :

Les boues peuvent être valorisées énergétiquement par le biais de la digestion anaérobie, un processus biologique dans lequel les boues sont décomposées en biogaz, principalement du méthane. Ce biogaz peut ensuite être utilisé pour produire de l'électricité et de la chaleur, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles.

#### 2.4.4. Compostage :

Les boues peuvent être compostées avec d'autres matières organiques, telles que des déchets végétaux, pour produire un compost riche en nutriments. Ce compost peut être utilisé comme amendement du sol dans l'agriculture ou dans l'aménagement paysager, offrant une alternative naturelle aux engrais chimiques.

#### 2.4.5. Incinération :

L'incinération des boues est une option qui permet de réduire le volume des boues et de produire de l'énergie thermique. Cependant, cette méthode peut être coûteuse en raison des exigences en matière de traitement des émissions et des cendres produites.

## Conclusion

Ce chapitre a jeté les bases théoriques nécessaires pour comprendre la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration. Nous avons exploré les processus de traitement des eaux usées et des boues, en mettant en évidence les caractéristiques de la matière organique, les différents types de boues et les risques sanitaires et écologiques associés.

# Chapitre 03 : Fondements théoriques de la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration

# Introduction

Ce chapitre explore en détail les principes fondamentaux de la digestion anaérobie, qui est un processus clé dans le traitement des boues dans les stations d'épuration. Cette introduction fournira un aperçu des sujets abordés dans ce chapitre, allant de la définition de la digestion anaérobie aux différentes étapes du processus, en passant par les avantages, les types de substrats digestibles et les produits finaux. De plus, nous examinerons les facteurs influençant le processus de digestion anaérobie, les modes de mise en œuvre, les études antérieures sur le sujet, ainsi que les différentes technologies de digesteurs utilisées et les prétraitements des boues.

## 3.1. Définition de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie est un processus biologique de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène. Ce processus est réalisé par des microorganismes spécifiques qui produisent du biogaz (composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone) et des résidus solides appelés boues digérées. La digestion anaérobie est largement utilisée dans le traitement des eaux usées, la gestion des déchets organiques et la production d'énergie renouvelable. Elle offre de nombreux avantages tels que la réduction des volumes de déchets, la production d'un fertilisant naturel (le digestat) et la production d'énergie sous forme de biogaz. (ANGELIDAKI, I., & SANDERS 2004)

## 3.2. Les différentes étapes de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie se compose généralement de quatre étapes principales (présenter dans l'annexe 9) (NJAMPOU 2011).

### 3.2.1. Hydrolyse :

Les molécules organiques complexes telles que les protéines, les graisses et les hydrates de carbone sont dégradées en molécules plus simples comme les acides aminés, les acides gras et les sucres. Cette étape est réalisée par divers microorganismes, principalement des anaérobies stricts. (NJAMPOU 2011)

### 3.2.2. Acidogénèse :

Les monomères sont transformés en acides organiques, en alcools, en ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ainsi qu'en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et en hydrogène (H<sub>2</sub>). (NJAMPOU 2011)

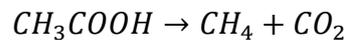
### **3.2.3. Acétogénèse :**

Parmi ces substrats de cette phase, on retrouve l'acide acétique (CH<sub>3</sub>COOH), le CO<sub>2</sub> et l'H<sub>2</sub>. L'acide acétique joue un rôle clé dans la transformation de la matière organique dans l'environnement, et de nombreuses bactéries sont capables de le produire par fermentation. (NJAMPOU 2011)

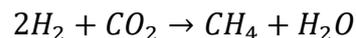
### **3.2.4. Méthanogénèse :**

Cette phase constitue l'étape finale et spécifique de la fermentation méthanique. Elle est réalisée par des microorganismes très spécialisés, principalement des anaérobies stricts appartenant aux groupes des méthanobactériales, méthanococcales et méthanomicrobiales. La méthanogénèse se déroule selon deux voies principales :

1. La voie acétoclastique, dans laquelle l'acide acétique est converti en méthane et en dioxyde de carbone :



2. La voie hydrogénophile, dans laquelle le mélange CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> est utilisé :



Ces étapes se produisent dans un environnement anaérobie, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène, et sont réalisées par des communautés de micro-organismes qui travaillent en symbiose pour dégrader les composés organiques. (Voir annexe 9). D'autres réactions peuvent également se produire à partir de différents composés tels que le méthanol, l'acide formique, la méthylamine ou le diméthylsulfure. Ces réactions contribuent à la production de méthane dans le processus de méthanogénèse. (ANGELIDAKI, I., & SANDERS 2004) (NJAMPOU 2011)

### 3.3. Les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie présente plusieurs avantages et inconvénients qu'on a résumé dans le tableau 3 suivant : (BOUALLAGUI, H., HAOUARI, O., BEN CHEIKH, R., & HAMDY 2009)

Tableau 3 les avantages et les inconvénients de la digestion anaérobie

Avantage :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"><li>- Production de biogaz qui peut être utilisé comme source d'énergie renouvelable.</li><li>- Réduction significative du volume de boues produites, ce qui réduit les coûts de traitement et d'élimination.</li><li>- Élimination efficace des matières organiques, ce qui contribue à réduire la pollution de l'environnement.</li><li>- La digestion anaérobie peut être utilisée pour traiter une variété de types de déchets organiques.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Les installations sont généralement coûteuses à construire et à entretenir.</li><li>- Le processus peut être difficile à gérer en raison de la sensibilité aux variations de température, de pH et de charge organique.</li><li>- Les odeurs peuvent être un problème, en particulier si les installations sont situées près des zones résidentielles ou commerciales.</li><li>- Le biogaz peut contenir du sulfure d'hydrogène et d'autres contaminants qui doivent être éliminés avant l'utilisation.</li></ul>

### 3.4. Les types de substrats digestibles

Les substrats digestibles sont de différents types. On peut les classer en quatre catégories principales (ANGELIDAKI, I., & SANDERS 2004) :

1. Les matières grasses : Elles peuvent être hydrolysées en acides gras volatils, qui sont ensuite transformés en méthane et en dioxyde de carbone. Les graisses peuvent provenir de sources alimentaires telles que les huiles, les graisses animales, les graisses végétales, etc.
2. Les protéines : Les protéines sont hydrolysées en acides aminés, qui sont ensuite dégradés en ammoniac. L'ammoniac est ensuite utilisé pour la production de méthane et de dioxyde de carbone.

3. Les glucides : Les glucides sont convertis en acides organiques tels que l'acide acétique, l'acide propionique et l'acide butyrique, qui sont ensuite utilisés pour la production de méthane et de dioxyde de carbone.
4. La cellulose et la lignine : Ce sont des composants de la biomasse végétale qui peuvent être dégradés par des micro-organismes spécifiques en acides organiques, qui sont ensuite utilisés pour la production de méthane et de dioxyde de carbone.

### 3.5. Les produits finaux de la digestion anaérobie

Les produits finaux de la digestion anaérobie dépendent du type de substrat, du processus de digestion et des conditions de fonctionnement. Cependant, en général, les produits finaux de la digestion anaérobie sont (ANGELIDAKI, I., & SANDERS 2004):

- Le biogaz : principalement composé de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), avec de faibles quantités de gaz sulfureux ( $\text{H}_2\text{S}$ ) et d'autres gaz. le biogaz peut être valorisé en tant que source d'énergie renouvelable
- Les boues digestates : résidus solides qui contiennent des matières organiques partiellement dégradées, des nutriments et des micro-organismes. les boues digestates peuvent être utilisées comme engrais ou comme source de matière organique pour le compostage
- L'eau effluent : qui peut contenir des nutriments tels que l'azote et le phosphore, des métaux lourds, des matières en suspension, des solides dissous, des agents pathogènes et d'autres polluants organiques et inorganiques. Il peut être traité pour être réutilisée ou rejetée dans l'environnement en toute sécurité.

### 3.6. Les facteurs influençant le processus de digestion anaérobie

La digestion anaérobie est un processus complexe qui peut être influencé par plusieurs facteurs, tels que (HAJJAJI, NOUREDDINE, PONS, M. N., RENAUDIN, V. 2010):

- **La composition du substrat** : la teneur en matières organiques, la C/N ratio, la teneur en nutriments, la toxicité et la biodégradabilité du substrat peuvent influencer la performance du digesteur anaérobie.
- **La température** : la température est un facteur important qui peut affecter la vitesse de la réaction de digestion anaérobie. Les températures optimales se situent généralement entre  $35^\circ\text{C}$  et  $55^\circ\text{C}$ .

- **Le pH** : un pH optimal est essentiel pour maintenir un environnement favorable aux microorganismes impliqués dans la digestion anaérobie.
- **Le rapport carbone/azote (C/N)** : un rapport C/N équilibré est important pour favoriser la croissance microbienne et la production de biogaz.
- **La charge organique volumique (COV)** : une COV élevée peut entraîner une inhibition du processus de digestion anaérobie.
- **La concentration de gaz dissous** : la concentration de gaz dissous dans le digesteur peut affecter la solubilité de l'hydrogène et du dioxyde de carbone, ce qui peut influencer la production de méthane.
- **Le temps de rétention hydraulique (TRH)** : le TRH est le temps que le substrat reste dans le digesteur et est important pour la croissance microbienne et la production de biogaz.

### 3.6.1. Les conditions optimales de la digestion anaérobie

Les conditions optimales de la digestion anaérobie peuvent varier selon le type de substrat et la composition du mélange bactérien. Cependant, certaines conditions générales ont été identifiées pour favoriser la performance de la digestion anaérobie, notamment représenté dans le tableau 4 (BENYAHIA 2012) :

Tableau 4 Les conditions optimales de la digestion anaérobie (BENYAHIA 2012)

<b>La température</b>	<b>Le pH</b>	<b>La concentration en matière organique</b>	<b>La concentration en nutriments</b>	<b>Le TRH</b>
généralement entre 30°C et 40°C pour la digestion mésophile, et entre 50°C et 60°C pour la digestion thermophile	généralement entre 6,5 et 7,5 pour la digestion mésophile, et entre 7,0 et 8,5 pour la digestion thermophile.	généralement entre 2% et 10% en poids sec.	notamment en azote et en phosphore.	qui dépend de la composition du substrat et des conditions de digestion.

### 3.7. Les différents modes de mise en œuvre de la digestion anaérobie

Il existe différents modes de mise en œuvre de la digestion anaérobie, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages. Comprendre les nuances et les particularités de chaque mode de mise en œuvre est essentiel pour choisir la meilleure stratégie en fonction des besoins spécifiques d'un projet de méthanisation.

#### 3.7.1. Les modes de fonctionnement en fonction de la température

La température est un facteur catalyseur dans toutes les transformations chimiques et biochimiques, bien évidemment la digestion. Les études d'optimisation des performances des réacteurs de la digestion ont prouvé qu'il existe des valeurs optimums de la température pour la digestion : 35°C dans les zones mésophiles et 55°C dans les zones thermophiles.

Généralement dans l'industrie on trouve trois modes de fonctionnement par rapport à la température (BERNET, NICOLAS ET BUFFIÈRE, PIERRE. MOLETTA 2008) :

- fonctionnement à température ambiante : c'est le mode de la digestion psychrophile en réacteur qui est utilisé dans la majorité des cas pour les traitements extensifs. L'avantage de ce mode est l'économie conséquente au niveau des investissements comme il fait un intérêt croissant pour le traitement en milieu tempéré. Leur inconvénient, il est limité dans les zones froides, il n'assure pas la permanence.
- Fonctionnement en mode mésophile (entre 30 et 40°C) : c'est un mode très stable, il assure une vitesse de digestion constante, c'est le mode couramment utilisé chez les industries.
- Fonctionnement en mode thermophile (entre 50 et 65°C) : ce mode a un rendement de digestion meilleur que le mode mésophile mais il n'est pas stable et il peut avoir des inhibitions. Leur avantage est l'hygiénisation des résidus sortie du réacteur (destruction des germes pathogènes), il est utilisé couramment pour le traitement des produits organiques solides.

### 3.7.2. Les modes de fonctionnement en fonction de mode d'alimentation de digesteur

1. **Alimentation en continu** : c'est le mode le plus courant à l'échelle industrielle. Le réacteur utilisé fonctionne à volume constant maintenu par un débit d'alimentation égale au débit de du évacué (régime nominale).
2. **Alimentation discontinue** : ou bien mode batch, c'est un mode sans échange de quantité de matière avec l'extérieur.
3. **Alimentation séquentielle** : ou bien sequencing batch reactor (SBR), c'est un mode hybride entre le continu et le discontinu, il conserve la biomasse dans le réacteur, d'une manière partielle ou totale, pour le cycle de réaction suivant. (BERNET, NICOLAS ET BUFFIÈRE, PIERRE. MOLETTA 2008)

## 3.8. Études antérieures sur la digestion anaérobie des boues des STEP

La section dédiée aux études antérieures sur la digestion anaérobie des boues des Stations d'Épuration des Eaux Usées (STEP) revêt une importance capitale. Elle offre l'occasion d'explorer les recherches et les études préalables réalisées dans ce domaine, nous permettant ainsi de situer notre propre recherche dans le contexte global de cette discipline et de bénéficier des connaissances et des expériences accumulées par des chercheurs éminents

### 3.8.1. Revue des études antérieures sur la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration

Les recherches ont porté sur divers aspects tels que l'optimisation des paramètres de digestion, l'évaluation des performances de réduction des matières organiques, la production de biogaz et la stabilité du processus. Ces études ont permis d'améliorer notre compréhension de la digestion anaérobie des boues d'épuration et d'identifier des stratégies prometteuses pour une valorisation efficace et durable des boues.

Parmi ces chercheurs, René Moletta se distingue par ses contributions remarquables à la méthanisation des déchets organiques. Ses travaux novateurs ont jeté les bases de cette discipline en explorant en détail les aspects cinétiques de la digestion anaérobie. De plus, il a approfondi notre compréhension des paramètres opérationnels influençant les performances du processus, tout en développant des

stratégies avancées de contrôle et de surveillance des digesteurs anaérobies. Les recherches de Moletta ont ainsi permis d'établir des fondements solides et de fournir des applications pratiques pour la digestion anaérobie des boues des STEP. (MOLETTA 2008)

La revue de littérature démontre également l'importance d'autres travaux de recherche pertinents dans ce domaine. Parmi eux, l'étude réalisée par Smith et al. (2019) a approfondi notre compréhension des performances des installations de digestion anaérobie des boues de STEP. Les chercheurs ont examiné avec rigueur des paramètres tels que la production de biogaz, la réduction des volumes de boues et les aspects environnementaux associés. Les résultats ont clairement démontré l'efficacité considérable de la digestion anaérobie dans la gestion des boues et la production d'énergie renouvelable.(AMHA, YAMROT M., CORBETT, MICHAEL, ET SMITH 2019).

De même, l'étude de Meegoda, J. N., Li, B., Patel, K., et al. (2018) a focalisé son attention sur les aspects cinétiques de la digestion anaérobie des boues des STEP. Les chercheurs ont minutieusement analysé les paramètres opérationnels, tels que la température, le pH et la concentration de substrat, afin de mieux comprendre leur influence sur les performances des digesteurs anaérobies. Leurs conclusions ont permis d'optimiser les conditions de fonctionnement et d'affiner notre compréhension des mécanismes de la digestion anaérobie.(MEEGODA, JAY N., LI, BRIAN, PATEL, KUSH 2018)

Une autre étude remarquable, menée par Glénisson, G., Caillet, H., et Regnier, T. (2022), a porté sur l'impact des prétraitements sur la digestion anaérobie des boues des STEP. Les chercheurs ont exploré différentes techniques, notamment la thermolyse et la sonication, afin d'évaluer leur influence sur la biodégradabilité des boues et la production de biogaz. Leurs résultats ont mis en évidence le potentiel de certains prétraitements pour améliorer de manière significative les performances du processus de digestion anaérobie.(GLÉNISSON, GIULIA, CAILLET, HÉLÈNE, ET REGNIER 2022)

Enfin, l'étude de Baldé, Y. M. (2022) s'est penchée sur un aspect important de la digestion anaérobie des boues des STEP, à savoir l'élimination des micropolluants organiques. Les chercheurs ont évalué l'efficacité de différentes configurations de digesteurs anaérobies dans la dégradation de ces polluants, tout en proposant des recommandations pour optimiser ce processus. Leurs travaux ont ainsi contribué à une

meilleure compréhension des défis liés à la gestion des micropolluants organiques lors de la digestion anaérobie des boues des STEP.(BALDE´ 2022)

### 3.8.2. Analyse des résultats et des principales conclusions des études antérieures

Ces études mentionnées représentent un échantillon significatif des travaux de recherche existants sur la digestion anaérobie des boues des STEP. Elles ont permis de faire avancer les connaissances dans ce domaine en fournissant des informations précieuses sur les performances du processus, les paramètres opérationnels, les prétraitements et la gestion des micropolluants. Ces recherches constituent une base solide pour notre propre étude sur la station d'épuration de Beni-Mered, nous permettant de bénéficier des enseignements précédents et d'identifier les lacunes qui nécessitent une attention particulière dans notre recherche.

En intégrant les connaissances et les résultats obtenus grâce à ces études antérieures, notre recherche sur la digestion anaérobie des boues des STEP vise à approfondir notre compréhension de ce processus en Algérie, en tenant compte des spécificités locales et des contraintes environnementales. Notre objectif est de proposer des solutions adaptées pour optimiser la production d'énergie renouvelable tout en minimisant l'impact sur l'environnement. Nous nous appuyerons sur les avancées scientifiques réalisées dans le domaine, en mettant l'accent sur l'efficacité du processus, la gestion des sous-produits et l'utilisation durable des ressources disponibles.

L'analyse des résultats des études antérieures sur la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration révèle plusieurs conclusions importantes. Tout d'abord, il a été démontré que la digestion anaérobie est une méthode efficace pour la réduction des matières organiques présentes dans les boues, ce qui permet de réduire la charge polluante avant leur élimination ou leur valorisation. De plus, la production de biogaz, principalement composé de méthane, constitue un avantage significatif de ce processus, offrant ainsi une source d'énergie renouvelable.

Les études ont également souligné l'importance de l'optimisation des paramètres de digestion tels que la température, le pH, la charge organique et le temps de rétention pour maximiser les performances de digestion et la production de biogaz.

Par ailleurs, il a été observé que la composition des boues, notamment la teneur en matières grasses et en fibres, peut influencer le rendement du processus de digestion. Enfin, des études ont mis en évidence la nécessité de contrôler et de surveiller attentivement le processus de digestion anaérobie pour garantir sa stabilité et éviter les problèmes tels que les inhibitions microbiennes ou les perturbations du processus.

### 3.8.3. Identification des lacunes ou des aspects nécessitant une amélioration

L'identification des lacunes et des aspects souligne la nécessité de poursuivre les recherches dans le domaine afin d'améliorer les performances de la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration et de favoriser une gestion plus durable des boues. Cette identification nécessitant et met en évidence des améliorations dans le domaine de la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration. On prend quelques points clés :

Premièrement, il existe un besoin de recherches supplémentaires sur l'optimisation des paramètres de digestion, notamment en ce qui concerne les variations saisonnières et les conditions spécifiques des différentes installations de traitement des eaux usées. Cela permettrait de mieux comprendre les variations de performance et d'adapter les paramètres de digestion en conséquence.

Deuxièmement, il est important d'étudier davantage les effets des différents types de boues sur le processus de digestion anaérobie. Les boues provenant de différentes sources peuvent présenter des caractéristiques et des compositions différentes, ce qui peut influencer la stabilité et l'efficacité de la digestion. Une meilleure compréhension de ces variations aiderait à optimiser les stratégies de gestion des boues.

Troisièmement, il existe un besoin d'études approfondies sur les mécanismes microbiens impliqués dans la digestion anaérobie des boues. Une meilleure connaissance des interactions entre les différentes populations microbiennes et leur rôle dans le processus de digestion permettrait de développer des approches plus précises pour contrôler et améliorer la performance de la digestion.

Enfin, il est important de prendre en compte les aspects économiques et environnementaux de la digestion anaérobie des boues. Des études supplémentaires sur les coûts de mise en œuvre, les impacts environnementaux et les avantages économiques de la valorisation du biogaz produit sont nécessaires pour évaluer pleinement la viabilité de ce processus et encourager son adoption à plus grande échelle.

Les études antérieures sur la digestion anaérobie des boues des STEP ont joué un rôle essentiel dans l'avancement des connaissances et des techniques dans ce domaine. En tirant parti de ces connaissances, notre recherche sur la station d'épuration de Beni-Mered aspire à apporter de nouvelles perspectives pour une gestion plus efficace des boues et une exploitation durable des ressources énergétiques.

### 3.9. Les digesteurs

Le digesteur, connu également sous les noms de fermenteur ou de bioréacteur anaérobie, constitue le cœur de la méthanisation. Il s'agit d'un réacteur chimique clos, généralement de forme cylindrique, hermétique à l'air et préférentiellement isolé thermiquement. Sa fonction principale est d'offrir un environnement propice à la fermentation des déchets riches en matière organique, grâce à l'interaction des microorganismes. (BENAROUR 2015)

Ces derniers se chargent de la dégradation chimique et biologique des effluents organiques. Afin de faciliter le contrôle des différents paramètres, tels que le pH, la température et la pression, le digesteur peut être équipé de dispositifs de chauffage, d'agitation, de prélèvement et de mesure de la teneur en gaz. (BENAROUR 2015)

#### 3.9.1. Types de digesteurs anaérobies

Les types de digesteurs anaérobies peuvent être classés en fonction de différents critères. Ces critères de classification aident à identifier les différentes configurations et caractéristiques des digesteurs anaérobies, permettant ainsi de choisir le type le plus approprié en fonction des besoins spécifiques de l'installation. Il est important de prendre en compte ces critères lors de la conception et de la sélection du digesteur afin d'optimiser le processus de digestion anaérobie et d'assurer une gestion efficace des boues. Les critères les plus couramment utilisés pour classer les digesteurs sont (NJAMPOU 2011) :

#### 3.9.1.1. Caractéristiques technologiques :

- **Approvisionnement** : Les digesteurs peuvent être continus (pour les substrats ne dépassant pas 15% de matières sèches) ou discontinus, offrant la flexibilité d'utiliser différents substrats liquides ou solides.
- **Mobilité de la flore microbienne** : Certains digesteurs utilisent un garnissage ou un lit fluidisé pour favoriser la fixation de la flore microbienne, tandis que d'autres permettent une flore microbienne libre.
- **Mélange ou agitation** : Certains digesteurs sont équipés d'un système de mélange pour homogénéiser le milieu, contrôler le transfert des matières et éviter la formation de volumes morts et de courts-circuits.
- **Température de fonctionnement** : Les digesteurs peuvent être classés en fonction de leur température de fonctionnement, tels que psychrophiles, mésophiles ou thermophiles.

#### 3.9.1.2. Charges acceptées :

- **État du substrat** : Certains digesteurs sont adaptés à la fermentation de substrats liquides à faible charge, tandis que d'autres sont conçus pour la fermentation de substrats solides à forte charge.

#### 3.9.1.3. Principe de fonctionnement :

- **Nombre d'étapes** : Certains digesteurs fonctionnent en une seule étape, où toutes les transformations microbiennes se déroulent dans un seul réacteur, tandis que d'autres utilisent deux étapes distinctes, séparant l'hydrolyse et l'acidogénèse de l'acétogénèse et de la méthanogénèse.

#### 3.9.1.4. Autres paramètres :

- **Taille du système** : Les digesteurs peuvent être classés en fonction de leur échelle, tels que les digesteurs pour une utilisation familiale, les digesteurs pour une utilisation agricole ou les digesteurs centralisés.
- **Matériau de construction** : Certains digesteurs sont construits en acier, en PVC, en film plastique ou en béton, et cette classification tient compte de la forme et de la nature du matériau utilisé.
- **Configuration** : Les digesteurs à gazomètre combiné peuvent être classés en modèles chinois ou indiens, selon leur configuration spécifique.

### 3.9.2. Les formes des digesteurs

Il existe différentes formes de digesteurs, notamment ovoïdes, cylindriques, continentaux et anglo-américains. Généralement construits en béton avec une protection interne en résine époxy, les digesteurs de grande taille peuvent souvent être réalisés en acier vitrifié, qui s'avère plus compétitif.

La forme la plus répandue en Europe continentale est caractérisée par un rapport hauteur sur diamètre d'environ 1, un fond conique pour faciliter l'évacuation des sédiments, et un dôme conique ou bombé pour résister à la pression. En Allemagne, les formes ovoïdes sont couramment utilisées pour les grands digesteurs, tandis qu'au Royaume-Uni et en Scandinavie, on trouve des digesteurs cylindriques avec toit et fond plat. (*Méthanisation des boues de stations : Règle de l'art et état des lieux sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse 2012*).

En ce qui concerne les réacteurs à boues libres, leur géométrie peut varier. En France, environ 70% des installations sont équipées de digesteurs cylindriques, tandis que le reste utilise des digesteurs de type continental. Cette répartition s'explique par le fait que ces deux formes sont les seules proposées par les deux plus grands constructeurs français (groupes Suez et Veolia). Dans d'autres pays européens tels que l'Allemagne, la Suisse et l'Autriche, on trouve plus fréquemment des digesteurs de type ovoïde, qui permettent de réduire l'emprise au sol et favorisent le brassage en éliminant les zones mortes.

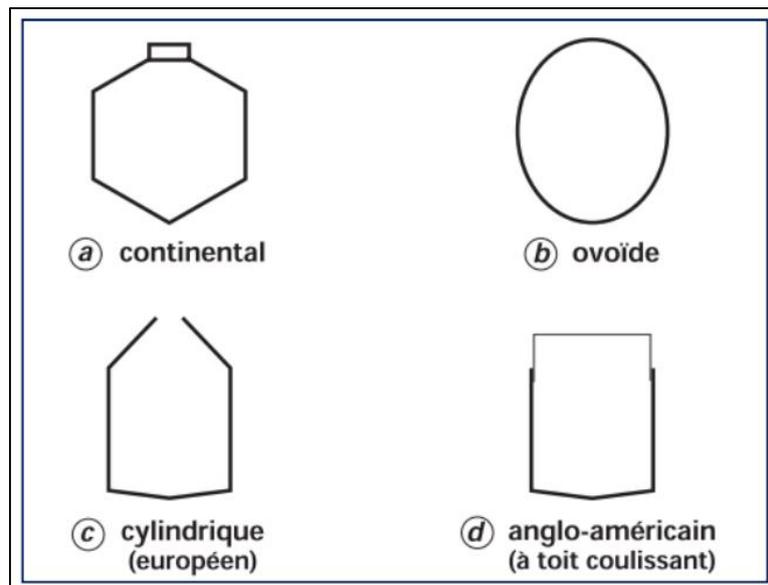


Figure 1 Différentes géométries de digesteur de boues d'épuration (*Méthanisation des boues de stations : Règle de l'art et état des lieux sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse 2012*)

### 3.9.3. Les critères de choix de type de l'installation :

Plusieurs types de digesteurs anaérobies sont utilisés et chaque type présente des caractéristiques spécifiques, des avantages et des limites qui doivent être pris en compte lors de la sélection du digesteur le plus approprié pour une installation donnée. Pour choisir le type de digesteur le plus adapté Il est essentiel de prendre en compte pour chaque type (MOLETTA 2008):

- Les caractéristiques spécifiques.
- Les besoins de l'installation.
- Les contraintes techniques, économiques et environnementales.
- Une évaluation approfondie des avantages et des limites.

## 3.10. Technologie des digesteurs et leur principe de conception et de fonctionnement

Les points généraux à prendre en compte dans une installation de digestion anaérobie et qui fournissent une vue d'ensemble des aspects courants dans une installation de digestion anaérobie comprennent (ARBI 2020)

- Alimentation des boues.
- Mélange des boues
- Conditions de digestion.
- Production de biogaz.
- Extraction des boues digérées.

### 3.10.1. Alimentation des digesteurs

L'alimentation des digesteurs dans une installation de digestion anaérobie se fait en introduisant les matières organiques dans le système. Les matières organiques, telles que les boues biologiques provenant du traitement des eaux usées, les déchets alimentaires, les déchets agricoles, etc., sont acheminées vers les digesteurs où elles subissent le processus de digestion anaérobie.

En général, la bêche d'alimentation des digesteurs reçoit principalement les boues mixtes qui peuvent être dirigées soit vers la digestion dans le digesteur, soit vers la déshydratation pour contourner la digestion.

Pour assurer une digestion efficace, l'alimentation des digesteurs doit être régulière à la fois en termes de débit et de composition des boues. Les boues sont envoyées vers la vasque d'alimentation du digesteur à l'aide de pompes primaires. Un débitmètre est installé au refoulement des pompes d'alimentation du digesteur pour mesurer le débit et la concentration des boues d'alimentation. Cela permet de surveiller les charges massiques et volumétriques envoyées aux digesteurs, et de s'assurer que l'alimentation est constante.

Un système de mesure de niveau est également utilisé pour gérer les pompes d'alimentation des digesteurs. En cas de trop-plein dans la bêche d'alimentation, les boues excédentaires sont renvoyées vers le poste toutes eaux.

Le by-pass de la digestion est nécessaire dans certains cas, notamment lorsque des problèmes surviennent en amont du digesteur ou lorsque la digestion des boues est interrompue. Il permet de diriger directement les boues épaissies vers la déshydratation, contournant ainsi le processus de digestion.

### 3.10.2. Le digesteur : Maintien des conditions optimales

Lorsque les boues sont introduites dans le digesteur, il est essentiel de maintenir des conditions optimales pour favoriser le processus de digestion anaérobie. Plusieurs facteurs influencent la digestion anaérobie, tels que le pH, la température, le taux d'acides gras volatils (AGV) et la production de biogaz. Cependant, il est important de noter que les conditions optimales peuvent varier en fonction du type de digesteur utilisé (par exemple, digesteur à agitation mécanique, à voie sèche, à lit fluidisé, etc.) et des caractéristiques spécifiques des matières organiques traitées. Les principaux aspects à prendre en compte sont :

- **pH** : Le pH optimal pour la digestion anaérobie se situe généralement entre 6,5 et 8,5. Un pH équilibré est crucial pour favoriser l'activité des micro-organismes anaérobies et maintenir un processus de digestion efficace. Des ajustements du pH peuvent être nécessaires en fonction de la composition des matières organiques alimentées dans le digesteur.
- **Température** : La température est un facteur clé pour le bon fonctionnement de la digestion anaérobie. Dans la plupart des cas, une température de fonctionnement

optimale se situe entre 35°C et 40°C. Cependant, certains digesteurs peuvent fonctionner à des températures plus basses (par exemple, digesteurs mésophiles) ou plus élevées (par exemple, digesteurs thermophiles) en fonction des besoins spécifiques du processus et des caractéristiques des matières organiques.

- **Taux d'acides gras volatils (AGV) :** Les acides gras volatils sont des produits intermédiaires de la digestion anaérobie. Un taux d'AGV équilibré est essentiel pour maintenir l'activité microbienne et éviter des effets néfastes tels que l'acidification excessive du digesteur. Un contrôle approprié du taux d'AGV est réalisé en ajustant le rapport entre les matières organiques alimentées et les micro-organismes présents dans le digesteur.
- **Production de biogaz :** La production de biogaz est un indicateur important de l'efficacité de la digestion anaérobie. Une production de biogaz optimale est obtenue en maintenant les conditions précédentes (pH, température, taux d'AGV) dans les plages appropriées. Un suivi régulier de la production de biogaz permet de surveiller la performance du digesteur et d'apporter les ajustements nécessaires si besoin.

### 3.10.3. L'extraction des boues

L'extraction des boues dans une installation de digestion anaérobie est généralement réalisée en utilisant le principe des vases communicants. Voici les étapes typiques de ce processus :

**Positionnement de la vanne d'extraction :** La vanne d'extraction est située dans la vasque d'extraction, et sa position est déterminante pour l'écoulement des boues. Si le sommet de la vanne est placé en dessous du niveau de boues dans le digesteur, les boues peuvent s'écouler vers la vasque d'extraction et être évacuées. En revanche, si le sommet de la vanne est positionnées au-dessus du niveau de boues, les boues restent dans le digesteur et ne peuvent pas atteindre la vasque d'extraction. Dans ce cas, les boues digérées ne sont pas évacuées.

**Extraction des boues digérées :** Lorsque les boues digérées sont présentes dans la vasque d'extraction, elles sont extraites par gravité. Leur écoulement est dirigé vers le système de déshydratation ou une autre étape de traitement ultérieure.

Surveillance de l'équilibre de pression : Pour assurer un bon fonctionnement du processus d'extraction des boues, il est essentiel de surveiller l'équilibre entre la pression du gaz présent dans le digesteur et le niveau des boues. Des mesures de pression sont effectuées afin de maintenir cet équilibre. Cela permet de garantir une extraction efficace des boues tout en évitant les problèmes liés à une pression excessive ou insuffisante.

Utilisation de pompes d'extraction : Dans certains cas, notamment pour les digesteurs de grande taille ou lorsque les boues doivent être transportées sur de longues distances, des pompes d'extraction équipées de variateurs de fréquence sont utilisées. Ces pompes permettent un contrôle précis du débit d'extraction des boues du fond du digesteur. Les boues extraites sont ensuite acheminées vers les étapes de déshydratation ou d'autres processus de traitement.

#### 3.10.4. Construction de la cuverie :

La construction de la cuverie des digesteurs est une étape essentielle dans la mise en place de ces installations. Pour assurer la durabilité et l'efficacité des digesteurs anaérobies une conception appropriée, associée à des matériaux de qualité, est essentielle la construction de la cuverie des digesteurs doit être réalisée en respectant les normes de construction et de sécurité applicables, ainsi que les spécifications du projet.

Différents matériaux peuvent être utilisés pour construire la cuverie, tels que le béton, l'acier ou le plastique renforcé de fibres de verre.(Tijdschrift. 1998)

Le béton est couramment utilisé en raison de sa durabilité et de sa résistance aux agressions chimiques. Les cuves en béton sont généralement construites en utilisant des techniques de coffrage et de coulage du béton sur place, ce qui permet d'obtenir des structures solides et adaptées aux contraintes spécifiques de la digestion anaérobie.

L'acier est également utilisé dans la construction des cuveries de digesteurs, en particulier pour les installations de grande taille. Les réservoirs en acier sont souvent préfabriqués en usine et transportés sur le site de l'installation, ce qui permet de

réduire les délais de construction. L'acier offre une grande résistance mécanique et peut être revêtu de matériaux protecteurs pour résister aux agressions chimiques.

Le plastique renforcé de fibres de verre (PRFV) est une autre option de construction pour les cuveries de digesteurs. Ce matériau présente une grande résistance à la corrosion et est adapté aux environnements agressifs. Les cuves en PRFV sont généralement fabriquées en usine et livrées sur le site de l'installation.

### 3.10.5. Brassage des digesteurs

Le brassage des digesteurs est une étape clé dans le processus de digestion anaérobie. Il vise à maintenir les boues en mouvement et à favoriser une répartition homogène des micro-organismes responsables de la digestion. Le brassage est essentiel pour assurer une digestion efficace et maximiser la production de biogaz.

Il existe différentes méthodes de brassage des digesteurs, qui peuvent varier en fonction de la taille et de la conception du digesteur, ainsi que des caractéristiques spécifiques de l'installation de digestion anaérobie.

#### 3.10.5.1. Type de brassage :

Le mélange du substrat à l'intérieur du digesteur peut être effectué à l'aide de différents systèmes, dont certains sont présentés schématiquement ci-dessous. Ces dispositifs permettent principalement d'assurer un brassage mécanique du substrat, une recirculation du substrat ou un brassage hydraulique utilisant le biogaz.(MOLETTA 2008)

Le brassage mécanique implique l'utilisation d'agitateurs ou de mélangeurs mécaniques à l'intérieur du digesteur. Ces équipements sont conçus pour agiter le substrat de manière homogène, favorisant ainsi la répartition des microorganismes et des nutriments, et améliorant la digestion anaérobie.

La recirculation du substrat consiste à pomper une partie du substrat déjà digéré du bas du digesteur et à le réinjecter dans le digesteur à un stade antérieur du processus. Cela permet d'assurer un mélange et une homogénéisation du substrat, ainsi qu'une réinoculation de microorganismes actifs dans les zones où leur concentration peut être faible.

Le brassage hydraulique au biogaz utilise le biogaz produit par la fermentation anaérobie pour créer un mouvement au sein du digesteur. Le biogaz est introduit dans le fond du digesteur, créant ainsi des remous et des turbulences qui favorisent le mélange du substrat.

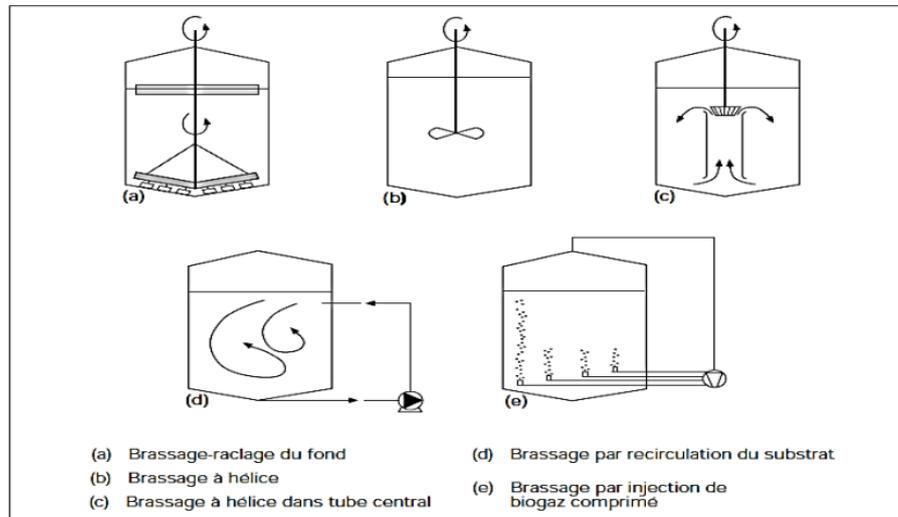


Figure 2 les types de brassage

### 3.10.5.2. Le brassage au biogaz

Le brassage au biogaz est un principe de fonctionnement utilisé dans les installations de digestion anaérobie pour assurer un mélange efficace des boues et favoriser la fermentation anaérobie. Dans ce système, le biogaz produit lors de la digestion anaérobie est utilisé pour agiter les boues à l'intérieur du digesteur.

Le biogaz est composé principalement de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), qui sont les produits de la fermentation des matières organiques. Ce biogaz est généralement capté à partir de la partie supérieure du digesteur, où il se forme en raison de sa légèreté par rapport aux boues.

Le brassage au biogaz a plusieurs avantages. Il assure un mélange homogène des boues, ce qui favorise une digestion plus efficace et une meilleure dégradation des matières organiques. Cela permet également de réduire les problèmes de formation de couches flottantes ou de décantation des boues. De plus, le brassage au biogaz contribue à maintenir une température uniforme à l'intérieur du digesteur, ce qui est essentiel pour le bon fonctionnement des micro-organismes responsables de la digestion anaérobie.

Le biogaz produit par les digesteurs est libéré vers le haut des digesteurs et stocké dans le ciel gazeux des digesteurs. Une partie de ce biogaz est extraite du ciel gazeux et dirigée vers le compresseur de brassage. Après compression, le biogaz est refoulé par les compresseurs vers les cannes de brassage des boues situées dans les digesteurs. Le brassage des boues des digesteurs avec le biogaz se déroule en plusieurs étapes :

- Aspiration du biogaz contenu dans le ciel gazeux des digesteurs.
- Récupération de l'eau présente dans le biogaz en utilisant des pots de purge basse pression pour chaque ligne. L'eau est récupérée par condensation et envoyée au poste toutes eaux.
- Compression du biogaz à l'aide des compresseurs, notamment les ensembles compresseurs et l'ensemble compresseur de secours.
- Récupération de l'eau contenue dans le biogaz comprimé en utilisant des pots de purge moyenne pression pour chaque ligne. L'eau est récupérée par condensation et envoyée au poste toutes eaux.
- Injection du biogaz comprimé au niveau des cannes de brassage des digesteurs.

Pour éviter d'endommager les compresseurs de biogaz lors de leur fonctionnement, il est nécessaire de les refroidir. Cela est réalisé en associant un groupe de refroidissement à l'eau aux compresseurs.

#### 3.10.5.2.1. Les pots de purge

Ils sont utilisés pour traiter l'humidité présente dans le biogaz sortant des digesteurs. Lorsque le biogaz se déplace dans les canalisations, il se refroidit et l'humidité se condense, formant ainsi du condensat. Les pots de purge sont positionnés aux points bas des circuits du biogaz pour collecter ces condensats.

Dans le cas des pots de purge basse pression, ils sont installés aux points bas des deux circuits du biogaz. Ils récupèrent les condensats formés et les envoient vers un puisard situé dans le local des pots de purge basse pression.

Quant aux pots de purge moyenne pression, ils sont positionnés sur le circuit au refoulement des compresseurs. Également placés aux points bas des deux circuits, ils collectent les condensats provenant du biogaz comprimé. Ces condensats sont ensuite dirigés vers le même puisard que celui des pots de purge basse pression.

L'objectif de ces pots de purge est de permettre la séparation et l'évacuation des condensats du biogaz, afin d'assurer un fonctionnement efficace et sans accumulation excessive d'humidité dans le système.

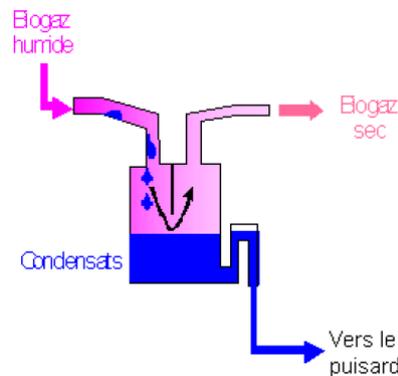


Figure 3 Schéma de fonctionnement d'un pot de purge

#### 3.10.5.2.2. Le puisard du local pot de purge basse pression

Il est conçu pour recueillir tous les condensats évacués des pots de purge du circuit de brassage du biogaz. Les condensats s'écoulent gravitairement vers le puisard où ils sont collectés. Pour assurer une gestion efficace du puisard, il est équipé de deux détecteurs de niveau : un niveau bas et un niveau haut. Ces détecteurs permettent de surveiller le niveau de liquide dans le puisard.

De plus, le puisard est équipé de deux pompes immergées qui fonctionnent en fonction des détecteurs de niveau. Lorsque le niveau d'eau atteint le niveau haut, les pompes sont activées pour évacuer les condensats du puisard. Les condensats sont ensuite envoyés vers le réseau de trop-plein du digesteur, assurant ainsi leur évacuation appropriée.

Cette configuration du puisard, avec des détecteurs de niveau et des pompes immergées, permet de maintenir le niveau d'eau optimal dans le puisard et de garantir un bon fonctionnement du système de gestion des condensats.

#### 3.10.5.2.3. Le filtre à tamis

C'est un élément essentiel installé à l'aspiration du compresseur dans le système de gestion du biogaz. Son rôle principal est de retenir les impuretés présentes dans le biogaz, évitant ainsi que celles-ci n'endommagent le bon fonctionnement du compresseur.

Le filtre à tamis est généralement constitué d'un corps en forme de Y avec des brides de raccordement, permettant une installation facile dans le circuit du biogaz. Il est équipé d'un tamis avec des mailles de taille relativement importante, ou il peut également comporter un tamis fin intérieur pour une filtration plus précise.

Lorsque le biogaz passe à travers le filtre, les impuretés présentes dans le gaz sont capturées et se fixent sur le tamis. Cela permet de prévenir l'accumulation d'impuretés et de garantir que le biogaz qui atteint le compresseur est relativement propre et exempt de particules susceptibles de nuire à son fonctionnement.

#### 3.10.5.2.4. La compression de biogaz

Les compresseurs de brassage, installés un par digesteur, fonctionnent en permanence lorsque les conditions de fonctionnement sont réunies. En cas de besoin, le compresseur de secours peut automatiquement prendre le relais grâce aux vannes manuelles d'affectation. Il est également important de noter qu'un groupe de refroidissement à l'eau est prévu pour les compresseurs de biogaz. Ce groupe de refroidissement fonctionne tant qu'au moins un compresseur de biogaz est en fonctionnement, assurant ainsi un refroidissement adéquat pour éviter d'endommager les compresseurs.

#### 3.10.5.2.5. Le brassage des boues

Le brassage des digesteurs anaérobies est réalisé en injectant le biogaz comprimé sous forme de bulles dans le fond de chaque digesteur. Les bulles remontent à la surface des boues, créant un mouvement ascendant qui entraîne un mouvement torique des boues à l'intérieur du digesteur. Ce mouvement torique correspond à une circulation verticale des boues, favorisant ainsi un brassage efficace.

Les cannes de brassage sont généralement disposées de manière circulaire au centre de chaque digesteur pour brasser l'ensemble du contenu de manière homogène. Cette disposition permet une distribution uniforme du biogaz et assure un brassage efficace des boues, favorisant la répartition des micro-organismes et la digestion anaérobie.

Des variations dans la conception des cannes de brassage, leur nombre, leur positionnement et les débits de biogaz utilisés peuvent être observées dans des cas

spécifiques pour optimiser le brassage en fonction des exigences particulières de chaque installation.

Le débit de biogaz utilisé pour le brassage des digesteurs peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la taille des digesteurs, la quantité de boues à brasser, les caractéristiques des matières organiques traitées et les objectifs de l'installation.

Dans un contexte général, le débit de brassage typique se situe souvent dans une fourchette de 500 à 1500 Nm<sup>3</sup>/h (normaux mètres cubes par heure) par digesteur. Cependant, il est important de noter que ce chiffre peut varier considérablement en fonction des spécificités de chaque installation.(CAMACHO, PATRICIA ET PRÉVOT 2011)

Le débit de biogaz utilisé pour le brassage des boues doit être suffisant pour créer un mouvement ascendant efficace et un mouvement torique des boues à l'intérieur du digesteur. Un débit trop faible peut entraîner une stagnation des boues, compromettant ainsi l'efficacité de la digestion anaérobie. D'un autre côté, un débit trop élevé peut entraîner une turbulence excessive, des pertes de biogaz non désirées et une consommation d'énergie accrue. Il est recommandé de réaliser des études spécifiques de dimensionnement et de simulation pour déterminer le débit de biogaz optimal adapté aux besoins de chaque installation.

Les cannes de brassage sont disposées de manière circulaire au centre de chaque digesteur. Cette disposition permet de brasser l'ensemble du digesteur de manière homogène, assurant ainsi une distribution uniforme du biogaz et un brassage efficace des boues. Cette disposition des cannes de brassage de manière circulaire au centre de chaque digesteur est une pratique générale utilisée dans de nombreux systèmes de digestion anaérobie. Elle est couramment employée pour brasser l'ensemble du digesteur de manière homogène, assurant ainsi une distribution uniforme du biogaz et un brassage efficace des boues. (Voir annexe 5)

### 3.10.6. Chauffage et régulation de la température

Maintenir une température adéquate dans les digesteurs est crucial pour favoriser l'activité microbienne et optimiser la production de biogaz. Le chauffage des digesteurs peut être réalisé de différentes manières, notamment par l'utilisation de

systèmes de chauffage à circulation d'eau chaude, de serpentins de chauffage immergés dans les boues ou de systèmes de chauffage à air chaud. Ces systèmes permettent de fournir la chaleur nécessaire pour maintenir la température souhaitée à l'intérieur des digesteurs.

La régulation de la température se fait généralement à l'aide de sondes de température placées à différents points stratégiques à l'intérieur des digesteurs. Ces sondes mesurent en continu la température des boues et transmettent les données à un système de régulation. Le système de régulation ajuste alors l'apport de chaleur en fonction des besoins pour maintenir la température cible.

La température optimale dans les digesteurs peut varier en fonction du type de substrat utilisé et du processus de digestion. En général, la plage de température couramment utilisée se situe entre 35°C et 55°C. Certains processus de digestion spécifiques, tels que la méthanisation thermophile, nécessitent des températures plus élevées, souvent supérieures à 50°C.

La régulation précise de la température est essentielle pour maintenir des conditions favorables à l'activité des microorganismes méthanogènes. Une température inadéquate peut entraîner une diminution de l'efficacité de la digestion et une production réduite de biogaz. Par conséquent, il est important de surveiller et de contrôler en permanence la température des digesteurs pour garantir des performances optimales.

#### 3.10.6.1. Type de chauffage : chauffage à circulation d'eau chaude

Les digesteurs d'eaux usées sont généralement maintenus à une température spécifique (entre 30-40°C ou 50-60°C) en faisant circuler de l'eau chaude à travers un échangeur de chaleur externe ou interne au digesteur. Cette eau chaude peut être produite par une chaudière ou en utilisant l'énergie thermique récupérée à partir de moteurs ou de systèmes de cogénération fonctionnant au biogaz. Certains systèmes utilisent également une injection directe de vapeur, ce qui présente l'avantage d'un transfert de chaleur direct sans nécessiter d'échangeur supplémentaire.

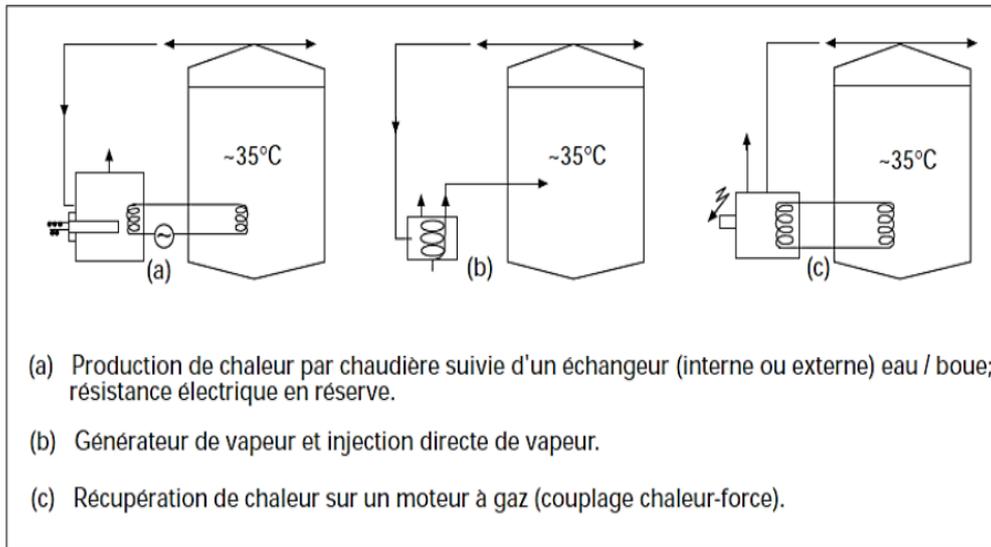


Figure 4 les différents types de chauffage

### 3.10.6.1.1. Choix du système de chauffage

Le bilan énergétique est un élément essentiel lors du choix du système et de la détermination des conditions de fonctionnement. Certains réacteurs à mélange complet peuvent consommer 50% ou plus de l'énergie produite, surtout si l'isolation n'est pas optimale ou si les effluents à traiter ont une forte teneur en eau.

Une analyse énergétique complète est nécessaire pour chaque cas spécifique, mais il est important de noter que le réchauffage du substrat reste le facteur le plus déterminant.

### 3.10.6.1.2. La régulation de la température dans le système de chauffage des boues

La régulation de la température dans le processus de chauffage des boues est un concept général qui s'applique à toutes les installations de traitement des boues. Qu'il s'agisse de digesteurs anaérobies, de systèmes de compostage, de séchage thermique ou d'autres méthodes de traitement, maintenir une température contrôlée est essentiel pour assurer l'efficacité et la stabilité des processus de traitement des boues.

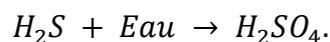
La régulation de la température peut varier en fonction de la méthode de traitement spécifique et des exigences du processus. Cela peut impliquer l'utilisation de divers équipements de chauffage tels que des échangeurs de chaleur, des systèmes de circulation d'eau chaude ou de vapeur, des résistances électriques, des brûleurs à gaz, etc.

Les systèmes de régulation de la température peuvent inclure des capteurs de température pour surveiller en continu les boues ou les fluides de chauffage, des vannes de régulation pour contrôler les débits de fluide, des dispositifs de contrôle

automatisés pour ajuster la puissance de chauffage en fonction des besoins, et des alarmes de sécurité pour prévenir les conditions de température anormales.

La régulation est nécessaire pour plusieurs raisons. L'une des raisons est liée aux caractéristiques de la chaudière et à la prévention de la corrosion causée par la présence de H<sub>2</sub>S (sulfure d'hydrogène) et la formation d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en cas de condensation.

La température des eaux de retour de la chaudière doit être maintenue à un niveau minimal de température pour éviter la formation de condensats. Si le biogaz contenu dans les boues digérées contient une quantité élevée de H<sub>2</sub>S et qu'il y a condensation sur les tubes de chauffe de la chaudière, cela peut entraîner des corrosions causées par l'acide sulfurique. Une réaction chimique possible est la suivante :



Pour éviter ces problèmes, il est important de prévenir la formation de condensats en maintenant une température suffisamment élevée.

Pour atteindre une température minimale des eaux de retour, il est nécessaire de mélanger les eaux de retour provenant de l'échangeur de chaleur, avec les eaux chaudes provenant de la sortie de la chaudière. Cela permet d'augmenter la température des eaux de retour et d'éviter la condensation. Un système d'automatisation est utilisé pour régler ce mélange.

L'eau chaude circule en continu dans la boucle de l'eau chaude de la chaudière" grâce à la pompe. Si nécessaire, il est possible d'ajouter de l'eau adoucie dans cette boucle en ouvrant les vannes.

#### 3.10.6.1.3. Les brûleurs des chaudières digesteurs

Dans le système de chaudières digesteurs, les brûleurs peuvent être alimentés de différentes manières pour assurer un fonctionnement continu et efficace. Voici les éléments clés liés à l'alimentation des brûleurs :

- Alimentation en biogaz provenant du digesteur : Le biogaz produit dans le digesteur peut être utilisé directement comme combustible pour alimenter les brûleurs. Le biogaz est extrait du digesteur et acheminé vers les brûleurs à travers un réseau de canalisations approprié.

- Alimentation en biogaz stocké dans le gazomètre : Si le niveau de biogaz dans le gazomètre est suffisamment élevé, il peut être utilisé pour alimenter les brûleurs. Le biogaz est prélevé du gazomètre et dirigé vers les brûleurs via le réseau de canalisations.
- Alimentation en fuel de la citerne de gasoil : En cas de niveau bas dans le gazomètre, lorsque le biogaz n'est pas disponible en quantité suffisante, le brûleur peut basculer vers l'utilisation de fuel provenant d'une citerne de gasoil. Cela peut être effectué manuellement par un opérateur.
- Isolation du réseau biogaz à l'aide de vannes de sécurité : Des vannes de sécurité sont installées pour isoler les brûleurs du réseau biogaz lorsque cela est nécessaire, par exemple, lorsqu'un basculement vers le fuel est effectué ou lorsqu'il y a des opérations de maintenance.
- Débitmètre pour mesurer le débit de biogaz : Un débitmètre est utilisé pour mesurer avec précision le débit de biogaz alimentant le brûleur. Cela permet de suivre la consommation de biogaz et d'ajuster les paramètres de régulation en conséquence.
- Boosters de biogaz ou supprimeurs : Des boosters de biogaz ou supprimeurs sont utilisés pour augmenter la pression du biogaz en entrée du brûleur, conformément à une consigne de régulation spécifique (dans ce cas, 90 mbar). Cela garantit un débit de biogaz adéquat et stable pour une combustion efficace.
- Débitmètres pour la consommation de fuel domestique : Des débitmètres sont également utilisés pour mesurer la consommation de fuel domestique lorsque le brûleur fonctionne avec du fuel provenant de la citerne de gasoil. Cela permet de suivre la consommation et d'effectuer les ajustements nécessaires.

#### 3.10.6.2. L'échangeur de chaleur : échangeur à faisceau tubulaire

L'échangeur de chaleur utilisé dans le processus de chauffage des boues est généralement un échangeur à faisceau tubulaire. C'est l'un des types d'échangeurs de chaleur les plus couramment utilisés dans les applications industrielles. D'autres types d'échangeurs de chaleur, tels que les échangeurs à plaques ou les échangeurs à coquille et tubes, peuvent également être utilisés dans le processus de chauffage des boues en fonction des spécifications et des préférences de chaque installation.

Un échangeur à faisceau tubulaire se compose de deux circuits de fluide : le circuit des boues et le circuit de fluide de chauffage. Les boues circulent à l'intérieur

des tubes, tandis que le fluide de chauffage circule à l'extérieur des tubes, permettant le transfert de chaleur entre les deux. Lorsque les boues circulent à travers les tubes, la chaleur est transférée du fluide de chauffage au travers des parois du tube, réchauffant ainsi les boues. Le fluide de chauffage peut être de la vapeur, de l'eau chaude, de l'huile thermique ou tout autre fluide approprié pour le transfert de chaleur. Il est conçu de manière à maximiser la surface d'échange thermique entre les boues et le fluide de chauffage. Cela est réalisé grâce à la configuration des tubes, qui peuvent être droits ou enroulés en spirale, et à la disposition des tubes dans l'échangeur.

L'utilisation de ce type permet un transfert de chaleur efficace et contrôlé, assurant le réchauffage des boues de manière précise tout en évitant les chocs thermiques indésirables. Cela garantit que les boues atteignent la température souhaitée pour maintenir une digestion anaérobie efficace.

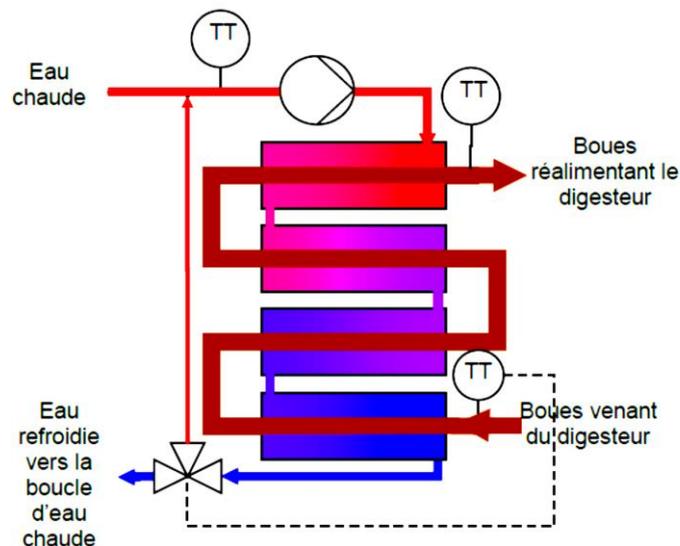


Figure 5 Schéma représentatif de principe de chauffage des boues dans l'échangeur

### 3.10.7. Stockage et utilisation du biogaz

#### 3.10.7.1. Evacuation de biogaz

Le biogaz produit pendant la digestion se trouve dans le ciel gazeux du digesteur, au-dessus des boues. Il est récupéré par une conduite située au sommet de l'ouvrage. Des soupapes et des gardes hydrauliques sont installés pour assurer la sécurité des équipements et des personnes en cas de variations de pression importantes.

Le biogaz passe d'abord par le pot de purge basse pression, où les condensats sont séparés. Ensuite, une partie du biogaz est envoyée vers les compresseurs de

brassage pour le brassage des boues. Si le volume de biogaz produit dépasse la capacité des compresseurs de brassage, l'excédent est dirigé vers le gazomètre.

Le transfert du biogaz des digesteurs vers le gazomètre se fait en utilisant la différence de pression entre les différents ateliers. Ainsi, le biogaz est acheminé vers le gazomètre où il est stocké et peut être utilisé ultérieurement pour des usages tels que la production d'électricité ou de chaleur.

#### 3.10.7.2. Alimentation directe des chaudières :

Le biogaz peut être utilisé comme combustible pour alimenter les chaudières, produisant ainsi de la chaleur pour des applications telles que le chauffage ou la production d'eau chaude.

#### 3.10.7.3. Brûlage par la torchère :

Si le volume de biogaz produit dépasse la capacité d'utilisation ou de stockage, le biogaz en excès peut être brûlé par la torchère afin d'éviter sa dispersion dans l'atmosphère. La torchère est alimentée lorsque le niveau de biogaz dans le gazomètre dépasse 80 % de sa capacité totale.

#### 3.10.7.4. Stockage dans le gazomètre :

Généralement, le stockage dans le gazomètre et l'utilisation du biogaz pour alimenter la torchère est applicable à de nombreuses installations de traitement des boues. Les capacités de stockage, les caractéristiques de la membrane du gazomètre, la pression de fonctionnement, les dispositifs de mesure et de contrôle, ainsi que l'alimentation de la torchère à partir du gazomètre, sont des pratiques courantes. Cependant, les détails spécifiques, tels que les capacités exactes, les pressions spécifiques et les dispositifs de contrôle utilisés, peuvent varier en fonction de la conception et des spécifications de chaque installation.

Le biogaz est stocké dans un double membrane, avec la membrane intérieure étanche au biogaz et la membrane extérieure offrant une résistance mécanique et une protection contre les conditions climatiques. La pression à l'intérieur du gazomètre est maintenue à environ 20 mbar par les compresseurs.

Le niveau de biogaz dans le gazomètre est contrôlé par le dispositif de mesure, ce qui permet de surveiller le fonctionnement des installations utilisant le biogaz, tels que la torchère et les chaudières.

Le maintien de la pression du gazomètre est assuré par deux ventilateurs fonctionnant en alternance pour prévenir toute défaillance simultanée. Un registre flottant est utilisé pour maintenir une pression constante dans l'enveloppe extérieure du gazomètre. Le registre ajuste son ouverture en fonction du niveau de remplissage du gazomètre, permettant ainsi de maintenir une pression de 23 mbar. La pression dans le circuit biogaz est maintenue constante au point de raccordement du gazomètre, compte tenu des pertes de charge.

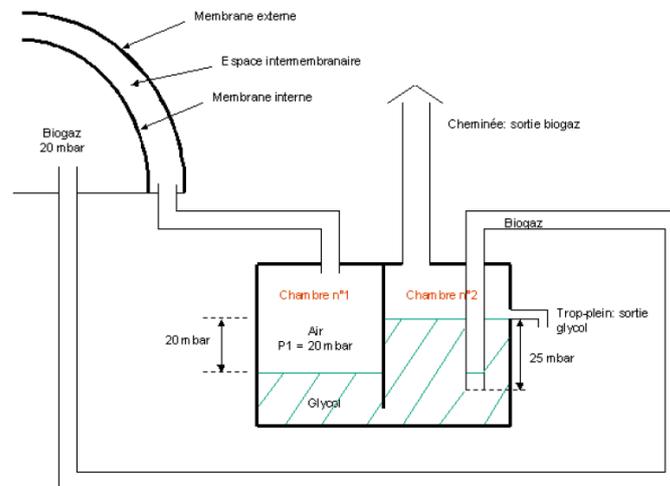


Figure 6 Schéma de fonctionnement de la garde hydrique

La torchère peut être alimentée soit par le biogaz directement issu des digesteurs, soit par le biogaz stocké dans le gazomètre. Des vannes sont utilisées pour contrôler l'allumage et l'alimentation de la torchère. Des arrêtes-flammes sont installés pour protéger les équipements en cas de retour de flamme.

### 3.11. Prétraitement des boues pour la digestion anaérobie

Le prétraitement des boues dans la digestion anaérobie joue un rôle important pour améliorer l'efficacité du processus. Il permet de surmonter les défis liés à la complexité de la matière organique des boues, en favorisant leur biodégradabilité et en réduisant la présence de substances inhibitrices.

Il existe plusieurs procédés de prétraitement des boues qui peuvent être utilisés pour améliorer les performances de la digestion anaérobie. (PILLI 2015) (MOLETTA 2002) (CAMACHO, PATRICIA ET PRÉVOT 2011) (MOLETTA 2002):

#### 3.11.1. Prétraitement thermique :

Le prétraitement thermique consiste à chauffer les boues à des températures élevées pendant une période déterminée. Cela peut être réalisé à l'aide de procédés tels que la pasteurisation, la stérilisation ou l'hydrolyse thermique.

### **3.11.2. Prétraitement mécanique :**

Le prétraitement mécanique implique l'utilisation de forces mécaniques pour déchiqueter, broyer ou désintégrer les boues. Cela peut être réalisé à l'aide de broyeurs, de malaxeurs ou d'autres dispositifs mécaniques.

### **3.11.3. Prétraitement chimique :**

Le prétraitement chimique implique l'ajout de produits chimiques aux boues pour faciliter la dégradation des matières organiques. Les produits chimiques couramment utilisés comprennent les acides, les bases, les agents oxydants ou les agents réducteurs.

### **3.11.4. Prétraitement enzymatique :**

Le prétraitement enzymatique implique l'ajout d'enzymes spécifiques aux boues pour dégrader les composés organiques complexes. Les enzymes peuvent aider à décomposer les polymères et les matières organiques récalcitrantes, facilitant ainsi leur biodégradation dans le digesteur. Le prétraitement enzymatique peut être utilisé en combinaison avec d'autres procédés de prétraitement pour améliorer l'efficacité de la digestion anaérobie.

### **3.11.5. Prétraitement par ultrasons :**

Le prétraitement par ultrasons est une technique de prétraitement des boues qui utilise des ondes ultrasonores à haute fréquence pour désintégrer les particules solides et décomposer les composés organiques.

## **3.12. Production de biogaz par la digestion anaérobie des boues**

La production de biogaz par la digestion anaérobie des boues est un processus clé dans le traitement des déchets organiques. Ce procédé permet la conversion des matières organiques en une source d'énergie renouvelable, offrant ainsi une solution durable pour la gestion des boues d'épuration.

### **3.12.1. Composition du biogaz produit**

La production de biogaz est l'un des principaux avantages de la digestion anaérobie des boues des stations d'épuration. Ce biogaz est principalement composé de méthane (CH<sub>4</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Cependant, sa composition peut varier en fonction de différents facteurs tels que (BENNOUNA, M. et KEHAL 2001) :

- la composition des boues.
- les conditions de digestion.
- les techniques de gestion.
- Le rapport C/N.
- La température.

- Le pH.
- La rétention hydraulique.
- La charge organique.

Tableau 5 Comparaison entre Biogaz et G.N.(BOUCHAREB, Menel; KADDECHE 2019)

<b>Gamme de concentration des principaux constituants</b>		
<b>Constituants</b>	<b>Biogaz formé par digestion méthaniques de déchets de biomasse</b>	<b>(G.N) Gaz naturel Algérien</b>
CH <sub>4</sub>	50 à 70	67 à 93
CO <sub>2</sub>	25 à 30	0.2 à 2
H <sub>2</sub> S	0.1 à 5	-
N <sub>2</sub>	0.5 à 3	0.7 à 3
H <sub>2</sub>	0.1 à 1	0
CO	<0.1	-

### 3.12.2. Potentiel de production de biogaz des boues d'épuration

L'estimation de potentiel de production de biogaz nécessite des études et des calculs spécifiques basés sur les caractéristiques propres des boues d'une station d'épuration.

Le potentiel de production de biogaz des boues d'épuration dépend de plusieurs facteurs, notamment (NJAMPOU 2011) :

- Composition des boues : les boues riches en matières organiques, telles que les boues primaires et les boues activées, ont un potentiel plus élevé de production de biogaz.
- Caractéristiques des boues : les boues bien équilibrées sur le plan nutritionnel et présentant une bonne stabilité organique favorisent une production optimale de biogaz.
- Conditions de digestion : les conditions optimales doivent être maintenues pour favoriser l'activité microbienne et maximiser la production de biogaz.
- Techniques de gestion : La co-digestion de boues avec des déchets organiques externes peut améliorer le potentiel de production en introduisant de nouvelles sources de matières organiques.

On peut améliorer le rendement en biogaz on utilisant des stratégies comme (HESS 2007) :

- Le contrôle des paramètres de processus
- L'amélioration de la biodégradabilité des substrats
- La co-digestion avec d'autres substrats
- L'optimisation du système de mélange

### 3.12.3. Valorisation du biogaz produit :

*Tableau 6 Applications et avantages de l'utilisation du biogaz dans les installations de traitement des eaux usées (HAOUAM, SALAH EDDINE et HASSAINE 2020)(RAHMANI, ABDRAHI, TAYEBI, HACHEMI 2016)*

Application	Avantage
Production d'électricité	l'alimentation les installations de traitement des eaux usées L'injection dans le réseau électrique pour une utilisation générale.
Production de chaleur	Source de chaleur dans les systèmes de chauffage et de production d'eau chaude. chauffage des bâtiments, des serres agricoles, des installations industrielles, ou encore pour les processus de séchage.
Cogénération	Optimisation de l'utilisation de l'énergie contenue dans le biogaz. Amélioration l'efficacité globale du système.
Injection dans le réseau de gaz naturel	Source d'énergie pour le chauffage, la cuisson et d'autres applications domestiques ou industrielles
Utilisation comme carburant pour les véhicules	La réduction des émissions de gaz à effet de serre La transition vers une mobilité plus durable

## Conclusion

En conclusion, Ce chapitre fournit une base solide de connaissances théoriques qui sera essentielle pour la conception et l'intégration des installations de méthanisation. En comprenant les principes fondamentaux de la digestion anaérobie, les ingénieurs et les professionnels du domaine seront en mesure d'optimiser les performances des installations de méthanisation et de maximiser la production d'énergie à partir des boues des stations d'épuration.

# Chapitre 04 : Présentation de la STEP de Beni Mered

# Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons la station de traitement des eaux usées de Beni Mered impliquées dans notre étude. L'entreprise AMENHYD, nous a proposé le sujet, apporte son expertise en ingénierie et en solutions environnementales. L'Office National de l'Assainissement (ONA), qui gère la station de Beni Mered, nous a fourni les données nécessaires pour notre analyse. Cette section permettra de mieux comprendre les acteurs clés et leur rôle dans notre étude.

## 4.2. Présentation de la STEP de Beni Mered

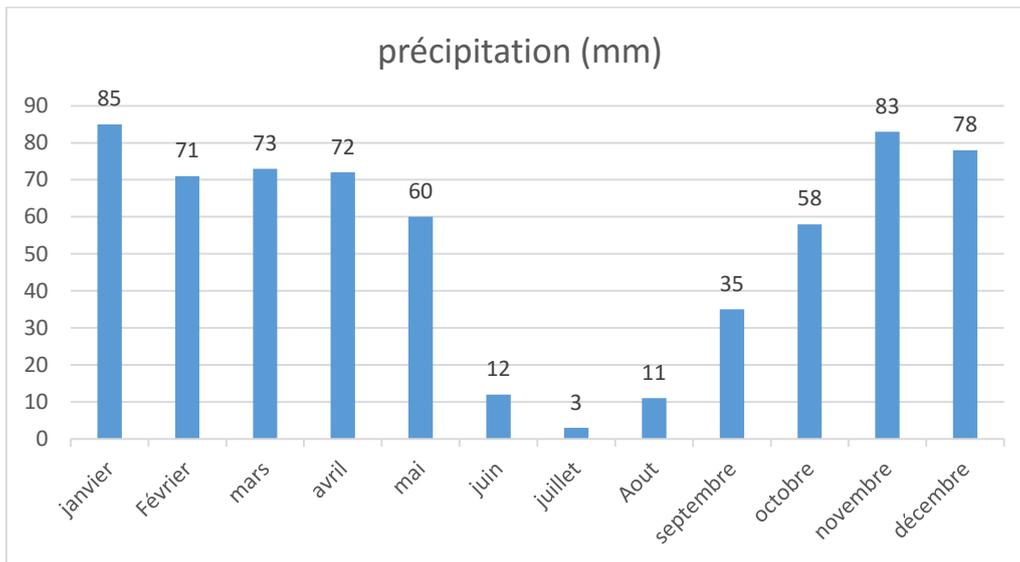
La station de traitement des eaux usées (STEP) de Beni Mered est conçue pour le traitement des eaux usées provenant de l'aire urbaine de Blida-Beni Mered, ainsi que des industries connectées à cette zone. Elle est implantée sur un terrain d'environ 6 hectares, situé à l'est de la route nationale N°1, à proximité d'Oued Béni Azaa, qui traverse les localités de Blida, Ouled Aiche et Beni Mered sur une distance d'environ 30 km. Elle est également proche d'autres cours d'eau tels que l'Oued Lekhel, l'Oued Ftiss, l'Oued El Harrach, l'Oued Bouroumi, et d'autres encore. La station se trouve à environ 5 km au nord-est de Blida, à environ 40 km au sud-ouest d'Alger et à environ 30 km au nord-est de Médéa.

Depuis les années quatre-vingt du vingtième siècle, la gestion de cette STEP est assurée par l'ONA (Zone d'Alger).

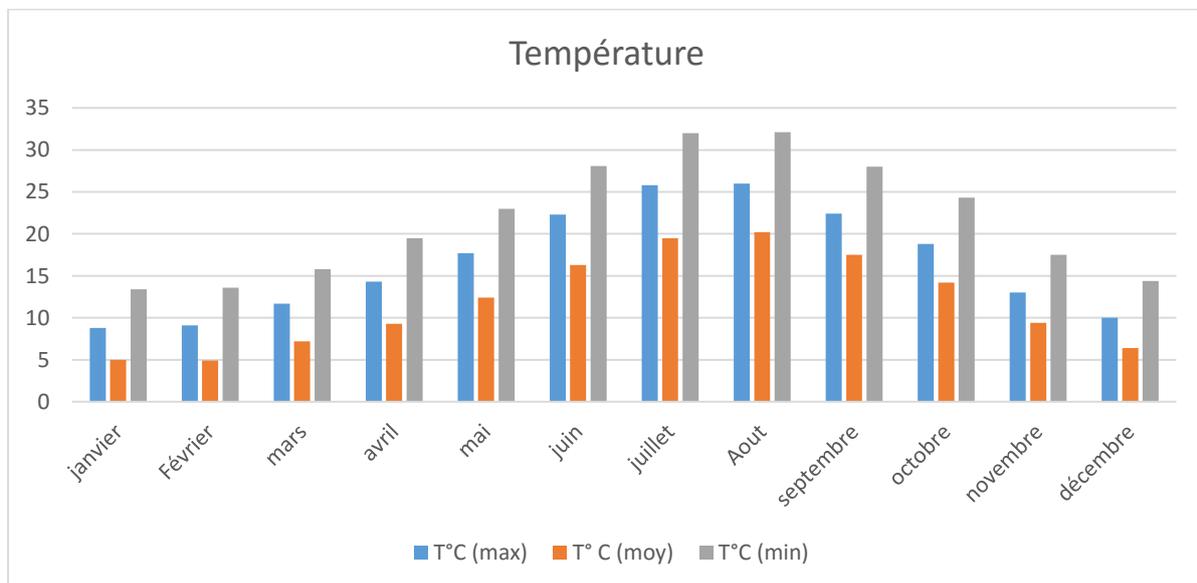
### 4.2.1. Description générales sur la STEP

#### 4.2.1.1. Aperçu climatique

Le climat de Béni Mered est considéré comme tempéré chaud. En hiver, les précipitations sont plus abondantes par rapport à l'été. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat de Béni Mered est classé comme Csa. La température moyenne annuelle dans cette région est d'environ 16,7 °C. On enregistre en moyenne 641 mm de pluie par an.



Le mois de juillet présente les précipitations les plus faibles, avec seulement 3 mm. En revanche, le mois de janvier enregistre les plus fortes précipitations, avec une moyenne de 85 mm.



Une différence de 17,2 °C est constatée entre la température la plus basse et la plus élevée tout au long de l'année.

#### 4.2.1.2. Gestion des déchets et des boues

Les données mensuelles de production des déchets et des boues fournissent des informations importantes pour évaluer les tendances et les variations dans la génération de déchets dans la station de traitement des eaux usées.

En analysant ces données mensuelles voici quelques observations et commentaires :

Représentation de la production mensuelles des boues :

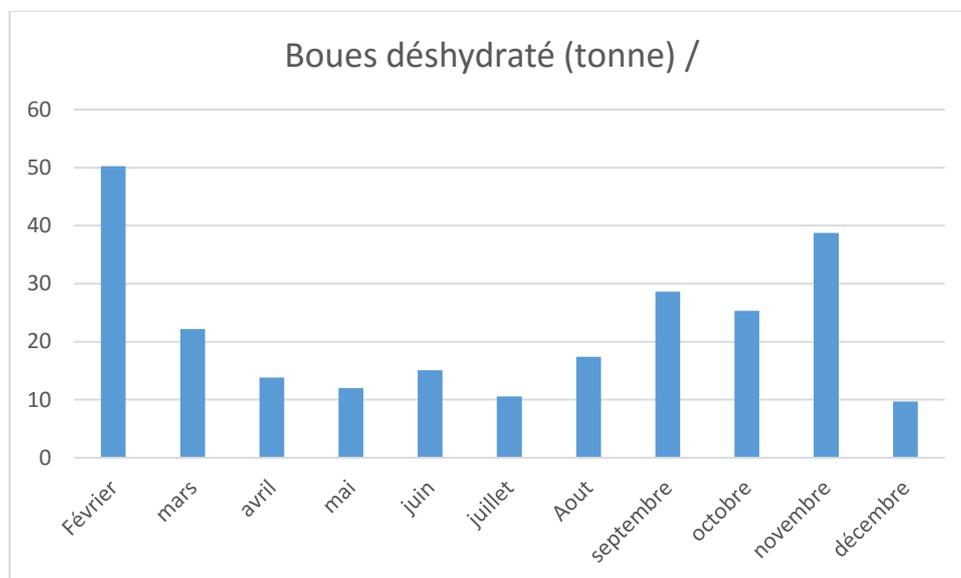


Figure 7 histogramme de variation de Production des boues mensuelle ,2015

Selon l'histogramme représenté dans la figure 9, ce qui concerne les boues déshydratées, il y a une variation significative d'un mois à l'autre. Par exemple, en février, la quantité de boues déshydratées était de 50,25 tonnes, tandis qu'en mars, elle était de 22,2 tonnes. Cela peut être dû à des variations dans la charge organique des eaux usées entrantes ou à des fluctuations dans le processus de déshydratation des boues. Les mois de septembre, octobre et novembre présentent les plus grandes quantités de boues déshydratées, atteignant respectivement 28,63 tonnes, 25,35 tonnes et 38,74 tonnes. Cela peut être lié à des facteurs saisonniers ou à des variations dans les activités industrielles.

Représentation de la production mensuelle des déchets :

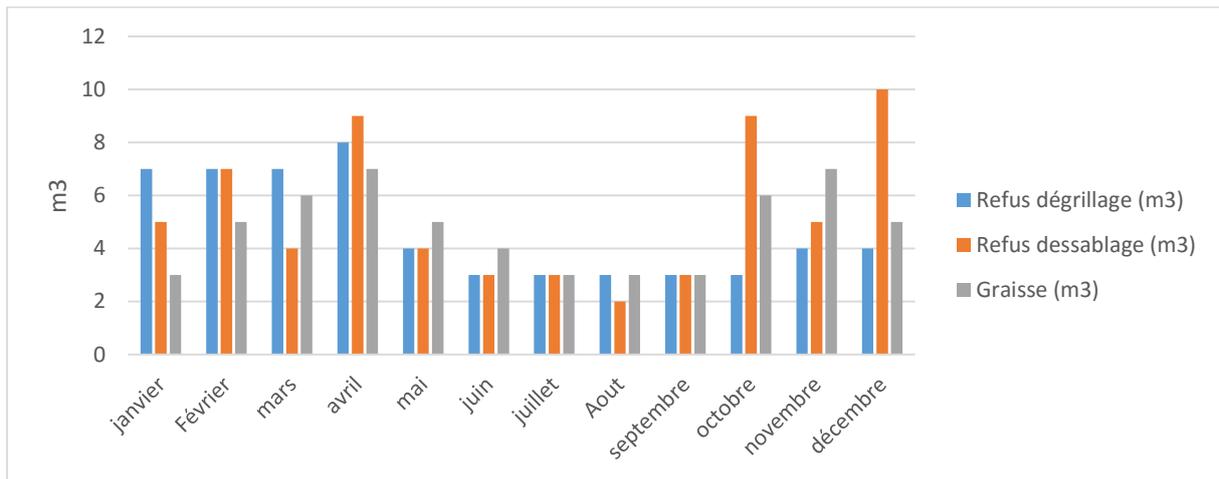


Figure 8 histogrammes de variation de Production des déchets mensuelle ,2015

D'après l'histogramme représenté dans la figure 10 :

- Les quantités de refus de dégrillage varient légèrement d'un mois à l'autre, avec une moyenne d'environ 5 à 7 m3 par mois. Il n'y a pas de tendance claire dans ces variations, ce qui suggère une production relativement constante de déchets de dégrillage.
- Les quantités de refus de dessablage fluctuent davantage, avec des valeurs allant de 2 à 9 m3 par mois. Il y a des variations significatives d'un mois à l'autre, indiquant des variations dans les particules de sable et de gravier présentes dans les eaux usées entrantes.
- Les quantités de graisse générée sont relativement stables, avec une moyenne d'environ 4 à 6 m3 par mois. Cela indique une production constante de graisse provenant des activités industrielles ou des sources domestiques.

En représentant les données annuelles de production des déchets et des boues en pourcentage par rapport à la moyenne annuelle de 2015 dans la figure 11, on a :

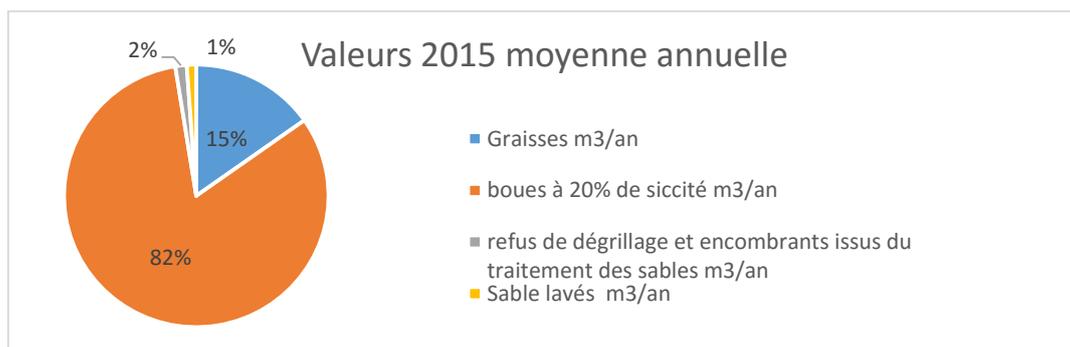


Figure 9 présentation des pourcentages des différents déchets générés à la station annuellement, 2015

- Graisses : Les graisses représentent environ 15% de la production totale des déchets, avec une quantité moyenne annuelle de 4745 m<sup>3</sup>. Cela indique une contribution significative des graisses dans la composition des déchets générés dans la station de traitement des eaux usées.
- Boues à 20% de siccité : Les boues à 20% de siccité représentent la plus grande partie des déchets produits, représentant environ 82% de la production totale des déchets. Avec une quantité moyenne annuelle de 25610 m<sup>3</sup>, les boues constituent la principale composante des déchets générés dans la station de traitement.
- Refus de dégrillage et encombrants issus du traitement des sables : Les refus de dégrillage et les encombrants issus du traitement des sables représentent environ 2% de la production totale des déchets, avec une quantité moyenne annuelle de 433 m<sup>3</sup>. Bien que cela soit relativement faible par rapport aux autres types de déchets, il est important de les gérer correctement pour maintenir l'efficacité du processus de traitement.
- Sables lavés : Les sables lavés représentent environ 1% de la production totale des déchets, avec une quantité moyenne annuelle de 360 m<sup>3</sup>. Bien que leur contribution soit relativement faible, leur gestion adéquate est essentielle pour éviter tout impact environnemental négatif.

Cette analyse en pourcentage met en évidence l'importance de boues déshydratées en tant que principale composante des déchets produits dans la station de traitement des eaux usées. Elle souligne également l'importance de gérer correctement les graisses, les refus de dégrillage, les encombrants et les sables lavés pour assurer un fonctionnement efficace et respectueux de l'environnement de la station

#### La gestion des boues et déchets appropriés à la station

- Gestion des refus de dégrillage : Les refus de grille sont stockés dans des bennes de 7m<sup>3</sup> chargées pour être évacuées par camion vers le Centre d'Enfouissement Technique.
- Gestion des sables de prétraitement : Les sables extraits du prétraitement sont dirigés vers un laveur. Après lavage et classification, les sables sont stockés dans des bennes type AMPLI Roll de 7m<sup>3</sup> évacuées du site par camion pour rejoindre la décharge.

- Gestion des boues déshydratées : Après épaissements, les boues biologiques déshydratées par filtres à bandes sont évacuée en décharge.
- Dévolution finale et mise en décharge : Pour la mise en centre d'enfouissement technique des déchets la station n'a pas prévu de taxes, ni de redevances pour l'évacuation des boues déshydratées (20% des boues produites destinées à la valorisation agricole et 80% évacuée en décharge) . Les boues destinées à la valorisation agricole seront mises sur site à disposition des agriculteurs.

#### 4.2.2. Exploitation de la STEP :

La station d'épuration est conçue pour une capacité de traitement de 383 000 équivalents habitants d'ici 2015, avec une proportion d'effluents industriels représentant 40 000 équivalents habitants. Les eaux usées à épurer ont les caractéristiques qualitatives et quantitatives résumées dans le tableau suivant.

*Tableau 7 : Données de base de la STEP de Béni Mered*

<b>Charges hydraulique entrant à la station d'épuration</b>		
<b>paramètres</b>	valeurs	Unités
<b>pollution domestique</b>	343000	Eq.H
<b>pollution industrielle</b>	40000	Eq.H
<b>capacité de traitement</b>	383000	Eq.H
<b>débit moyen journalier</b>	51560	m <sup>3</sup> /j
<b>débit moyen horaire</b>	2148	m <sup>3</sup> /h
<b>débit de pointe temps sec</b>	3310	m <sup>3</sup> /h
<b>débite de pointe temps pluie</b>	4800	m <sup>3</sup> /h
<b>charges polluants entrant à la station d'épuration</b>		
<b>demande biologique en oxygène (DBO<sub>5</sub>)</b>	21065	kg/j
<b>demande chimique en oxygène (DCO)</b>	52563	kg/j
<b>Matière en suspension (MES)</b>	25278	kg/j
<b>Azote (NTK)</b>	3830	kg/j
<b>Phosphore (P)</b>	766	kg/j

Actuellement, la STEP de Beni Mered fonctionne avec une seule file de traitement, car le débit moyen reçu ne dépasse pas 25% du débit nominal.

Avant d'être raccordés, ces établissements doivent prévoir l'installation de prétraitements pour rendre leurs rejets conformes au traitement des effluents urbains. Les effluents industriels sont ensuite acheminés vers la bêche d'arrivée de la station par le biais de cinq postes de relevage. La station est alimentée par cinq (5) postes de refoulement (PR) :

- PR18 avec un débit pointe de 6200 m<sup>3</sup> /j.
- PR22 avec un débit de pointe de 1000m<sup>3</sup> /j.
- PR22BIS dont les eaux usées rejoignent le PR22.
- PR CENTRAL dont les eaux usées rejoignent le PR18.
- PR BOUAARFA dont les eaux usées rejoignent le PR CENTRAL.

Donc elle est alimentée par 2 postes de refoulement :

- PR18 (2 canalisations de refoulement de d=900) avec un débit nominal de 4000m<sup>3</sup>/h pour l'horizon 2015 et 6200 m<sup>3</sup>/h pour l'horizon 2030.
- PR 22 (1 canalisation de refoulement de d=500) avec un débit nominal de 800m<sup>3</sup>/h pour l'horizon 2015 et 1000m<sup>3</sup>/h pour l'horizon 2030.

4.2.2.1. La chaîne des procédés de traitement des eaux :

(Voir le schéma dans annexe 7)

### *Prétraitement*

Généralement, les prétraitements ont pour objectif d'éliminer les éléments les plus grossiers afin de prévenir le colmatage des modules par les matières en suspension (MES). Dans le prétraitement de la station d'épuration de Beni Mered, les effluents sont soumis à deux opérations distinctes.

1. dégrillage (quatre (4) lignes)
2. dessablage-déshuilage (trois (3) lignes)

### *Dégrillage*

La première phase des prétraitements comprend un processus de dégrillage fin visant à éliminer les matières grossières des effluents. Cette étape est réalisée à l'aide de quatre dégrilleurs fins automatiques, avec un entrefer de 10 mm, dont un est en mode de secours. Les déchets extraits sont collectés dans un transporteur à vis, puis compactés dans une vis compacteuse à déchets. La vitesse d'approche des effluents dans le canal du dégrilleur est d'environ 0,51 m/s.

### *Dessablage et déshuilage*

Les effluents sont ensuite dirigés vers les ouvrages de dessablage-déshuilage, qui facilitent la décantation des résidus les plus denses tels que les sables, ainsi que la flottation des déchets plus légers comme les graisses. Cette opération est réalisée au moyen de trois lignes de dessableurs-déshuileurs, conçues pour traiter un débit total

de 4800 m<sup>3</sup>/h. Ces ouvrages sont de forme rectangulaire et fonctionnent selon un flux longitudinal lent. Actuellement, deux lignes sont en exploitation, avec un débit de pointe unitaire de 1600 m<sup>3</sup>/h.

L'élimination du sable vise à prévenir l'abrasion des équipements et le dépôt ultérieur de ces particules, ce qui pourrait entraîner des obstructions des canalisations et un ensablement des ouvrages. L'élimination des graisses favorise le transfert d'oxygène dans les bassins d'aération. La flottation des graisses est réalisée en utilisant de l'air comprimé pour créer des bulles dans le dessableur-déshuileur. Les graisses qui flottent en surface sont ensuite évacuées à l'aide d'un racleur fixé au pont. Le sable accumulé au fond du dessableur-déshuileur est évacué par un système d'air lift intégré au pont. Des pompes à vide sont utilisées pour aspirer le sable et le transférer vers le canal de collecte le long du dessableur-déshuileur.

### Traitement Primaire

Avant le traitement biologique, les effluents passent par trois ouvrages de décantation primaire, chacun ayant des caractéristiques spécifiques. Actuellement, une seule ligne de décantation primaire est en service.

*Tableau 8 Caractéristique dimensionnelles et fonctionnelle du décanteur primaire*

<b>Caractéristique dimensionnelles</b>			
<b>Données</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs</b>	
<b>Nombre d'ouvrage</b>	/	3	
<b>Diamètre unitaire</b>	M	33	
<b>Hauteur d'eau en zone périphérique de l'ouvrage</b>	m	2.6	
<b>Surface utile</b>	m <sup>2</sup>	855	
<b>Volume utile</b>	m <sup>3</sup>	2223	
<b>Volume total</b>	m <sup>3</sup>	6669	
<b>Fonctionnement des ouvrages</b>			
<b>Débit horaire moyen par ouvrage</b>	m <sup>3</sup> /h	716	
<b>Vitesse ascensionnelle au débit moyen</b>	M <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> .h	0.85	
<b>Temps de passage</b>	h	3.10	

Le décanteur primaire a pour objectif de réduire les paramètres MES (matières en suspension) de 55%, la DCO (demande chimique en oxygène) de 30% et la DBO<sub>5</sub> (demande biochimique en oxygène sur 5 jours) de 30%. Cela entraîne l'accumulation de boues au fond du décanteur. Ces boues sont ensuite raclées vers un puits central et

extraites vers la file de traitement des boues par le biais de la bêche de mélange des boues mixtes (biologiques et primaires).

Les eaux en surface passent à travers une lame déversant crénelée située en périphérie du bassin. Après cette étape, les eaux sont dirigées vers les bassins d'aération pour la prochaine phase du traitement.



### Traitement Biologique

Après les décanteurs primaires, les effluents sont acheminés vers le traitement biologique. Le bassin biologique est considéré comme le cœur de la station d'épuration, car c'est là que se déroule l'épuration des eaux usées grâce à une population spécifique de bactéries. Cette population bactérienne, également appelée biomasse ou boue activée, est responsable de la dégradation et de l'assimilation de la pollution présente dans les effluents. Ce mécanisme engendre une croissance bactérienne qui permet le renouvellement et le développement continu des bactéries.

Le bassin biologique remplit trois objectifs principaux :

- Oxydation des produits carbonés.
- Oxydation et réduction des produits azotés.
- Oxydation et réduction du phosphore.

Et pour atteindre ces trois (03) objectifs, trois actions sont nécessaires :

- Aération du bassin ;
- Recirculation des boues ;
- Extraction des boues en excès.

La station d'épuration de Beni Mered est composée de trois bassins d'aération. Chaque bassin est équipé de quatre aérateurs de surface d'une puissance nominale de 55 kW chacun. La valeur maximale spécifique brute d'apport en oxygène est de 1,6 kg d'O<sub>2</sub>/kWh. Ces aérateurs assurent l'oxygénation nécessaire dans les bassins pour favoriser l'activité bactérienne et le processus de traitement des eaux usées.

*Tableau 9 Caractéristique dimensionnelles du bassin d'aération*

<b>Données</b>	<b>Unités</b>	<b>Valeurs</b>
----------------	---------------	----------------

<b>Nombre d'ouvrage</b>	U	03
<b>Dimension unitaire</b>	m*m*m	32 x 32 x 4, 65
<b>Volume unitaire</b>	m3	4762
<b>Volume total</b>	m3	14286
<b>Temps de passage</b>	h	8.67
<b>Nombre d'aérateur de surface par bassin</b>	U	04
<b>Puissance absorbé unitaire</b>	Kw	51
<b>Puissance absorbé totale</b>	Kw	612
<b>Puissance spécifique</b>	W/m <sup>3</sup>	43

Le traitement de cette pollution se fait par les bactéries présentes dans le bassin biologique et nécessite l'apport d'oxygène par les aérateurs, son mode de fonctionnement dépend de la charge polluante entrante et de la quantité de boue dans bassin. Dans notre cas il s'agit d'un traitement moyenne charge dont la charge massique varie entre 0.25-0.5 kg DBO<sub>5</sub> /kg MVS /j.

La biomasse peut contenir plusieurs micro-organismes épuratoires comme :

- Bactérie : pseudomonas , aeromonas, flavobacter, alcaligenes ..
- Protozoaires : zooflagellés, vorticelles, sarcodines , amibes ..
- Métazoaires : rotifères, nématodes, ciliés, tardigrades.

#### Traitement Secondaire (Clarification)

L'étape de traitement dans la station d'épuration est essentielle pour garantir un rejet d'eau de qualité conforme aux normes en Algérie. Cette étape permet de séparer les boues de l'eau traitée en fonction de la capacité des boues à se décanter (en fonction de la nature des effluents) et de la capacité de l'ouvrage à gérer les variations de charge hydraulique. Le dimensionnement d'un clarificateur est basé sur une vitesse ascensionnelle inférieure à la vitesse de décantation des boues. De plus, il est important d'avoir une hauteur d'eau suffisante en périphérie des ouvrages pour favoriser le tassement des boues (selon la théorie de Kynch).

*Tableau 10 Caractéristiques des clarificateurs*

<b>Données</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Nombre De file</b>	U	3
<b>Diamètre intérieur d'un clarificateur</b>	m	46
<b>Volume d'un clarificateur</b>	m3	6315
<b>Volume total de clarification</b>	m3	18945
<b>Hauteur d'eau périphérique</b>	m	3.8

Chaque filtre du clarificateur est alimenté par gravité à travers un puits central et une canalisation située sous le radier. Les boues se déposent au fond de l'ouvrage et sont aspirées à l'aide de tubes verticaux qui balayent toute la surface à chaque rotation. Ce système permet d'éviter un temps de séjour plus long des boues situées en périphérie, qui devraient sinon être ramenées vers le centre avant d'être extraites.

L'eau épurée est récupérée par surverse et dirigée vers le poste de désinfection et de comptage avant de quitter l'ouvrage.



## Désinfection

L'objectif de cette opération est d'éliminer les organismes pathogènes tels que les protozoaires, les bactéries et les virus présents dans l'eau traitée afin d'éviter toute contamination. Pour cela, une désinfection à l'eau de javel est utilisée, avec une densité de 1.22 kg/l et une concentration en chlore de 13%. Deux cuves verticales, d'un volume unitaire de 20 m<sup>3</sup>, sont utilisées pour stocker cette solution de désinfection.

*Tableau 11 Caractéristiques dimensionnelles et fonctionnelles de l'ouvrage de désinfection*

<b>Données</b>	<b>Unités</b>	<b>Valeurs</b>
<b>Nombre d'ouvrage</b>	U	01
<b>volume</b>	m <sup>3</sup>	2145
<b>Débit de pointe maximale</b>	m <sup>3</sup> /h	3310
<b>Temps de contact</b>	mn	39
<b>Taux de chlore actif à injecter (mg Cl actif) en moyenne</b>	mg/l	5
<b>Concentration de l'eau de Javel à 13%</b>	g/l	150
<b>Consommation moyenne journalière hypochlorite de sodium</b>	m <sup>3</sup> /j	3.44

Les eaux épurées sont rejetées dans l'Oued Béni Azza.



#### 4.2.2.2. La chaîne des procédés de traitement des boues

La filière de traitement choisie comprend les étapes suivantes : (voir le schéma dans annexe 8)

- Extraction des boues en excès des décanteurs et clarificateurs.
- Mélange des boues primaires et des boues biologiques dans une nouvelle bêche de mélange.
- Épaississement statique des boues mixtes dans l'épaississeur existant.
- Stabilisation aérobie des boues pour réduire la fraction organique, réalisée sur deux ouvrages identiques.
- Déshydratation mécanique des boues à l'aide de quatre unités de filtre à bande presseuses. Les boues déshydratées sont ensuite évacuées à l'aide de bennes dédiées.

##### 4.2.2.2.2. Bêche de mélange

La bêche de mélange est un réservoir où les boues provenant des décanteurs primaires, des postes de recirculation et du poste de flottation sont collectées et mélangées. Elle est équipée d'un agitateur et de deux pompes de transfert d'une capacité de 70 m<sup>3</sup>/h. Son rôle est d'assurer un mélange homogène des boues avant de les traiter dans les étapes suivantes du processus.

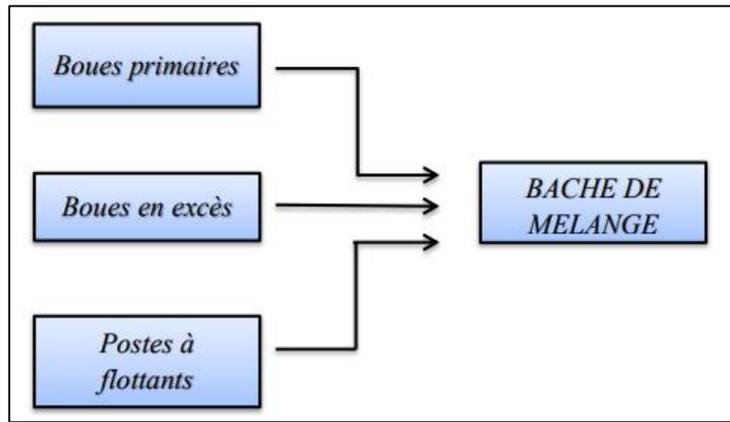


Figure 10 les différentes matières organiques envoyées à la bache de mélange

Données		Unités	Valeurs
<b>concentration des boues primaires extraites files 1 et 2</b>		g/l	01
<b>Volume des boues primaires extraites files 1 et 2</b>	Moyenne annuelle	m <sup>3</sup> /j	295
	Pointe temps sec		545
<b>Concentration des boues biologiques extraites files 1 et 2</b>		g/l	8
<b>Volume des boues biologiques extraites files 1 et 2</b>	Moyenne annuelle	m <sup>3</sup> /j	524
	Pointe temps sec		938

Tableau 12 les données de caractérisation de la bache de mélange

#### 4.2.2.2.3. Épaississement gravitaire

Le processus d'épaississement des boues repose sur la gravité et le temps de séjour dans l'épaississeur. Voici les principales caractéristiques de cet ouvrage :

1. Les boues sont introduites au centre de l'épaississeur, à l'intérieur d'une jupe de tranquillisation appelée Clifford.
2. Un pont racleur mobile équipé de racles assure le raclage du fond de l'épaississeur.
3. Une fosse de récupération centrale avec une herse facilite l'élimination de l'eau interstitielle et des gaz emprisonnés.
4. Les boues épaissies sont extraites depuis le fond de l'ouvrage.
5. L'eau de surverse, qui se trouve à la surface, est recueillie.

L'épaississement gravitaire permet de concentrer les boues, et cette technologie présente l'avantage d'une consommation électrique très faible.



Tableau 13 Caractéristiques d'épaississeur gravitaire

Description	Unités	Valeurs
Nombre de file	g/l	17-17.5
Diamètre de l'épaississeur	m	22
Hauteur	m	04
Surface	m <sup>2</sup>	380
Volume d'un épaississeur	mg/l	1521
Concentration des boues en entrée	mg/l	11.3
Concentration des boues épaissie	g/l	30
Temps de séjour en moyen	m3 /j	3.3

Les boues concentrées dans l'épaississeur sont extraites à l'aide de trois pompes volumétriques, dont une est une pompe de secours. Chaque pompe est équipée d'une vanne et d'un débitmètre électromagnétique sur le refoulement vers chaque bassin de stabilisation aérobie. Cela permet de contrôler et de réguler le débit des boues extraites vers les bassins de stabilisation.

#### 4.2.2.2.4. Stabilisation des boues

La stabilisation des boues organiques dans la STEP vise à réduire leur quantité en dégradant les matières volatiles et en hygiénisant partiellement les boues. Cela est réalisé en favorisant l'auto-oxydation des micro-organismes en présence d'oxygène. Ainsi, les matières organiques sont transformées en minéraux plus stables, ce qui facilite leur traitement ultérieur.

Données	Unités	Valeurs
Concentration en oxygène dissous	mg/l	0.5-0.7
Temps de séjour	j	14

<b>Taux d'abattement des MVS</b>	%	40-45
----------------------------------	---	-------



Dans les deux bassins de stabilisation aérobie de la station d'épuration, l'aération des boues est assurée par quatre turbines verticales. Ces turbines ont été sélectionnées en fonction de leur efficacité d'oxygénation, qui est de 1,9 kg d'oxygène par kilowatt en conditions standards. Cette configuration garantit un apport adéquat en oxygène pour favoriser la dégradation des matières organiques présentes dans les boues.

*Tableau 14 les caractéristiques des bassins de stabilisation aérobie*

<b>description</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs</b>	
<b>Nombre D'ouvrage</b>	U	2	
<b>longueur</b>	m	28	
<b>largeur</b>	m	28	
<b>hauteur d'effluent dynamique</b>	m	4.54	
<b>Volume de chaque file</b>	m <sup>3</sup>	3559	
<b>volume total</b>	m <sup>3</sup>	7119	
<b>Nombre total des turbines</b>	U	8	
<b>capacité nécessaire d'aération</b>	Moyenne annuelle	Kg	953
	Pointe journalière	O <sub>2</sub> /h	985
<b>Capacité d'aération totale</b>	Kg O <sub>2</sub> /h	1280	
<b>Volume journalière des boues stabilisées</b>	Moyenne annuelle	m <sup>3</sup>	468

	Pointe journalière		591
<b>Temps de séjour moyen</b>	Moyenne annuelle	j	12
	Pointe journalière		15.2
<b>Concentration en MES des boues en sortie stabilisation</b>		g/l	19.7
<b>Dégradation de la matière organique</b>		%	43
<b>Dégradation des boues totales</b>		%	34
<b>Taux de matière organique dans la boue stabilisée</b>		%	62.5

#### 4.2.2.2.5. Déshydratation des boues

Il s'agit d'une déshydratation mécanique sur quatre (04) unités de filtre à bande presseuses.

*Tableau 15 Caractéristiques des filtres à bande*

<b>Données</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs 2015 moyenne annuelle</b>	<b>Valeurs 2015 pointe</b>
<b>Nombre De filtre</b>	U	04	
<b>Largeur de bande</b>	m	2	
<b>Masse journalière des boues traitée</b>	Kg*MS/j	11726	21022
<b>Concentration des boues stabilisées</b>	g*MS/l	22	25
<b>Volume journalier des boues traité</b>	m <sup>3</sup> /j	547	841
<b>Débit moyen d'alimentation par machine</b>	m <sup>3</sup> /j	137	210
<b>Durée de fonctionnement théorique</b>	h/j	16	16
<b>Débit alimentation unitaire nominal</b>	m <sup>3</sup> /h	8.5	13.1
<b>Capacité unitaire pompe retenue</b>	m <sup>3</sup> /h	15	15

<b>Siccité des boues déshydratées</b>	%	20	20
<b>Taux de capture</b>	%	95	95
<b>Flux total de boues déshydratées par machine</b>	m3/h	3.7	6.6

Les boues provenant des ouvrages de stabilisation sont pompées vers l'atelier de déshydratation. Avant d'entrer dans les machines de déshydratation, les boues sont traitées avec un polymère qui favorise la formation de floccs, facilitant ainsi le processus de déshydratation. Une centrale de préparation automatique de polymère en poudre est prévue, où le polymère est dosé et dilué avec de l'eau industrielle.

*Tableau 16 Préparation de polymère*

<b>Données</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs 2015 moyenne annuelle</b>	<b>Valeurs 2015 pointe</b>
<b>Taux de traitement</b>	Kg/tMS	6	6
<b>Consommation journalière</b>	Kg/j	70	126.4
<b>Concentration de la solution polymère</b>	g/l	3	3
<b>Débit horaire par filtre</b>	l/h	366	657

Chaque ligne de déshydratation est équipée d'une pompe dédiée et d'un débitmètre électromagnétique. En amont des filtres presses, une table d'égouttage est installée pour permettre l'évacuation facile de la majeure partie de l'eau contenue dans les boues.

Au niveau du filtre presse, les boues sont acheminées entre deux toiles filtrantes en mouvement continu en appliquant progressivement une pression pouvant atteindre 1,5 kg/cm<sup>2</sup>. La tension des toiles est maintenue grâce à un système pneumatique de correction. À la fin du processus de pressage, les derniers rouleaux ont un rayon plus petit, ce qui permet de couper le gâteau de boue déshydratée et facilite sa récupération.

Les boues déshydratées sont ensuite détachées des toiles par des racleurs et sont collectées sous chaque filtre grâce à une vis de convoyage commune. Les eaux de filtrat, résultant du processus de déshydratation, sont récupérées en dessous des filtres et sont évacuées vers le poste de traitement des eaux usées.

#### 4.2.2.2.6. Stockage des boues déshydratées

Les boues déshydratées sont récupérées des filtres presses par quatre vis de convoyage, puis pompées vers des points de stockage. Deux options de stockage sont disponibles : des bennes d'une capacité de 7 m<sup>3</sup> ou une grande aire de stockage en béton de 735 m<sup>3</sup>. Les pompes gageuses assurent le transfert des boues vers ces points de stockage, offrant ainsi une redondance complète du système. Le volume maximum de boues déshydratées traitées par jour est de 105 m<sup>3</sup>, avec une teneur en matières sèches de 20%.

#### 4.2.3. Prélèvement Et Echantillonnage

Le prélèvement d'échantillons d'eau est une opération essentielle qui nécessite une grande attention. Il est important d'obtenir des échantillons homogènes et représentatifs, sans altérer les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. En général, le préleveur n'est pas l'analyste lui-même, donc il est important d'avoir du personnel qualifié qui comprend l'importance des conditions de prélèvement pour garantir la qualité des résultats analytiques. Il existe deux méthodes de prélèvement : manuelle et automatique.

Il est important de noter que lors des prélèvements sur le terrain ou lors des opérations de maintenance, l'utilisation de détecteurs de gaz toxiques est essentielle. Ces détecteurs permettent de détecter différents gaz, tels que

- l'hydrogène sulfaté (H<sub>2</sub>S).
- l'oxygène (O<sub>2</sub>).
- le monoxyde de carbone (CO).
- les gaz inflammables tels que le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'éthylène (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>).

La présence de ces détecteurs garantit la sécurité des personnes impliquées en identifiant la présence de gaz potentiellement dangereux.

Points de prélèvements :

**Filière eau :**

- Eau brute.
- Surverse eau épurée.
- Surverse décanteur primaire.
- Bassin d'aération

**Filière boue :**

- Boue de recirculation.
- Boue biologique extraite (en excès).
- Boue primaire.
- Boue mixte (Boue primaire + Boue biologique extraite).
- Boue épaissie + Surverse épaisseur.
- Boue stabilisée.
- Boue déshydratée

## Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter la station de traitement des eaux usées de Beni Mered. Nous avons exploré la description générale de la STEP, en mettant l'accent sur l'aperçu climatique et la gestion des déchets et des boues. Enfin, nous avons abordé la chaîne des procédés de traitement des eaux et des boues, ainsi que les points de prélèvement et d'échantillonnage.

## Chapitre 05 : Conception d'une installation de digestion anaérobie pour la STEP de Beni Mered

# Introduction

Ce chapitre se concentre sur la conception d'une installation de digestion anaérobie pour la station d'épuration à énergie positive de Beni Mered. Ce chapitre est essentiel pour comprendre les aspects techniques, économiques et environnementaux liés à l'intégration de la digestion anaérobie dans le processus de traitement des eaux usées. Dans cette introduction, nous présenterons un aperçu des différentes sections abordées dans ce chapitre, mettant en évidence l'importance de chaque aspect pour la conception de l'installation.

## 5.1. Collecte des données de la STEP de Beni Mered

### 5.1.1. Méthodologie :

La méthodologie de collecte des données pour notre mémoire technique sur la station d'épuration des eaux usées de Beni Mered, réalisée en partenariat avec l'ONA, peut comprendre les étapes suivantes :

- Identification des sources d'informations :
  - mémoire technique Processé pièce contractuelle n°02, passé avec les entreprises groupées Otv(France) / GESI TP SPA (algérien).
  - mémoire technique sur la station d'épuration des eaux usées de Beni Mered, située dans la wilaya de Blida en Algérie.
  - Manuel d'exploitation de la station.
- Analyse du document interne
- Échange avec les entreprises d'accueil de stage
- Entretiens avec les experts
- Visites sur site
- Recherche bibliographique
- Documentation et référencement

### 5.1.2. Analyse des données

Représentation des concentrations en MES au cours de processus de traitement de la STEP de Beni Mered :

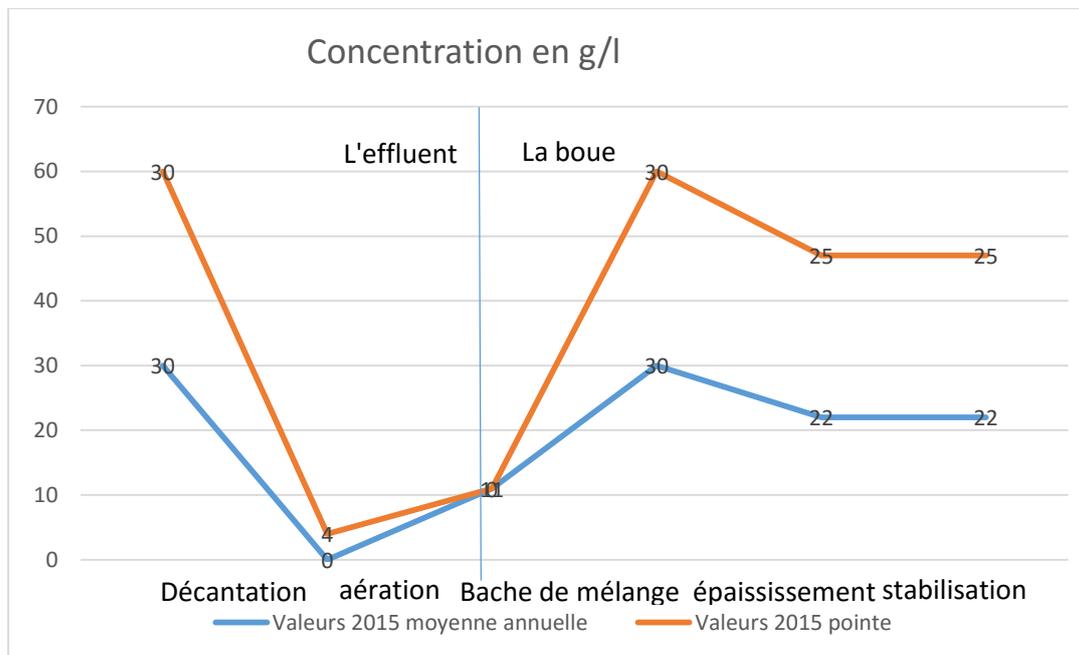


Figure 11 variations des concentrations en MES au cours de processus de traitement de la STEP de Beni Mered

À travers les courbes représenté dans la figure 13, nous constatons que les variations de concentration de MES dans l'effluent passent par deux étapes :

- La première étape est une forte diminution due à la décantation.
- La deuxième étape est une augmentation modérée en raison de la production des boues dans le bassin d'aération.

Concernant les variations de concentration des matières solides (MS) dans la boue, elles passent également par deux étapes :

- La première étape est une augmentation due au mélange des boues primaires et biologiques dans le bassin de mélange.
- La deuxième étape est une diminution de la concentration, car il s'agit de processus de traitement des boues tels que l'épaissement et la stabilisation.

Présentation de la quantité des boues :

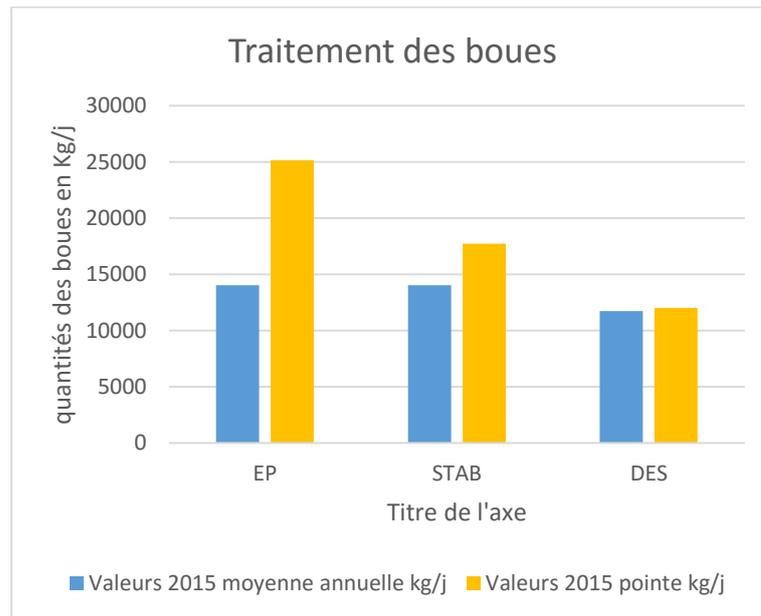


Figure 12 variations de la quantité des boues au cour de traitement

L'histogramme présenté dans la figure 14 présente les quantités de boues et montre une diminution faible lors du processus d'épaississement et une diminution forte lors du processus de stabilisation, cela correspond généralement aux étapes typiques du traitement des boues.

Présentation de variations du taux des MVS

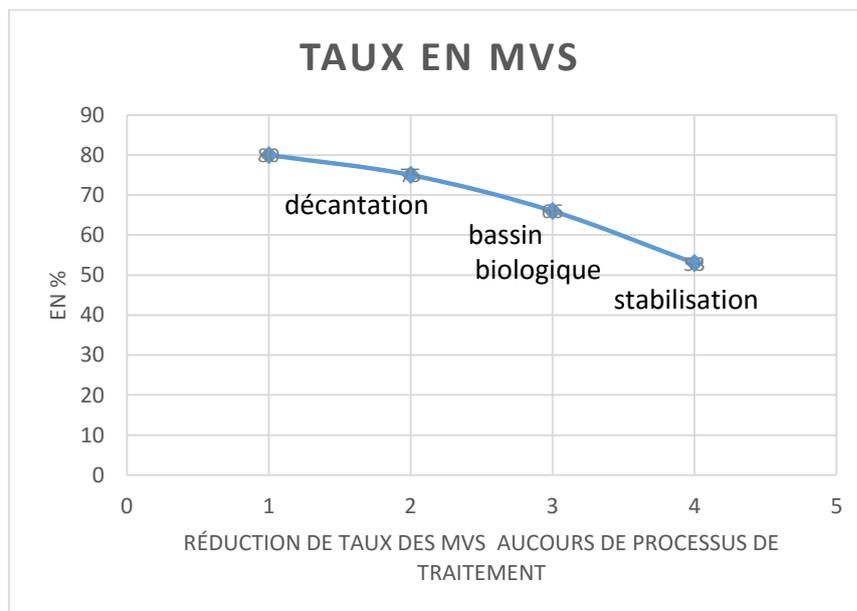


Figure 13 variations de taux des MVS lors de traitement

Dans la figure 15 on observe une diminution du taux des MVS à mesure que les boues passent par ces différentes étapes de traitement. Cela peut être le résultat de la dégradation des matières organiques par des microorganismes, de l'élimination des particules solides en suspension ou d'autres processus de traitement spécifiques.

Analyse de la consommation énergétique annuelle par (kWh/an) :

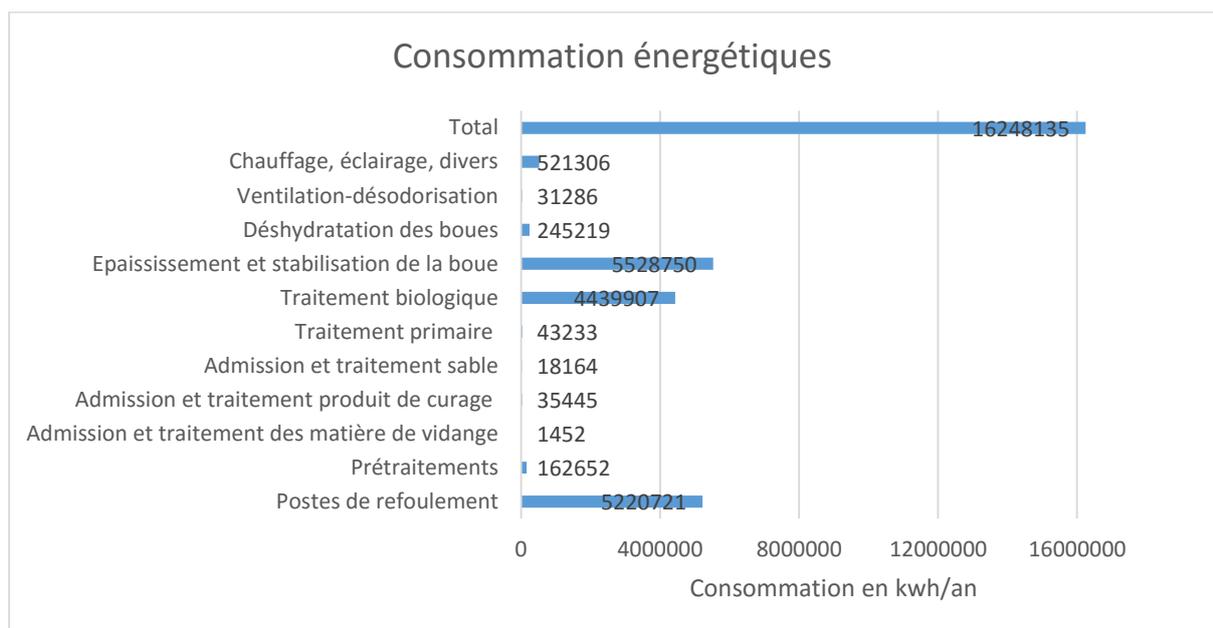


Figure 14 consommation énergétique des équipements de la station

D'après la figure 16, on a la consommation énergétique totale de la STEP est de 16 248 135 kWh par an. Le traitement biologique représente 4 439 907 kWh, soulignant son caractère intensif en énergie et ouvrant la voie à l'optimisation énergétique. De plus, l'épaississement et la stabilisation des boues nécessitent également une quantité importante d'énergie, soit 5 528 750 kWh par an.

### 5.1.3. Les besoins de l'installation

Les besoins de l'installation de Beni Mered en ce qui concerne le traitement des boues sont les suivants :

- *Réduction du volume des boues :*

L'installation cherche à réduire la quantité de boues générées, ce qui permettra de minimiser les coûts de gestion et d'élimination des déchets.

- *Stabilisation des boues :*

Les boues doivent être stabilisées pour réduire leur potentiel de fermentation, minimiser les odeurs et les risques environnementaux associés, et faciliter leur gestion ultérieure.

- *Valorisation des déchets organiques :*

L'installation souhaite valoriser les déchets organiques contenus dans les boues en produisant du biogaz, qui pourra être utilisé comme source d'énergie renouvelable ou comme combustible.

- *Amélioration de la qualité des boues traitées :*

Il est essentiel de traiter les boues de manière à réduire les matières organiques et les nutriments indésirables, afin de garantir leur conformité aux normes environnementales et leur utilisation sécuritaire dans d'autres applications.

- *Utilisation de l'infrastructure existante :*

Il est préférable d'optimiser l'utilisation de l'infrastructure déjà présente dans l'installation, telle que les digesteurs aérobie existants, pour minimiser les coûts de construction et de mise en place de nouveaux équipements.

- *Respect des réglementations environnementales :*

L'installation doit se conformer aux réglementations environnementales en vigueur concernant le traitement des boues, la gestion des déchets et les émissions de gaz à effet de serre.

## 5.2. Contraintes techniques, économiques et environnementales

Les contraintes qui doivent être prises en compte lors du choix et de la mise en œuvre du système de traitement des boues à l'installation de Beni Mered sont :

### 5.2.1. Contraintes techniques :

- **Capacité de traitement :** Le système de traitement des boues doit être dimensionné pour répondre à la capacité de traitement nécessaire, en fonction du débit des eaux usées traitées et de la quantité de boues générées.
- **Compatibilité avec l'infrastructure existante :** Les nouvelles installations et équipements doivent être compatibles avec l'infrastructure existante de l'installation de Beni Mered, ce qui peut nécessiter des ajustements ou des modifications.
- **Fiabilité et robustesse :** Le système de traitement des boues doit être fiable et robuste, capable de fonctionner de manière continue et de traiter efficacement les boues, tout en minimisant les risques de dysfonctionnement et de défaillance.
- **Gestion des odeurs :** Les procédés de traitement des boues doivent prendre en compte la gestion des odeurs potentiellement émises pendant le processus, afin de minimiser les impacts sur l'environnement et les nuisances pour les populations environnantes.

### 5.2.2. Contraintes économiques :

- Coûts d'investissement : Les coûts d'investissement liés à l'acquisition et à l'installation des équipements de traitement des boues doivent être pris en compte, en veillant à ce qu'ils soient compatibles avec le budget disponible pour le projet.
- Coûts d'exploitation et de maintenance : Les coûts d'exploitation et de maintenance du système de traitement des boues, y compris l'énergie nécessaire, les produits chimiques, la main-d'œuvre et les coûts de maintenance des équipements, doivent être évalués pour assurer la viabilité économique du projet.
- Rentabilité et valorisation des sous-produits : Il convient d'évaluer la rentabilité potentielle du projet, en particulier en ce qui concerne la valorisation des sous-produits tels que le biogaz produit par la digestion anaérobie des boues.

### 5.2.3. Contraintes environnementales :

- Conformité réglementaire : Le système de traitement des boues doit être conçu et exploité conformément aux réglementations environnementales locales, régionales et nationales, afin de garantir la protection de l'environnement et de la santé publique.
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre : L'installation doit prendre en compte les émissions de gaz à effet de serre associées au traitement des boues et chercher à les minimiser, en particulier en favorisant la production et l'utilisation de biogaz renouvelable.
- Gestion des sous-produits et des déchets : La gestion des sous-produits générés par le traitement des boues, tels que les résidus de digestion et les boues stabilisées, doit être effectuée de manière appropriée, en évitant les impacts négatifs sur l'environnement.

## 5.3. Choix des techniques et des équipements

### 5.3.1. Les équipements

Pour choisir les équipements, on doit fixer notre objectif, les caractéristiques nécessaires et on doit étudier le meilleur choix fourni selon le budget de projet aussi.

## Pompes

### ➤ Pour les boues

Des pompes centrifuges ou à vis excentrée en acier inoxydable sont recommandées pour leur robustesse et leur résistance à l'abrasion. Les pompes centrifuges à boues, également appelées pompes à lisier, sont couramment utilisées dans ce type d'application.

### ➤ Pour l'eau

Des pompes à eau standard telles que des pompes centrifuges ou des pompes à flux axial peuvent être utilisées.

## Compresseurs

Il est recommandé d'utiliser des compresseurs à vis ou à palette capables de traiter l'humidité et dotés de systèmes de filtration. Ils doivent être fiables, durables et résistants aux conditions spécifiques du biogaz, notamment à la présence de contaminants et d'impuretés. Les compresseurs à piston ou les compresseurs centrifuges sont souvent utilisés pour cette application.

## Gazomètre

Un gazomètre à double membrane peut être utilisé pour stocker et réguler le biogaz généré. Il offre une capacité de stockage et une flexibilité de fonctionnement appropriées.

## Tuyauterie

### ➤ Pour les boues :

Des matériaux résistants à la corrosion tels que le polyéthylène haut densité (PEHD) ou le polypropylène (PP) sont recommandés. L'acier inoxydable ou l'acier au carbone revêtu peuvent également être utilisés dans les applications où les boues présentent une concentration élevée en matières solides et des propriétés corrosives élevées.

### ➤ Pour l'eau :

Des tuyaux en acier inoxydable ou en PVC sont recommandés en raison de leur résistance à la corrosion et de leur adaptation aux variations de température

### ➤ Pour le biogaz :

Des tuyaux en acier galvanisé ou en polyéthylène réticulé (PEX) peuvent être utilisés, en veillant à ce qu'ils soient étanches et compatibles avec les composants présents dans le biogaz.

### 5.3.2. Choix de la typologie du digesteur

- Type de Digesteur : Continu
  - Approvisionnement en substrat de manière continue
  - Traitement des substrats liquides ne dépassant pas 15% de matières sèches (MS)
- Génération de la Flore Microbienne : Première Génération avec Flore Microbienne Libre
  - Flore microbienne se développe librement sans support fixe ou en suspension
- Mode de Mélange : Mélangé
  - Utilisation d'un système de mélange pour homogénéiser les conditions du milieu
- Température de Digestion : Mésophile
  - Plage de température optimale pour la croissance microbienne entre 35°C et 40°C
- Système de Stockage du Biogaz : Réacteur à Gazomètre Séparé
  - Stockage du biogaz produit séparément du digesteur principal
- Charge Acceptée : État Liquide
  - Digestion des substrats sous forme liquide
- Principe de Fonctionnement : Mono-Étape
  - Toutes les transformations microbiennes se produisent dans un seul réacteur
- Taille du Système : Digesteur-Fosse Vertical en Béton (Digesteur-Silo)
  - Construction en béton avec une forme verticale
- Couplage de la Digestion Anaérobie et de la Digestion Aérobie
  - Combinaison des étapes de digestion anaérobie et de digestion aérobie
  - Utilisation de deux digesteurs primaires pour la digestion anaérobie et des digesteurs aérobie existants dans la station

5.3.2.1. Une évaluation approfondie caractéristiques spécifiques, des avantages et des limites.

---

<b>Les caractéristiques spécifiques</b>	<b>Avantages</b>
- Digesteur Continu	- Approvisionnement régulier en substrat
- Le digesteur fonctionnera de manière continue sans interruption du processus de digestion	- et une production continue de biogaz. - Une performance constante et une gestion efficace des déchets organiques.

---

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flore Microbienne Libre</li> <li>- Le digesteur utilisera une flore microbienne libre, ce qui signifie que les micro-organismes responsables de la digestion anaérobie se développeront sans support fixe.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- une plus grande flexibilité dans le traitement de différents substrats</li> <li>- une adaptation rapide aux variations de composition.</li> <li>- une grande diversité de micro-organismes capables de dégrader différents types de matières organiques.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mélange Homogène</li> <li>- Le digesteur sera équipé d'un système de mélange</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- une distribution uniforme des déchets organiques dans le digesteur</li> <li>- favoriser les réactions microbiennes et prévenir la formation de zones mortes ou de courts-circuits</li> <li>- une dégradation efficace et une production de biogaz optimale.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Digestion Mésophile</li> <li>- La température de digestion sera maintenue dans la plage mésophile, généralement entre 35°C et 40°C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- favorise une activité biologique efficace des micro-organismes</li> <li>- une dégradation plus rapide des déchets organiques et une production de biogaz plus élevée.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réacteur à Gazomètre Séparé</li> <li>- Le biogaz produit lors de la digestion sera stocké dans gazomètre séparé de digesteur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- une récupération efficace du biogaz et sa mise à profit ultérieure pour la production d'énergie.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Charge Liquide</li> <li>- Le digesteur traitera des substrats à l'état liquide, ce qui convient particulièrement aux boues avec une teneur élevée en eau.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilité d'intégration des déchets organiques liquides dans le processus de digestion anaérobie, ce qui peut inclure des effluents industriels liquides ou des boues provenant d'autres étapes de traitement.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mono-Étape</li> <li>- Toutes les étapes de la digestion anaérobie se déroulent dans un seul réacteur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplification du processus de digestion anaérobie en ne nécessitant qu'un seul digesteur.</li> </ul>

---

	- réduction des coûts de construction et d'exploitation, ainsi que l'empreinte spatiale de l'installation
- Digesteur-Fosse Vertical en Béton :	- Une structure solide et durable pour la digestion des boues
- Le digesteur sera construit sous la forme d'une fosse verticale en béton.	

---

#### 5.3.2.2. Limites de la typologie choisie :

- Capacité limitée : En optant pour une typologie de digesteur spécifique, il est important de prendre en compte la capacité de traitement. Selon les besoins de l'installation de Beni Mered, il est possible que la capacité du digesteur choisi soit insuffisante pour gérer la quantité de déchets organiques générée.
- Sensibilité aux variations de charge : Les digesteurs continus peuvent être sensibles aux variations de charge, ce qui peut affecter la performance de la digestion anaérobie. Il est important de surveiller et d'ajuster le processus en fonction des fluctuations de la charge organique.
- Besoins en maintenance : Les digesteurs continus nécessitent une surveillance et une maintenance régulières pour assurer un fonctionnement optimal. Cela peut inclure le contrôle du pH, de la température, du mélange et d'autres paramètres pour maintenir des conditions propices à l'activité microbienne.
- Investissement initial : La mise en place d'un digesteur continu de première génération avec une flore microbienne libre, un mélange homogène, etc., peut nécessiter un investissement initial plus élevé en comparaison à d'autres typologies de digesteur. Il est important de prendre en compte les coûts associés à la construction et à l'installation du digesteur.
- Gestion des effluents et des résidus : La typologie choisie peut générer des effluents et des résidus qui nécessitent une gestion appropriée. Il est essentiel de mettre en place des systèmes de traitement des effluents et des plans de gestion des résidus pour assurer la conformité aux normes environnementales.

## 5.4. Modélisation anaérobie par bilan matière de la digestion

Dans cette dernière partie, nous examinons les équations de bilan de matière pour la boue dans le cadre de la digestion anaérobie. Nous décrivons les équations qui permettent de quantifier les flux d'entrée et de sortie de matière organique, de gaz et d'autres composants au sein du système de digestion. Nous discutons des équations de bilan de carbone, d'azote et de phosphore, ainsi que de leur importance dans l'évaluation de l'efficacité et des performances du processus de digestion anaérobie.

La modélisation de processus complexes tels que la digestion anaérobie présente plusieurs avantages importants. Tout d'abord, elle offre une représentation simplifiée du processus, qui peut être utilisée pour évaluer différents comportements dans des conditions spécifiques. De plus, grâce à des phases de validation expérimentale, elle permet de prévoir et d'anticiper les réactions, ce qui facilite la gestion des réacteurs. Nous commençons par construire un modèle mathématique basé sur la cinétique intrinsèque des réactions biologiques, en prenant en compte la stœchiométrie et le rendement. Ensuite, nous abordons le principe du bilan matière, ainsi que différentes méthodes pour prendre en compte la dimension spatiale.

### 5.4.1. Cinétique biologique de la digestion anaérobie

cette partie, nous présentons les équations cinétiques qui décrivent la vitesse de dégradation de la matière organique lors de la digestion anaérobie. Nous abordons les modèles les plus couramment utilisés, tels que le modèle de Monod et le modèle de digestion en phases, et expliquons comment ils sont appliqués pour prédire les performances de la digestion anaérobie. Nous discutons également des paramètres cinétiques importants, tels que la constante de vitesse de dégradation et le coefficient d'inhibition.

La digestion anaérobie peut être décrite par différents modèles cinétiques. Les plus couramment utilisés sont :

Le modèle de Monod :

Ce modèle décrit la cinétique de croissance des bactéries en fonction de la concentration de substrat disponible. L'équation est la suivante :

$$\mu = \frac{\mu_{max} * S}{K_s + S} \dots (1)$$

Où  $\mu$  est la vitesse de croissance des bactéries,  $\mu_{max}$  est la vitesse de croissance maximale,  $S$  est la concentration de substrat et  $K_s$  est la constante de demi-saturation.

Le modèle de Chen-Hashimoto :

Ce modèle est basé sur la cinétique de dégradation de la matière organique. L'équation est la suivante :

$$\frac{dS}{dt} = \frac{-K_1 * S * x}{(K_s + S) - K_2 * S} \dots (2)$$

Où  $S$  est la concentration de substrat,  $X$  est la concentration de bactéries,  $K_1$  est la constante de dégradation de la matière organique,  $K_2$  est la constante de mort bactérienne et  $K_s$  est la constante de demi-saturation.

Le modèle de Contois :

Ce modèle décrit la relation entre la vitesse de croissance des bactéries et la concentration de substrat. L'équation est la suivante :

$$\mu = \frac{\mu_{max} * S}{(K_s + S) * (1 - \frac{X}{K_x})} \dots (3)$$

Où  $X$  est la concentration de bactéries,  $K_x$  est la constante de saturation en bactéries.

Ces modèles sont utilisés pour décrire et prédire la performance des réacteurs de digestion anaérobie.

Les équations cinétiques pour la digestion anaérobie sont utilisées pour modéliser le processus de conversion des matières organiques en biogaz et en digestat. Il existe plusieurs modèles cinétiques pour la digestion anaérobie, mais voici les trois modèles les plus couramment utilisés :

#### 5.4.2. Bilan de matière organique :

$$\text{Entrée de matière organique} = \begin{cases} \text{Sortie de matière organique} \\ + \text{Production de biogaz} \\ + \text{Acumulation de matière organique} \end{cases} \dots (4)$$

Mathématiquement, cela peut être représenté comme :

$$Q * C_{in} = Q * C_{out} + Q_g * Y + V * \frac{dc}{dt} \dots (5)$$

Où :

1.  $Q$  : est le débit d'entrée de boue ( $m^3/j$ )
2.  $C_{in}$  : est la concentration d'entrée de matière organique ( $g/l$ )
3.  $C_{out}$  : est la concentration de sortie de matière organique ( $g/l$ )
4.  $Q_g$  : est le débit de biogaz produit ( $m^3/j$ )
5.  $Y$  : est le rendement de conversion de matière organique en biogaz (sans unité)
6.  $V$  : est le volume du digesteur ( $m^3$ )
7.  $\frac{dc}{dt}$  : est la variation de concentration de matière organique dans le digesteur ( $g/l/j$ )

Le modèle de Stover-Kincannon :

Ce modèle est basé sur l'hypothèse que la vitesse de production de biogaz est limitée par la vitesse de croissance des micro-organismes et la disponibilité en nutriments. La vitesse de production de biogaz est donc donnée par l'équation suivante :

$$r = \frac{\mu * S}{K_s + S + \frac{b * S^2}{K_s^2}} \dots (6)$$

Où :

- i.  $r$  : est la vitesse de production de biogaz ( $kg/m^3/j$ )
- ii.  $\mu$  : est le coefficient de croissance microbienne ( $j^{-1}$ )
- iii.  $S$  : est la concentration en substrat disponible ( $kg/m^3$ )
- iv.  $K_s$  : est la constante de demi-saturation ( $kg/m^3$ )
- v.  $b$  : est le coefficient de recouvrement ( $kg/m^3$ )

Les équations cinétiques sont souvent utilisées pour modéliser la digestion anaérobie et prévoir la production de biogaz. Les deux équations cinétiques les plus couramment utilisées sont l'équation de Monod et l'équation de Chen-Hashimoto. L'équation de Monod est basée sur la cinétique de croissance microbienne et décrit le taux de production de biogaz en fonction de la concentration de substrat organique dans la boue.

L'équation de Chen-Hashimoto est basée sur la thermodynamique et décrit la production de biogaz en fonction de la température et de la concentration de substrat organique dans la boue.

#### 5.4.2.1. Modélisation du bilan de matière

Dans cette partie, nous examinons les équations de bilan de matière pour la boue dans le cadre de la digestion anaérobie. Nous décrivons les équations qui permettent de quantifier les flux d'entrée et de sortie de matière organique, de gaz et d'autres composants au sein du système de digestion. Nous discutons des équations de bilan de carbone, d'azote et de phosphore, ainsi que de leur importance dans l'évaluation de l'efficacité et des performances du processus de digestion anaérobie.

Les sections précédentes ont présenté la modélisation des cinétiques mises en jeu dans les réactions de la digestion anaérobie et celle liée à certains paramètres physico-chimiques. Le point de départ de la modélisation des réacteurs est le bilan matière dont la forme générale est, certes, très connue, mais suffisamment importante pour être rappelée. Précisons que cette formulation doit impérativement faire référence à un constituant donné mais aussi à un espace prédéfini (ou enceinte de bilan) ainsi qu'à un certain élément de temps.

$$\textit{Accumulation} = \textit{Entrée} - \textit{Sortie} + \textit{Réaction} \dots (7)$$

Le bilan de matière sur un digesteur parfaitement agité permet de quantifier les flux d'entrée et de sortie de matière dans le système. Voici les équations de bilan de matière pour un tel digesteur :



Des quantités journalières des boues épissés en  $kgMS$  par jour selon la formule suivante :

$$Qb = \frac{mb}{C} \dots (11)$$

- $mb$  : la quantité journalière des boues épissés en ( $kgMS/j$ )
- $C$  : la concentration des boues épissés en  $kgMS/m^3$

Donc le volume de digesteur est

$$V_{digesteur} = \frac{mb}{C} * ts \dots (12)$$

### 5.5.2. Les dimensions de digesteurs :

Pour avoir les dimensions totales de digesteur on doit avoir sélectionné une forme géométrique, dans notre cas c'est une forme cylindrique dans notre cas la forme de digesteur est cylindrique à dôme fixe et une base conique pour la sédimentation des boues digérées. On aura les deux dimensions la hauteur et le diamètre :

- Soit on fixe la hauteur et on calcule le diamètre :

$$D = \sqrt{\frac{4 * V}{\pi * H}} \dots 13$$

- Soit on fixe le diamètre et on calcule la hauteur :

$$H = \frac{4 * V}{D^2 * \pi} \dots 14$$

- Soit on suppose que la hauteur égale à diamètre, pour des raisons de choix de la typologie et de type de brassage choisi on doit respecter le rapport :

$$\frac{H}{D} \approx 1 \dots (15)$$

Donc

$$H = D = \sqrt[3]{\frac{4 * V}{\pi}} \dots (16)$$

- La surface horizontale  $S$  en ( $m^2$ ) :

$$S = \frac{\pi * D^2}{4} \dots (17)$$

### 5.5.3. Équations de dimensionnement du gazomètre

Le volume de gaz produit G :

Pour le volume de gaz produit on va utiliser l'équation suivante :

$$G = MO * B0 * TSH * r \dots (18)$$

Tel que :

$$MO = MVS = mb * x \dots (19)$$

Où :

- *MO* : La quantité de matière organique (*Kg MS/j*)
- *MVS* La quantité de matière volatile sèche (*Kg MVS/j*)
- *B0* : Le potentiel de production (*m3/kgMO*)
- *r*: le taux d'élimination des MVS par la digestion
- *x* : Le taux des MVS (%)

*Bilan énergétique :*

Le PCI du méthane pure vaut 9,94 kWh/m<sup>3</sup> dans les conditions normales de température et de pression. L'énergie du biogaz provient de son principal composant, le méthane. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du méthane, c'est-à-dire la quantité de chaleur produite par la combustion, est de 9,42 kWh/m<sup>3</sup>, à 15 °C, et pour une pression atmosphérique normale. Selon les filières de production et les matières organiques utilisées, la proportion du méthane varie. Un biogaz à 65 % de méthane présentera donc un PCI de 9,42 x 0,65, soit 6,1 kWh/m<sup>3</sup>. Par comparaison, le gaz naturel est constitué de 96 % de méthane. Avec un processus optimisé, environ 500 m<sup>3</sup> de biogaz sont extraits par tonne de matière organique traitée. (Energies-renouvelables 2015)

La formule pour calculer l'énergie totale Et annuellement est :

$$Et = PCH4 \times PCI \dots (20)$$

Où :

- Et est l'énergie totale annuelle
- PCH<sub>4</sub> est la production de biogaz annuelle (en m<sup>3</sup>)
- PCI est le pouvoir calorifique inférieur du méthane (en kWh/m<sup>3</sup>) :

Environ 95 % de l'énergie potentiellement disponible dans le biogaz peut être valorisée. Cependant, une petite partie de cette énergie, environ 5 %, n'est pas utilisée. (5% sera perdue).

Cela est nécessaire pour maintenir un excès de production de méthane par rapport à la consommation des systèmes de combustion, afin d'assurer un débit nominal constant pour les brûleurs. Le surplus de biogaz est éliminé en le brûlant dans une torchère.

La formule pour calculer l'énergie valorisable  $E_v$  annuellement est :

$$E_v = 0.95 * E_t \dots (21)$$

Où :  $E_v$  est l'énergie valorisable annuelle

**Hypothèse :** La digestion des boues biologiques nécessite environ 30 % de l'énergie valorisable pour satisfaire les besoins en chaleur. La chaudière biogaz utilisée pour le chauffage présente un rendement énergétique global de 90 %, ce qui permet une efficacité élevée de transformation de l'énergie.

La formule pour calculer l'énergie nécessaire au chauffage  $E_{chauff}$  du digesteur est :

$$E_{chauff} = (E_v \times 0,3) / 0,9 \dots (22)$$

Où :

- $E_{chauff}$  est l'énergie nécessaire au chauffage du digesteur

La formule pour calculer l'énergie restante  $E_{rest}$  disponible est :

$$E_{rest} = E_v - E_{chauff} \dots (23)$$

Où :

- $E_{rest}$  est l'énergie restante disponible

#### 5.5.4. Résultats de dimensionnement

Selon la sélection et le choix de la typologie du digesteur anaérobie et d'après les données de la station d'épuration de Beni Mered, puisque en va intégrer la digestion en amont de la stabilisation aérobie et en aval de l'épaississement, on va utiliser les données des boues envoyées vers la stabilisation aérobie pour notre calcul :

<b>Données</b>	<b>Unité</b>	<b>Valeurs 2015 moyenne annuelle</b>	<b>Valeurs 2015 pointe</b>
<b>MES totale</b>	kg MS/j	14033	17742
<b>taux de MVS</b>	% (MVS/MS)	66	66
<b>MVS</b>	kg MVS/j	9262	11710
<b>volume journalière des boues totales</b>	m3/j	467	508

<b>Concentration des boues épaissie</b>	g/l	30	30
---	-----	----	----

Le volume de digesteur :

<b>paramètres à introduire</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<i>Qb</i>	467	508	m <sup>3</sup> /j
<i>ts</i>	21	21	j
<b>paramètres calculés</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<i>V<sub>digesteur</sub></i>	9807	10668	m <sup>3</sup>

Si le volume des boues n'est pas disponible :

<b>paramètres à introduire</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<i>ts</i>	21	21	j
<i>mb</i>	14033	17742	kg MS/j
<i>C</i>	30	30	g/l
<b>paramètres calculés</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<i>Qb</i>	467,77	591,40	m <sup>3</sup>
<i>V<sub>digesteur</sub></i>	9823,10	12419,40	m <sup>3</sup>

Les dimensions de digesteurs :

Notre digesteur se compose d'un corps cylindrique et un dôme fixe et un cône de base qui aura un angle quotidiennement de 10°, selon la littérature. Les dimensions qu'on va calculer sont de corps cylindrique qui est le volume réactionnel de la digestion.

Pour le calcul on a les trois cas :

- Soit on fixe la hauteur et on calcule le diamètre :

<b>paramètres à introduire</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b>V</b>	9823,1	12419,4	m3
<b>H</b>	<i>20 (5 mètre sous terre et 15 hauteurs sur terre)</i>	20	m
<b>paramètres calculés</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b>D</b>	25,01	28,12	m
<b>S</b>	491,16	620,97	m2

- Soit on fixe le diamètre et on calcule la hauteur :

<b>paramètres à introduire</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b>V</b>	9823,1	12419,4	m3
<b>D</b>	<i>24 (selon l'espace disponible sur la station)</i>	24	m
<b>paramètres calculés</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b>H</b>	21,71	27,45	m
<b>S</b>	452,39	452,39	m2

- Soit on suppose que la hauteur égale à diamètre, pour des raisons de choix de la typologie et de type de brassage choisi on doit respecter le rapport :  $\frac{H}{D} \approx 1$

<b>paramètres à introduire</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b>V</b>	9823,1	12419,4	m3

<b>paramètres calculés</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b>H=D</b>	23,21	25,10	m
<b>S</b>	423,18	494,80	m <sup>2</sup>

Selon les données moyennement annuelles. Dans les cas de pointe on a toujours l'option de by passe pour protégé notre ouvrage. Le volume de digesteur pris en considération est 9823.1m<sup>3</sup>.

Dans notre cas on est limité par la hauteur (selon l'exploitant de la station, condition de cahier de charge. On reprend le premier cas de H=20 et D=25.01 m et une surface de 591.16m<sup>2</sup>.

Le volume de gaz produit G :

<b>paramètres à introduire</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b>mb</b>	14033	17742	Kg MS/j
<b>B0 (valeur d'estimation de la littérature(NJAMPOU 2011))</b>	0.25	0.25	kg MS/m <sup>3</sup> (gaz)
<b>r (valeur de la littérature (MOLETTA 2008))</b>	60	60	%
<b>x</b>	66	66	%

<b>paramètres calculés</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b>MO = MVS</b>	9261,78	11709,72	kg MVS/j
<b>G journalière</b>	1389,27	1756,46	Nm <sup>3</sup> de gaz/j
<b>G annuelle</b>	507082,46	641107,17	Nm <sup>3</sup> de gaz/an

## Bilan énergétique

<b>paramètres à introduire</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b><i>PCH4 =G</i></b>	507082,46	641107,17	m3/an
<b>PCI (de la littérature (PILLI 2015))</b>	6,1	6,1	kWh/m3.an
<b>taux de valorisation d'énergie</b>	95	95	%
<b>taux d'énergie utilisés pour le chauffage</b>	30	30	%
<b>rendement énergétique de chauffage</b>	90	90	%
<b>Total d'énergie consommée par la station</b>	16248135	16248135	kwh/an
<b>paramètres calculés</b>	<b>valeurs moyenne annuelle</b>	<b>valeurs de pointe</b>	<b>unités</b>
<b><i>Et</i></b>	3093203	3910754	kWh /an
<b><i>Ev</i></b>	2938543	3715216	kWh /an
<b><i>Echauff</i></b>	979514	1238405	kWh /an
<b><i>Erest</i></b>	1959029	2476811	kWh /an

Donc, le pourcentage que nous avons réussi à couvrir pour transformer notre station en une station à énergie positive est :

<b>L'utilisation de la digestion anaérobie peut couvrir une partie des besoins en électricité de la station.</b>	<b>12-15</b>	<b>%</b>
<b>Si l'utilisation de la digestion aérobie est négligée et que l'on passe de la digestion anaérobie à la déshydratation la couverture sera représentée par</b>	17-21	%
<b>Le montant économisé.</b>	9076179 -11475064	DA/an

#### 5.5.5. Interprétation et recommandation :

On observe que l'inclusion de la digestion anaérobie couvre une proportion considérable de l'énergie consommée par la station. Cependant, pour obtenir une station de traitement à énergie positive à 100%, nous aurons besoin d'inclure d'autres alternatives telles que :

- L'utilisation de sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire ou éolienne.
- L'optimisation de l'efficacité énergétique de la station en utilisant des équipements plus efficaces et en mettant en œuvre des pratiques de gestion de l'énergie.
- L'intégration de systèmes de cogénération pour récupérer et utiliser la chaleur résiduelle générée par la station.
- L'exploration de possibilités de stockage d'énergie pour une utilisation ultérieure.
- La mise en place de pratiques de gestion des déchets efficaces pour réduire la quantité de matières organiques traitées et optimiser la production d'énergie.

## 5.6. Description technique de l'installation proposée pour Beni Mered

Dans le cadre de l'intégration d'une installation de digestion anaérobie dans la station d'épuration de Beni Mered, il est essentiel de comprendre la place de cette unité de traitement ainsi que ses objectifs en termes de traitement. Cette présentation technique vise à répondre à plusieurs questions clés :

- Quelles sont les différentes sections qui composent cette installation et quelles sont leurs fonctionnalités respectives ?
- Quels traitements sont effectués dans cette unité de digestion anaérobie ?
- Et enfin, comment ces traitements sont-ils réalisés ?

En examinant de près ces aspects, nous pourrions mieux appréhender l'importance et le fonctionnement de cette installation de digestion anaérobie au sein de la station d'épuration de Beni Mered.

### 5.6.1 Localisation de l'installation

La figure 15 représente la vue aérienne de la station d'épuration de Beni Mered :



Figure 15 La vue aérienne

L'espace disponible pour intégrer l'unité de digestion est de 3282,63 m<sup>2</sup> au total. Il convient d'évaluer si cet espace est suffisant pour accueillir un digesteur, un gazomètre et un département de chauffage et de compression, en le comparant à la station d'épuration de BARAKI. (Voir l'annexe 3). La figure 16 représente le schéma fonctionnel de la station :

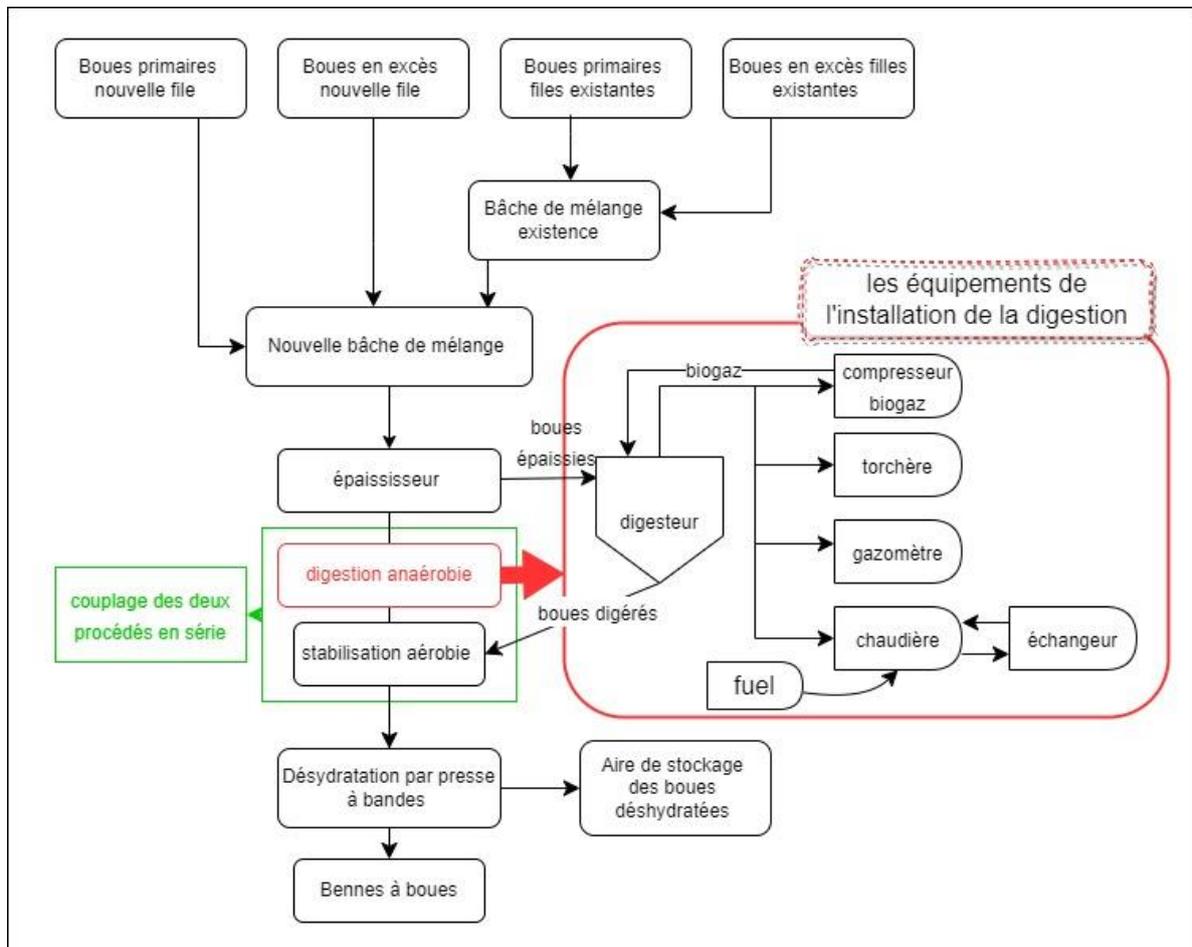


Figure 16 Schéma fonctionnel de la station

### 5.6.2. Les sections de l'unité de traitement

L'unité de traitement se divise en 4 sections (voir le schéma représentatif des sections d'installation en P&ID dans l'annexe 6 avec la liste des équipements et instruments tagué dans l'annexe 7) :

- Section 1 : Alimentation, digestion et extraction ;
- Section 2 : Brassage au biogaz ;
- Section 3 : Stockage et utilisation du biogaz ;
- Section 4 : Chauffage de la digestion.

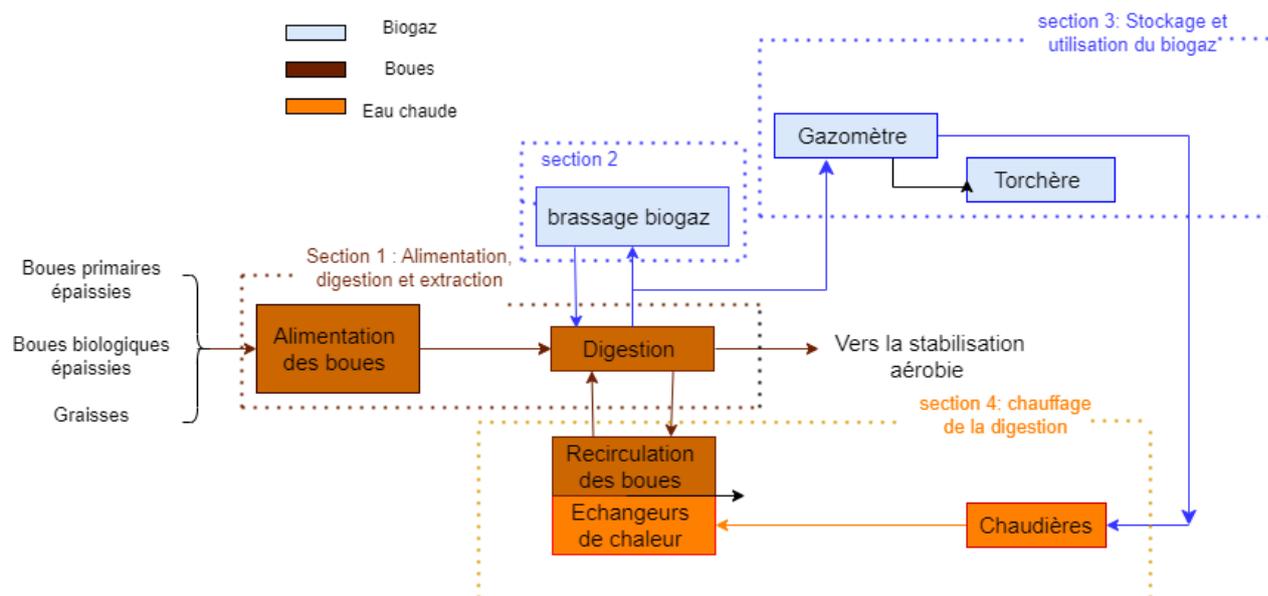


Figure 17 Représentation schématique des 4 sections de l'unité de traitement

### 5.6.2.1. Section 1 : Alimentation, digestion et extraction

#### Mélange des boues introduites :

La station d'épuration de Beni Mered dispose déjà d'une bêche de mélange en amont de l'épaississeur, et le digesteur est positionnée en aval de l'épaississeur sans passer par une autre bêche de mélange, donc le processus de mélange des boues épaissies est déjà effectué dans la bêche de mélange existante avant d'être acheminées vers le digesteur.

Dans ce cas, l'installation est configurée de manière à utiliser la bêche de mélange en amont de l'épaississeur pour homogénéiser les boues épaissies et faciliter la digestion anaérobie dans le digesteur. En résumé, la séquence des infrastructures est : bêche de mélange → épaississeur → digesteur. La bêche de mélange joue un rôle essentiel dans la préparation des boues épaissies avant qu'elles ne soient introduites dans le digesteur pour la digestion anaérobie. Cette configuration existante permet d'optimiser le processus de digestion et d'assurer une meilleure performance de l'unité de digestion anaérobie dans la station d'épuration de Beni Mered

Objectif	Produits en présence	Principes
Alimenter en continu le digesteur Digérer les boues ;	<u>en entrée :</u> Boues épaissies, Graisses épaissies. <u>en sortie :</u> Boues digérées ;	Digestion mésophile anaérobie ; Brassage ; Pompage.

Extraire les boues digérées vers la stabilisation aérobie.	Biogaz	
--	--------	--

Éléments compris dans la section :

Alimentation de digesteur :

- Pompe d'alimentation de digesteur (SEEPEX, Débit max 65 m<sup>3</sup>/h, Type Rotor excentré). Déjà existé dans la station
- Vannes d'affectation pompe de secours à alimentation des digesteurs

Digesteur primaire (ouvrage compris dans la section1) :

- Mesures de niveau de boues des digesteurs ;
- Détecteur de niveau haut vasque d'entrée des digesteurs ;
- Détecteur de niveau très haut vasque de trop plein des digesteurs
- Vanne télescopique vasque de sortie des boues du digesteur ;
- Vanne de rapide ;
- Soupape de sûreté des digesteurs
- Arrête-flamme des digesteurs ;
- Mesure de pression du ciel gazeux des digesteurs.

Extraction des boues digérées vers la déshydratation :

- Débit d'extraction des boues digérées ;
- Pompe d'extraction des boues digérées (fournie, Type Rotor excentré) ;
- Mesure température boues digérées ;
- Mesure pH des boues digérées.

Principe de fonctionnement :

Alimentation de digesteur et maintien des conditions optimale :

Les boues sont introduites dans le digesteur par une **vasque d'alimentation**. Dans cette vasque, la boue fraîchement injectée est mise en contact avec de la boue préalablement réchauffée à une **température** de 37°C +/- 2°C, grâce à un **échangeur de chaleur**. Ce mélange est ensuite injecté dans le fond du digesteur. Ce processus de mélange permet d'éviter les chocs thermiques en introduisant des boues tièdes dans le digesteur. Les **bactéries mésophiles**, responsables de la digestion anaérobie, sont sensibles aux variations de leur environnement.

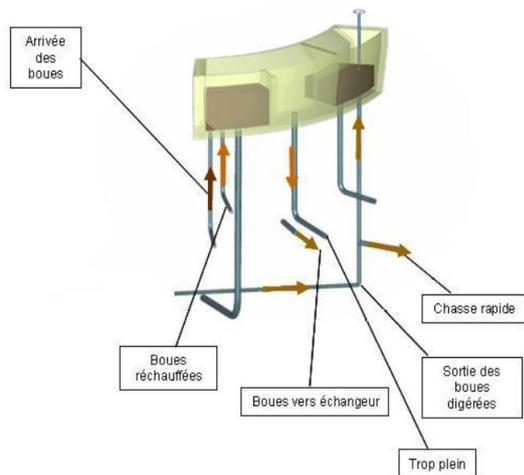


Figure 18 une vasque d'alimentation

Une partie des boues du digesteur est extraite et envoyée vers **un atelier de chauffage** des boues. Cet atelier permet de maintenir les boues à la température optimale de 37°C.

Lorsque la vasque d'alimentation contient plus de boues qu'elle ne peut en recevoir, les boues excédentaires débordent dans une vasque de trop-plein. Elles sont ensuite évacuées vers un puisard avant de retourner en tête de station.

La digestion anaérobie produit du biogaz. Étant plus léger que les boues, le biogaz se retrouve dans la partie supérieure du digesteur, formant une atmosphère gazeuse. Ce biogaz est ensuite transféré vers un gazomètre par différence de pression.

Le gazomètre maintient une pression de +/- 20 mbar sous le dôme du digesteur, assurant ainsi une gestion adéquate du biogaz produit.

Le **niveau de boues** dans chaque **digesteur** primaire est ajusté en fonction du réglage de la vanne télescopique.

#### L'extraction des boues

L'extraction des boues des digesteurs se fait à partir de la **vasque de sortie** des boues du digesteur primaire. Une **poire de niveau** haut est utilisée pour détecter les éventuels blocages dans cette vasque.

L'extraction des boues dans une installation de digestion anaérobie est effectuée en utilisant le principe des vases communicants. Lorsque le sommet de la vanne est positionné en dessous du niveau de boues dans le digesteur, les boues s'écoulent naturellement vers la vasque d'extraction pour être évacuées. En revanche, lorsque le sommet de la vanne est positionné au-dessus du niveau de boues, les boues restent dans le digesteur car elles ne peuvent pas atteindre la vasque d'extraction.

Une fois que les boues digérées se trouvent dans la vasque d'extraction, elles sont extraites par gravité et dirigées vers le processus de stabilisation aérobie. Le niveau des

boues et la pression du ciel gazeux sont surveillés en utilisant des mesures de pression afin de maintenir un équilibre optimal.

Pour l'extraction des boues digérées situées au fond du digesteur, des pompes d'extraction équipées de variateurs de fréquence sont utilisées en secours. Ces pompes permettent de transférer les boues vers le processus de stabilisation aérobie.

#### 5.6.2.2. Section 2 : Brassage au biogaz

Objectif	Produits en présence	Principes
Homogénéiser les boues dans les digesteurs ; Favoriser le maintien d'une température uniforme ; Assurer un bon contact entre les matières organiques et les bactéries ; Eviter les dépôts au fond de l'ouvrage ; Eviter la formation de mousse et de flottants à la surface des digesteurs	Biogaz ; Boues digérées ; Condensats.	Brassage ; Compression ; Purge.

Éléments compris dans la section :

- Compresseur de biogaz pour le brassage de digesteur (fournie, Débit nominal 1200 Nm<sup>3</sup>/h Type A palette)
- Compresseur de secours digesteur (fournie, Débit nominal 1200 Nm<sup>3</sup>/h Type A palette)
- Vannes d'isolement en entrée des compresseurs
- Vannes d'isolement en sortie des compresseurs
- Vannes d'affectation du compresseur de secours
- Pompes du puisard du local pot de purge basse pression (fournie, Type Vide cave)
- Détection niveau bas/haut du puisard du local pot de purge basse pression
- Pots de purge basse pression (fournie)
- Pots de purge moyenne pression (fournie)
- Pompes du circuit de refroidissement
- Echangeur thermique (fournie)
- Circuit de refroidissement

Eléments compris dans le skid du compresseur de biogaz

- Filtre à tamis
- Soupape de sûreté
- Détecteur de basse pression en entrée du compresseur
- Détecteur de haute pression en sortie du compresseur

Principe de fonctionnement :

#### Brassage des boues

Ça se fait en injectant le biogaz comprimé sous forme de bulles dans le fond de chaque digesteur. Le débit de brassage adopté est de 1200 Nm<sup>3</sup>/h pour chaque digesteur.

Les cannes de brassage sont disposées de manière circulaire au centre de chaque digesteur. Cette disposition permet de brasser l'ensemble du digesteur de manière homogène, assurant ainsi une distribution uniforme du biogaz et un brassage efficace des boues.

#### La compression du biogaz par des compresseurs à palettes

Elle est réalisée par des compresseurs à palettes qui aspirent le biogaz, le compriment et le refoulent vers les cannes de brassage. Les compresseurs utilisés sont des compresseurs à palettes, composés d'un stator cylindrique, d'un rotor cylindrique avec 6 rainures radiales et de 6 palettes en matière stratifiée.

Le rotor, situé à l'intérieur du stator, tourne autour d'un axe excentré. Les palettes coulissent librement dans les rainures radiales du rotor. Lorsque le rotor tourne, les palettes s'appliquent contre le stator, délimitant des cellules de volume variable.

Le biogaz entre dans ces cellules, qui augmentent progressivement de volume pendant la rotation, créant ainsi une phase d'aspiration. En continuant leur rotation, les cellules diminuent de volume, provoquant ainsi la compression du biogaz. Lorsque les cellules atteignent l'orifice de refoulement, le biogaz comprimé s'échappe dans le collecteur de sortie avec une vitesse élevée.

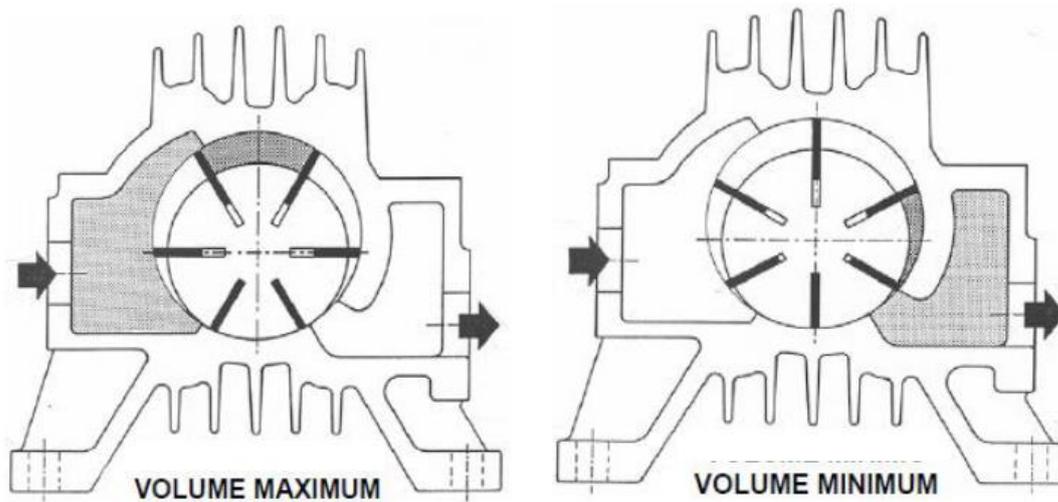


Figure 19 Schéma de l'évacuation du biogaz et le schéma de l'arrivée du biogaz

### 5.6.2.3. Section 3 : Stockage et utilisation du biogaz

Objectif	Produits en présence	Principes
Satisfaire les besoins énergétiques des chaudières.	Biogaz	Compression ; Stockage de biogaz

Éléments compris dans la section :

- Gazomètre (fournie)
- Ventilateur de gonflage du gazomètre
- Détecteur pression du gazomètre
- Registre flottant de maintien de la pression du gazomètre
- Mesure du niveau du gazomètre
- Mesure de fuite de CH<sub>4</sub> sur le gazomètre
- Garde hydraulique du gazomètre
- Vanne d'alimentation / soutirage du gazomètre
- Pot de purge basse pression
- Débitmètre d'alimentation en biogaz de la torchère
- Skid torchère

Éléments compris dans le skid torchère :

- Torchère
- Arrête-flamme
- Vannes solénoïdes
- Vanne d'alimentation

## Principe de fonctionnement

### Les brûleurs de chaudières

Dans le système de chaudières digesteurs, les brûleurs peuvent être alimentés de différentes manières. Ils peuvent être alimentés par le biogaz provenant du digesteur ou par le biogaz stocké dans le gazomètre. En cas de niveau bas dans le gazomètre, le brûleur fonctionne au fuel de la citerne de gasoil, avec un basculement effectué par l'opérateur. Les brûleurs peuvent être isolés du réseau biogaz à l'aide de vannes de sécurité. Le débit alimentant le brûleur est mesuré à l'aide d'un débitmètre. Des boosters de biogaz ou supprimeurs sont utilisés pour augmenter la pression du biogaz en entrée du brûleur, avec une consigne de régulation. Des débitmètres sont également utilisés pour suivre la consommation de fuel domestique pour l'alimentation de la chaudière.

### Stockage de biogaz

Le gazomètre permet de stocker le biogaz pour une utilisation ultérieure.

#### 5.6.2.4. Section 4 : Chauffage de la digestion

Objectif	Produits en présence	Principes
Maintenir la température à 37 °C +/- 2°C dans les digesteurs.	Boues sortant des digesteurs ; Eau chaude ; Eau conditionnée ; Fuel ; Biogaz.	Echange de chaleur ; Pompage

### Éléments compris dans la section

- Pompes de recirculation des boues (fournie, Type Centrifuge)
- Pompes d'alimentation en eau des échangeurs (fournie, Débit 120 m<sup>3</sup> /h Type Centrifuge).
- Echangeurs de chaleur (fournie).
- Vannes 3 voies de régulation de la température de l'eau chaude venant des chaudières.
- Température de l'eau en entrée des chaudières
- Température de l'eau en sortie des chaudières

- Pompes de la boucle d'eau des chaudières (fournie) Débit 65 m<sup>3</sup> /h Type Centrifuge.
- Ensemble Echangeur de chaleur.

#### Éléments compris dans l'ensemble Echangeur de chaleur

- Température des boues digérées en entrée de l'échangeur 37°C
- Température des boues digérées en sortie de l'échangeur < 40°C
- Mesure du pH des boues du digesteur
- Température de l'eau alimentant l'échangeur < 70°C
- Température de l'eau en sortie de l'échangeur 60°C

#### Principe de fonctionnement

##### Les étapes clés du processus de chauffage des boues :

1. Extraction des boues : Les boues à réchauffer sont continuellement prélevées depuis le fond du digesteur à l'aide de pompes. Chaque digesteur est équipé de plusieurs pompes, y compris une pompe de secours, assurant un débit continu.
2. Mesure de température : Avant d'entrer dans l'échangeur de chaleur, la température des boues est mesurée. Cette mesure est représentative de la température à l'intérieur du digesteur et doit être maintenue à 37°C avec une tolérance de +/- 2°C.
3. Réchauffage des boues : Les boues sont chauffées par l'échangeur de chaleur, qui transfère la chaleur d'une source externe aux boues. L'objectif est de compenser les pertes thermiques et l'arrivée de boues fraîches. Il est essentiel de contrôler la variation de température des boues pendant le processus de réchauffage, en veillant à ce qu'elle ne dépasse pas 4°C afin d'éviter tout choc thermique pour les bactéries.
4. Température des boues réchauffées : Après le passage par l'échangeur de chaleur, les boues ont une température d'environ 38°C, légèrement supérieure à la température cible de 37°C. Cette augmentation de température compense les pertes thermiques et assure que les boues réinjectées dans le digesteur maintiennent une température optimale.
5. Réinjection des boues : Les boues réchauffées sont réinjectées au niveau de la vasque d'alimentation du digesteur. Ce processus garantit que les boues maintiennent la température nécessaire pour soutenir l'activité des bactéries et favoriser la digestion anaérobie.

L'échangeur de chaleur : échangeur à faisceau tubulaire

Il est composé de deux circuits : un circuit d'eau chaude et un circuit de boues. Dans ce système, l'eau chaude est le fluide caloporteur, tandis que les boues circulent dans le circuit de boues. Voici les principales caractéristiques de l'échangeur de chaleur :

1. Circuit d'eau chaude : L'eau chaude est utilisée comme source de chaleur pour réchauffer les boues. Le débit du circuit d'eau est constant, avec un débit de 120 m<sup>3</sup>/h. L'eau chaude est acheminée vers l'échangeur de chaleur à une température comprise entre 50 et 70°C. À la sortie de l'échangeur, l'eau a une température d'environ 60°C.
2. Régulation de la température de l'eau chaude : La température de l'eau chaude envoyée vers l'échangeur est ajustée à l'aide d'une vanne de régulation à 3 voies. Cette vanne permet de modifier la température de l'eau chaude en fonction des mesures de température fournies par les capteurs. L'ouverture de la vanne est contrôlée en fonction des besoins de chauffage des boues.
3. Circuit de boues : Les boues à réchauffer entrent dans l'échangeur de chaleur du côté opposé à l'eau chaude. L'échangeur fonctionne en contre-courant, ce qui permet un transfert thermique optimal entre l'eau chaude et les boues. Les boues sont réchauffées par le transfert de chaleur provenant de l'eau chaude. À la sortie de l'échangeur, les boues ont une température augmentée d'environ 1°C à 2°C.

Il est nécessaire de contrôler la température de l'eau chaude afin d'éviter toute surchauffe des boues. Si la température de l'eau dépasse 70°C, il y a un risque de cuisson des boues, ce qui peut entraîner un encrassement prématuré de l'échangeur et nuire à son efficacité.

L'eau chaude utilisée dans l'échangeur provient de la chaudière. Une pompe, assure un débit continu d'eau chaude vers l'échangeur de chaleur, avec un débit de 120 m<sup>3</sup>/h.

## 5.7. Les risques d'installation et préventions

La mise en place d'une installation de digestion anaérobie dans une station d'épuration peut engendrer certains risques sanitaires potentiels. Parmi ces risques, on retrouve notamment : (EVANNO, S. ET WEINBERGER 2014) :

**Les émissions de gaz :** La digestion anaérobie produit des gaz tels que le méthane, le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène. Si ces gaz sont libérés en grande quantité sans être correctement traités ou évacués, ils peuvent représenter un danger. Plus spécifiquement, le sulfure d'hydrogène est toxique et peut provoquer des problèmes respiratoires ainsi que des irritations oculaires, pouvant avoir des conséquences néfastes sur la santé.

**Les risques d'explosion :** Le méthane produit par la digestion anaérobie est un gaz inflammable qui peut former des mélanges explosifs avec l'air. Des fuites de méthane peuvent se produire et s'accumuler dans des espaces confinés ou mal ventilés, augmentant ainsi le risque d'explosion. Il est donc essentiel de mettre en place une gestion appropriée des gaz et de prendre des mesures de sécurité adéquates afin de minimiser ce risque.

**La contamination des sols et des eaux souterraines :** Les sous-produits générés par les installations de digestion anaérobie, tels que les digestats ou les effluents liquides, peuvent contenir des substances nocives ou des agents pathogènes. Si ces sous-produits ne sont pas correctement gérés ou en cas de fuites, ils peuvent contaminer les sols environnants et les eaux souterraines, ce qui représente un risque potentiel pour la santé humaine et l'environnement.

**L'exposition aux agents pathogènes :** Les matières organiques dégradées au cours du processus de digestion anaérobie peuvent contenir des agents pathogènes tels que des bactéries, des virus et des parasites. Sans la mise en place de mesures de sécurité appropriées pour prévenir la propagation de ces agents pathogènes, les travailleurs et les personnes vivant à proximité de l'installation pourraient être exposés à des infections potentielles.

**Les risques liés aux produits chimiques :** Certains additifs chimiques peuvent être utilisés pour améliorer l'efficacité du processus de digestion anaérobie. Cependant, si ces produits chimiques ne sont pas manipulés, stockés ou éliminés correctement, ils peuvent représenter un risque pour la santé des travailleurs ainsi que pour l'environnement.

Il convient de souligner que la plupart de ces risques peuvent être atténués grâce à une conception appropriée de l'installation, une gestion adéquate des déchets et la mise en place de mesures de sécurité adéquates.

#### 5.7.1. La mise en place de mesures de sécurité adéquates

Afin de réduire au maximum ces risques, diverses mesures de sécurité et de prévention sont couramment mises en place :

1. Mise en place de systèmes de ventilation et de captage des gaz : Il est essentiel d'installer des systèmes de ventilation adéquats pour évacuer les gaz produits par la digestion anaérobie et ainsi prévenir toute accumulation dangereuse. De plus, l'utilisation de dispositifs de captage des gaz permet de récupérer et de valoriser le biogaz tout en minimisant les fuites.
2. Contrôle des émissions : Des dispositifs de contrôle des émissions, tels que des torchères, peuvent être employés en vue de brûler de manière sécurisée les gaz combustibles. Cela contribue à prévenir les risques d'explosion ou de libération incontrôlée de gaz inflammables.
3. Gestion adéquate des sous-produits : Il est primordial de gérer et de traiter correctement les digestats et les effluents liquides afin d'éviter toute contamination des sols et des eaux souterraines. Pour ce faire, il convient de mettre en place des systèmes de stockage étanches, des dispositifs de traitement des eaux et des procédures de gestion des déchets conformes aux réglementations environnementales en vigueur.
4. Formation et équipement de protection individuelle (EPI) : Il est indispensable de former les travailleurs aux risques spécifiques associés à l'installation de digestion anaérobie et de les doter d'équipements de protection individuelle appropriés tels que des masques respiratoires, des combinaisons de protection, des gants et des lunettes de sécurité.
5. Application de bonnes pratiques d'hygiène : Des mesures d'hygiène strictes doivent être mises en place pour prévenir la propagation d'agents pathogènes. Cela peut inclure des protocoles de lavage des mains, la mise à disposition

d'installations sanitaires adéquates ainsi que des procédures régulières de nettoyage et de désinfection.

6. Gestion des produits chimiques : Si des additifs chimiques sont utilisés, il est impératif de manipuler, stocker et éliminer ces substances de manière sécurisée, en se conformant aux réglementations en vigueur. Il est également important de mettre à disposition des fiches de données de sécurité et de former le personnel à l'utilisation sûre de ces produits.

En respectant scrupuleusement ces mesures de sécurité et en se conformant aux réglementations appropriées, il est possible de minimiser les risques sanitaires associés aux installations de digestion anaérobie. Ainsi, un fonctionnement sûr et durable de ces installations peut être assuré.

## Conclusion

Ce chapitre constitue une étape cruciale dans la conception et l'intégration d'une installation de digestion anaérobie dans la station d'épuration de Beni Mered. Les résultats obtenus fournissent une base solide pour la mise en œuvre pratique de l'installation, permettant ainsi d'exploiter de manière optimale les ressources énergétiques présentes dans les eaux usées traitées.

## Chapitre 06 : Développement d'outils de dimensionnement

# Introduction

Ce chapitre présente l'interface que nous avons développée qui est une interface de dimensionnement du digesteur des boues. L'objectif principal de cette interface est d'aider les utilisateurs à prendre des décisions éclairées en leur fournissant des informations précises et fiables sur les dimensions optimales du digesteur des boues. Cela leur permettra de concevoir et de planifier leur projet de manière plus efficace, en maximisant la production d'énergie tout en garantissant un fonctionnement optimal de la digestion anaérobie.

Cette interface offre aux utilisateurs un moyen convivial de saisir les paramètres pertinents liés à leur projet, tels que les caractéristiques des boues, les taux de production de boues, les performances attendues, etc. Une fois que ces informations sont fournies, l'interface effectue des calculs complexes pour déterminer les dimensions recommandées du digesteur des boues.

## 6.1. Description de l'interface

L'apparence de l'interface est soignée et conviviale. Elle est basée sur une mise en page claire et organisée, avec des éléments de conception modernes. L'interface utilise des couleurs agréables à l'œil et une typographie lisible pour améliorer la lisibilité et l'expérience utilisateur. (Voir [Annexe 1](#)). Les fonctionnalités principales de l'interface comprennent :

- Remplissage des champs requis :

Les utilisateurs peuvent remplir les champs requis avec les données pertinentes pour leur projet, tels que les caractéristiques des boues, les taux de production de boues, les performances attendues, etc.

- Bouton de calcul :

Une fois que les champs requis sont remplis, les utilisateurs peuvent cliquer sur le bouton "Calculer" pour effectuer les calculs nécessaires et obtenir les dimensions du digesteur des boues.

- Affichage des résultats :

Les résultats du calcul sont affichés à l'écran, présentant les dimensions recommandées pour le digesteur des boues en fonction des données fournies.

- Options de personnalisation :

Les utilisateurs peuvent explorer les options de personnalisation pour ajuster les paramètres et voir comment ils influencent les résultats. Cela leur permet d'expérimenter différentes configurations et d'obtenir des informations sur l'impact de chaque paramètre sur les dimensions du digesteur.

### 6.1.1. Développement et exécution de l'interface

Pour développer cette interface, j'ai utilisé des technologies web courantes telles que :

- HTML ;
- CSS ;
- JavaScript.

Nous avons également utilisé des bibliothèques ou des frameworks supplémentaires, tels que sublime Text, pour faciliter le développement et améliorer l'apparence de l'interface.

L'interface peut être exécutée dans un navigateur web moderne sans nécessiter de logiciels spécifiques.

### 6.1.2. Discussion de l'aspect visuel et de l'ergonomie de l'interface

L'interface utilisateur se concentre sur la convivialité et l'intuitivité afin d'offrir une expérience agréable aux utilisateurs.

#### 6.1.2.1. Aspect visuel :

- nous avons opté pour un design propre et professionnel en utilisant une combinaison de couleurs apaisantes et une mise en page claire.
- nous avons utilisé une police de caractères lisible et adaptée à l'écran pour faciliter la lecture des informations.
- nous avons ajouté des éléments visuels tels que des titres, des sections et des espacements pour organiser visuellement le contenu et améliorer la lisibilité.
- nous avons également utilisé des icônes ou des symboles significatifs pour représenter les actions ou les étapes du processus, ce qui facilite la compréhension et l'identification des éléments interactifs.

#### 6.1.2.2. Organisation de l'information :

- Les informations sont présentées de manière structurée en utilisant des titres, des sous-titres et des paragraphes. Cela permet aux utilisateurs de scanner rapidement le contenu et de trouver les informations pertinentes.
- nous avons divisé l'interface en sections distinctes pour couvrir différentes parties de l'interface de dimensionnement du digesteur des boues, telles que l'introduction, les instructions et la section de démarrage. Cela facilite la navigation et la compréhension globale de l'interface.
- Les instructions et les étapes à suivre sont présentées de manière claire et concise, avec une mise en forme adaptée pour les rendre facilement identifiables.

#### 6.1.2.3. Éléments de navigation et d'interaction :

- nous avons utilisé des liens hypertextes pour permettre aux utilisateurs de passer facilement d'une section à une autre ou d'accéder à des pages externes pour plus d'informations.
- Les boutons sont utilisés de manière significative pour indiquer les actions à effectuer, comme le bouton "Accéder à l'interface" pour passer à la prochaine étape.
- Les champs de saisie des données sont clairement étiquetés avec des libellés descriptifs pour guider les utilisateurs dans la saisie des informations requises.
- nous avons utilisé des contrôles et des sélecteurs intuitifs, tels que des cases à cocher ou des listes déroulantes, pour faciliter la sélection des options pertinentes.

#### 6.1.3. Fonctionnalités de l'interface

L'interface que j'ai créée pour le dimensionnement du digesteur des boues propose les fonctionnalités suivantes pour faciliter le processus de dimensionnement des installations de méthanisation :

➤ Calculs de dimensionnement :

- L'interface permet aux utilisateurs de saisir les données pertinentes pour le dimensionnement du digesteur des boues, telles que les caractéristiques des boues, la quantité de matière organique, les rendements attendus, etc.

- Sur la base de ces données, l'interface effectue des calculs automatiques pour déterminer les dimensions optimales du digesteur, y compris la capacité, le volume, la hauteur, le diamètre, etc.

- Les formules et les méthodologies de calcul utilisées sont basées sur des références et des principes théoriques reconnus dans le domaine du dimensionnement des digesteurs de méthanisation.

➤ Visualisation des résultats :

- Une fois les calculs effectués, les résultats du dimensionnement du digesteur des boues sont affichés à l'écran.

- Les informations clés, telles que les dimensions calculées et les résultats des rendements attendus, sont présentées de manière claire et structurée pour une meilleure compréhension.

- Des graphiques ou des représentations visuelles peuvent également être inclus pour aider à visualiser les résultats et les tendances, par exemple, un graphique montrant l'évolution de la production de biogaz en fonction du temps.

➤ Convivialité et intuitivité :

- L'interface est conçue pour être conviviale et intuitive, avec des instructions claires sur la manière d'utiliser l'interface et de saisir les données requises.

- Les erreurs de saisie sont vérifiées et des messages d'erreur peuvent être affichés pour aider les utilisateurs à corriger les problèmes de données incorrectes ou manquantes.

- Des fonctionnalités de sauvegarde et de récupération des données peuvent être incluses pour permettre aux utilisateurs de reprendre leur travail à partir du point où ils l'ont laissé.

6.1.3.1. Données d'entrée et résultats et sorties :

(Voir Annexe 2)

Page 2 :

- Temps de séjour (ts) : Nombre de jours de rétention hydraulique dans le digesteur.
- Quantité de boues (Mb) : Masse totale des boues à traiter dans le digesteur.
- Concentration des boues épaissies (C) : Teneur en matière sèche des boues épaissies.

- Débit d'entrée des boues ( $Q_b$ ) : Quantité de boues à introduire dans le digesteur par unité de temps.

L'interface traite ces données en utilisant des formules et des paramètres prédéfinis pour calculer les résultats suivants :

- Volume de digesteur ( $V_{\text{digesteur}}$ ) : Volume total du digesteur nécessaire pour traiter les boues spécifiées.
- Débit d'entrée des boues ( $Q_b$ ) : Débit d'alimentation des boues dans le digesteur, basé sur les données saisies.

Les résultats sont présentés à l'utilisateur sous forme de valeurs numériques, indiquant le volume du digesteur requis et le débit d'entrée des boues.

Page 3 :

- Nombre de digesteurs à installer : Nombre total de digesteurs à mettre en place.
- Volume de digesteur calculé : Volume total du digesteur calculé à partir des données précédentes.
- Hauteur fixée (pour cas a) : Hauteur spécifiée pour le digesteur (dans le cas où la hauteur est fixée).
- Diamètre fixé (pour cas b) : Diamètre spécifié pour le digesteur (dans le cas où le diamètre est fixé).

L'interface utilise ces données pour générer les résultats suivants :

- Cas : Indication du cas (a ou b) en fonction des données fournies.
- Diamètre du digesteur : Diamètre du digesteur calculé à partir des données saisies.
- Surface du digesteur : Surface du digesteur calculée à partir des données saisies.

Les résultats sont présentés à l'utilisateur en affichant le cas correspondant, le diamètre du digesteur et la surface du digesteur.

Page 4 (Partie 1) :

- Masse des boues ( $m_b$ ) : Masse totale des boues à traiter.
- Coefficient de production de gaz (BO) : Facteur qui représente la quantité de gaz produite par unité de matière organique dégradée.
- Rendement (r) : Rendement de la production de gaz.
- Taux des MVS (x) : Taux de matière volatile dans les boues.

Les résultats calculés par l'interface comprennent :

- Volume de gaz produit (G) : Volume total de gaz produit par les boues spécifiées.
- Masse organique (MO) : Masse organique dégradée dans le digesteur.
- Production journalière de gaz : Volume de gaz produit par jour.
- Production annuelle de gaz : Volume de gaz produit par an.

Les résultats sont affichés à l'utilisateur pour chaque variable calculée.

Page 4 (Partie 2) :

- Volume de gaz annuel (G annuelle) : Volume total de gaz produit par an.
- Taux de valorisation d'énergie : Pourcentage du gaz produit qui est utilisé pour la valorisation énergétique.
- Taux d'énergie utilisé pour le chauffage : Pourcentage de l'énergie produite utilisé pour le chauffage.
- Rendement énergétique de chauffage : Rendement de l'utilisation de l'énergie pour le chauffage.
- Total d'énergie consommée par la station : Consommation totale d'énergie de la station.

Les résultats présentés à l'utilisateur comprennent :

- Energie totale produite (Et) : Quantité totale d'énergie produite par le gaz.
- Energie valorisée (Ev) : Quantité d'énergie utilisée pour la valorisation.
- Energie utilisée pour le chauffage (Echauff) : Quantité d'énergie utilisée pour le chauffage.
- Energie restante (Erest) : Quantité d'énergie restante après la valorisation et le chauffage.
- Utilisation de la digestion anaérobie pour l'électricité : Indication de l'utilisation de la digestion anaérobie pour produire de l'électricité.
- Montant économisé (DA) : Montant économisé en utilisant la digestion anaérobie par rapport à d'autres méthodes.
- Montant économisé (USD) : Montant économisé en dollars grâce à l'utilisation de la digestion anaérobie.

Ces résultats sont présentés à l'utilisateur sous forme de valeurs numériques, indiquant les quantités d'énergie produites, utilisées et économisées, ainsi que des indications sur l'utilisation de l'énergie et les économies réalisées.

#### 6.1.4. Tests et validation

Lors du développement de notre interface, nous avons réalisé plusieurs tests pour nous assurer de son bon fonctionnement et de sa conformité aux objectifs fixés. Voici les principaux tests que nous avons effectués :

- Test de fonctionnalité : Nous avons vérifié que toutes les fonctionnalités de l'interface étaient opérationnelles et qu'elles produisaient les résultats attendus. Nous avons effectué des tests avec des données d'entrée variées pour garantir que les calculs étaient correctement effectués et que les résultats étaient cohérents.
- Test d'utilisabilité : pour évaluer l'interface en termes de convivialité et de facilité d'utilisation on a accompli des tâches spécifiques sur l'interface tout en fournissant des commentaires sur l'expérience, des impressions, des suggestions d'amélioration et des remarques concernant la clarté des résultats présentés.

##### 6.1.4.1. Les principaux ajustements que nous avons apportés :

- Clarification des étapes de saisie des données.
- Amélioration de la lisibilité des résultats.
- Correction des erreurs de calcul.

##### 6.1.4.2. La validation des calculs :

Nous avons comparé les résultats obtenus par notre interface avec ceux obtenus à l'aide d'outils de calcul similaires, tels que des feuilles de calcul Excel.

Nous avons effectué des tests avec différentes combinaisons de données d'entrée et nous avons vérifié la cohérence des résultats en utilisant des données d'une installation existante celle de STEP BARAKI.

Les résultats obtenus par l'interface étaient conformes à ceux de l'installation de BARAKI ce qui nous a validé le modèle qu'on a choisi. (Voir les résultats de validations à l'aide des données de BARAKI dans l'annexe 2).

## 6.2. Limitations et perspectives :

### 6.2.1. Limitations de l'interface :

- Simplifications des modèles :

L'interface repose sur des modèles de calcul simplifiés pour estimer les résultats. Ces modèles peuvent ne pas tenir compte de toutes les variables et interactions complexes présentes dans un système réel de digestion anaérobie. Par conséquent, les résultats fournis par l'interface peuvent ne pas refléter avec précision les performances réelles d'une installation.

- Données manquantes ou limitées :

L'interface dépend des données fournies par les utilisateurs pour effectuer les calculs. Cependant, certaines données importantes peuvent être manquantes ou difficiles à obtenir, ce qui peut limiter la précision des résultats. Par exemple, des données sur la composition spécifique des boues ou sur les caractéristiques du substrat peuvent ne pas être disponibles.

- Absence de considérations spécifiques au site :

L'interface ne prend pas en compte les conditions environnementales, géographiques ou géologiques spécifiques d'un site donné. Ces facteurs peuvent avoir une incidence sur les performances de la digestion anaérobie et sur les résultats obtenus. Par conséquent, les résultats fournis par l'interface doivent être interprétés avec prudence et adaptés aux conditions du site réel.

### 6.2.2. Perspectives d'amélioration et d'extension :

- Modèles plus complexes :

L'interface pourrait être améliorée en utilisant des modèles plus sophistiqués qui tiennent compte de davantage de variables et d'interactions complexes. Cela permettrait d'améliorer la précision des résultats et de fournir une évaluation plus réaliste des performances de la digestion anaérobie.

- Intégration de bases de données :

L'ajout d'une base de données intégrée contenant des informations sur les caractéristiques des boues, les propriétés du substrat et d'autres données pertinentes pourrait faciliter la saisie des données et améliorer la précision des résultats.

- Adaptation aux conditions spécifiques du site :

L'interface pourrait être développée pour prendre en compte les conditions spécifiques du site, telles que le climat, la disponibilité des matières premières et les contraintes environnementales. Cela permettrait de personnaliser les résultats en fonction des conditions réelles du site.

➤ Prise en compte de la flexibilité opérationnelle :

Une fonctionnalité intéressante à ajouter serait la possibilité d'explorer différentes stratégies opérationnelles, telles que des variations dans les temps de séjour, les taux d'alimentation en boues, les températures, etc. Cela permettrait aux utilisateurs d'optimiser les performances de leur système de digestion anaérobie.

➤ Analyse de rentabilité :

L'interface pourrait être étendue pour inclure une analyse de rentabilité, prenant en compte les coûts d'investissement, les coûts de fonctionnement et les économies potentielles réalisées grâce à la digestion anaérobie. Cela aiderait les utilisateurs à évaluer la viabilité économique de leur projet.

## Conclusion

L'interface que nous avons développée pour le dimensionnement des installations de méthanisation présente plusieurs avantages et une grande utilité dans le domaine de la conception et de l'intégration de ces installations. Elle permet aux concepteurs et aux ingénieurs de dimensionner efficacement les composants clés d'une installation, tels que le digesteur et le gazomètre, en fonction des paramètres spécifiques de chaque projet. Cela permet d'optimiser les performances de l'installation tout en minimisant les coûts et les risques. Elle offre la possibilité d'explorer différentes configurations et stratégies opérationnelles, ce qui permet aux utilisateurs de comparer et d'évaluer différentes options avant de prendre des décisions finales. Cela facilite la conception de solutions sur mesure adaptées aux besoins spécifiques de chaque projet.

## Conclusion générale

Au terme de cette étude approfondie sur les installations de méthanisation, il est indéniable que la digestion anaérobie représente une pierre angulaire dans la quête d'une station de traitement à énergie positive. En effet, cette méthode offre une couverture considérable, couvrant jusqu'à 12-15% des besoins en électricité de la station, et contribue ainsi de manière significative à la viabilité environnementale et économique de ce processus.

Toutefois, il est essentiel de ne pas négliger d'autres alternatives énergétiques, qui peuvent offrir des compléments conséquents et prometteurs pour un avenir plus soutenable. La diversification des méthodes de traitement permettra assurément d'accroître la proportion d'énergie produite localement et de viser l'atteinte d'une station de traitement à énergie positive à 100%.

La mise en œuvre d'une interface de dimensionnement adaptée s'avère être un outil inestimable dans ce noble dessein. Cet outil offre une panoplie d'avantages indéniables en permettant aux concepteurs et ingénieurs de façonner des installations sur mesure, optimisées pour chaque projet spécifique. En combinant expertise technique et exploration minutieuse des configurations et stratégies opérationnelles, cette interface ouvre la voie à des installations à la fois performantes, économiquement avantageuses et intrinsèquement respectueuses de l'environnement.

Les économies réalisées, atteignant jusqu'à 9076179 à 11 475 064 DA par an, constituent le reflet tangible de la réussite de ces initiatives novatrices. Ces économies ne se limitent pas seulement à un aspect financier, mais elles témoignent également de notre engagement envers la préservation des ressources naturelles et la réduction des émissions nocives.

La transition vers des installations de méthanisation à énergie positive est un impératif que nous ne pouvons ignorer. L'utilisation harmonieuse de la digestion anaérobie et d'autres approches complémentaires, soutenue par des outils de dimensionnement avancés, nous projette vers un avenir durable et prospère. En embrassant ces évolutions, nous œuvrons de concert pour bâtir un monde meilleur, préservant notre planète pour les générations à venir.

En plus des aspects abordés précédemment, il convient d'explorer certaines perspectives essentielles qui peuvent enrichir davantage la recherche sur les installations de méthanisation à énergie positive. Ces perspectives se concentrent sur

des domaines clés tels que l'étude économique et le coût d'investissement, l'analyse du cycle de vie (ACV) et l'intégration de l'installation dans la production d'électricité.

En considérant ces perspectives supplémentaires, nous pourrions approfondir notre compréhension des aspects économiques, environnementaux et énergétiques des installations de méthanisation à énergie positive. En intégrant une étude économique rigoureuse, une analyse du cycle de vie complète et une approche d'intégration dans la production d'électricité, nous pourrions renforcer les fondements de ces technologies durables et contribuer à une transition énergétique plus solide et plus efficace. Cette recherche soutenue est essentielle pour créer des solutions adaptées, économiquement viables et respectueuses de l'environnement, favorisant ainsi le développement durable de notre société.

## Références bibliographiques

- ✚ AMHA, YAMROT M., CORBETT, MICHAEL, ET SMITH, ADAM L., 2019. Two-phase improves performance of anaerobic membrane bioreactor treatment of food waste at high organic loading rates.. .
- ✚ ANGELIDAKI, I., & SANDERS, W., 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. Reviews in environmental science and bio/technology. . . 2004.
- ✚ ARBI, S BABA, 2020. Techniques des Systèmes de Digestion. . Université Mohamed Khider-Biskra, Faculté des Sciences Exactes et SNV.
- ✚ BAHRI, A. ET HOUMANE, B. ., 1987. Effet de l'épandage des eaux usées traitées et des boues résiduaires sur les caractéristiques d'un sol sableux de Tunisie. Science du sol. Vol. 25, pp. 267-278.
- ✚ BALDE´, YOUNOUSSA MOUSSA., 2022. Modélisation et estimation de digesteurs anaérobies pour la dépollution de déchets et la production d'énergie. . paris saclay.
- ✚ BENAROUR, SARA., 2015. Réalisation d'un digesteur pour la production du biogaz. .
- ✚ BENNOUNA, M. ET KEHAL, S., 2001. Production de méthane à partir des boues des stations d'épuration des eaux usées: Potentiel existant en Algérie. Rev. Energ.Ren.: Production et Valorisation–Biomasse, ., pp. 29-36.
- ✚ BENYAHIA, BOUMEDIENE., 2012. Modélisation et observation des bioprocédés à membranes : application à la digestion anaérobie. . MONTPELLIER 2.
- ✚ BERNET, NICOLAS ET BUFFIÈRE, PIERRE. MOLETTA, R., 2008. Caractérisation de la mise en œuvre de la méthanisation.
- ✚ BOUALLAGUI, H., HAOUARI, O., BEN CHEIKH, R., & HAMDI, M., 2009. Bioreactor landfilling: biodegradability and biodegradation kinetics of MSW. Bioresource technology.
- ✚ BOUCHARAB, MENEL; KADDECHE, Nahla Yassmine., 2019. Contribution à la valorisation des boues de stations d'épuration : Cas STEP de Guelma.. . Université 08 Mai 1945 de Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie,.
- ✚ CAMACHO, PATRICIA ET PRÉVOT, CLAUDE., 2011. Méthanisation des boues. In : La méthanisation., p. P. 201-229.

- ✚ DARSY, CORALIE et al., 2002. Effluents des établissements hospitaliers : teneur en microorganismes pathogènes, risques sanitaires, procédures particulières d'épuration et de gestion des boues. Office International de l'eau. pp. 1–9.
- ✚ EVANNO, S. ET WEINBERGER, B., 2014. Procédés de méthanisation et gestion des risques industriels. TECH. SCI. MÉTHODES,. p. P. 62-73.
- ✚ GEBREEYESSUS, G., MEKONNEN, A., CHEBUDE, Y., ALEMAYEHU, E., 2021. Impact du prétraitement du stillage lors d'une digestion anaérobie couplée supportée par scories, suivie d'une dégradation aérobie. air, soil and water research. .
- ✚ GHANEM, ALINE, EINHORN, JACQUES, LAURENT, FRANCOIS, et al, 2006. Impact écotoxicologique des composés organiques présents dans les boues d'épuration valorisées par épandage sur les sols agricoles. In : 3ème Séminaire d'Écotoxicologie de l'INRA. . p. np. 3ème Séminaire d'Écotoxicologie de l'INRA.
- ✚ GLÉNISSON, GIULIA, CAILLET, HÉLÈNE, ET REGNIER, THIERRY., 2022. Digestion anaérobie des épluchures de légumes : évaluation de l'influence de prétraitements biologiques et de la co-digestion sur le potentiel méthanogène. . CONGRÈS NATIONAL DE RECHERCHE DES IUT (CNRIUT).
- ✚ HAJJAJI, NOUREDDINE, PONS, M. N., RENAUDIN, V., ET AL., 2010. Production du biogaz par digestion anaérobie : aspects technologiques et environnementaux. . SÉMINAIRE DE L'ECOLE DOCTORALE RP2E.
- ✚ HAMIDI, OUIZA, 2017. Conception d'un code de calcul pour le dimensionnement des stations d'épuration à boues activées. . p. 49.
- ✚ HAOUAM, SALAH EDDINE ET HASSAINE, SOUHILA., 2020. Etude du potentiel de valorisation énergétique du biogaz de la station d'épuration baraki.. .
- ✚ HESS, Jonathan., 2007. Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation.. . Université Nice Sophia Antipolis.
- ✚ KRAA, ABD ELHEQ, 2017. Contribution à l'étude expérimentale du comportement physicochimique et rhéologique des boues de la station d'épuration de la ville d'AIN BEIDA. .
- ✚ LIMA AMARANTE, J. A., 2010. Biométhanisation des déchets putrescibles municipaux-technologies disponibles et enjeux pour le Québec. . UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, SHERBROOKE, QUÉBEC, CANADA,.

- ✚ LIU, B., & QIU, H., 2015. Organic matter characterization in wastewater and sewage sludge. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT,. No. A REVIEW., pp. 236, 633-649.
- ✚ MEEGODA, JAY N., LI, BRIAN, PATEL, KUSH, ET AL., 2018. A Review of the Processes, Parameters, and Optimization of Anaerobic Digestion. . International Journal of Environmental Research and Public Health.
- ✚ MERABET, HAMZA, 2008. Utilisation du chitosane dans le conditionnement des boues. .
- ✚ Méthanisation des boues de stations : Règle de l'art et état des lieux sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse, 2012. .
- ✚ MOLETTA, René, 2002. La digestion anaérobie des déchets municipaux.
- ✚ MOLETTA, René, 2008. Méthanisation de la biomasse. Bioprocédés et bioproductions. DOI 10.51257/a-v1-bio5100.
- ✚ NJAMPOU, P, 2011. Dimensionnement d'une installation de biométhanisation.. . INSTITUT INTERNATIONAL DE L'INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT.
- ✚ PAY DRECHSEL, CHRISTOPHER A. SCOTT, LIQA RASCHID-SALLY, MARK REDWOOD ET AKIÇA BAHRI, 2020. L'irrigation avec des eaux usées et la santé.
- ✚ PILLI, SRIDHAR., 2015. Évaluation des technologies de prétraitement des boues pour améliorer l'efficacité de la digestion anaérobie : bilans massique et énergétique et émissions de gaz à effet de serre.. . UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.
- ✚ RAHMANI, ABDRAHI, TAYEBI, HACHEMI, et al., 2016. Gestion et valorisation énergétique des déchets organiques.. . Université Ahmed Draïa-Adrar.
- ✚ REVERDY, A L, FERSTLER, V and BAUDEZ, J C, 2020. La méthanisation des boues d'épuration urbaines État des lieux en France et état de l'art. . pp. 73–79.
- ✚ SEAAL, 2017. MANUEL OPERATEUR.
- ✚ STANDARD, APHA., 2017. Analyse de la matière organique dans la boue. METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER.
- ✚ TIJDSCHRIFT., 1998. Revue M, Société belge des mécaniciens. Société belge des mécaniciens. p. PAGE 38.

## Les sites web

- ✚ ACTU-ENVIRONNEMENT, 2010. Le traitement des boues d'épuration. . Online. 2010. Retrieved from : <https://www.actu-environnement.com/AE/DOSSIERS/TRAITEMENT-DES-BOUES/TRAITEMENT-BOUES-EPURATION.PHP4> , [accessed 29 May 2023].
- ✚ BLAIS, JF and SASSEVILLE, JL, 1996. État de l'art du traitement et de la disposition ou valorisation des boues d'usines d'épuration municipales: les mesures d'efficacité énergétique électrique. . Online. Retrieved from : <http://espace.inrs.ca/id/eprint/641/1/R000429.pdf> [accessed 21 June 2023].
- ✚ ENERGIES-RENOUVELABLES, 2015. Biogaz. . Online. 2015. Retrieved from : [energies-renouvelables.org](http://energies-renouvelables.org) , [accessed 24 June 2023].
- ✚ LADJEL, FARID ET ABOU, Sonia., 2014. Perspective de valorisation agricole et énergétique des boues issues des STEP en Algérie. Ministère des ressources en eau .Online.Retrievedfrom: [https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as\\_sdt=0%2C5&q=LADJEL%2C+Fari+d+et+ABBOU%2C+Sonia.+Perspectives+de+valorisation+agricole+et+énergétique+des+boues+issues+des+STEP+en+Algérie.+Oran%3A+Office+National+d%27Assainissement%2C+25+mars+2014.&btnG=](https://scholar.google.com/scholar?hl=fr&as_sdt=0%2C5&q=LADJEL%2C+Fari+d+et+ABBOU%2C+Sonia.+Perspectives+de+valorisation+agricole+et+énergétique+des+boues+issues+des+STEP+en+Algérie.+Oran%3A+Office+National+d%27Assainissement%2C+25+mars+2014.&btnG=), [accessed 21 June 2023].
- ✚ MINISTÈRE DES RESSOURCES EN EAU, 2023. Ministère des Ressources en Eau. . Online. 2023. Retrieved from: [https://www.mh.gov.dz/?page\\_id=1934](https://www.mh.gov.dz/?page_id=1934). [accessed 24 May 2023].
- ✚ WATER, UN, 2017. Wastewater Management. A UN Water Analytical Brief. . Online. 2017. Retrieved from : [https://scholar.google.com/scholar?cluster=12292180254471897570&hl=fr&as\\_sdt=2005&scioldt=0,5#d=gs\\_cit&t=1687307184415&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3A4kHejtCYlqoJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26scf%3D1%26hl%3Dfr](https://scholar.google.com/scholar?cluster=12292180254471897570&hl=fr&as_sdt=2005&scioldt=0,5#d=gs_cit&t=1687307184415&u=%2Fscholar%3Fq%3Dinfo%3A4kHejtCYlqoJ%3Ascholar.google.com%2F%26output%3Dcite%26scirp%3D0%26scf%3D1%26hl%3Dfr) , [accessed 21 June 2023].

# Annexes

Annexe 1 : Des images représentatifs d'exécution de l'interface .....	144
Annexe 2 : exécution de validation des calculs de l'interface .....	149
Annexe 3 : l'espace disponible pour l'intégration de l'installation dans la station	150
L'espace nécessaire pour une installation avec un digesteur, un gazomètre et un département de chauffage et brassage .....	150
Annexe 4 : Principe des vases communicants .....	151
Annexe 5 : Schéma de fonctionnement de cannes de brassage .....	152
Annexe 6 : Schéma représentatif des sections d'installation en P&ID (piping and instrument diagram).....	153
Annexe 8 : schéma représentatif de la chaine des procédés de traitement des boues .....	155
Annexe 9 : les différentes étapes de la digestion anaérobie et les flux de carbones associés (en % de DCO) .....	156

## Annexe 1 : Des images représentatifs d'exécution de l'interface

Exécution de la page 1 :

### **Interface de dimensionnement du digesteur des boues**

#### **Introduction**

Bienvenue dans l'interface de dimensionnement du digesteur des boues ! Cette interface a été développée pour vous aider à calculer les dimensions optimales d'un digesteur des boues dans le cadre de notre projet de fin d'études sur la station d'épuration à énergie positive par l'intégration de la digestion anaérobie. En utilisant cette interface, on peut dimensionner efficacement le digesteur pour maximiser la production d'énergie et assurer un fonctionnement optimal de la digestion anaérobie.

#### **Instructions**

Pour utiliser cette interface, suivez les étapes suivantes :

1. Remplissez les champs requis avec les données pertinentes pour votre projet.
2. Cliquez sur le bouton "Calculer" pour effectuer les calculs nécessaires.
3. Consultez les résultats affichés à l'écran pour obtenir les dimensions du digesteur des boues.
4. Explorez les options de personnalisation pour ajuster les paramètres et voir comment ils influencent les résultats.

Assurez-vous de fournir des données précises et de lire attentivement les instructions pour obtenir des résultats pertinents. N'hésitez pas à consulter la documentation fournie pour plus d'informations sur les principes théoriques du dimensionnement d'un digesteur des boues.

#### **Commencer**

Cliquez sur le bouton ci-dessous pour accéder à l'interface de dimensionnement du digesteur des boues.

Accéder à l'interface

Exécution de la page 2 : calcul de volume de digesteur :

## Interface de dimensionnement du digesteur des boues - Page 2

**Entrées de données de calcul de volume de digesteur**

Temps de séjour (ts) :

  
Quantité de boues (Mb) :  
  
Concentration des boues épaissies (C) :  
  
Débit d'entrée des boues (Qb) :  

Calculer

### Visualisation des résultats

Volume de digesteur (V\_digesteur) :  
9828.00

Débit d'entrée des boues (Qb) :  
468.00

Accéder au calcul des dimensions

## Interface de dimensionnement du digesteur des boues - Page 2

**Entrées de données de calcul de volume de digesteur**

Temps de séjour (ts) :

  
Quantité de boues (Mb) :  
  
Concentration des boues épaissies (C) :  
  
Débit d'entrée des boues (Qb) :  

Calculer

### Visualisation des résultats

Volume de digesteur (V\_digesteur) :  
9823.10

Débit d'entrée des boues (Qb) :  
467.77

Accéder au calcul des dimensions

Exécution de la page 3 : calcul des dimensions :

## Interface de dimensionnement du digesteur des boues - Page 3

### Entrées de données de calcul de volume de digesteur

Nombre de digesteurs à installer :

Volume de digesteur calculé :

Hauteur fixée (pour cas a) :

Diamètre fixé (pour cas b) :

Calculer

### Résultats

Accéder au calcul de biogaz

Cas a : Fixer la hauteur et calculer le diamètre

Diamètre du digesteur : 25.01 m

Surface du digesteur : 491.40 m<sup>2</sup>

## Interface de dimensionnement du digesteur des boues - Page 3

### Entrées de données de calcul de volume de digesteur

Nombre de digesteurs à installer :

Volume de digesteur calculé :

Hauteur fixée (pour cas a) :

Diamètre fixé (pour cas b) :

Calculer

### Résultats

Accéder au calcul de biogaz

Cas b : Fixer le diamètre et calculer la hauteur

Hauteur du digesteur : 21.72 m

Surface du digesteur : 452.39 m<sup>2</sup>

## Interface de dimensionnement du digesteur des boues - Page 3

### Entrées de données de calcul de volume de digesteur

Nombre de digesteurs à installer :

Volume de digesteur calculé :

Hauteur fixée (pour cas a) :

Diamètre fixé (pour cas b) :

Calculer

### Résultats

Accéder au calcul de biogaz

Cas c : Supposer que la hauteur est égale au diamètre

Diamètre et hauteur du digesteur : 23.22 m

Surface du digesteur : 423.32 m<sup>2</sup>

## Interface de dimensionnement du digesteur des boues - Page 4

### Entrées de données de calcul de volume de digesteur

Masse des boues (mb) :

Coefficient de production de gaz (B0) :

Rendement (r) :

Taux des MVS (x) :

Calculer

### Résultats

Volume de gaz produit (G) :

Masse organique (MO) : 9261.78 kg

Production journalière de gaz : 1389.27 m<sup>3</sup>

Production annuelle de gaz : 507082.46 m<sup>3</sup>

### Bilan énergétique

Volume de gaz annuel (G annuelle) :

Taux de valorisation d'énergie :

Taux d'énergie utilisé pour le chauffage :

Rendement énergétique de chauffage :

Total d'énergie consommée par la station :

Calculer

### Résultats du bilan énergétique

Bilan énergétique :

Energie totale produite (Et) : 3093203.01 kWh

Energie valorisée (Ev) : 2938542.86 kWh

Energie utilisée pour le chauffage (Echauff) : 1077465.71 kWh

Energie restante (Erest) : 1861077.14 kWh

Utilisation de la digestion anaérobie pour l'électricité : 11.45%

Montant économisé (DA) : 13614269.05 DA

Montant économisé (USD) : 99910.46 USD

Revenir au début

## Annexe 2 : exécution de validation des calculs de l'interface

### Interface de dimensionnement du digesteur des boues - Page 2

#### Entrées de données de calcul de volume de digesteur

Temps de séjour (ts) :

Quantité de boues (Mb) :

Concentration des boues épaissies (C) :

Débit d'entrée des boues (Qb) :

Calculer

#### Visualisation des résultats

Volume de digesteur (V\_digesteur) :

252000.00

Débit d'entrée des boues (Qb) :

12000.00

Accéder au calcul des dimensions

Dans la station de BARAKI on a deux digesteurs primaires :

### Interface de dimensionnement du digesteur des boues - Page 3

#### Entrées de données de calcul de volume de digesteur

Nombre de digesteurs à installer :

Volume de digesteur calculé :

Hauteur fixée (pour cas a) :

Diamètre fixé (pour cas b) :

Calculer

#### Résultats

Accéder au calcul de biogaz

Cas b : Fixer le diamètre et calculer la hauteur

Hauteur du digesteur : 16.69 m

Surface du digesteur : 754.77 m<sup>2</sup>

Les dimensions à partir de dossier technique (document interne SEAAL)

► Ouvrages compris dans la section :

Ouvrage	Caractéristique	Valeur
Bâche d'alimentation des digesteurs	Volume	200 m <sup>3</sup>
	Hauteur d'eau	3,80 m
Digesteurs primaires	Volume de digestion	12000 m <sup>3</sup>
	Volume de stockage	m <sup>3</sup>
	Diamètre intérieur	31 m
	Hauteur cylindrique	15 m
Digesteur secondaire	Volume de digestion	12000 m <sup>3</sup>
	Volume de stockage	3 800 m <sup>3</sup>
	Diamètre intérieur	31 m
	Hauteur cylindrique	15 m

### Annexe 3 : l'espace disponible pour l'intégration de l'installation dans la station



### L'espace nécessaire pour une installation avec un digesteur, un gazomètre et un département de chauffage et brassage



## Annexe 4 : Principe des vases communicants

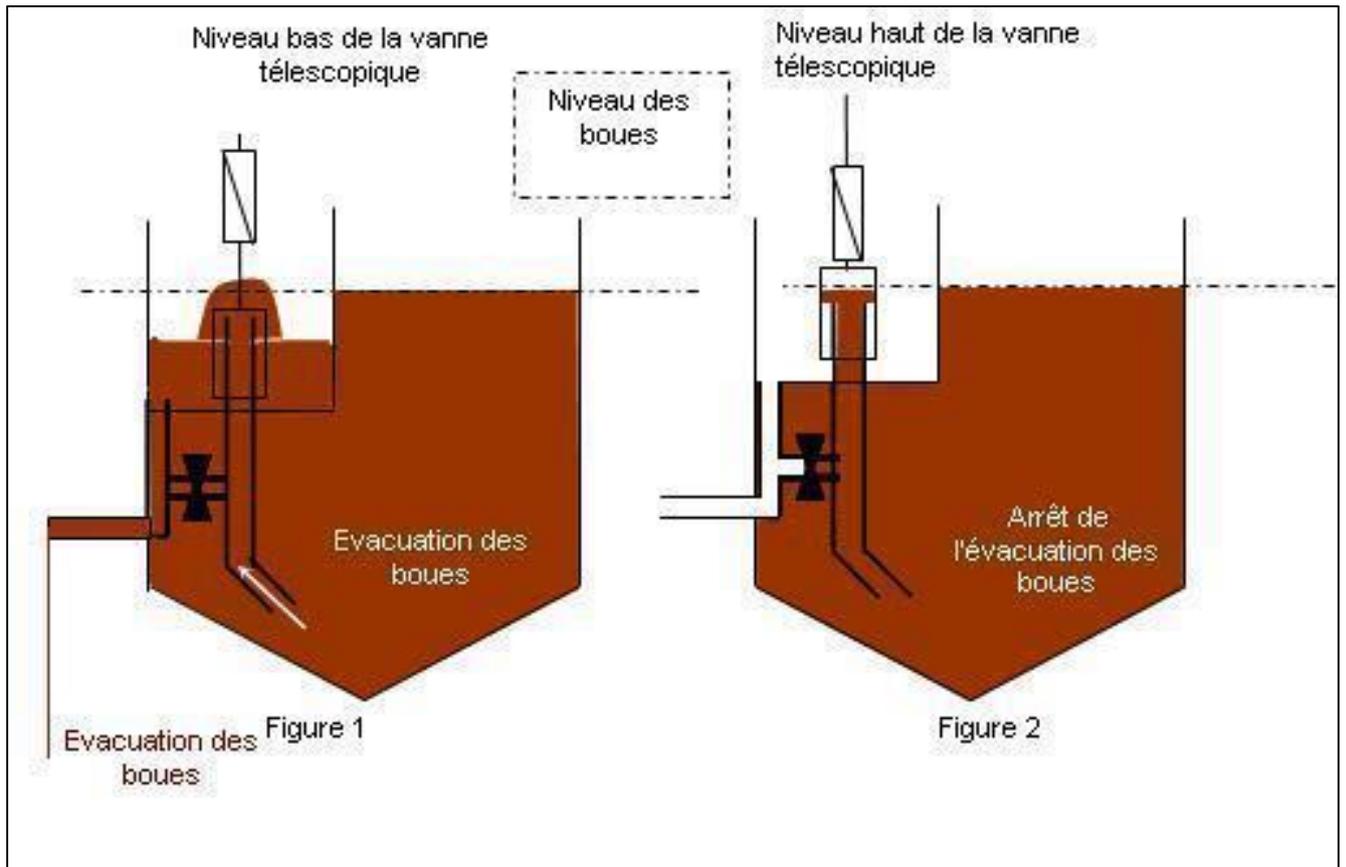


Figure 20 Principe des vases communicants

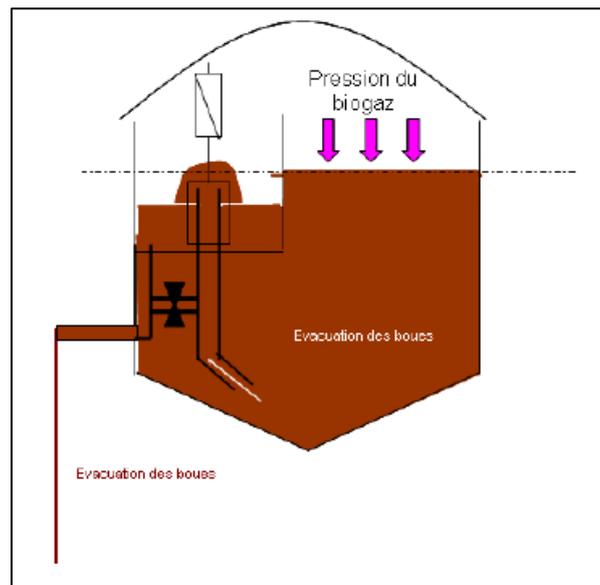
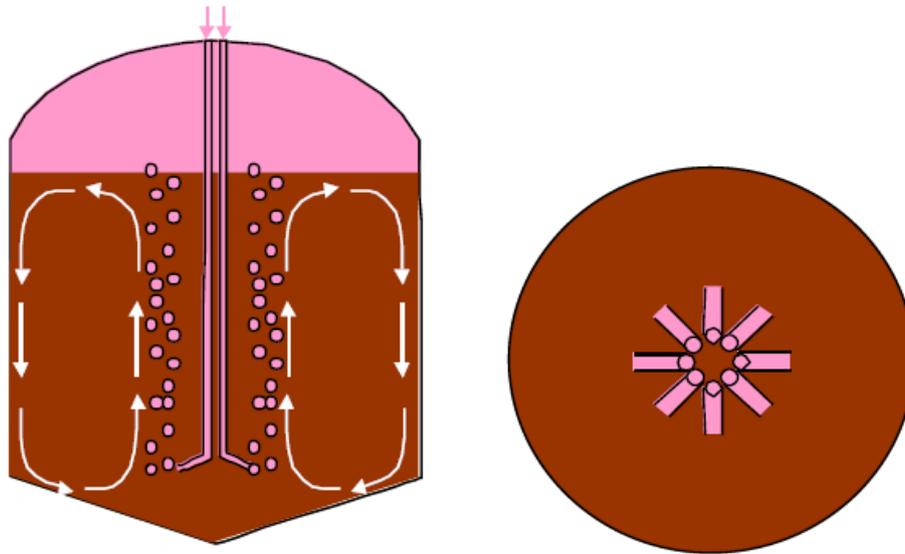


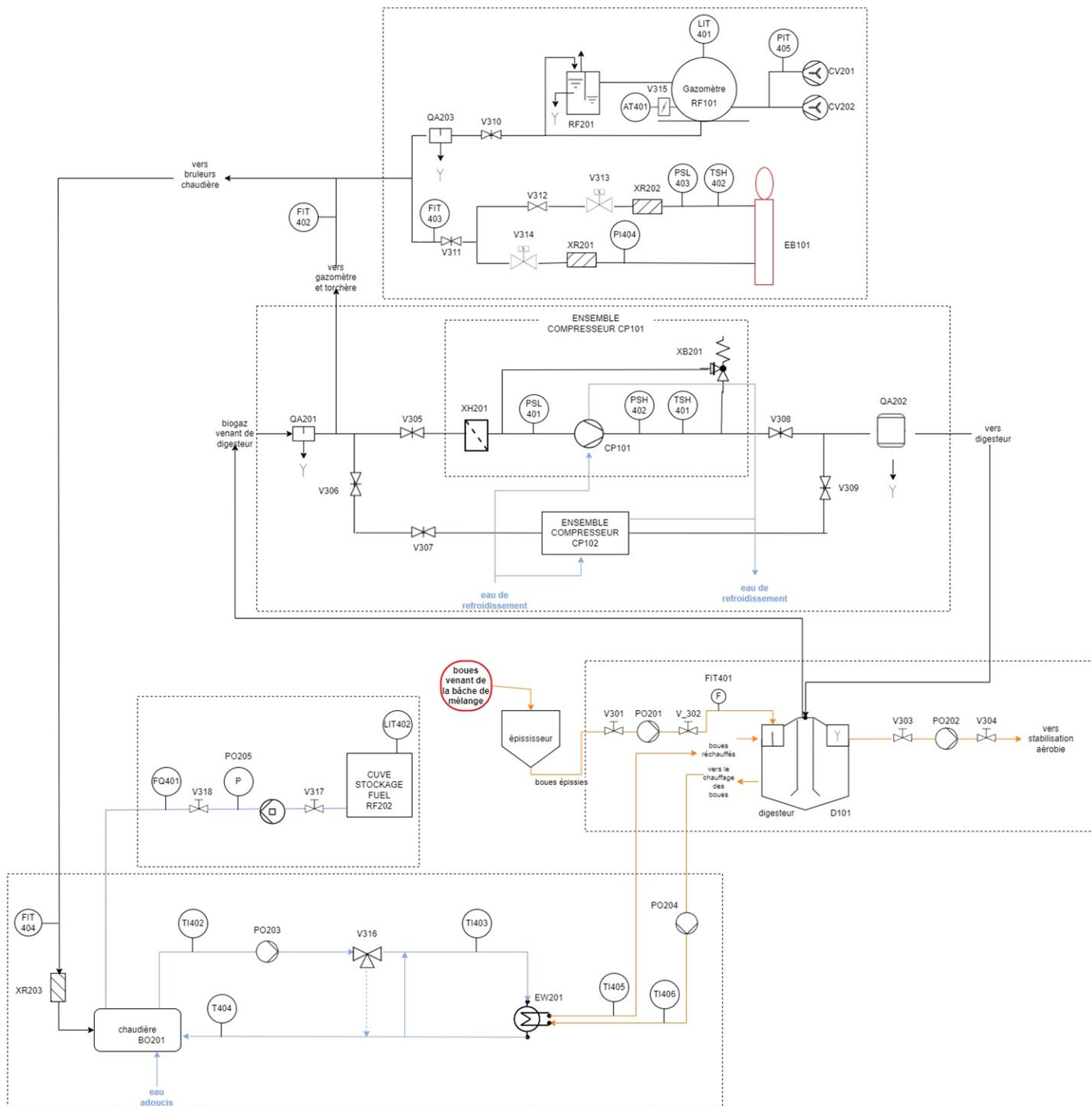
Figure 21 Influence de la pression

## Annexe 5 : Schéma de fonctionnement de cannes de brassage

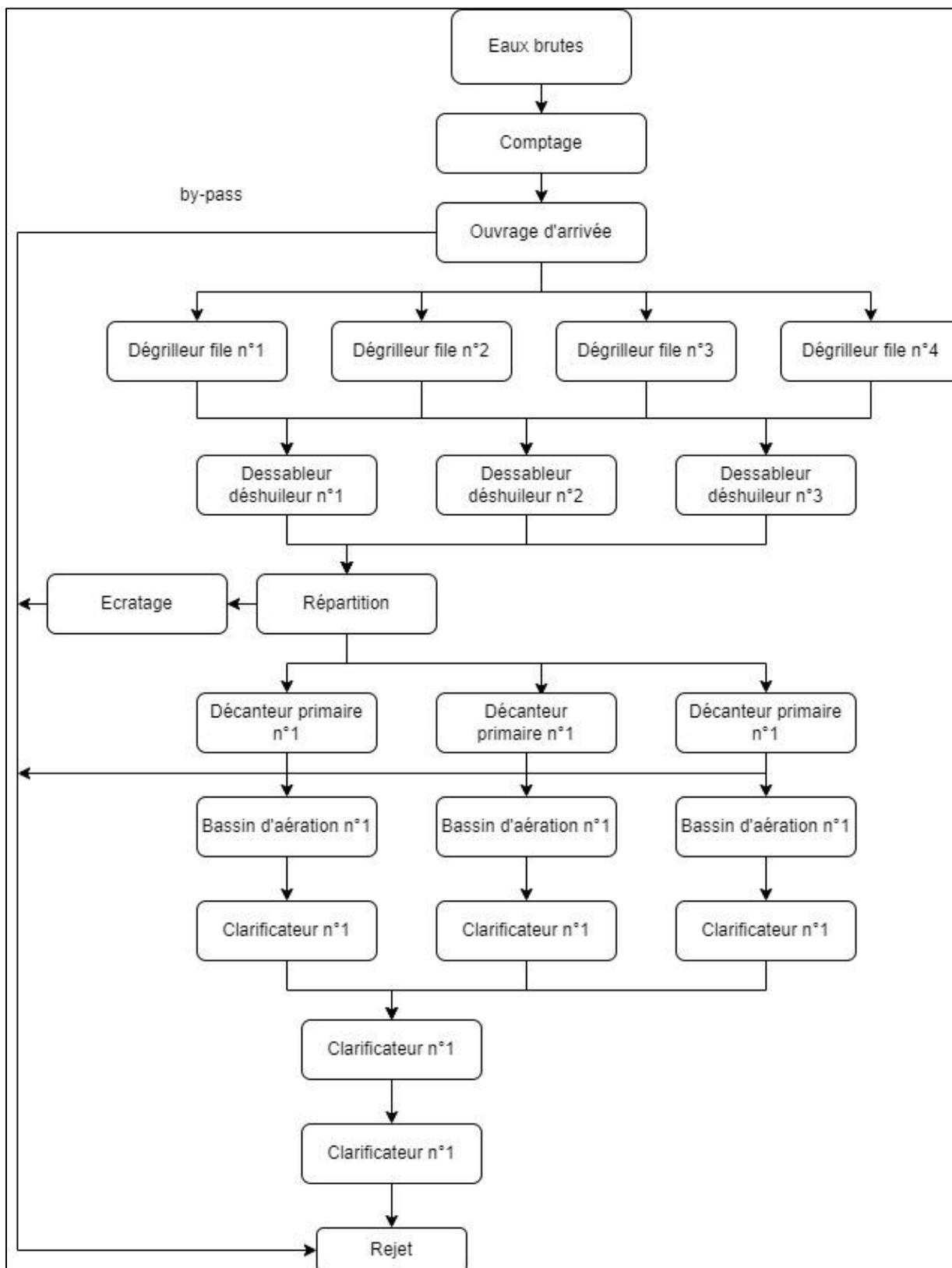


*Figure 22 Schéma de la disposition des cannes de brassage (vue de dessus), Schéma de fonctionnement de cannes de brassage (vue de côté)*

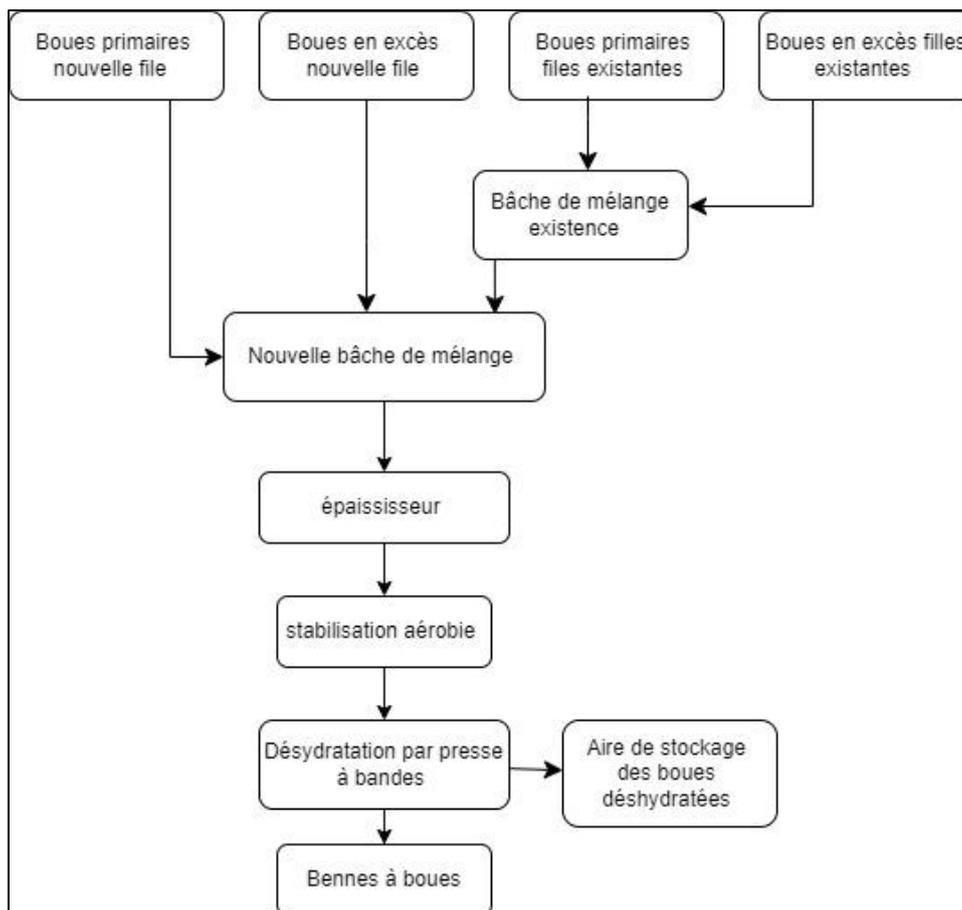
## Annexe 6 : Schéma représentatif des sections d'installation en P&ID (piping and instrument diagram)



## Annexe 7 : schéma représentatif de la chaîne des procédés de traitement des eaux



Annexe 8 : schéma représentatif de la chaîne des procédés de traitement des boues



Annexe 9 : les différentes étapes de la digestion anaérobie et les flux de carbones associés (en % de DCO)

