

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE M'HAMED BOUGERA BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT ÉNERGÉTIQUE**

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

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

Spécialité : Énergétique et Environnement

Thème

**VALORISATION ÉNERGETIQUE DES BOUES
DE LA STATION D'ÉPURATION DE
BOUMERDES**

Promoteur :
Mr HIMRANE NABIL

Présenté par :
M^{elle} KARDACHE LOUBNA

Encadreur :
Mr KHEDRAOUI SOFIANE

Promotion : 2015/2016

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents. Ma mère pour m'avoir mis au monde et pour m'avoir accompagné tout le long de ma vie. Je lui dois une fière chandelle. Mon père qui sans lui je ne serais pas arrivé jusqu'ici. J'espère toujours rester fidèle aux valeurs morales que vous m'avez apprises.

A ma petite sœur, mes deux petits frères, mon oncle Achour et toute ma famille et tous mes amis.

Remerciements

Je remercie avant tout Dieu de m'avoir donné la volonté et la santé pour réaliser ce modeste travail.

Ce travail a été mené au laboratoire de la DTD sonatrach de Boumerdes, au département environnement, et à l'office national des eaux (ONA) de Boumerdes.

Monsieur Nabil HIMRAN, professeur à l'université de Boumerdes, a encadré mon travail. Je le remercie d'avoir accepté mon projet et de m'avoir prodigué tous les conseils indispensables. Je le remercie aussi d'avoir suivi, guidé soutenu et fait confiance à mon travail.

Je tiens à remercier Monsieur Sofiane KHEDRAOUI, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire de la DTD sonatrach (Boumerdes). Ses conseils précieux, son intérêt à mon sujet pour le temps qu'il m'a consacré et son inestimable soutien, sans oublier l'ensemble du personnel et opérateur de la société.

Un grand merci à Monsieur Moussa, chef de la STEP de Boumerdes, pour sa disponibilité et la qualité de ses conseils et avis sur le travail que j'ai pu mener. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Madame Hassiba, ingénieur du laboratoire de l'office national des eaux (ONA), d'avoir guidé mes pas au niveau de la station de Boumerdes, pour ses critiques élogieuses qui sont arrivées à point nommé.

Je remercie aussi le Jury pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de juger mon travail.

Les remerciements ne seraient rien sans une mention particulière pour mes collègues de la promotion " Energétiques et Environnement" sans oublier Monsieur BRACHEMI chef de département énergétique et professeur à l'université de Boumerdes (INGM), de son soutien et sa compassion envers nous pendant ces dernières années. Et pour mes amies de longues dates, merci pour tous les moments qu'on a passés ensemble.

Je remercie toute personne ayant contribué, de près ou de loin, dans ce travail, merci infiniment.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
CHAPITRE I : Généralité sur les stations d'épuration	
I-1 Introduction	03
I-2 Définition des eaux usées	03
I-3 Types des eaux usées	04
I-4 Traitement des eaux usées	04
I-5-1 Paramètres de mesures	04
I-5 Les différents types d'irrigation	07
I-6 Station d'épuration	09
I-6-1 Les procédés de traitement des STEP	09
I-7 Présentation de la station d'épuration de Boumerdes	11
I-8 Description de la procédure de traitement de la station de Boumerdes	15
I-9 Avantages et inconvénients de la réutilisation	21
CONCLUSION	22
CHAPITRE II : Analyses et cas de réutilisation	
II-1 Introduction	23
II-2 Échantillonnage	23
II-2-1 Prélèvement de l'eau à analyser	23
II-3 Analyses physico-chimiques	24
II-4 Cations et anions majeurs	25
II-5 Paramètres indicateurs de pollution	26
II-6 Détermination des métaux lourds	27
II-7 Analyses bactériologiques et parasitologiques	27
II-18 Interprétation des analyses et calcul du rendement de la STEP	28
II-8-1 Résultats des analyses physico-chimiques	28
II-8-2 Résultats des analyses chimiques (indicateurs de pollution)	32

II-8-3 Résultats des analyses des métaux lourds	33
II-8-4 Résultats des analyses du SAR	33
II-8-5 Résultats des analyses bactériologiques et parasitologiques	34
II-8-6 Calcul du rendement de la station d'épuration	35
II-9 Cas de réutilisation des eaux épurées pour l'irrigation	36
CONCLUSION	37

CHAPITRE III : Valorisation des boues d'épuration

III-1 Introduction	38
III-2 Généralités sur les boues	38
III-2-1 Production de boues de STEP	38
III-2-2 Caractérisation des boues	39
III-2-3 Types des boues résiduaires	39
III-3 Principe de la production aérobie à boues activées	41
III-4 Les différentes voies de valorisation et d'élimination des boues	41
III-5 Définition de la méthanisation	42
III-5-1 Les principales phases du processus de méthanisation	42
III-6 Les paramètres de la digestion anaérobie	44
III-7 Les différents types du digesteur	45
III-8 Caractéristiques du digesteur	46
III-9 Le biogaz	48
III-9-1 Composition du biogaz	48
III-9-2 Caractéristique physique	49
III-9-3 Valeur énergétique du biogaz	50
III-10 Stockage du biogaz	50
III-11 Production et utilisation du biogaz	51
III-12 Rendement de valorisation énergétique	52
III-13 Avantages et inconvénients du biogaz	53
CONCLUSION	54

CHAPITRE IV : Dimensionnement du digesteur

IV-1 Introduction	55
IV-2 Traitement du biogaz	55
IV-2-1 Procédés de traitement du biogaz avant valorisation énergétique	56
IV-2-2 Traitement du biogaz selon le mode de valorisation	60
IV-3 Critères du biogaz pour les modes de valorisation	61
IV-3-1 Production de chaleur	61
IV-3-2 Transformation en bio-méthane carburant	62
IV-3-3 L'injection du biogaz dans le réseau de gaz	62
IV-3-4 Production d'électricité et de chaleur (cogénération)	63
IV-4 Moralité	65
IV-5 Estimation de la production électrique pour la STEP de Boumerdes	65
IV-5-1 Dimensionnement de l'installation	65
IV-5-2 Bilan matières et énergétiques	67
IV-5-3 Analyse de la rentabilité du projet	70
CONCLUSION	71
CONCLUSION GENERALE	72
ANNEXES	
BIBLIOGRAPHIE	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Système d'irrigation du riz	07
Figure I.2 : Système de ruissellement	07
Figure I.3 : Système d'irrigation à la raie	08
Figure I.4 : Système de contrôle de nappe	08
Figure I.5 : Système d'aspersion	08
Figure I.6 : Système de goutte à goutte	09
Figure I.7 : Position géographique de la STEP de Boumerdes	12
Figure I.8 : Synoptique de la station de Boumerdes	13
Figure I.9 : L'épuration des eaux usées	14
Figure I.10 : Bassin d'orage	15
Figure I.11 : Le dégrilleur automatique	16
Figure I.12 : Dégraisseur-dessableur	17
Figure I.13 : Ouvrage de répartition	17
Figure I.14 : Bassin d'aération	18
Figure I.15 : Clarificateur	18
Figure I.16 : Bassin de chloration	19
Figure I.17 : Epaisseur	20
Figure I.18 : L'appareil de déshydratation	21
Figure II.1 : Evaluation de la température entre l'entrée et la sortie	29
Figure II.2 : Evaluation du pH entre l'entrée et la sortie.....	29
Figure II.3 : Evolution de la conductivité entre l'entrée et la sortie	30
Figure II.4 : Evolution des MES entre l'entrée et la sortie	30
Figure II.5 : Evolution de la DCO entre l'entrée et la sortie	31
Figure II.6 : Evolution de la DBO ₅ entre l'entrée et la sortie	32
Figure II.7 : Evolution du SAR des eaux épurées pendant 3 mois	34
Figure II.8 : Evolution du rendement de la STEP durant 3 mois	36
Figure III.1 : Boues primaire	40

Figure III.2 : Boues physico-chimique	40
Figure III.3 : Boues biologique	40
Figure III.4 : Traitement des eaux usées par boues activées	41
Figure III.5 : Les voies d'élimination et de valorisation des boues	42
Figure III.6 : Les étapes de la méthanisation	43
Figure III.7 : Les différents types de digesteur	46
Figure III.8 : Les différents formes du digesteur	47
Figure III.9 : schéma explicatif de la production du biogaz	48
Figure III.10 : Equivalence énergétique du biogaz	52
Figure IV.1 : Organigramme de traitement et de valorisation du biogaz	56
Figure IV.2 : Enrichissement par lavage à l'eau	58
Figure IV.3 : Enrichissement par lavage au polyéthylène glycol	58
Figure IV.4 : Le cycle d'adsorption dans le système PSA	59
Figure IV.5 : Enrichissement par cryogénie.....	59
Figure IV.6 : Mode de valorisation du biogaz	61
Figure IV.7 : Digesteur cylindrique	67
Figure IV.8 : Schéma du digesteur	69
Figure IV.9 : Schéma de la cogénération	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Décret exécutif de rejets pour l'irrigation	06
Tableau I.2 : Les procédés d'épuration des eaux usées	09
Tableau I.3 : Les procédés de traitement des boues	11
Tableau II.1 : Table pour la prise d'essai de la DBO ₅	25
Tableau II.2 : Tableau des résultats physico-chimiques	28
Tableau II.3 : Tableau des résultats chimiques	32
Tableau II.4 : Tableau des résultats des métaux lourds	33
Tableau II.5 : Tableau des résultats des analyses du SAR	33
Tableau II.6 : Tableau des résultats d'analyses parasitologiques	34
Tableau II.7 : Tableau des résultats d'analyses microbiologiques	35
Tableau II.8 : Tableau des rendements	35
Tableau III.1 : La composition chimique du biogaz	48
Tableau III.2 : Caractéristique physique du biogaz comparé au gaz naturel	50
Tableau III.3 : Pouvoir calorifique du biogaz selon sa teneur en méthane	50
Tableau IV.1 : Les différents traitements selon le mode de valorisation	60
Tableau IV.2 : Caractéristiques d'un biogaz de chaudière	61
Tableau IV.3 : Caractéristiques requises pour un biogaz carburant	62
Tableau IV.4 : Caractéristiques requises du bio-méthane pour l'injection	62
Tableau IV.5 : Les machines de valorisation énergétique du biogaz	63
Tableau IV.6 : Calcul de la valeur actuelle net	70

Liste des symboles et abréviations

CE : Conductivité Electrique.

DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène.

DCO : Demande Chimique en Oxygène.

MES : Matière en Suspension.

MVS : Matière Volatile en Suspension.

MO : Matière Organique.

AVG : Acide Gras Volatils.

pH : Potentiel hydrique.

TRH : Temps de Rétention Hydraulique.

SAR : Ratio d'adsorption du sodium.

STEP : Station d'épuration.

Eq/hab : Equivalent habitant.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONA : Office National d'Assainissement de Boumerdes.

DTD : Division Technologie et Développement ex CRD.

I.P.A : Institut Pasteur d'Alger.

En amont : A l'entrée de la Station d'épuration.

En aval : A la sortie de la Station d'épuration.

BioGNV : Bio gaz naturel véhicule.

PSA : Pressure System Adsorption.

Pi : Production initiale de boues.

PCI : Pouvoir calorifique inférieur.

PCS : Pouvoir calorifique supérieur.

ppm : partie par million 1% = 10000ppm.

mg/Nm³ : milligrammes par normal m³.

INTRODUCTION GENERALE

L'eau a une valeur incontestable, qu'elle soit utilisée pour la consommation humaine, l'agriculture, les loisirs, le transport ou la production d'énergie.

La gestion durable de l'eau est l'un des principaux axes du développement durable, dans la mesure où l'eau doit répondre aux besoins des générations actuelles et satisfaire les générations futures. L'agriculture constitue le plus gros consommateur des ressources hydriques, vu la diminution des apports en eau constatée depuis plusieurs décennies. L'épuration de l'eau usée et son utilisation en irrigation est une option attirante, en particulier dans les zones arides et semi-arides, car elle représente une source d'eau et d'engrais additionnels renouvelables et fiables.

Aussi, les eaux résiduaires peuvent être chargées par de nombreux polluants et constituent des milieux parfois très complexes. L'analyse de ces eaux résiduaires permet d'identifier la ou les substances indésirables qu'on doit éliminer à priori lors d'un traitement d'épuration au niveau des stations d'épurations. La charge en agents polluants (boues) dans une eau peut être valorisée à partir de certains paramètres.

Par ailleurs, les boues d'épurations sont considérées comme une importante source de biomasse en Algérie, cependant leur utilisation comme source d'énergie reste restreinte par rapport à d'autres pays dans le monde.

La valorisation énergétique des boues issues du procédé épuratoire génère un biogaz après digestion anaérobie, ce dernier contient du méthane CH_4 qui a un pouvoir calorifique important et peut se considérer comme un combustible très intéressant pouvant se substituer au gaz naturel du fait qu'il est valorisable dans plusieurs applications énergétiques (production de chaleur, de l'électricité, carburant automobile et bio-méthane ...etc).

Dans notre travail, on a étudié le fonctionnement de la station d'épuration de Boumerdes à boue activée et on a effectué la valorisation énergétique des boues d'épuration, dans le but de réaliser des perspectives de développement de la production de biogaz et d'énergie électrique. Notre travail est divisé en deux grandes parties, la première partie est consacrée à l'étude de fonctionnement de la station d'épuration de Boumerdes :

- En analysant les différents paramètres physico-chimique qui gèrent les eaux de la STEP, de vérifier une éventuelle valorisation des eaux traitées, dans le domaine agricole.
- Les résultats de notre travail seront comparés aux normes et réglementations Algérienne des eaux épurées pour l'irrigation.

➤ Par la suite, nous avons calculé le rendement épuratoire de la station d'épuration de Boumerdes.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons mené une étude sur la fermentation méthanique ou la bio-méthanisation qui est l'une des méthodes de valorisation de la biomasse, pour cela on a fait le dimensionnement d'un digesteur afin de produire le biogaz qui est constitué essentiellement du dioxyde de carbone et du méthane. Ce dernier peut être valorisé par différentes voies : production de chaleur et d'électricité, utilisation comme carburant ou injection dans le réseau de gaz naturel.

Enfin, ce manuscrit est clôturé par une conclusion générale où nous présentons les résultats obtenus avec les perspectives que nous jugeons utiles pour un meilleur aboutissement de ce travail.

I-1 INTRODUCTION

En Algérie, les contraintes du climat, la croissance démographique, les transformations économiques et sociales sont à l'origine d'une demande en eau sans cesse croissante. Parallèlement, le recours à l'irrigation est devenu une nécessité. Or, face à ces demandes, les ressources en eau sont rares et insuffisantes. Elles sont limitées, vulnérables et inégalement réparties. Pour une population de 38 millions d'habitants, les ressources renouvelables en eau sont de 550 m³/an par habitant, de ce fait, l'Algérie est un pays où l'eau est rare. Dans ces conditions déficitaires en eau, le secteur de l'agriculture est le plus gros demandeur. [1] Dans ce contexte, l'utilisation des eaux usées épurées est devenue une exigence et il faut qu'elle fasse partie intégrante de la stratégie de mobilisation de toutes les ressources disponibles. En Algérie, la consommation en eau s'accroît de manière soutenue depuis cette dernière décennie. C'est ainsi qu'une politique de mobilisation et d'utilisation des eaux non conventionnelles (dessalement de l'eau de mer, eaux saumâtres, eaux usées) a été mise en place récemment. Dans le cadre de la gestion des eaux usées épurées, plusieurs moyens sont mis en place pour une meilleure protection de l'environnement aquatique.

Les stations d'épuration urbaines ont pour rôle d'éliminer la pollution contenue dans les effluents domestiques, avant leur rejet dans le milieu naturel. Le principe consiste à éliminer les matières minérales et organiques en suspension et en solution, afin d'obtenir une eau épurée, conforme aux normes de rejets. La procédure du traitement des eaux usées urbaines est définie comme l'ensemble des processus biogéochimiques par lesquels un environnement aquatique pollué retrouve après l'arrêt des rejets et après un laps de temps variable sa pureté initiale. [2]

On collecte les eaux usées à l'aide d'un réseau d'assainissement d'une agglomération qui seront acheminés vers la station d'épuration pour obtenir un effluent épuré pour lequel la pollution soit limitée à un degré, tel que le rejet ne crée aucune nuisance à la faune ni à la flore du milieu récepteur.

La réutilisation des eaux usées épurées agit à deux niveaux :[3]

- Elle évite les rejets d'eaux issues de la station d'épuration dans le milieu naturel.
- Elle constitue un approvisionnement supplémentaire.

I-2 Définition des eaux usées :

Les eaux usées sont des liquides de composition hétérogène, chargées en matières minérales ou organiques, pouvant être en suspension ou en solution, et dont certains peuvent avoir un caractère toxique. L'eau usée est l'eau qui a été utilisée et qui doit être traitée avant d'être réintroduite vers d'autres sources d'eaux pour qu'elles ne causent pas la pollution de ces autres sources. Les eaux usées proviennent de plusieurs sources. Tout ce que vous évacuez en tirant la chasse d'eau et lorsque vous utilisez vos éviers est considérés comme une eau usée.

Les eaux usées, qui sont un mélange de plusieurs types d'eaux et pour éviter la pollution, sont acheminées par un réseau d'assainissement vers une station d'épuration pour y être traitées et si possible réutilisées. [4]

I-3 Types des eaux usées :

Les eaux usées sont réparties en 3 catégories :

I-3-1 Les eaux usées domestiques : sont issues des installations sanitaires, des cuisines, du nettoyage des bâtiments, des lessives à domicile, de certains petits établissements et qui sont destinées à être déversées dans une station d'épuration.

I-3-2 Les eaux de ruissellement : artificielles d'origine pluviale, elles sont aussi considérées comme étant des eaux usées, si ce n'est qu'elles font, dans certains cas, l'objet d'un traitement séparé dans le cadre de leur évacuation.

I-3-3 Les eaux usées agricoles : sont des eaux usées provenant d'établissements ou sont gardés ou élevés des animaux entraînant une charge polluante globale inférieure à une valeur maximale fixée par le gouvernement et qui ne sont ni des jardins zoologiques ni des animaleries permanentes.

I-4 Traitement des eaux usées :

I-4-1 Paramètres de mesures : pour une meilleure appréciation de la composition des eaux usées, il existe des critères d'évaluation de la pollution qui sont : la température de l'eau, le potentiel hydrique (pH), la conductivité électrique, les matières en suspension (MES), la demande biochimique en oxygène (DBO), la demande chimique en oxygène (DCO), l'azote, le phosphore et autres critères microbiologique tels que les coliformes fécaux. On trouve aussi les métaux lourds qui peuvent représenter une nuisance potentielle. [5]

1- Paramètres physico-chimiques :

a- Température : c'est un paramètre souvent négligé dans les collecteurs urbains, mais qui devrait être plus souvent mesuré surtout dans le cas de rejets industriels dans le réseau. Le fonctionnement de certains ouvrages d'épuration est très sensible à des températures trop élevées, ainsi tout rejet doit être inférieur à 30° C. [6]

b- Potentiel hydrique : le pH permet d'exprimer le degré d'acidité des eaux usées. Sa mesure est très importante pour juger le bon fonctionnement d'une étape de traitement.

c- Conductivité : c'est une mesure simple, qui se pratique avec un électrode et fournit une indication précise sur la concentration totale en sels dissous. Par comparaison avec la conductivité de l'eau potable, il est ainsi possible de juger rapidement si des apports importants, en particulier industriels, ont lieu dans le réseau d'assainissement. [6]

d- Matières En Suspension : les MES représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc qui sont retenues par un filtre. Les MES, qui comportent des matières organiques et minérales, constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel. [7]

e- La demande chimique en oxygène : la DCO est la quantité d'oxygène consommée par les matières existante dans l'eau dans des conditions opératoires définies.

Le rapport DCO/DBO₅ renseigne sur la qualité de la biodégradation. Un rapport DCO/DBO₅ inférieur à 2,5 indique que ces eaux sont susceptibles de subir un traitement biologique. [8]

f- La demande biochimique en oxygène : la DBO représente la quantité d'oxygène dépensée par les phénomènes d'oxydation chimique, d'une part, et d'autre part la dégradation des matières organiques par voie aérobie nécessaire à la destruction des composés organiques. En effet, dans un effluent complexe, ces deux types d'oxydation se superposent, d'où le nom biochimique. Notons que dans les eaux usées domestiques, ce sont les phénomènes biologiques qui prédominent.

2- Paramètres chimiques (indicateurs de pollution) :

a- Azote : il est mesuré sous différentes formes, les types d'analyses dépendant des formes chimiques recherchées, on peut les diviser en deux grandes familles (pour ce qui concerne l'épuration) : l'azote réduit et l'azote oxydé.

Le premier correspond à l'azote organique que l'on trouve dans les eaux usées provenant notamment des déchets métaboliques (protéine, urée) d'origine humaine.

L'azote oxydé se retrouve de façon marginale dans les eaux usées, il s'agit des nitrites (NO₂⁻) et des nitrates (NO₃⁻), produits de la transformation chimique (oxydation) de l'azote réduit.

b- Phosphore : il peut se retrouver sous forme minérale ou organique. Ces différents composés se trouvent soit à l'état dissous dans la phase liquide, soit fixés sur les matières en suspension. [9]

Dans les eaux résiduaires urbaines le phosphore provient du métabolisme et des détergents, mais cette dernière origine tend à diminuer par la réduction des composés phosphorés dans les lessives.

3- Paramètres biologiques :

La boue activée est constituée essentiellement de bactéries et parfois de champignons de rotifères et de nématodes.

a- Nématodes : ce sont des vers filiforme non segmentés, recouvert d'une couche chitineuse transparente.

b- Coliformes fécaux : les coliformes fécaux, ou coliformes thermo tolérants, sont un sous-groupe des coliformes totaux capables de fermenter le lactose à une température de 44,5°C. Bien que la présence de coliformes fécaux témoigne habituellement d'une contamination d'origine fécale, plusieurs coliformes fécaux ne sont pas d'origine fécale, provenant plutôt d'eaux enrichies en matière organique, tels les effluents industriels du secteur, des pâtes et papiers ou de la transformation alimentaire.

L'eau traitée doit être conforme au décret exécutif Algérien de rejet pour l'irrigation :

Tableau I.1 : Décret exécutif de rejets pour l'irrigation.

Paramètre	Unité	Concentration maximale admissible
Température	°C	< 30°
pH	-	6.5 à 8.5
MES	mg/l	30
CE	ds/m	3
DBO ₅	mg/l	30
DCO	mg/l	90
SAR = 0-3 CE		0.2
3-6		0.3
6-12	ds/m	0.5
12-20		1.3
20-40		3

Azote (NO ₃ -N)	mg/l	30
Phosphate (P-PO ₄)	mg/l	02
Métaux lourds =		
Fer		20
Cuivre		5
Zinc	mg/l	10
manganèse		10
chrome		1
nickel		2
cadmium		0.05
plomb		10
Coliforme Fécaux	Nombre de CF/100ml	<1000 CF/100ml
Nématodes intestinaux	Œufs /l	Absence

Décret exécutif n^o 07-149 du 3 Joumada El Oula 1428 correspondant au 20/05/2007.

I-5 Les différents types d'irrigation :

Les quatre principales méthodes utilisées aujourd'hui en irrigation sont comme suit :
L'irrigation de surface (par submersion, ruissellement ou à la raie), l'irrigation par contrôle de nappe, l'irrigation par aspersion ainsi que l'irrigation au goutte-à-goutte.

- L'irrigation par submersion est utilisée pour des cultures semi-dense comme les rizières, là ou le terrain doit être plat, entouré de barrages et l'eau abondante.



Figure I.1 : Système d'irrigation du riz.

- L'irrigation par ruissellement se pratique dans les terrains en pente.

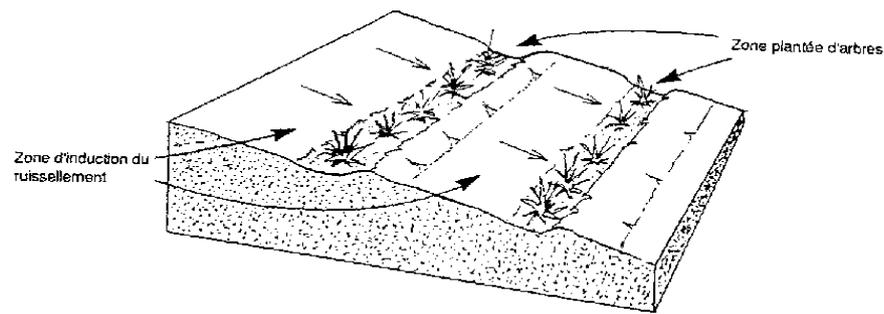


Figure I.2 : Système de ruissellement.

- L'irrigation à la raie est réservé aux cultures plantées en rangs, comme les légumes.



Figure I.3 : Système d'irrigation à la raie.

- L'irrigation par contrôle de nappe consiste à maintenir la nappe phréatique à un niveau suffisant pour permettre l'absorption de l'eau par les cultures par remontée capillaire.

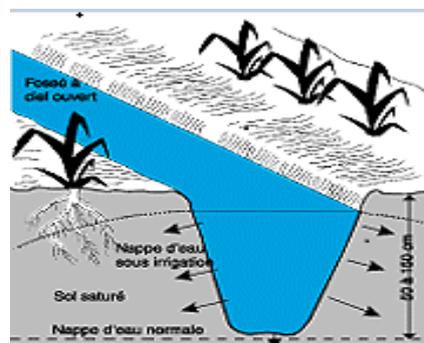


Figure I.4 : Système de contrôle de nappe.

- Dans l'irrigation à aspersion les asperseurs disposés le long d'un tuyau envoient chacun des gouttes d'eau dans une surface circulaire jusqu'à ce que l'humidité atteigne le niveau des racines, mais dans le cas d'une irrigation avec des eaux usées traitées, cette méthode est à bannir car le risque de contamination des parties aériennes est élevé.



Figure I.5 : Système d'aspersion.

- Dans l'irrigation au goutte-à-goutte, l'eau est distribuée en quantités faibles mais fréquentes au niveau des racines de chaque plante au moyen de minces tubes en plastique. [3]



Figure I.6 : Système de goutte à goutte.

NB : L'irrigation par les eaux épurées des cultures autorisées doit cesser au moins deux semaines avant la récolte.

I-6 Station d'épuration :

Une station d'épuration permet de traiter les eaux usées qu'elles soient d'origines industrielles ou qu'elles proviennent des activités quotidiennes de l'homme. Le but est de collecter les eaux usées, puis de les épurer par traitement, avant de pouvoir les rejeter dans le milieu naturel sans risquer de polluer notre environnement.

Une station d'épuration est une installation de plusieurs dispositifs et de procédés bien spécifique ; chaque procédé a pour rôle d'éliminer ou de diminuer le taux d'un polluant présent dans l'eau usée. Equipée d'un LABORATOIR D'ANALYSE qui a pour but de calculer le rendement de la STEP et d'étudier l'anomalie (si nécessaire) ; d'une façon générale il surveille le fonctionnement de la station.

Une STEP est généralement placée à l'extrémité d'un réseau de collecte à l'amont d'un milieu naturel bleu, tel un lac.

I-6-1 Les procédés de traitements des STEP :

Les STEP traitent les eaux usées afin de les purifier et aussi les boues d'épuration en les déshydratants de toute humidité.

1- Les procédés d'épuration des eaux usées : [10]

Filières de traitement	Les étapes	Particularités
Le prétraitement	1- Dégrillage 2- Tamisage 3- Dessablage 4-Déshuilage (dégraissage)	L'eau traverse une première grille qui permet d'éliminer les plus gros déchets : c'est le dégrillage, puis passe au travers de tamis, c'est le tamisage. Les sables et graviers se déposent au fond de bassins conçus à cet effet et sont évacués : c'est le dessablage. Les graisses remontent grâce à une injection d'air et sont collectées à la surface : c'est le déshuilage.
Le traitement physico-chimique	La Décantation	Permet d'éliminer environ 70 % des matières en suspension. Celles-ci se déposent au fond du bassin ce sont les boues primaires. Elles sont ensuite récupérées par raclage du fond du bassin, puis envoyées à l'épaisseurs. Les performances de la décantation peuvent être améliorées par l'ajout de réactifs chimiques, permettant après coagulation et floculation, de capter jusqu'à 90 % des matières en suspension.
Le traitement biologique	1- lagunage 2- Boue activée 3- Lit bactérien	Ce traitement secondaire reproduit les phénomènes d'autoépuration existant dans la nature. Des bactéries présentes dans les eaux usées sont utilisées pour dégrader les matières polluantes dissoutes. Cette dégradation par voie biologique se fait dans les bassins d'aération.
La clarification		Cette étape permet de séparer, par décantation, l'eau dépolluée et les boues ou résidus secondaires issus de la dégradation des matières organiques. Cette décantation est opérée dans des bassins spéciaux, les "clarificateurs".L'eau, dans la plupart des cas, peut alors être rendue au milieu naturel.

La désinfection		<p>Les traitements primaires et secondaires ne détruisent pas complètement les germes présents dans les rejets domestiques, des procédés d'élimination supplémentaires sont donc employés lorsque les eaux traitées sont rejetées en zone de baignade, de pisciculture ou d'élevage de coquillage. Un réactif désinfectant peut être ajouté aux traitements avant leurs rejets dans le milieu naturel. Le chlore est le désinfectant le plus courant.</p>
-----------------	--	---

2- Les procédés de traitement des boues d'épuration : [11]

Filières de traitement	Particularités
Epaississement	<p>L'épaississement des boues a pour objectif de concentrer de la façon la plus économique les boues et de permettre d'alimenter à régime et à concentration pratiquement constante les installations de déshydratation. Il s'agit donc d'une étape intermédiaire pour la diminution du volume de boues produites par la station en permettant d'améliorer la concentration des boues en excès en termes de matières sèches.</p>
Digesteurs	<p>Le digesteur est l'élément principal d'une installation de biogaz. C'est dans le digesteur que les processus biochimiques et microbiens de fermentation ont lieu lors desquels le biogaz est constitué.</p>
Déshydratation	<p>La déshydratation des boues en excès est assurée par une presse à bande filtrante. Les boues à traiter après avoir été mélangées à une solution de polymères sont déversées sur un tapis roulant perméable qui assure la pression de ces boues au fur et à mesure de leur passage sur le tapis, ainsi obtenant à la fin une boue beaucoup plus sèche.</p>

I-7 Présentation de la station d'épuration de Boumerdes**I-7-1 Description et situation géographique :**

La ville de Boumerdes est située à une cinquantaine de kilomètres à l'Est d'Alger ; elle est située au bord de la mer méditerranéenne. La wilaya de Boumerdes compte environ 786 602 habitants. La mise en place du système de management environnemental concerne le système d'assainissement de l'unité de Boumerdes à savoir : la STEP de Boumerdes est située à la limite, Sud de la commune de Boumerdes dans un bas fond sur la rive gauche de l'oued TATAREG sur le chemin reliant Boumerdes à Corso. Elle s'étend sur une superficie de 34966.15 m², sa capacité est de 75 000 Eq/hab, conçue pour protéger le milieu récepteur, en l'occurrence la mer méditerranéenne. [12]



Figure I.7 : position géographique de la Step de Boumerdes.

I-7-2 Définition de la pollution à traiter :

L'eau à traiter a les caractéristiques suivantes :

- Volume journalier 15 000 m³/j.
- DCO journalière 5062.5 kg/j.
- Débit moyen 24h 625 m³/h.
- DBO₅ journalière 4050 kg/j.
- Débit de pointe temps sec ... 1063 m³/h.
- MES journalières 5250 kg/j.
- Débit de pointe temps de pluie ... 1944 m³/h.
- Coefficient de rejet 80%.

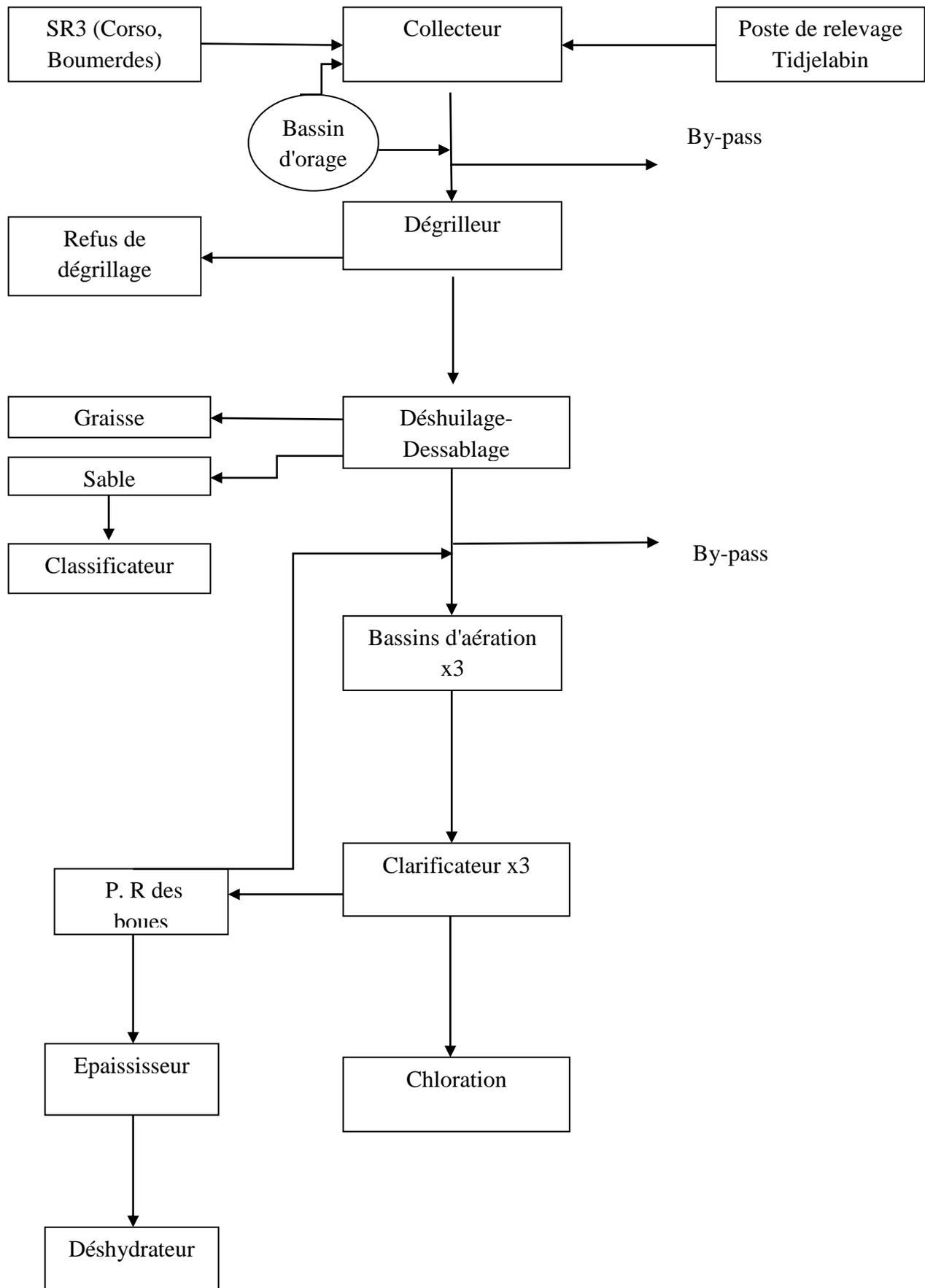


Figure I.8 : Synoptique de la station de Boumerdes.

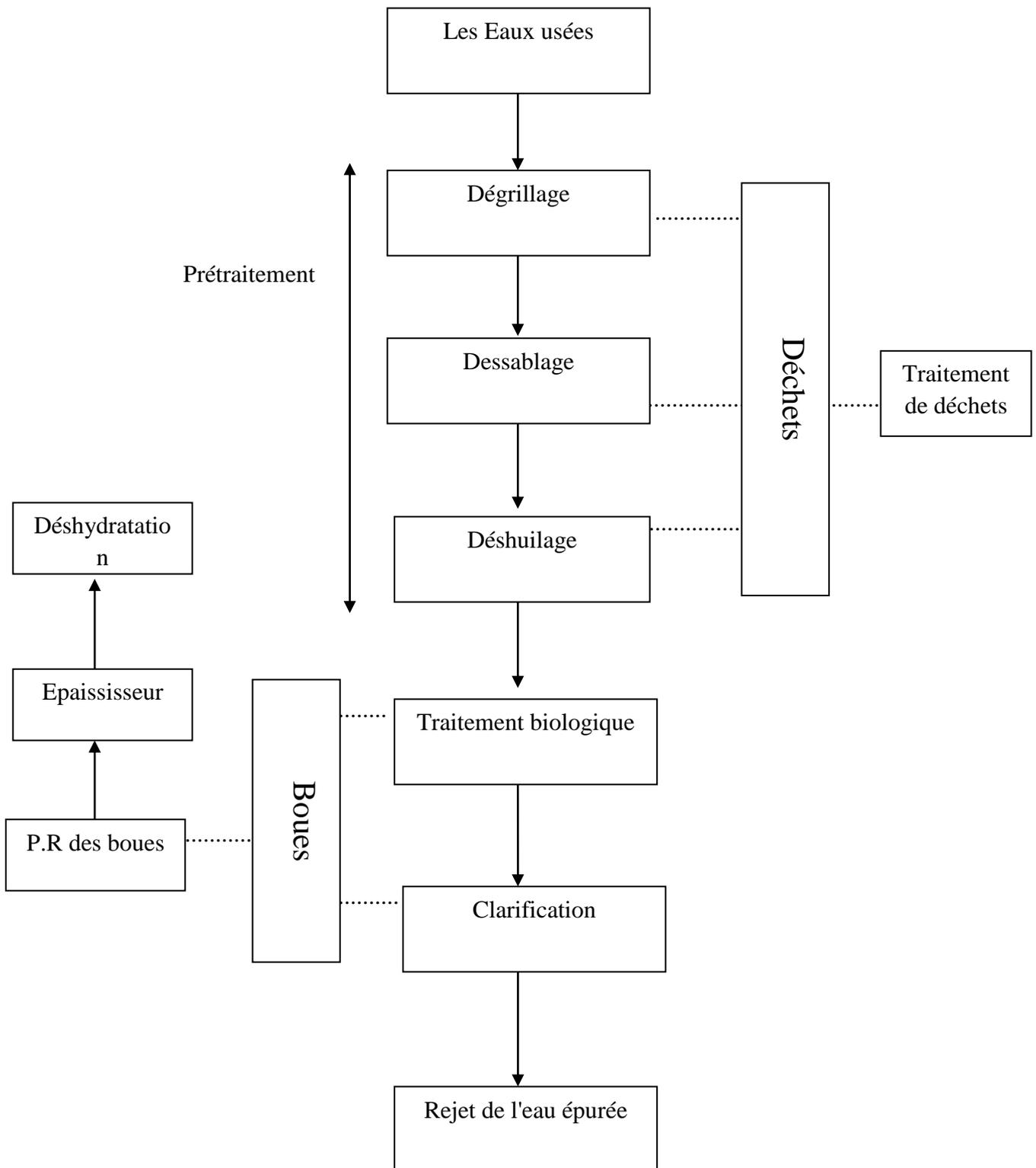


Figure I.9 : L'épuration des eaux.

I-8 Description de la procédure de traitement de la station de Boumerdés

Le traitement des eaux se fait selon la procédure suivant : [13]

- Arrivée des eaux, bassins d'orage.
- Dégrillage.
- Dessablage-dégraissage.
- Traitement biologique.
- Clarification, décantation.
- Désinfection de l'eau traitée.

1- Arrivée des eaux et bassins d'orage :

Une partie des effluents sont envoyés par pompage directement dans le canal d'alimentation du prétraitement d'une part et par gravité dans la bêche de relèvement, ceci par deux conduites de 600 mm de diamètre, ce poste de relèvement permet l'alimentation du prétraitement en aval. Un déversoir alimente un bassin d'orage de tout débit supérieur au débit accepté par l'installation suivant le nombre de bassins d'aération en service. Deux pompes submersibles permettent de relever ces eaux vers le prétraitement, sur la base de la vidange du bassin plein, laissant ainsi rapidement le volume disponible pour réguler le débit entrant, sans toutefois surcharger le traitement ultérieur.



Figure I.10 : Bassin d'orage.

2- Prétraitement :

a- Dégrillage : L'ensemble du dégrillage comporte un dégrilleur automatique fin du type à champ courbe, avec espacement entre barreaux de 20 mm, le dégrillage grossier ayant déjà été assuré dans les stations de pompage en amont.

Les refus sont évacués par convoyeur à vis vers une benne ou tout autre dispositif de stockage.



Figure I.11 : Le dégrilleur automatique.

b- Dessablage-dégraissage : les ouvrages circulaires de dessablage-dégraisseur ont pour but

- L'élimination par décantation de la plus grande partie de sable de dimensions supérieures à 150-200 mm
- L'élimination d'une grande partie de matières flottantes (graisse.....) en partie supérieure des ouvrages.

La rétention des particules sableuses contenues dans l'eau résiduaire urbaine est indispensable, car elle permet :

- D'éviter l'abrasion des engins mécaniques.
- D'éviter les surcharges dans les étapes suivantes du traitement, notamment en cas de pluie, ou la quantité journalière de sable arrivant sur la station peut être multipliée de 3 à 7 fois.
- D'éviter l'accumulation de sables dans les étapes ultérieures du traitement.
- La quantité de sable piégé soit de l'ordre de 15 à 40 mg/l (étude France).

L'élimination des graisses permet :

- D'améliorer la quantité visuelle de la surface des ouvrages ultérieurs.
- De limiter la quantité de flottants et graisses susceptibles de se coller, de s'agglutiner ou de flotter dans les ouvrages situés en aval et qui peuvent créer des problèmes de colmatage et de fermentation.
- La quantité de graisses piégées soit de l'ordre de 5 à 15 mg/l (étude France).



Figure I.12 : Dégraisseur-dessableur.

3- Ouvrage de répartition :

Un ouvrage de répartition permet d'aiguiller l'eau à traiter vers les différentes files de traitement par l'intermédiaire de batardeaux.



Figure I.13 : Ouvrage de répartition.

4- Traitement biologique :

a- Bassins d'aération : les eaux prétraitées sont dirigées vers 3 bassins d'aération munis de turbines type " acti-retor" (machine destinée à épurer l'eau en y faisant pénétrer de l'air à travers sa couche superficielle) permettant l'aération prolongée et la culture bactérienne à l'origine du traitement. Les bassins reçoivent d'autre part la "liqueur mixte" constituée par la recirculation des boues provenant des clarificateurs finaux.

- Nombre de bassins 3
- Volume unitaire 3600 m³
- Profondeur 4,5 m
- Nombre d'aérateurs 9



Figure I.14 : Bassin d'aération.

5- Clarification finale :

L'eau sortante des ouvrages d'aération est dirigée vers 3 clarificateurs de diamètre 24 m la base de dimensionnement étant de 0.8 m/h par pointe de temps sec, la surface requise est de 1330 m², les boues décantées au fond de chaque ouvrage sont dirigées à l'aide d'un racleur vers un puits central de collecte. Elles sont reprises par une tuyauterie les acheminant vers la bêche de recirculation avoisinante aux bassins d'aération. Une partie des boues est recirculée en tête d'aération sous le nom de liqueur mixte et une partie est extraite pour être envoyée vers l'épaississeur.

Les eaux décantées sont recueillies par surverse dans une rigole périphérique pour être dirigées vers la désinfection et le canal de comptage.



Figure I.15 : Clarificateur.

6- Bassin de chloration (Bassin chicane) :

L'eau clarifiée transite vers un ouvrage en béton comportant un certain nombre de chicanes (passage en zigzag). Un premier canal permet de mesurer le débit d'eau traité. Une

série de canaux en chicane permet d'assurer un contact prolongé entre l'eau à désinfecter et l'eau chlorée.

Caractéristique générale :

- Largeur des canaux 1 m
- Volume total 385 m³
- Temps de séjour au débit de pointe temps sec 20min

La dose de chlore prévue est de 9.5 g/m³ et est assurée par un ensemble de chloration à partir de chlore gazeux.



Figure I.16 : Bassin de chloration.

7- Traitement des boues:

Le traitement des boues issues de la décantation clarification comporte deux étapes :

- Un épaissement statique.
- Une déshydratation mécanique. [13]

a- Epaissement des boues : avant transfert en déshydratation, il est nécessaire d'épaissir au maximum les boues dans le but essentiellement de traiter des plus faibles volumes et donc d'avoir des ouvrages et équipements plus compacts. L'épaississeur n'est pas le "dépotoir" final du traitement de l'eau mais l'ouvrage intermédiaire indispensable entre la chaîne de traitement d'eau et la chaîne de traitement des boues. Son but est de :

- Soulager le traitement de l'eau en captant au maximum les boues produites par cette chaîne de traitement en lui restituant une surverse peu chargée dite "claire" afin d'éviter tous les stockages préjudiciables de boues dans les ouvrages de traitement d'eau.

- Fournir à la chaîne de traitement des boues un "produit" rassemblant le maximum de quantité tant en concentration qu'en fraîcheur afin d'assurer les conditions optimales de déshydratation.

L'épaississeur doit être considéré comme un ouvrage à part entière remplissant les mêmes fonctions qu'un décanteur (qu'il soit primaire ou secondaire), c'est-à-dire qu'il réalise une séparation solide liquide.

Caractéristiques dimensionnelles :

- Diamètre intérieur 13 m

Caractéristique fonctionnelles :

- Charge massique 30 kg/m²/j
- Concentration de sortie moyenne 20 g/l minimum
- Volume journalier à transférer en déshydratation 792 m³

Les boues épaissies sont reprises au fond de l'ouvrage pour être refoulées vers la déshydratation à l'aide d'une pompe à vitesse variable afin d'ajuster le débit de boues à déshydrater.



Figure I.17 : Epaississeur.

b- Déshydratation mécanique : les boues épaissies sont d'abord flocculées avant d'être envoyées sur une bande presseuse, l'ajout de polymère en faible quantité est nécessaire afin d'améliorer la filtrabilité des boues.

Caractéristiques générales de la presseuse :

- Longueur de bande 2 m
- Capacité unitaire 150 kg MS/m/h
- Temps de fonctionnement journalier avec 1 seule machine 13.6 h

- Consommation de polymère moyenne 20 kg/j
- Siccité des boues déshydratées 15 ± 1 %
- Masse journalière de boues produites 4 t/j boues sèches

Le poste automatique et de dosage de polymère liquide à partir de polymère en poudre et d'eau potable.



Figure I.18 : L'appareil de déshydratation.

I-9 Avantages et inconvénient de la réutilisation des eaux usées épurées :

les eaux usées traitées sont utilisables en tout temps, et donc, toujours disponibles pour irriguer les cultures, même en cas de sécheresses. De plus, ce type de réutilisation donne des rendements plus élevés que l'irrigation conventionnelle avec de l'eau douce, même en utilisant des engrais artificiels. Ainsi, la hausse des rendements des cultures destinées à la consommation humaine entraîne une plus grande disponibilité des biens alimentaires (OMS, 2012). De plus, la réutilisation d'une partie des eaux usées permet d'augmenter la quantité d'eau disponible pour les usages non domestiques. De ce fait, elle permet de préserver les ressources en eau de qualité supérieure pour les usages plus restrictifs. Elle permet donc une disponibilité accrue de l'eau potable pour les populations, contribuant à leur santé et à leur bien-être.

Cette pratique permet de diminuer la quantité de rejets directs d'eaux usées dans les milieux récepteurs, elle s'accompagne généralement aussi d'une meilleure maîtrise de l'assainissement, et donc, de rejets moins polluant. Cette baisse quantitative et qualitative des rejets se traduit alors par un décroissement de la dégradation de l'environnement.

Finalement, la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation permet de bénéficier de leur apport en nutriments organique et inorganique pour répondre aux besoins des cultures. Les effluents des stations d'épuration contiennent une grande quantité de nutriments utilisables par les plantes, réduisant ainsi l'utilisation d'engrais chimiques et leur production.

Malgré que dans la plupart des cas les eaux usées sont produites près des agglomérations, et donc près à la demande, elles ne sont pas toujours disponibles à proximité immédiate des

zones ou l'utilisation est possible. De plus, la demande varie en fonction des saisons estivale, les besoins sont généralement plus grands en été à cause de la demande élevée pour les usages agricoles, urbains et réactifs.

Les eaux usées sont soumises à diverses sources de contaminants, limitant ainsi leur potentiel de réutilisation. Elles peuvent contenir un grand éventail de constituants biologiques, organiques et inorganiques, dont certains peuvent être nocifs pour la santé et la sécurité des êtres humains en fonction de leur concentration et de la durée d'exposition. Cependant, le niveau de préoccupation va surtout varier en fonction de l'usage qui est fait des eaux usées traitées, et donc des risques de contact entre ceux-ci et la population.

Certains contaminants chimiques peuvent avoir un effet sur la qualité des eaux de surface, des eaux souterraines. Si les eaux ne sont pas assez traitées, l'excès de nutriment, notamment le phosphore et l'azote, peuvent causer l'eutrophisation des plans d'eau (diminution d'oxygène disponible pour les espèces fauniques et floristiques). [14]

Conclusion :

Compte-tenu des éléments présents dans les eaux usées, la réutilisation d'une mauvaise qualité d'eau peut présenter des risques pour la santé et l'environnement. Pour cela, la station d'épuration de Boumerdes traite les eaux usées avec une performance remarquable, le prochain chapitre va nous permettre de calculer son rendement.

II-1 INTRODUCTION

Au cours de ce chapitre, on va procéder au prélèvement et à l'échantillonnage afin d'analyser l'eau usée brute et épurée de la STEP de Boumerdes. L'analyse effectuée touche les paramètres physicochimiques et bactériologiques dans le but de trouver si l'eau épurée et conforme aux normes de rejet pour l'irrigation, d'autre part de calculer le rendement de la station d'épuration.

II-2 Echantillonnage :

Compte tenu de la diversité de la nature des eaux résiduaires ainsi que des systèmes de transfert et de dilution, il n'existe pas de technique de prélèvement satisfaisante en toutes circonstances. Il est essentiel d'obtenir des prélèvements représentatifs du rejet et du milieu récepteur. En fonction du but à atteindre, le prélèvement sera manuel instantané ou automatique en continu. Lorsqu'il s'agit de contrôler des paramètres à l'état de traces ou susceptibles de très grandes variations, la contribution d'un échantillon moyen peut être obtenue à partir des prélèvements instantanés effectués avec des intervalles de temps réguliers. Si les analyses portent sur les composés organiques volatils, le mélange de plusieurs prélèvements n'est pas recommandé, il sera préférable d'effectuer l'analyse sur chaque prélèvement instantané. On peut faire aussi des analyses sur des prélèvements instantanés pour les différents paramètres. Pour assurer une bonne conservation des échantillons, il est recommandé (voire impératif) de maintenir les prélèvements à 4°C pendant toute la durée des prélèvements. Les prélèvements réalisés deux fois par semaine permettent notamment de réaliser le bilan de fonctionnement des stations d'épuration, de calculer son rendement et sa charge polluante.

Les prélèvements seront effectués dans des flacons propres en polyéthylène ou en verre, les échantillons soigneusement étiquetés et conservés à 4°C seront transportés jusqu'au laboratoire dans un laps de temps ne dépassant pas 24 heures. Toute fois un certain nombre de mesures seront à pratiquer sur place : température, pH, conductivité. En ce qui concerne les matières en suspension, leur mesure doit intervenir dans les 6 heures après le prélèvement. [7]

II-2-1 Prélèvement de l'eau à analyser :

Au cours de notre étude, les prélèvements pour certaines analyses se font dans deux points différents de la STEP de Boumerdes, à l'entrée de la STEP (eau brute), à la sortie (eau traitée) pour les autres analyses, le prélèvement se fait à la sortie de la STEP dans des conditions réglementaires d'hygiène.

Les principaux renseignements à fournir pour une analyse d'eau :

- Identifié le prélèvement ;
- Date et point de prélèvement ;
- Motif de la demande d'analyse.

II-3 Analyses physico-chimiques :

Dans la STEP de Boumerdes, l'eau destinée à l'irrigation est contrôlée. Les paramètres physico-chimiques concernant tout ce qui est relatif à la structure naturelle de l'eau est délimitée par des concentrations maximales pour les paramètres à analysés au niveau des laboratoires environnement de la DTD (Division Technologie et Développement ex CRD).

Nous avons donc réalisé des analyses pour déterminer la qualité physico-chimique de l'eau de la STEP.

II-3-1 Mesure du pH et température par électrométrie : la différence de potentiel existant entre une électrode en verre et une électrode de référence (calomel-KCI saturé) plongeant dans une même solution est une fonction linéaire du pH de cette solution. La détermination consiste en la mesure d'une différence de potentiel, elle s'effectue à l'aide d'un dispositif potentiométrique. La température est aussi déterminer avec le même dispositif.

II-3-2 Détermination de la conductivité : la conductivité électrique mesure le pouvoir conducteur d'une eau. Le courant est produit par les ions inorganiques présents à l'état dissous. La détermination de la conductivité s'effectue par la mesure de la résistance d'une colonne d'eau délimitée par deux électrodes. Une différence de potentiel engendrée par la résistance de la solution est inversement proportionnelle à la conductivité de l'eau.

II-3-3 Détermination des matières en suspension : l'eau est filtrée avec des disques filtrants en fibre de verre de 0,45 µm et d'un dispositif de filtration sous pression, le poids des MES retenues est déterminé par différence de pesée.

- Expression des résultats : le taux de matières en suspension exprimé en mg/l est donné par la formule

$$\text{MES en mg/l} = \frac{(m_2 - m_1) \times 10^3}{\text{PE}}$$

m_1 = la masse du filtre vide en mg.

m_2 = la masse du filtre plein en mg.

PE = le volume de la prise d'essai d'eau à analyser en ml.

II-3-4 Détermination de la demande chimique en oxygène : le test de la DCO consiste en la mesure d'oxygène équivalent à la quantité de matières organiques oxydables par le dichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$, dans une solution d'acide sulfurique à 50 %. Un composé à base d'argent est ajouté comme catalyseur. Un composé mercurique est ajouté pour réduire les interférences dues à l'oxydation des ions chlorures par le dichromate.

L'oxydation s'effectue à une température de 150 °C pendant deux heures, la lecture se fait par calorimétrie. Pour la gamme de DCO de 0 à 150 mg/l, la méthode consiste en la mesure de la concentration en chrome hexa-valent restant qui est caractérisée par une coloration jaune, pour la gamme de 0 à 1500 mg/l, la coloration obtenue est verte, elle correspond à la quantité de chrome trivalent produit.

II-3-5 Méthode d'évaluation de la DBO₅ par respirométrie : en fonction de la DCO mesuré et de la valeur de la DBO suspecté (tableau ci-dessous), il est introduit une quantité connue d'eau dans un flacon de mesure qui est relié au système manométrique. L'oxygène qui est absorbé par les micro-organismes pour dégrader la matière organique, est remplacé par l'air au-dessus de l'échantillon dans le flacon. Le CO₂ produit est absorbé par la soude. La différence de pression directement affichée à l'échelle manométrique en mg/l de DBO.

Marge de DBO (mg/l)	Volume d'eau en ml
0 - 40	432
0 - 80	365
0 - 200	250
0 - 400	164
0 - 800	97
0 - 2000	43,5
0 - 4000	22,7

Tableau II.1 : Table pour la prise d'essai de la DBO₅.

II-4 Cations et anions majeurs :

Une salinité importante des eaux d'irrigation engendre des effets indésirables tant sur les propriétés physiques du sol que sur la croissance et les rendements des cultures. Pour cela on a besoin de déterminer le Calcium, le Magnésium et le Sodium dans l'eau épurée pour calculer le SAR suivant l'équation suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]})}} / \text{Les concentrations en meq/l.}$$

II-4-1 Détermination du calcium par complexométrie : il consiste en la complexation des ions Ca^{2+} par l'acide éthylénediamine tétra-acétique en présence d'un indicateur coloré (Calcon) et dans une zone de pH comprise entre 12 et 13.

- Expression des résultats : la concentration en ion calcium est exprimée par

$$Ca^{2+} = \frac{V_1 \times N \times 40,08 \times 10^3}{PE} / \text{En mg/l.}$$

V_1 = volume d'EDTA versé en ml.

N = normalité de la solution d'EDTA

$40,08.10^3$ = masse atomique du calcium en mg.

PE = prise d'essai en ml. / (Pour convertir en meq on divise sur 20).

II-4-2 Dosage de la somme Calcium-Magnésium par complexometrie : il consiste en la complexation du calcium et du magnésium à pH =10 et en présence d'un indicateur coloré le noir d'Eriochrome.

- Expression des résultats : le teneur en ion magnésium et déduite de l'expression

$$Mg^{2+} = \frac{(V_2 - V_1) \times 24,32 \times 10^3 \times N}{PE} / \text{En mg/l.}$$

V_2 = volume en ml nécessaire au titrage de la somme Ca+Mg.

V_1 = Volume en ml nécessaire au titrage du Calcium.

N = normalité de la solution d'EDTA.

PE = prise d'essai de l'eau à analyser.

$24,32 .10^3$ = masse atomique du magnésium en ml. / (Pour convertir en meq on divise sur 12,16).

II-4-3 Détermination du sodium : il consiste en la lecture de la concentration des Na^+ à l'aide d'un appareil Dr LANGE JENWAY et l'eau distillée pour étalonner l'appareil. On divise sur 23 pour obtenir la concentration en meq.

II-5 Paramètres indicateurs de pollutions :

II-5-1 Dosage du nitrate par colorimétrie : le cadmium métallique contenu dans les gélules de réactifs réduit les nitrates présents dans l'échantillon en nitrites. Les nitrites réagissent en milieu acide avec l'acide sulfurique pour former un sel diazonium. Ce sel réagit avec l'acide

gentisique pour former un complexe coloré ambre. L'intensité de la coloration est proportionnelle à la concentration en nitrates.

II-5-2 Détermination du phosphore : le phosphore dans les eaux naturelles et usées se trouve uniquement sous forme de phosphates. La seule forme de phosphate susceptible d'être déterminée directement est l'ortho-phosphate. L'ortho-phosphate réagit avec le molybdate en milieu acide pour produire un complexe phospho-molybdate. L'acide ascorbique réduit le complexe, donnant une coloration intense de bleu molybdène.

II-6 Détermination des métaux lourds :

Par absorption atomique : l'absorption atomique est un phénomène physique qui correspond à l'absorption de la lumière par des atomes libres d'un élément à une longueur d'onde spécifique pour cet élément. On fournit à l'atome la radiation qu'il est capable d'absorber, cette radiation est émise par une source externe avec une intensité déterminée. En traversant la flamme, elle est partiellement absorbée par l'élément et son intensité diminue d'autant plus que la concentration de cet élément est plus grande.

II-7 Analyses bactériologiques et parasitologiques :

1- Analyses bactériologiques : technique de dénombrement en milieu liquide : Les prises d'essais de l'échantillon d'eau ou de ses dilutions sont incorporées dans un milieu liquide conçu pour permettre la croissance d'un micro-organisme ou de groupe de microorganismes. La croissance se traduit par l'apparition d'un trouble du milieu et, éventuellement, une modification visible (virage d'un indicateur de pH coloré).

- On ensemence des dilutions successives de l'eau à analyser (par exemple 1, 0.1, 0.01) à raison de 3 à 5 tubes de milieu de culture liquide par dilution (jusqu'à 96 puits en cas de manipulation en micro plaque).
- On notera le nombre de tubes inoculés présentant une culture visible indiquant la présence d'au moins d'un micro-organisme.
- Il doit être tenu compte que si l'absence de culture correspond à l'absence de micro-organisme, plus d'un micro-organisme peut être responsable d'une culture positive.
- Les tables, en fonction du nombre caractéristique (nombre de puits positifs pour chaque dilution) indiquent la valeur statistiquement la plus probable et son intervalle de confiance).

Les analyses bactériologiques ont été réalisées au sein du laboratoire d'analyse microbiologique des eaux et aliment et de l'environnement de l'Institut Pasteur d'Alger (I.P.A) qui se trouve à Dely - Brahim.

2- Analyses parasitologiques : Méthode de Bailenger recommandée par l'OMS. Centrifugation d'un mélange de tampon acéto-acétique et d'éther avec une solution de sulfate de zinc à 33 % de densité 1,18. Les analyses parasitologiques ont été réalisées au sein du laboratoire d'analyse parasitologique de l'hôpital Mustafa bacha qui se trouve à champ-de-manceuvre. (Voir annexes 1 pour tous les modes opératoires).

II-8 Interprétation des analyses et calcul du rendement de la STEP :

Au cours de mon stage au sein du DTD Sonatrach, il a été mis à notre disposition les moyennes nécessaires pour effectuer 6 analyses sur 3 mois (de Février à Avril 2016) pour des prélèvements issus de l'ONA (Boumerdes).

II-8-1 Résultats des analyses physico-chimiques:

Mois	Février				Mars				Avril			
Date de prélèvements	07/02/2016		09/02/2016		27/03/2016		29/03/2016		03/04/2016		04/04/2016	
Prélèvement/Paramètres	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
Température (°C)	16,6	16,5	16,8	15	15	14,3	17	16,7	17,5	17,1	17	16
Ph	7,47	7,2	7,44	7,13	7,38	7,24	7,4	7,36	7,83	7,31	7,06	7,04
Conductivité (ds/m)	0,01 297	0,01 204	0,01 012	0,00 89	0,01 381	0,01 366	0,01 312	0,01 306	0,01 171	0,01 162	0,01 215	0,01 212
MES(mg/l)	250	10	180	10	137	4	941	1	240	11	90	4
DCO (mg/l)	501	25	532	19	405	15	185	23,3	494	9	210	18
DBO (mg/l)	260	12	210	6	163	7,9	110	7	170	4	160	9

Tableau II.2 : Tableau des résultats physico-chimiques.

1- Interprétation de l'évolution de la température :

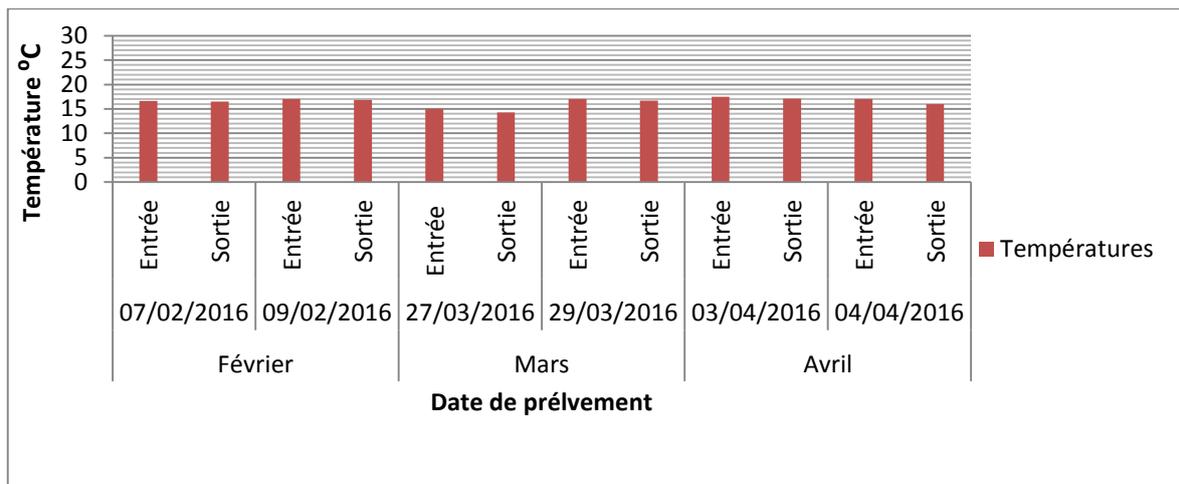


Figure II.1 : Evolution de la température entre l'entrée et la sortie des eaux.

La température agit comme un facteur physiologique sur le métabolisme et la croissance des organismes vivant dans l'eau, de ce fait, elle est liée à la vitesse de dégradation de la matière organique. On remarque une faible variation entre l'entrée de la STEP avec 15-17,5°C et la sortie avec 14-16,3°C durant les trois mois d'analyses. Une température élevée réduit la solubilité des gaz dissous, en particulier l'oxygène. Selon le décret Algérien de l'irrigation, la température ne doit pas dépassée 30 °C. Les eaux épurées de Boumerdes sont conformes au décret avec une moyenne de 16,7°C.

2- Interprétation de l'évolution du pH :

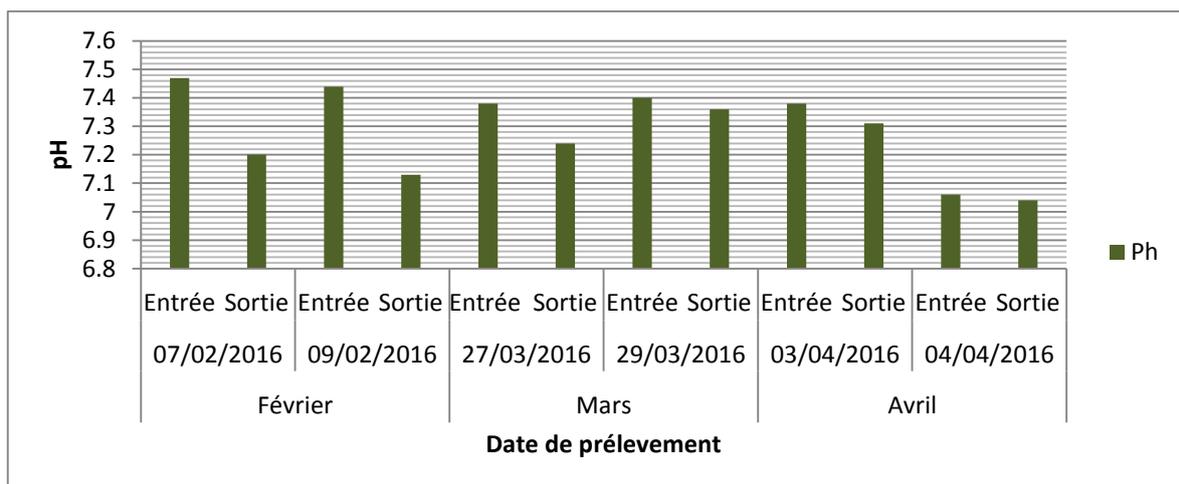


Figure II.2 : Evolution du pH de l'entrée et de la sortie des eaux.

Le pH relevé au cours de la période d'étude (Février à Avril 2016) varie entre 7,4 et 7,5 pour l'entrée et entre 7,2 et 7,4 pour la sortie de la STEP. D'une façon générale, le pH des

eaux épurées étudiée est peu variant et relativement stable au voisinage de la neutralité. Il se situe dans l'intervalle de la norme Algérienne de l'irrigation qui est de 6,5-8,5.

3- Interprétation de l'évolution de la conductivité :

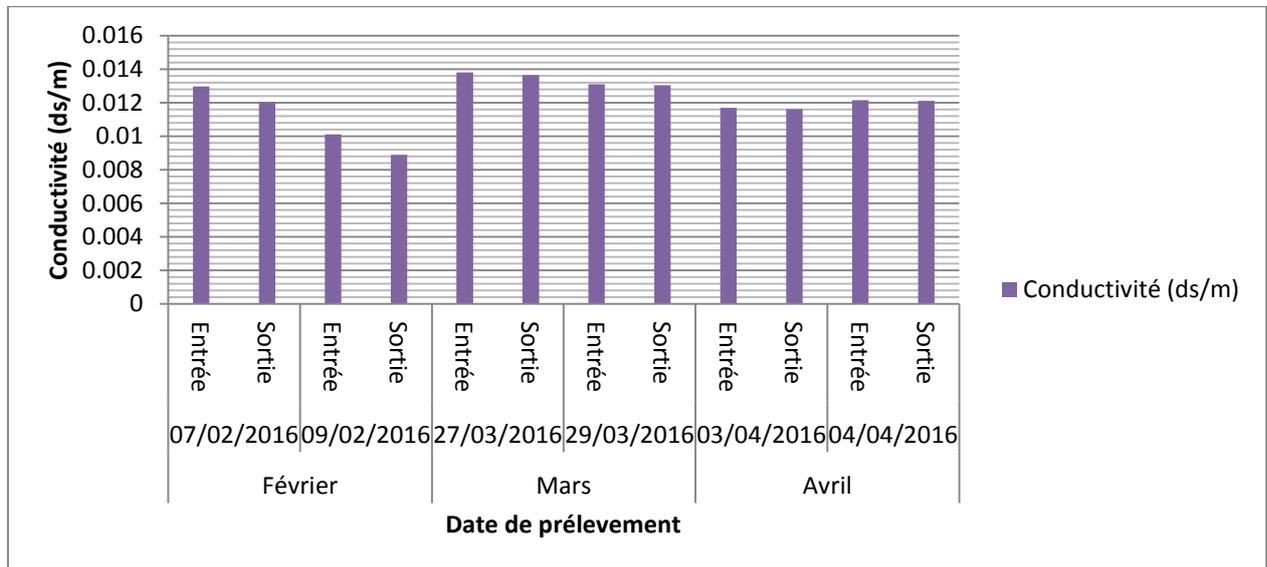


Figure II.3 : Evaluation de la conductivité des eaux entre l'entrée et la sortie des eaux.

Les résultats obtenus après analyse donnent une légère variation entre l'entrée et la sortie de la STEP. Ces valeurs sont au-dessous de la limite fixée par la réglementation Algérienne 3 ds/m. La légère diminution des valeurs de la conductivité électrique entre l'entrée et la sortie mène à conclure que l'élimination des matières minérales en solution est très faible ou inexistant dans le traitement biologique par boues activées.

4- Interprétation de l'évolution des MES :

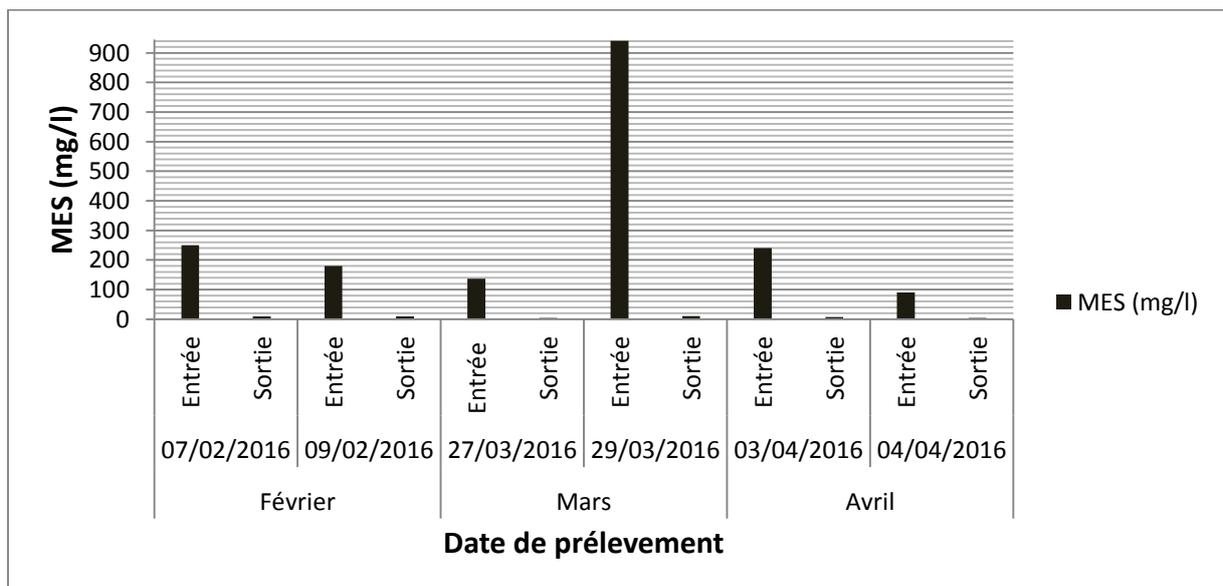


Figure II.4 : Evolution des MES des eaux entre l'entrée et la sortie de la STEP.

Les valeurs des MES sont comprises entre 90-941 mg/l pour les eaux usées et entre 4-11 mg/l pour les eaux épurées. Les valeurs des eaux épurées sont inférieures au seuil maximal de la réglementation Algérienne d'irrigation pour les eaux épures qui est de 30 mg/l.

La figure ci-dessus montre une baisse significative de la teneur en MES qui va dans le sens de l'élimination montrant une bonne efficacité du traitement par boues activées en passant des eaux brutes vers les eaux épurées avec un abattement moyen de 97,49 %.

5- Interprétation de l'évolution de la DCO :

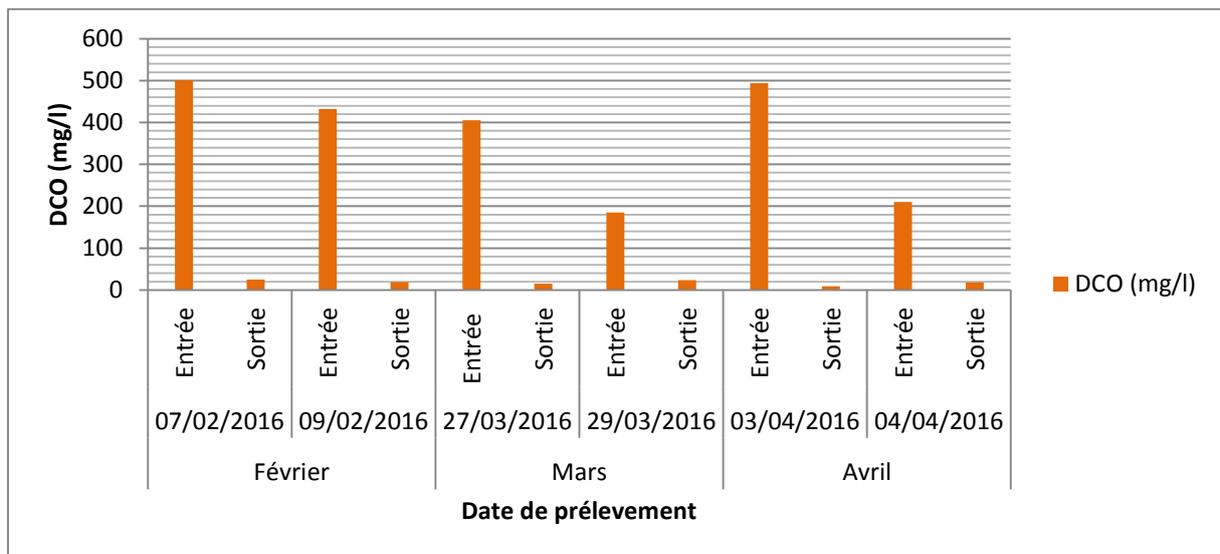


Figure II.5 : Evaluation de la DCO entres l'entrée et la sortie des eaux.

Les résultats obtenus après analyses donnant une variation remarquable entre l'entrée avec 18-105 mg/l et la sortie avec 9-25mg/l expliquant le bon traitement biologique au niveau des bassins d'aérations. La concentration moyenne de la DCO à la sortie et inférieure à la valeur admissible par la norme Algérienne d'irrigation qui est de 90mg/l.

Le rendement de dégradation de la DCO avoisine 95,07%. Ce qui traduit une bonne épuration des eaux usées par boues activées de la STEP de Boumerdes.

6- Interprétation l'évolution de la DBO₅ :

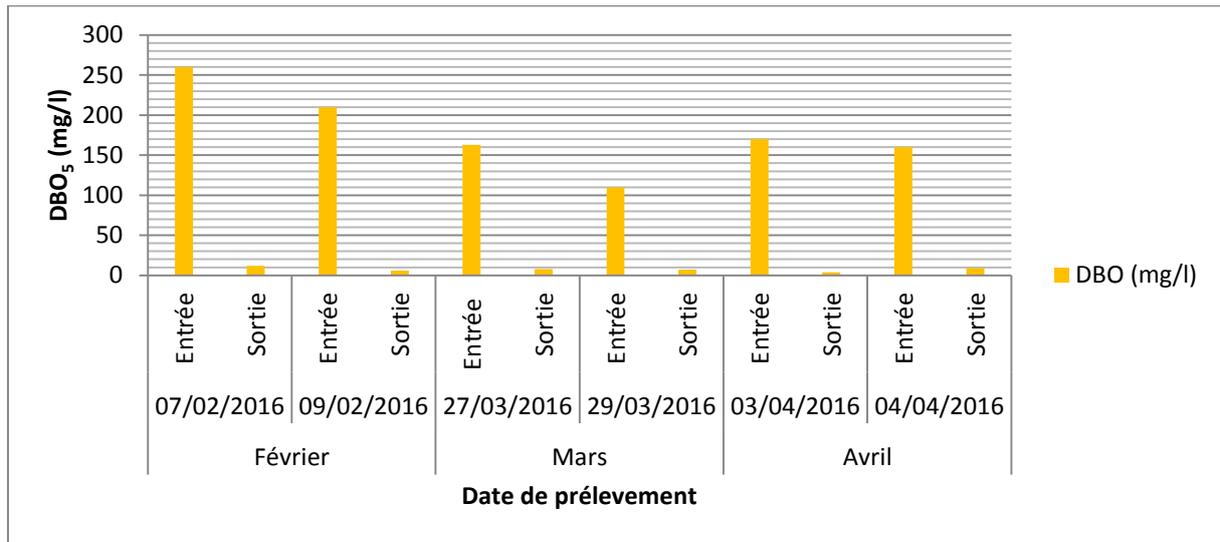


Figure II.6 : Evolution de la DBO₅ entre l'entrée et la sortie des eaux.

Le procédé de traitement biologique par les boues activées doit générer selon les normes en vigueur une eau traitée dont la valeur de la DBO₅ est inférieure à 30 mg/l.

Les valeurs obtenues de la DBO₅ à l'entrée de la STEP sont élevées 210-260mg/l. Après traitement les concentrations à la sortie de la STEP sont comprises entre 4-12mg/l. On remarque une diminution marquante de la DBO₅ due au bon traitement biologique au niveau du bassin d'aération, donc les eaux épurées sont conformes à la norme Algérienne d'irrigation.

II-8-2 Résultats des analyses chimiques (indicateurs de pollution) :

Paramètres	Date de prélèvement					
	Février		Mars		Avril	
	07/02/2016	09/02/2016	27/03/2016	29/03/2016	03/04/2016	04/04/2016
Nitrate (mg/l)	15	19	11,46	18,42	13,61	17,17
Ortho-phosphate (mg/l)	1,5	1	1,4	1,47	1,99	1,68

Tableau II.3 : Tableau des résultats chimiques.

Les teneurs obtenues après analyses des eaux épurées des Nitrates (N-NO₃) varient entre 11,5-19mg/l. Ceci peut être expliqué par une réaction de nitrification, au niveau des bassins d'aérations, due à une bonne oxygénation de l'azote organique présent dans l'effluent entrant dans la STEP. En effet, les valeurs acquises des Nitrates (N-NO₃) sont conformes à la norme d'irrigation par les eaux épurées qui est de 30 mg/l.

Sachant que les principales sources du phosphore sont les activités humaines. A noter que les résultats d'analyses des Phosphates (P-PO₄) varient entre 1-1,9mg/l. Ces valeurs sont inférieures à la réglementation Algérienne d'irrigation qui est de 2 mg/l.

II-8-3 Résultats des analyses des métaux lourds :

Paramètres	Date de prélèvement					
	Février		Mars		Avril	
	07/02/2016	09/02/2016	27/03/2016	29/03/2016	03/04/2016	04/04/2016
Cadmium (mg/l)	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02
Nickel (mg/l)	0,0458	0,0411	0,0454	0,0044	0,0455	0,0458
Zinc (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Plomb (mg/l)	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,3
Fer (mg/l)	0,02	0,0547	0,018	0,0619	0,01	0,05
Cuivre (mg/l)	0,058	0,01	0,0035	0,01	0,004	0,04
chrome (mg/l)	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Manganèse (mg/l)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tableau II.4 : Tableau des résultats des métaux lourds.

Nous pouvons séparer les métaux lourds en quatre catégories, selon qu'ils soient ou non indispensables au développement des végétaux et selon qu'ils posent ou non des problèmes sanitaire. Les valeurs obtenues après analyses des eaux épurées sont sous forme de trace par rapport aux normes exigées. (Voir annexe 2 pour les quatre catégories).

II-8-4 Résultats des analyses du SAR :

Les résultats d'analyses du SAR sont illustrés dans le tableau suivant :

Paramètres	Date de prélèvement					
	Février		Mars		Avril	
	07/02/2016	09/02/2016	27/03/2016	29/03/2016	03/04/2016	04/04/2016
Ca ⁺⁺	4,8	5,01	5,77	4,8	4,16	4,56
Mg ⁺⁺	3	2,46	2,16	2,48	2,64	2
Na ⁺	4	3,88	4,66	4,71	4,74	4,61
SAR	2,02	2,01	2,34	2,46	2,57	2,54

Tableau II.5 : Tableau des résultats des analyses du SAR.

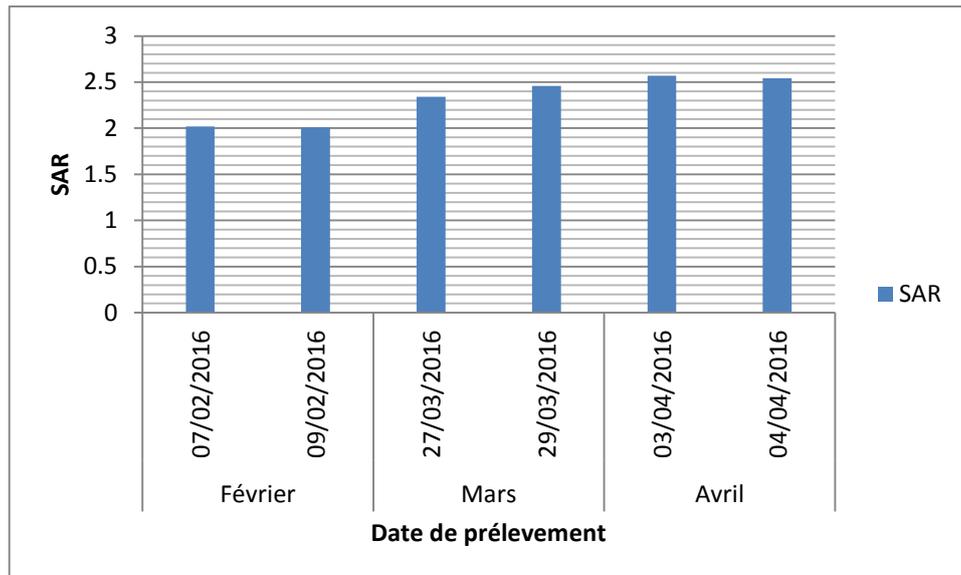


Figure II.7: Evolution du SAR des eaux épurées durant 3 mois.

L'influence du Sodium dépend des concentrations en Calcium et en Magnésium. Aussi, plutôt que de parler de concentration en sodium, nous parlons plutôt dans cette partie d'une valeur qui tient compte des effets mutuels du Sodium, du Calcium et du Magnésium. Il s'agit du ratio d'adsorption du sodium par le sol, le SAR. On utilise le SAR pour classier les risques liés au Sodium dans les sources d'eau d'irrigation. L'eau caractérisée par un SAR supérieur à 10 aura tendance à produire une accumulation de Sodium dans le sol. Ce dernier agit au niveau de la défloculation du sol argileux, ce qui entraîne une diminution de la macroporosité du sol, ce qui résulte une mauvaise pénétration de l'air et d'infiltration de l'eau dans le sol (perméabilité). Le sol devient alors dur et compact, affectant ainsi sa structure.[15]

D'après les résultats obtenus, l'eau épurée de la STEP de Boumerdes peut être utilisée pour tous types de sol sans risque d'accumulation du sodium à un niveau dommageable.

II-8-5 Résultats des analyses bactériologiques et parasitologiques :

1- Interprétation des résultats parasitologique :

Afin de déterminer les germes parasitologiques, on a fait des analyses au niveau du laboratoire d'analyse parasitologique de l'hôpital Mustafa bacha qui se trouve à champ-de-manœuvre.

Date	Paramètres	Résultats
04/04/2016	Recherche des nématodes	Négatif

Tableau II.6 : Tableau des résultats d'analyses parasitologiques.

D'après les analyses parasitologiques, on remarque que résultats des eaux usées épurées montre l'absence des nématodes. On conclut que d'après ces résultats, les eaux épurées sont bonne pour la valorisation agricole.

2- Interprétation des résultats microbiologiques :

Afin de pouvoir interpréter nos résultats, nous avons établi un tableau récapitulatif (Tableau II.7) qui regroupe les germes, indiquant le nombre de chaque germe à partir de 4 prélèvements (le nombre d'échantillon autoriser au niveau du laboratoire d'analyse microbiologique des eaux et aliment et de l'environnement de l'Institut Pasteur d'Alger (I.P.A) qui se trouve à Dely - Brahim.

Paramètres / Date de prélèvement	Mars		Avril	
	27/03/2016	29/03/2016	03/04/2016	04/04/2016
Coliformes totaux (37°C/100 ml)	900	700	800	900
Coliformes fécaux (44°C/100ml)	500	400	600	500

Tableau II.7 : tableau des résultats d'analyses microbiologiques.

D'après les analyses microbiologique des eaux épurées, on remarque une variation entres les coliformes totaux et une légère variation pour les coliformes fécaux, ces résultats sont conformes aux normes de la réglementation Algérienne des eaux épurées pour l'irrigation.

II-8-6 Calcul du rendement de la station d'épuration :

Le rendement démontre l'efficacité d'une STEP, il est calculé selon l'équation suivante :

$$R \% = \frac{\text{en amont} - \text{en aval}}{\text{en amont}} \times 100$$

En amont = MES_(In) + MO_(In) ; $MO = \frac{DCO+2 \times DBO}{3}$ [7].

En aval = MES_(Out) + MO_(Out) ; $MO = \frac{DCO+2 \times DBO}{3}$ [7].

Date de prélèvement	Février		Mars		Avril	
	07/02/2016	09/02/2016	27/03/2016	29/03/2016	03/04/2016	04/04/2016
Rendement %	95,53	95,61	96,25	98,75	96,78	93,99
R moyen %	95,57		97,5		95,38	

Tableau II.8 : Tableau des rendements.

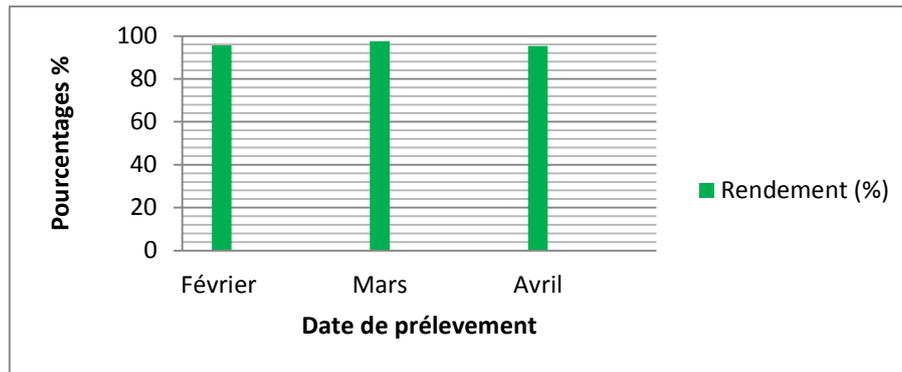


Figure II.8 : Evolution du rendement de la STEP durant les trois mois.

Nous avons obtenu un rendement moyen de 96 % durant les trois mois, d'où nous concluons que la station d'épuration étudiée a un bon pouvoir épuratoire donnant une bonne satisfaction.

II-9 Cas de réutilisation des eaux épurées pour l'irrigation :

A ce jour, plus de 40 millions de m³ d'eau usées municipales sont réutilisés chaque jour dans le monde. En effet, nombreux sont les pays qui ont décidé de combler une part grandissante de leurs besoins à l'aide de la réutilisation. On parlera de la France, la Tunisie et Boumerdes.

II-9-1 France : bien qu'elle ne fasse pas partie des pays arides ou semi-arides, la France n'est pas à l'abri des pénuries locales ou saisonnières d'eau. C'est pourquoi cette dernière a décidé de se tourner vers la réutilisation. Ainsi, par année, 7 millions de m³ d'eaux usées traitées sont utilisés pour l'irrigation d'espace verts, de golfs, de zone agricoles ou pour le nettoyage urbain.

II-9-2 Tunisie : un pays souffrant d'un déficit hydrique, est confrontée à une demande croissante en eau par le domaine agricole. Cela a mené à l'exploitation des eaux usées, C'est le cas de Cap Bon. Depuis 2008, les eaux usées sont traitées à l'aide d'un système de boues activées, pour ensuite être utilisées pour recharger l'aquifère via des bassins d'infiltration. Ces eaux sont utilisées dans le domaine agricole ainsi qu'industriel.

II-9-3 Boumerdes : la réutilisation des eaux épurées de la station de Boumerdes :

- Volume total produit = 4105 861 m³/an
- Volume réutilisé = 327 319.2 m³/an soit 7.97 % du volume total.

Le volume réutilisé est réparti entre 2 agriculteurs :

1- El Flici : volume exploité = 163 659.6 m³, surface irriguée = 27.5 Hec, elle est répartie sur 03 types de cultures : Les oranges avec 9 Hec. Les vignes avec 16 Hec. Luzerne avec 2.5 Hec.

2- Rahmoun : volume exploité = 163 659.6 m³, Surface irriguée = 32 Hec elle est répartie sur 2 types de cultures : Les oranges avec 9 Hec . Les vignes avec 23 Hec.

Conclusion :

La réutilisation des eaux usées épurées, dans l'irrigation agricole, dépend de trois paramètres essentiels : la salinité (le SAR), la présence des métaux lourds et la quantité microbiologique de l'effluent traité. A cet effet et compte tenu des résultats d'analyses (Salinité, métaux lourds, physico-chimique...) et du bon rendement épuratoire, on constate que, l'eau traitée de la station d'épuration de Boumerdes peut facilement être valorisée dans l'irrigation en conformité à la réglementation Algérienne.

III-1 INTRODUCTION

La production de boues est de plus en plus difficile à gérer, cela pousse les gouvernements à rechercher des solutions technologiques permettant de la réduire au même titre que la gestion des autres types de déchets.

Dans un futur proche, cette problématique risque de s'accroître, étant donné les projets de construction de nouvelles stations d'épuration qui vont permettre d'augmenter la capacité «épuration» de l'Algérie et par conséquent accroître la production de boues. Du fait que les contraintes locales et réglementaires, la mise en place de filières durables pour la valorisation et l'élimination des boues est difficile et coûteuse pour les collectivités. D'un point de vue réglementaire, deux destinations finales sont actuellement envisageables : la valorisation agronomique (épandage, compostage) et l'incinération. Il sera donc indispensable d'élaborer une véritable filière de boue en même temps que l'élaboration et la conception de la future station d'épuration.

Une des technologies efficace et moins coûteuse permettant le traitement de la fraction organique de ces déchets est la digestion anaérobie (bio-méthanisation), qui consiste en une dégradation biologique, en absence d'oxygène, de la matière organique en un mélange de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) appelé biogaz. Grâce à la digestion anaérobie, les déchets deviennent une source de richesses. Cette technologie devient essentielle dans le processus de réduction des volumes de déchets et la production de biogaz, qui est une source d'énergie renouvelable pouvant être utilisée dans la production d'électricité et de la chaleur. [18]

Durant le processus de digestion anaérobie, seule une partie de la matière organique est complètement dégradée, le reste est un excellent agent de fertilisation des terres agricoles.

III-2 Généralité sur les boues :**III-2-1 Production des boues des stations d'épurations :**

On appelle boues d'épuration les sédiments résiduaux issus du traitement des eaux usées. Les boues d'épuration urbaines résultent de différent traitement des eaux usées domestiques qui proviennent de l'activité humaines et éventuellement des rejets industriels dans les réseaux des collectivités après avoir subis un prétraitement obligatoire.

Les eaux usées sont collectées puis acheminées vers les stations d'épuration ou elle sont traitées. En fin de traitement, à la sortie de la station, l'eau épurée est rejetée vers le milieu naturel et il reste les boues résiduaux qui sont composées d'eau et de matières sèches contenant des substances minérales et organiques. [19]

III-2-2 Caractérisation des boues :

Ces boues sont caractérisées par un certain nombre de critères définissant leur composition physique et chimique :

- Leur siccité, c'est-à-dire leur taux de matière sèche. La concentration en matière sèche est exprimée en grammes de matière par litre de boues (ou en pourcentage pour la siccité).
- Leur teneur en matière volatile ou matière organique, par opposition aux matières minérales. La teneur en matière volatiles s'exprime en pourcentage du poids des matière sèche. Elle permet d'évaluer le degré de stabilisation des boues et leur aptitude à subir divers traitements (digestion, incinération,...).
- Leur teneur en matière minérale : différence entre matière sèche et matière volatile.
- Leur pouvoir calorifique inférieur qui permet d'évaluer leur aptitude à l'incinération. Il correspond à la quantité de chaleur pouvant être dégagée par une certaine masse de boue.
- Leur composition en matières fertilisantes (carbone organique, phosphore, azote, oligo-éléments), en éléments indésirables (traces métalliques et en composés traces organiques) et en micro-organismes.

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année et du type de traitement appliqué. Les boues sont très riches en matière organique (50 à 70 % de la matière sèche), ce qui favorise la prolifération des microorganismes qui se multiplient et décomposent la matière organique. En absence d'une aération suffisante, la décomposition libère des composés organiques nauséabonds, ainsi que le gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane,...). La décomposition des boues d'épuration libère également de grandes quantités d'azote (principalement sous forme de nitrate) et de phosphore.

Les métaux lourds représentent, en moyenne, moins de 0,15 % de la matière sèche. La réglementation évolue avec l'efficacité croissante de la gestion des déchets et les avancées techniques de leur traitement.

III-2-3 Types des boues résiduaires :

1- Boues de traitement primaire : elles sont produites par une simple décantation des matières en suspension (MES) contenues dans les eaux usées 70 % de MES peuvent ainsi être

retenues avec l'évolution de la conception des stations, ce types des boues est en train de diminuer. [17]

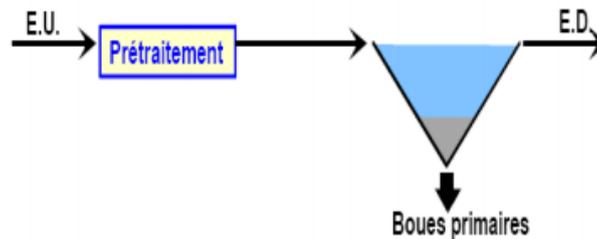


Figure III.1 : Boues primaire.

2- Boues de traitement physico-chimique : varient du type de procédé, les matières organiques particulières ou colloïdales contenues dans les eaux usées sont agglomérées par addition d'un réactif coagulant (sels de fer ou d'aluminium) 90 % de MES peuvent ainsi être captées séparées par décantation. Les boues obtenues renferment une partie importante des sels minéraux, issus des eaux brutes et de l'agent coagulant. Les boues physico-chimiques sont surtout produites dans des stations balnéaires ou touristiques, au service d'une variation de population très grandes et pour une court période.

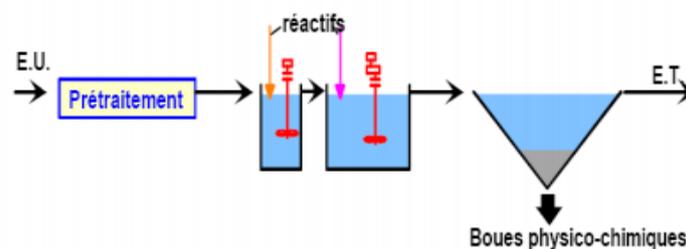


Figure III.2 : Boues physico-chimique.

3- Boues de traitement biologique : ces boues sont essentiellement formées par les bactéries "cultivées" dans les ouvrages d'épuration. Ces bactéries se sont nourries des matières organiques contenues dans les eaux usées. Pour maintenir l'activité biologique de la station à un bon niveau, une partie de la masse des bactéries ou "biomasse en excès" doit être prélevée soutirée régulièrement entretenant ainsi la dynamique des reproductions bactériennes.

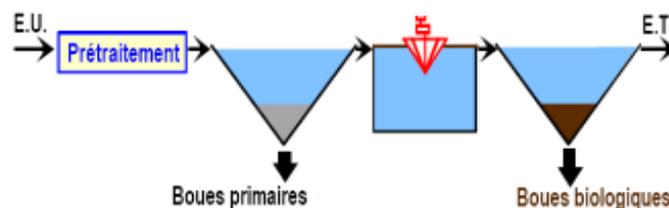


Figure III.3 : Boues biologique.

4- Procédés aérobies à boues activées : le procédé dit "à boues activées" utilise l'épuration biologique pour le traitement des eaux usées. C'est un mode d'épuration par cultures libres. Dans une filière de traitement des eaux, le procédé à boues activées fait partie des traitements secondaires.

Les boues activées, composées essentiellement de micro-organismes floculants, est mélangées avec l'oxygène dissous et de l'eau usée.

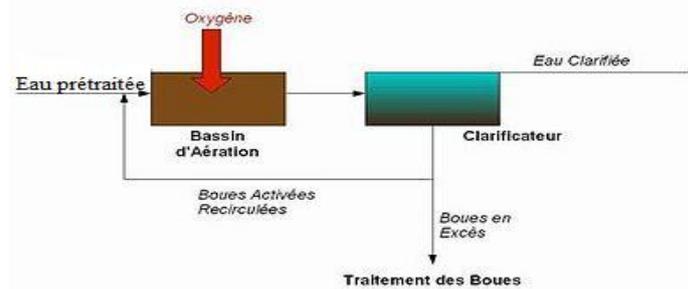


Figure III.4 : Traitement des eaux usées par boues activées.

III-3 Principe de la production aérobique à boues activées :

Quatre principales utilisations spécifiques du procédé à boues activées :

- Elimination de la pollution carbonée (matières organiques).
- Elimination de la pollution azotée.
- Elimination biologique du phosphore.
- Stabilisation des boues : procédé dit "aération prolongée" ou "digestion aérobie".

L'épuration par boues activées consiste à mettre en contact les eaux usées avec un mélange riche en bactéries par brassage pour dégrader la matière en suspension ou dissoute. Il faut assurer une aération importante pour permettre l'activité des bactéries et la dégradation de ces matières, suivie d'une décantation à partir de laquelle on renvoie les boues riches en bactéries vers le bassin d'aération.

III-4 Les différentes voies de valorisations et d'élimination des boues :

Après avoir subi les différents traitements, les boues peuvent être traitées de différentes façons.

- Valorisation agricole : l'épandage et le compostage.
- Valorisation énergétique : la méthanisation.
- Elimination des boues : incinération et mise en décharge.

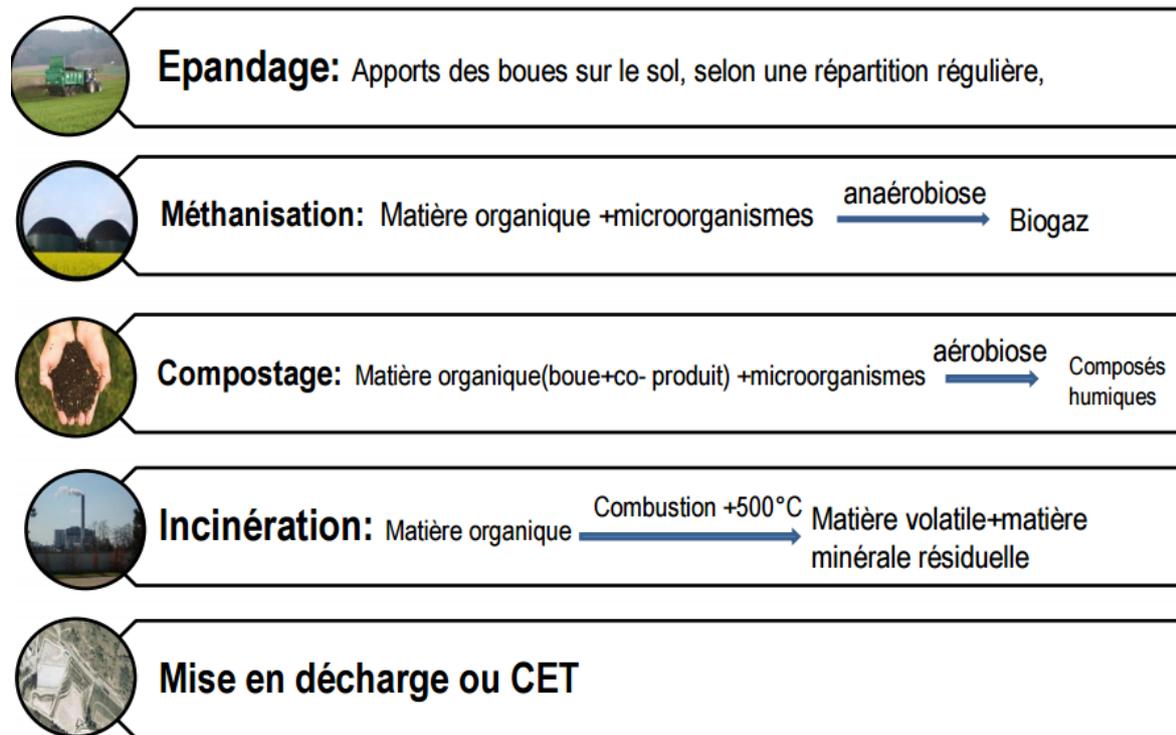


Figure III.5 : les voies d'éliminations et de valorisations des boues. [20]

Dans le contexte de la valorisation énergétique, notre travail propose une solution, ainsi pour réduire la quantité des boues d'épuration par le processus de digestion anaérobie et cela afin de présager une bonne réduction du nombre de pathogènes et une optimisation de la production du biogaz. Nous allons détailler cette valorisation par un processus dit "La Méthanisation". [20]

III-5 Définition de la méthanisation :

La méthanisation (ou fermentation anaérobie) est un procédé biologique permettant de valoriser des matières organiques qui sont dégradées partiellement en absence d'oxygène (digestion anaérobie), par l'action combinée de plusieurs types de micro-organismes qui conduit à la formation du biogaz [composé d'environ 50 % à 70 % de méthane (CH_4), de 20 % à 50 % de gaz carbonique (CO_2) et de quelques gaz traces (NH_3 , N_2 , H_2S)] qui est source d'énergie renouvelable et d'un digestat utilisé comme fertilisant.

III-5-1 Les principales phases du processus de méthanisation :

La digestion anaérobie (méthanisation) se déroule en trois étapes principales : l'hydrolyse l'acidogène, la céto-gène et la méthanogène. Chaque étape fait appel à des micro-organismes différents.

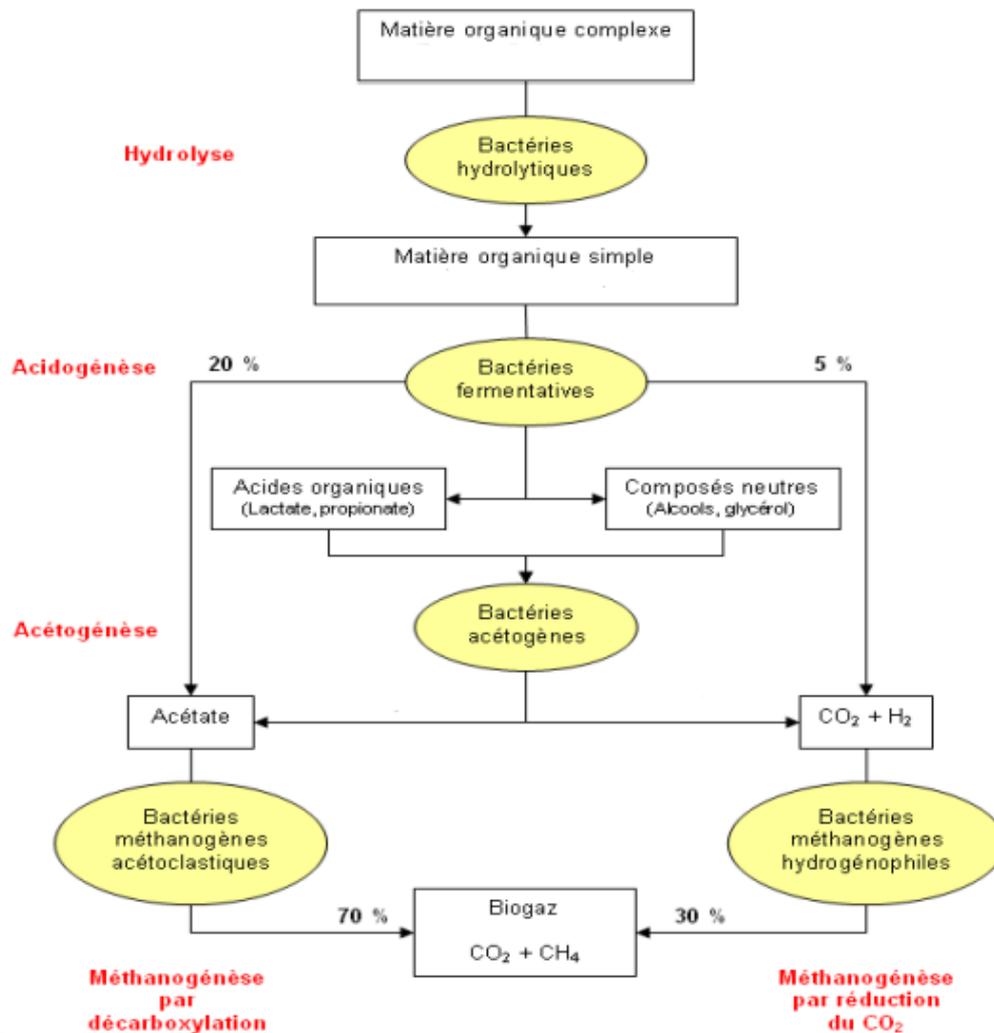


Figure III.6 : Les étapes de la méthanisation.

La digestion anaérobie est catalysée par des régimes de températures plus ou moins élevés, mésophile (32°-42°C) ou thermophile (50-57°C), favorables aux cinétiques biochimiques. Sous l'action de populations microbiennes, la matière organique subies des transformations successives jusqu'à la production finale de CH₄. La transformation de la matière organique se fait en trois phases principales.

1- Hydrolyse et acidogènes :

La première phase dite d'hydrolyse et d'acidogènes est assurée par des bactéries hydrolytiques. Ces bactéries transforment la matière organique complexe en composés plus simples, à savoir des acides gras volatils (AVG) (acide acétique,...) et des alcools (méthanol, éthanol...). On observe également la production d'hydrogène (H₂) et de dioxyde de carbone (CO₂) résultant de la réduction des lipides et des protéines.

2- Acétogénèse :

Au cours de la seconde phase, les produits de l'acidogène sont convertis en acétates (CH_3COO^-) et en hydrogène (H_2).

3- Méthanogènes :

Au cours de la troisième phase, des bactéries méthanogènes hydrogénophiles réduisent le CO_2 en méthane CH_4 en utilisant l'hydrogène et les bactéries méthanogènes acétoclastes transforment l'acétate en CH_4 .

A la fin de la digestion, on se retrouve avec du biogaz, majoritairement composé de CH_4 et CO_2 , et un substrat digéré, le digestat.

III-6 Les paramètres de la digestion anaérobie :

1- Temps de rétention hydraulique : le temps de séjours (TRH) est le principal paramètre de la digestion anaérobie. Il est généralement de l'ordre de 30 jours, mais tout dépend du volume du digesteur car on obtient le temps de séjours en divisant le volume du digesteur par le débit de boue entrant en digestion.

2- Température : Il existe trois types de digestion anaérobie : la digestion psychrophile (température autour de 6 à 15°C), la digestion mésophile (température à environ 30-35°C) et la digestion thermophile (température supérieure à 45°C). La digestion anaérobie thermophile est la plus efficace : la réaction est accélérée par la chaleur. Cependant, dans la pratique, la digestion anaérobie est plus souvent utilisée dans les conditions mésophiles : compromis entre les performances et les dépenses énergétiques dues au chauffage et plus grande stabilité du processus. Dans le domaine des conditions mésophiles l'autoconsommation est alors de l'ordre de 15 à 25 % du méthane produit (la digestion anaérobie est le seul procédé de traitement des eaux usées qui permette de tirer parti du potentiel énergétique de la matière organique tout en préservant une large part de son potentiel fertilisant).

3- Le pH : la zone optimale de pH pour la méthanisation est située aux alentours de la neutralité. Les bactéries méthanogènes sont fortement inhibées en dessous de 6, les bactéries acidogènes supportent mieux les pH inférieur à 6. Une chute de pH est donc le signe d'un dysfonctionnement. Dans la plupart des cas, le pH est autorégulé dans le digesteur avec des valeurs optimales comprises entre 6,8 et 7,4 mais un ajout de bicarbonate de soude peut être nécessaire pour le maintenir.

4- Charge organique entrante : la charge d'un digesteur s'obtient en rapportant le poids des matières volatiles introduites par rapport au volume du digesteur, elle s'exprime en Kg de MV/m³ et permet d'apprécier la quantité de matières nutritives introduites par rapport à la biomasse présente. Si le déchet est bien fermentescible, il faut éviter les surcharges brutales qui risquent de déséquilibrer le processus et d'acidifier le milieu par suite d'une trop rapide production d'acide gras volatil.

5- L'agitation : on utilise un agitateur mécanique ou on injecte du biogaz sous pression pour éviter la formation de croutes et la décantation des particules denses. Le principe physico-chimique des micro-organismes actifs sont des bactéries anaérobies.

6- Oxydation et teneur en eau : l'oxygène est extrêmement toxique pour les bactéries anaérobies (acétogènes et méthanogènes). Il est donc indispensable de protéger le milieu de toute entrée d'air. Une façon simple de procéder est de travailler en système noyé (saturé en eau). Les procédés de méthanisation sont donc spécialement adaptés pour les déchets très humides (teneur en eau supérieure à 80 %).

III-7 Les différents types du digesteur :

Le digesteur, encore appelé fermenteur ou bioréacteur-anaérobie, est généralement constitué d'une cuve fermée, étanche à l'air et de préférence isolé thermiquement de l'extérieur dans laquelle les microorganismes se côtoient pour dégrader chimiquement et biologiquement les effluents organiques et produire du biogaz. Le choix du digesteur varie en fonction du type de déchets à traiter et de l'application visée.

1- Les digesteurs à cultures libres : ce sont les réacteurs les plus anciens et les plus simples. On distingue :

- Les réacteurs mélangés dans lesquels le substrat est homogénéisé par brassage.
- Les réacteurs contacts dans lesquels la biomasse digérée est décantée et réintroduite en tête du digesteur.
- Les réacteurs piston qui permettent de faire acheminer le substrat de façon progressive dans le digesteur, de l'entrée à la sortie.

2- Les digesteurs à cultures fixées : un autre moyen d'augmenter la concentration bactérienne consiste à permettre aux microorganismes de se fixer sur des supports. On distingue :

- Les systèmes UASB (Upflow Anaerobic Sludge Banket ou lit de boues anaérobies à flux ascendant), en utilisant la capacité de floculation de la biomasse dans le réacteur et la sédimentation des granules, les flots bactériens sont équilibrés dans le réacteur par sédimentation avec le flux ascendant de l'effluent à traiter.
- Les systèmes à culture fixe, les réacteurs contiennent un support statique inerte, minéral ou synthétique sur lequel viennent se fixer les bactéries.
- Les systèmes à lit fluidisé, les bactéries sont fixées sur un support mobile, particules granulaire fines et poreuses comme le sable, maintenues en expansion et contrôlées par le flux ascendant rapide et régulier de l'effluent. [21]

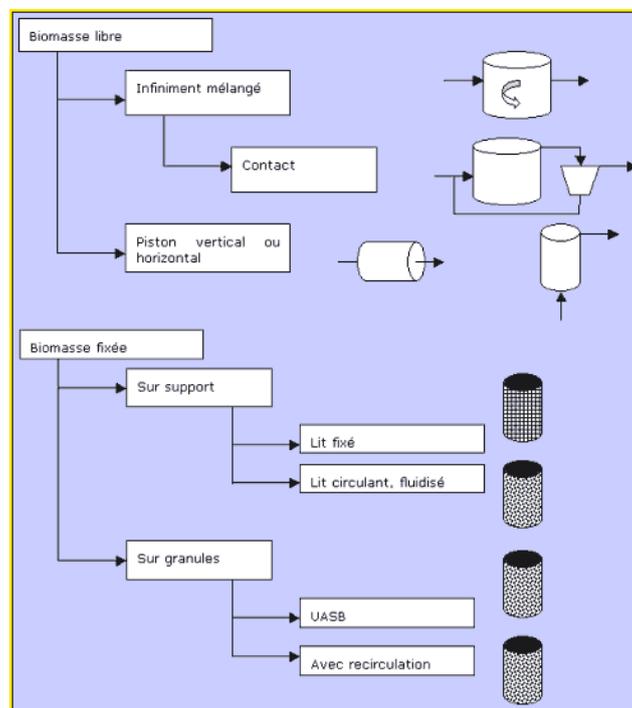


Figure III.7 : Les différents types de digesteurs. [21]

III-8 Caractéristiques du digesteur :

1- Nombre de digesteurs pour une ligne de traitement : il est possible de trouver sur une ligne de traitement de digestion anaérobie un ou plusieurs digesteurs en série. Dans tous les cas est présent un premier digesteur, chauffé, brassé, où se déroule l'essentiel des phénomènes biologiques. Certaines stations sont équipées d'un digesteur secondaire non chauffé, brassé, avec une récupération du biogaz résiduel.

2- Fonctionnement des digesteurs : les digesteurs comportent un volume dans leur partie haute où les boues à digérer sont introduites depuis l'épaississeur par pompage. L'alimentation

du digesteur peut se faire par temporisation (alimentation semi-continue) ou en continu. Le mode d'extraction dépend de la configuration du système :

- Lorsque plusieurs digesteurs sont montés en série, l'alimentation de chaque ouvrage se fait en général par surverse depuis l'ouvrage précédent. Il est recommandé de pouvoir effectuer de temps en temps un soutirage des boues par le fond du digesteur.
- L'extraction des boues du dernier ouvrage vers la déshydratation se fait par pompage.

Tous les digesteurs sont protégés contre les risques de suppression par une soupape de sécurité.

3- Forme des digesteurs : il existe plusieurs formes de digesteur. La plus répandue, est en forme continentale. En Europe, la forme continentale est caractérisée par un fond conique et un dôme conique ou bombé. En Allemagne, les formes ovoïdes se sont développées pour les digesteurs de grande taille. Au Royaume-Uni et en Scandinavie, on trouve des digesteurs cylindriques avec toit et fond plat.

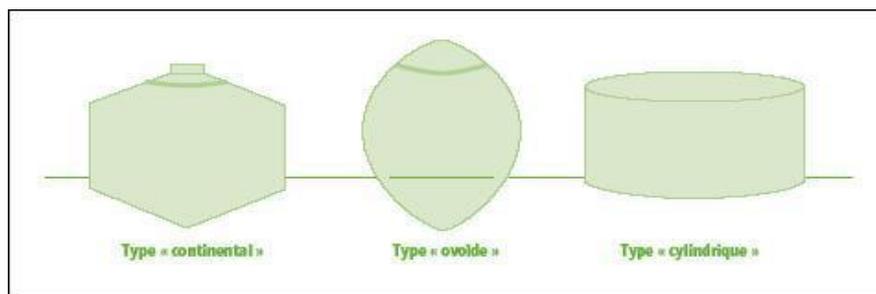


Figure III.8 : Les différentes formes du digesteur.

4- Brassage des boues : c'est un point relativement délicat à maîtriser, car les matériels utilisés sont fortement sollicités et l'état physique du déchet rend l'agitation difficile. Pour les déchets boueux, l'agitation doit permettre d'éviter la décantation des particules denses, tout en interdisant l'entrée d'air dans le digesteur. L'agitation peut être assurée par :

- Brassage mécanique, à l'aide d'un dispositif immergé tournant lentement (20 à 50 tr/min) tels que vis tubés ou hélice immergée.
- Brassage hydraulique, à l'aide de pompes adaptées.
- Brassage par injection de biogaz comprimé à la base du digesteur, le gaz est comprimé (de 1 à 2 bars selon la hauteur du digesteur) puis injecté au fond du digesteur par des cannes de distribution situées au centre. Il remonte vers la surface en entraînant la masse de boues, ce qui provoque un mouvement de convection important et le brassage de l'ensemble des boues.

5- Chauffage du digesteur : le chauffage des digesteurs se fait par un circuit externe de recirculation : les boues sont pompées depuis le fond du digesteur, elle passe dans un échangeur "eau chaude / boues", puis retournent vers la bêche d'alimentation du digesteur ou elles sont mélangées avec les boues fraîches. Les échangeurs thermiques sont en général de type tubulaire, ce qui facilite leurs entretiens. Ils sont alimentés, à contre-courant, par l'eau chaude provenant d'une chaudière biogaz, ou du circuit de refroidissement d'un moteur biogaz (cogénération).

III-9 Le biogaz :

Le biogaz est un combustible obtenu par la fermentation de matière organique dans un milieu anaérobie (sans oxygène). La dégradation des composants organiques et la production du biogaz s'effectuent selon le schéma suivant :

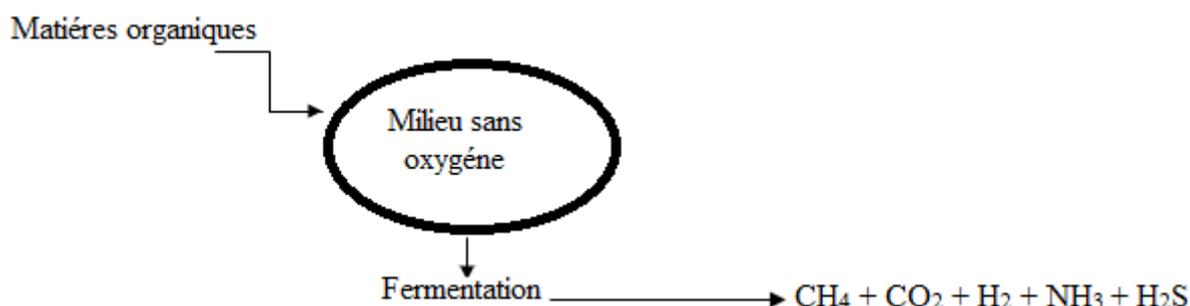


Figure III.9 : Schéma explicatif de la production de biogaz.

III-9-1 Composition du biogaz :

Les différentes sources de production conduisent à des compositions spécifiques différentes. La présence de H₂S, de CO₂ et d'eau rend le biogaz très corrosif et nécessite l'utilisation des matériaux adaptés. La composition d'un gaz en fermenteur dépend du substrat, de sa charge en matière organique, du débit d'alimentation. [21]

Composition	Pourcentage
CH ₄	60%
O ₂	0%
CO ₂	33%
H ₂ O	6%
H ₂ S	200 à 5000 ppm
N ₂	1%

Tableau III.1 : La composition chimique du biogaz.

a- Le méthane CH₄ : c'est l'un des principaux composant du biogaz, la température de mise à feu du méthane à pression atmosphérique en présence d'une flamme ou étincelle est de 550 °C, son auto inflammation n'est donc pas spontanée. C'est un gaz inodore et incolore, plus léger que l'air.

b- L'oxygène O₂ : la présence d'oxygène est essentiellement liée au mode opératoire de la production du gaz de biomasse. La présence d'oxygène révèle un défaut d'étanchéité dans le procédé d'extraction du gaz produit, le biogaz de digesteur ne contient en principe pas d'oxygène étant donné ses condition de formation et de transport vers l'utilisateur.

c- Le dioxyde de carbone CO₂ : c'est un gaz inodore et incolore, plus lourd que l'air. Il n'est ni inflammable ni toxique, ça présence est essentiel au gaz (biogaz), il ne participe pas au processus de combustion mais fait accroître l'indice de méthane.

d- L'eau H₂O : à la sortie, le biogaz est saturé de vapeur d'eau et cette quantité augmente avec la température du gaz. Les problèmes prévisibles sont :

- La vapeur d'eau réagit avec le H₂S pour former les acide sulfureux (nuisibles pour les vannes et métaux).
- La formation des poches d'eau dans les conduites de gaz, l'augmentation des pertes de charge au niveau du filtre.

e- Hydrogène sulfuré H₂S : c'est un gaz avec une odeur caractéristique dite "d'œuf pourri" (détectable à partir de 0,7 ppm, à partir de 150 ppm il inhibe l'odorat), plus lourd que l'air. Il est inflammable et très toxique. Il provoque nausées, vomissements. A haute concentration (>700 ppm) il affecte le système nerveux central et provoque la mort.

III-9-2 Caractéristiques physiques : Selon sa composition, le biogaz présente des caractéristiques qu'il est intéressant de comparer au gaz naturel et au propane. Le biogaz est un gaz sensiblement plus léger que l'air, il produit deux fois moins de calories par combustion à volume égal que le gaz naturel.

(Indice de Wobbe = utilisé pour caractériser les gaz et en particulier apprécier leur interchangeabilité, $W = PCS / \sqrt{\text{densité}}$).

Types de gaz	Biogaz	Gaz naturel
Composition	60% CH ₄ 33% CO ₂ 1% N ₂ 0% O ₂ 6% H ₂ O	97% CH ₄ 2,2% C ₂ 0,3% C ₃ 0,1% C ₄ ⁺ 0,4% N ₂
PCS KWH/m ³	6,6	11,3
PCI KWH/m ³	6	10,3
Densité	0,93	0,57
Masse volumique (kg/m ³)	1,21	0,73
Indice de Wobbe	6,9	14,9

Tableau III.2 : Caractéristique physique du biogaz comparé au gaz naturel.

III-9-3 Valeur énergétique du biogaz :

PCI : le pouvoir calorifique inférieur d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de combustible. On parle de PCI lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état vapeur.

Teneur en méthane	PCS	PCI
50%	5,5	5
60%	6,6	6
70%	7,7	7

Tableau III.3 : Pouvoir calorifique du biogaz selon sa teneur en méthane.

III-10 **Stockage du biogaz :**

Le biogaz est stocké avant d'être utilisé. Il existe deux différents modes de stockage :

- Sous une couverture membranaire au-dessus de la matière en digestion. Cette couverture va se tendre en fonction de la production de biogaz.
- Dans un gazomètre séparé des digesteurs, un système d'aspiration permet d'extraire le biogaz du digesteur.

Si les systèmes de valorisation du biogaz ne fonctionnent pas (panne, réparation..), le biogaz est brûlé en torchère, son énergie et donc perdue. La torchère est un élément de sécurité obligatoire, en cas de dysfonctionnement des moteurs de valorisation.

III-11 Production et utilisation du biogaz :

Une fois le biogaz produit, autant le valoriser le plus efficacement possible. Différentes voies sont envisageables : chaleur seule, électricité seule, cogénération, carburant automobile, injection dans le réseau de gaz naturel. Quatre modes de valorisation énergétique sont aujourd'hui exploités :

1- La production de chaleur :

Brûler du biogaz sous chaudière ou en four est la voie de valorisation la plus ancienne, la mieux maîtrisée et la plus courante. La teneur en CH₄ du biogaz peut descendre jusqu'à 20% et les contraintes d'épuration sont légères. Une désulfuration (visant à éliminer le soufre peut cependant s'avérer nécessaire si la teneur en H₂S conduit à des rejets soufrés excessifs dans les fumées. Elle s'effectue généralement par passage sur charbon actif ou traitement à l'hydroxyde ferrique). On utilise des brûleurs spéciaux adaptés à la combustion du biogaz, alimentés avec une surpression supérieure ou égale à 300 Mbar. Ces brûleurs, qu'on trouve couramment sur le marché, ont des injecteurs de plus grand diamètre que les brûleurs à gaz habituels et leur fonctionnement est moins souple. Mais le problème le plus délicat est celui que posent les risques éventuels de corrosion dus à la présence conjointe de vapeur d'eau, d'hydrogène sulfuré.

2- Le biogaz carburant :

Pour cette application, les spécifications de pureté du gaz sont beaucoup plus sévères que pour les précédentes, puisque le biogaz utilisable comme carburant doit contenir un minimum de 96% de méthane. Il faut en outre que le point de rosée soit inférieur à -20°C, ce qui correspond à une teneur en eau inférieure à 15 mg/m³. D'autres exigences sont à respecter, teneur en H₂S inférieure à 100 mg/m³, en huile inférieure à 70- 200 ppm, en hydrocarbures liquides inférieure à 1 %, avec une taille de poussières limitée à 40 microns.

3- L'injection dans le réseau :

La composition finale du biogaz injectable ainsi que sa pression dépendent évidemment des spécifications imposées par le gestionnaire du réseau. Ces dernières portent principalement sur les teneurs en méthane, en gaz carbonique, en hydrogène sulfuré et en oxygène. Le gaz injecté doit en outre être odorisé avant l'injection.

4- La production d'électricité :

La production d'électricité seule ou en cogénération peut s'effectuer avec une chaudière au biogaz, suivie d'une turbine à vapeur. Cette voie très classique pose peu de problèmes techniques et les contraintes d'épuration du biogaz sont celles que réclament les chaudières. L'autre voie, consiste à installer des moteurs à gaz, soit à étincelles, soit dual-fuel.

Ces derniers sont plus lents, plus souples, plus durables, mais ils sont aussi environ deux fois plus chers. Les moteurs exigent un biogaz contenant au moins 40% de méthane.

5- Production de froid :

L'utilisation de biogaz peut également alimenter une unité de tri-génération pour produire simultanément trois types d'énergie : la chaleur, l'électricité et le froid. C'est un mode de valorisation du biogaz qui est encore peu utilisé mais qui a de l'avenir. Le froid est produit à partir de la chaleur, selon l'une des deux techniques suivantes : la compression ou l'absorption.

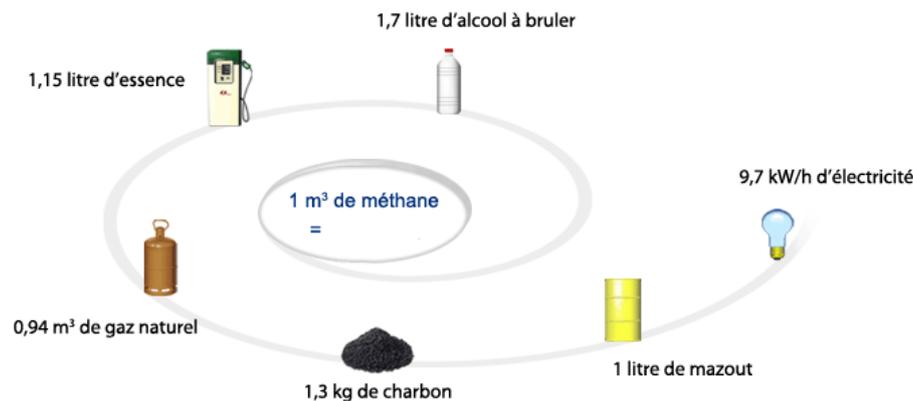


Figure III.10 : Equivalence énergétique du biogaz.

III-12 Rendements de valorisation énergétique :

La quantité d'énergie finale, c'est-à-dire intégralement valorisable sous forme de chaleur ou d'électricité, dépend du rendement de la chaîne des appareils (chaudière, moteur, régulation, échangeurs).

- Les rendements pour la production de chaleur seule à partir d'une chaudière sont évalués à 80-90 %.
- Les rendements pour la production d'électricité seule à partir d'un moteur à gaz sont évalués à 30-36 %.
- Rendements de cogénération sur un moteur à gaz :

Rendement électrique : 30 à 36 %.

Rendement thermique : 45 à 55 %.

La cogénération permet ainsi d'obtenir des rendements de transformation énergétiques très intéressants : jusqu'à 85 % de l'énergie initiale valorisable. C'est un moyen de valoriser de façon quasi optimale l'énergie potentiellement disponible.

L'électricité produite est donc consommée par la station, et une partie de la chaleur récupérée permet le chauffage du digesteur. Il est donc indispensable de trouver une utilisation à la chaleur non utilisée : usage sur site (séchage thermique des boues digérées, incinération), ou externe (vente de chaleur à un utilisateur potentiel).

III-13 Avantages et inconvénients du biogaz :

Le biogaz est un biocarburant présentant de nombreux avantages :

- réduction des émissions de gaz à effet de serre ;
- réduction de certains microbes dans les effluents agricoles (coliformes notamment) ;
- substitut à d'autres énergies exogènes (fossiles et nucléaire), source de revenus pour l'exploitant qui économise sur ses dépenses énergétiques et/ou, de plus en plus vend son énergie ;
- diminution de la charge en carbone des déchets végétaux. Une fois digérés, les déchets sont moins nocifs pour l'environnement, le risque d'une pollution biologique ou organique est en outre largement amoindri, et la fermentation diminue le pourcentage de matière sèche, permettant de diminuer le volume à transporter et épandre ;
- le fumier est traité gratuitement par des agriculteurs qui le récupèrent en fin de cycle, après avoir produit du méthane, de meilleure qualité car il ne brûle plus les plantes, il est purifié par rapport à certaines maladies et la totalité des semences de mauvaises herbes qu'il pouvait contenir sont détruites ;
- Il peut aussi être injecté sur le réseau de gaz naturel moyennant épuration. C'est la solution qui offre le meilleur rendement énergétique, si le réseau est assez proche du point de production. Cette solution est maintenant soutenue par les opérateurs de réseaux, qui envisagent même 100 % de gaz vert en 2050.

Avec tous ses avantages le biogaz présente certains inconvénients :

- en raison de la présence d'H₂S, le biogaz est un gaz explosif, corrosif et toxique. Un minimum de précaution doit être pris pour éviter la dégradation rapide des matériaux et risques pour les personnes ;
- le biogaz prend beaucoup de place, il faut 1000 m³ pour stocker l'équivalent de 700 litres de fioul soit 0,7 m³;
- le gaz produit doit être consommé au fur et à mesure de sa production, il est très difficile à stocker, à cause du volume qu'il occupe ;

- le biogaz est malodorant, en lien avec l' H_2S qui le compose (le soufre est connu pour son odeur d'œuf pourri), l'odeur n'est bien sur gênante qu'en cas de fuite dans l'installation.

Conclusion :

Il existe donc une grande variété de techniques permettant une valorisation énergétique des boues de station d'épuration. Certaines sont très largement utilisées, alors que d'autres restent ponctuelles et en arrêt. Néanmoins, toutes ces techniques ont en commun l'avantage de contribuer à la réduction de l'utilisation d'énergie fossile, de fournir un débouché pour la gestion des boues de STEP et la production d'énergie.

Dans le prochain chapitre on va parler du traitement du biogaz pour chaque type d'utilisation et du dimensionnement du digesteur.

IV-1 INTRODUCTION

Il n'existe pas un biogaz, mais des biogaz. Une grande variété de matières organiques peut en effet être méthanisée : fumier, déchets industriels, boues de station d'épuration, fraction organique des ordures ménagères, etc. Ainsi, c'est la composition des intrants en entrée qui détermine en grande partie celle du biogaz en sortie du digesteur. Au-delà du couple CH_4/CO_2 , le biogaz peut contenir d'autres éléments, en proportions réduites, mais toutefois problématiques : vapeur d'eau, sulfure d'hydrogène, ammoniac. Si le biogaz n'est pas traité, les conséquences peuvent être fatales pour les équipements : effet d'usure, casse moteur. Le conditionnement du biogaz est donc essentiel avant sa valorisation. Selon l'application, combustion en chaudière, cogénération, injection ou utilisation comme bioGNV, dans la 1^{er} partie on va traiter le biogaz de deux façons différentes :

- Epuration simple qui résume les opérations d'élimination de la vapeur d'eau, du H_2S , l'ammoniaque NH_3 , les minéraux et les éléments organo-halogénés.
- Epuration avancée ou enrichissement et qui désigne l'élimination du CO_2 pour enrichir le biogaz en méthane afin de le rendre à une proportion avoisinant celle du gaz naturelle.

Dans la 2^{ème} partie on va procéder à l'étude du dimensionnement du digesteur pour la production du biogaz.

IV-2 Traitement du biogaz :

Quelques soit l'usage final du biogaz, il est quasiment impossible de l'utiliser tel qu'il est produit ou récupéré. La seule fraction valorisable est le méthane qu'il contient en proportion plus au moins grande et les autres composants sont inutiles, gênants, voire nuisibles. Une ou plusieurs étapes de traitement sont indispensables en fonction de chaque voie de valorisation. En fait il est conseillé de traiter le biogaz pour limiter la corrosion des appareils. Celle-ci est due à l'hydrogène sulfuré, mais aussi à la présence d'eau et de gaz carbonique et qui contribuent à la formation d'un acide faible lorsqu'ils sont dissous dans l'eau, et parfois à la présence de composés chlorés c'est le cas de gaz de décharge. [22]

Dans le traitement du biogaz il faut distinguer entre les deux termes suivants :

- Epuration simple qui résume les opérations d'élimination de la vapeur d'eau, du H_2S , les siloxanes, l'ammoniaque NH_3 , les minéraux et les éléments organo-halogénés.
- Epuration avancée ou enrichissement et qui désigne l'élimination du CO_2 pour enrichir le biogaz en méthane afin de le rendre à une proportion avoisinant celle du gaz naturel.

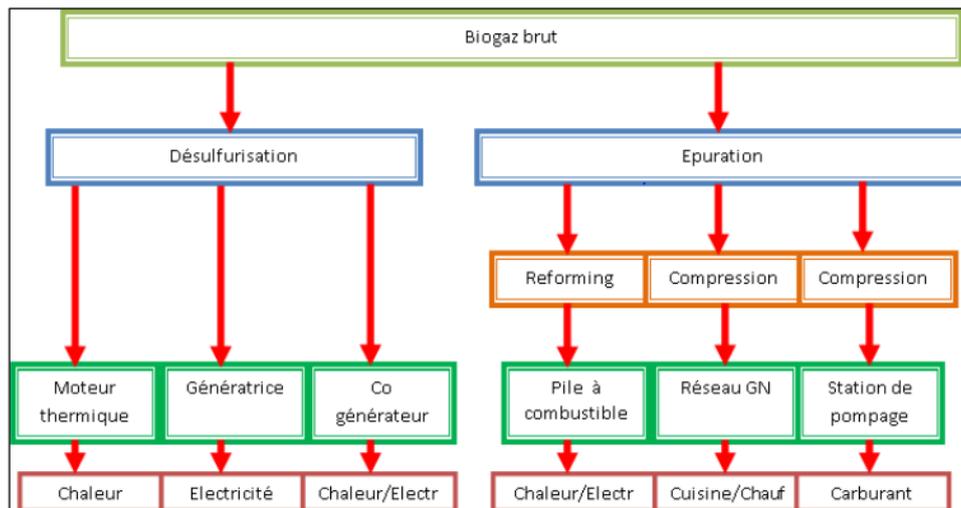


Figure IV.1 : Organigramme de traitement et de valorisation du biogaz.

IV-2-1 Procédés de traitement du biogaz avant valorisation énergétique :

1- Epuration du biogaz :

a- Elimination de la vapeur d'eau : il existe de nombreux moyens d'éliminer la vapeur d'eau. Si les contraintes de point de rosé ne sont pas trop strictes, un dévésiculateur suivi d'un séparateur diphasique suffit. Pour l'injection dans le réseau, la teneur en eau doit être inférieure à 30 mg/Nm^3 et l'on fait appel à des techniques comme la cryogénie, l'absorption sur glycols ou encore, la solution la plus courante, les tamis moléculaires. Pour l'usage carburant, la concentration en eau doit encore être divisée par deux (point de rosée -25°C) et il faudra se tourner vers le système PSA (Pressure System Adsorption).

b- Elimination du H_2S : le soufre, présent sous forme de sulfure d'hydrogène (H_2S), s'enlève assez facilement par passage sur de l'oxyde de fer ou du charbon actif, ce dernier étant plus facile à régénérer. Mais on peut également effectuer un lavage à l'eau sous pression, qui élimine aussi le CO_2 . Une petite partie du méthane (de l'ordre de 8 %) se dissout dans l'eau, mais le pouvoir séparateur est néanmoins important car les solubilités du H_2S et du CO_2 sont respectivement 85 et 30 fois supérieures à celle du méthane. On résumé on peut distinguer les voies de désulfuration les plus utilisées dans le biogaz :

- Filtration du gaz par adsorption :
 - sur charbon actif ou charbon actif imprégné.
 - sur oxydes de fer.
- Lavage basique (à la soude).
- Désulfuration biologique (dans les digesteurs ou en colonne de traitement bactérien).

Cette dernière technique est déconseillée dans le cas de la valorisation en bio-méthane, puisqu'elle peut facilement entraîner une augmentation des teneurs en O_2 et N_2 du bio-méthane, composés difficilement traités par les technologies d'épuration du biogaz.

c- Elimination des composés organo-halogénés : les organo-halogènes forment une large famille de composés constitués de chaînes carbonées qui comprennent un ou plusieurs groupements halogénés. Ces composés sont à l'origine de problèmes de corrosion, leur oxydation lors de la combustion conduit à une acidification (formation d'acide fluorhydrique HF ou Chlorhydrique HCl) des huiles dans les moteurs ou des fumées. On peut se débarrasser de ces composés, ainsi que les métaux lourds par passage sur charbon actif le plus souvent, et ensuite incinéré.

d- Elimination des Siloxanes : ces composés ne représente pas, à priori, un risque polluant pour l'environnement, mais leur présence dans le biogaz est à l'origine de dépôts solides de composés minéraux silices et silicates dans les chambres de combustion des moteurs thermiques lors de sa valorisation énergétique, mais également dans certaines zones des turbines et des brûleurs.

Ces accumulations sont pénalisant pour le bon fonctionnement des systèmes de conversion du biogaz en énergie. Elles posent en effet d'importants problèmes de maintenance qui conduisent à des arrêts de la production, la répétition de ces dysfonctionnements techniques affecte le taux d'utilisation des installations, et son notamment à l'origine de la diminution de la rentabilité financière des sites de valorisation énergétique du biogaz.

Cette problématique reste encore mal connue, tant sur le plan de ses origines, que de la nature complexe des molécules impliquées. Un développement spécifique sera consacré à cette problématique dite des "Siloxanes" dans les phases ultérieures de cette étude.

2- L'enrichissement du biogaz (élimination du CO_2) :

L'enrichissement du biogaz est l'expression pour définir le processus d'élimination du CO_2 contenu dans le biogaz brut qui vient de sortir du digesteur anaérobie, cependant plusieurs méthodes sont envisagées :

a- Par lavage à l'eau : la figure suivante présente le schéma d'écoulement du processus d'enrichissement par lavage à l'eau du biogaz brut. Le biogaz est comprimé et conduit vers la colonne de lavage (Scrubber), l'eau ruisselle de haut en bas et le biogaz qui se faufile de bas en haut à travers des chicanes qui sert à augmenter la surface d'échange air-liquide.

Le mélange H_2O et CO_2 sera séparé par un flash (Stripper) et l'eau traitée sera reconduite vers la colonne de lavage ; quant au biogaz enrichi il est très humide pour le valoriser, une dernière étape de déshumidification est indispensable avant l'utilisation comme carburant ou l'injecter dans le réseau du gaz naturel en tenant compte de la compression.

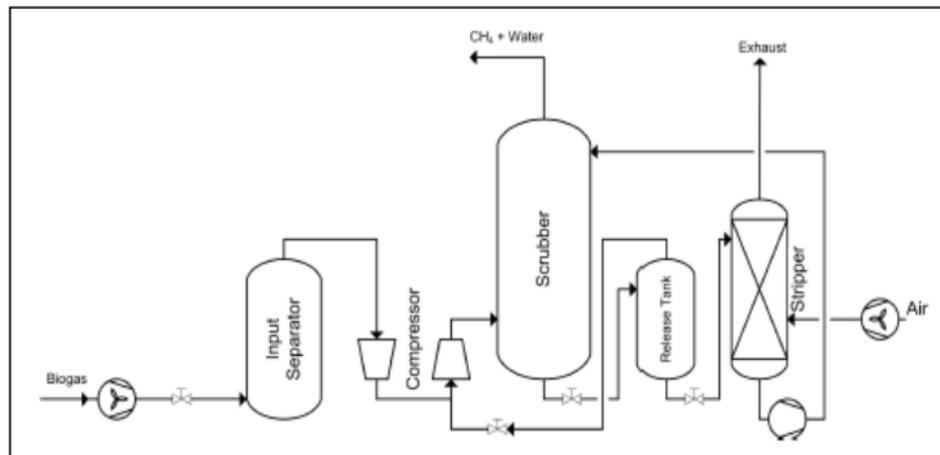


Figure IV.2 : Enrichissement par lavage à l'eau.

b- Par lavage au polyéthylène glycol : tel que l'eau, le polyéthylène glycol peut lui aussi être utilisé comme solvant pour l'absorption du CO_2 ainsi que l'anhydride sulfurique, ces deux derniers sont plus solubles dans ce solvant que le méthane, le processus présenté dans la figure ci-dessous reste le même que celui du lavage à l'eau, et la seule différence c'est que le CO_2 et le H_2S sont plus solubles dans ce composé organique que dans l'eau. Il faudra noter que ce processus est classé comme un procédé d'élimination de CO_2 par voie physique et il est préférable de procéder à l'élimination du H_2S avant d'injecter le biogaz par le dessous de la colonne (Absorption column) sinon une quantité considérable d'énergie (thermique et électrique) sera consommée dans le processus.

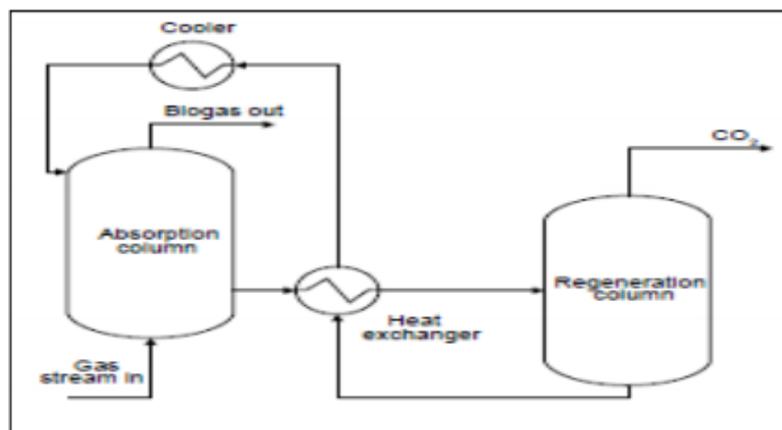


Figure IV.3 : Enrichissement par lavage au polyéthylène glycol.

c- Pressure Swing Adsorption (PSA) sur charbon actif : l'adsorption par variation de pression est une technique d'élimination du CO_2 contenu dans le biogaz brut, l'installation est composée de 4 tanks, un compresseur et un tank intermédiaire qui sert à éliminer le H_2S contenu dans le biogaz. Les quatre tanks qui doivent fonctionner selon un cycle alternatif d'adsorption, régénération et pressurisation, contiennent un matériau adsorbant, habituellement un tamis moléculaire à charbon actif est mis en place pour adsorbé le N_2 , O_2 , H_2O et bien sur CO_2 .

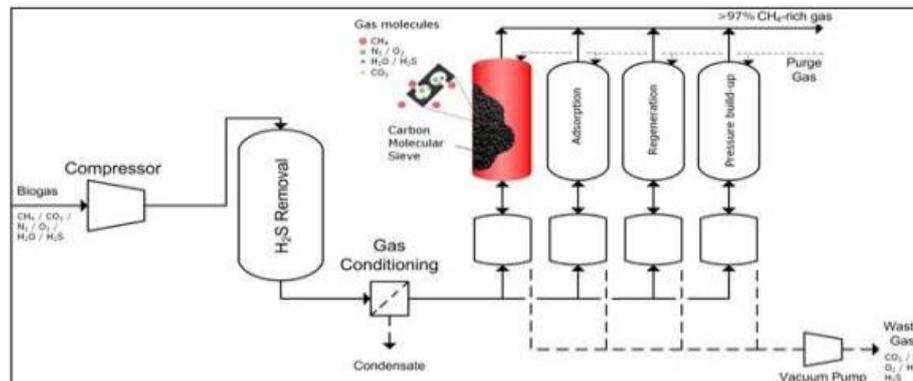


Figure IV.4 : Le cycle d'adsorption dans le système PSA.

d- La technique cryogénique : cette technique dans le nom "Cryogénie" signifie la production et l'usage des basses températures dans de nombreuses applications dont la récupération de plus de 90 % des gaz destructeur de la couche d'ozone en est une. En effet, le biogaz à $25\text{ }^\circ\text{C}$ et 37 % de CH_4 et avec une pression de 1bar entre dans un échangeur thermique à très basse température (cooler), en gardant la même pression mais à une température de $-70\text{ }^\circ\text{C}$, le biogaz subit ainsi deux étages de compression de 1 à 21 bar et de 21 à 40 bar avec deux refroidissements intermédiaires. Ensuite le biogaz à $-10\text{ }^\circ\text{C}$ et 40 bar entre dans une colonne de distillation donnant lieu à du CH_4 à 91 %.

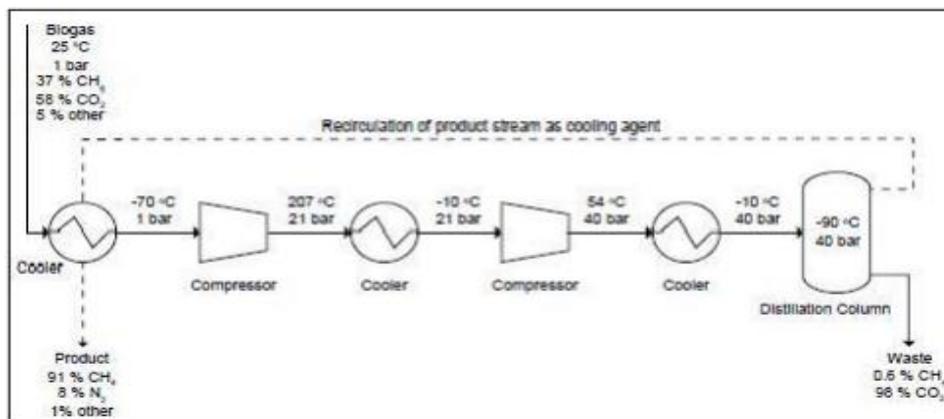


Figure IV.5 : Enrichissement par cryogénie.

3- La compression :

Pas mal de technique existent pour la compression du biogaz, selon le débit et la pression souhaitées. Mais tout d'abord il faut savoir que la compression du biogaz est nécessaire pour :

- Alimenter les équipements de valorisation : les motoristes par exemple demandant généralement une alimentation à une pression fixe. Il faut en outre compenser les pertes de charge des canalisations et des équipements de traitement du gaz.
- Epurer le biogaz : les différentes techniques d'épuration fonctionnent à des pressions de plusieurs bars ou dizaines de bars.
- Stocker le biogaz sous pression, ou l'injecter sur le réseau de transport du gaz naturel (de 4 à 60 bars).
- Réinjecter le biogaz sous pression dans le digesteur, pour le brassage (quelques millibars à quelques bars).

IV-2-2 Traitement du biogaz selon le mode de valorisation :

Quelques soit le mode de valorisation du biogaz (chaleur ou électricité), la présence d'une très grande variété de constituants dans le biogaz, dont certains, comme l'hydrogène sulfuré possèdent des propriétés toxique et corrosives ce qui impose la mise en œuvre d'une épuration du biogaz selon son mode de valorisation.

Mode d'utilisation	Combustion sous chaudière	Production d'électricité et cogénération	Biogaz carburant	Injection dans les réseaux
Besoin en épuration	Déshydratation, désulfuration (si nécessaire)	Déshydratation, désulfuration (si nécessaire)	Décarbonations, déshydratation, désulfuration, élimination des organo-halogéne (si nécessaire), élimination des métaux lourds (si nécessaire)	
Période de valorisation	Toute l'année	L'hiver	Toute l'année	

Stade de développement de la solution	Solution éprouvées industriellement	Solution éprouvées industriellement	Solution éprouvées industriellement en Suède (STEP) stade de démonstration en France	Unité pilote aux Pays-Bas, stade de démonstration en France
---------------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--	---

Tableau IV.1 : Les différents traitements selon le mode de valorisation.

IV-3 Critères du biogaz pour les modes de valorisation :

Le choix d'un mode de valorisation du biogaz découle principalement d'un calcul de rentabilité. Pour chaque mode de valorisation on a un biogaz adéquat à la demande : production de chaleur, transformation en bio-méthane, transformation en bioGNV, production d'électricité.

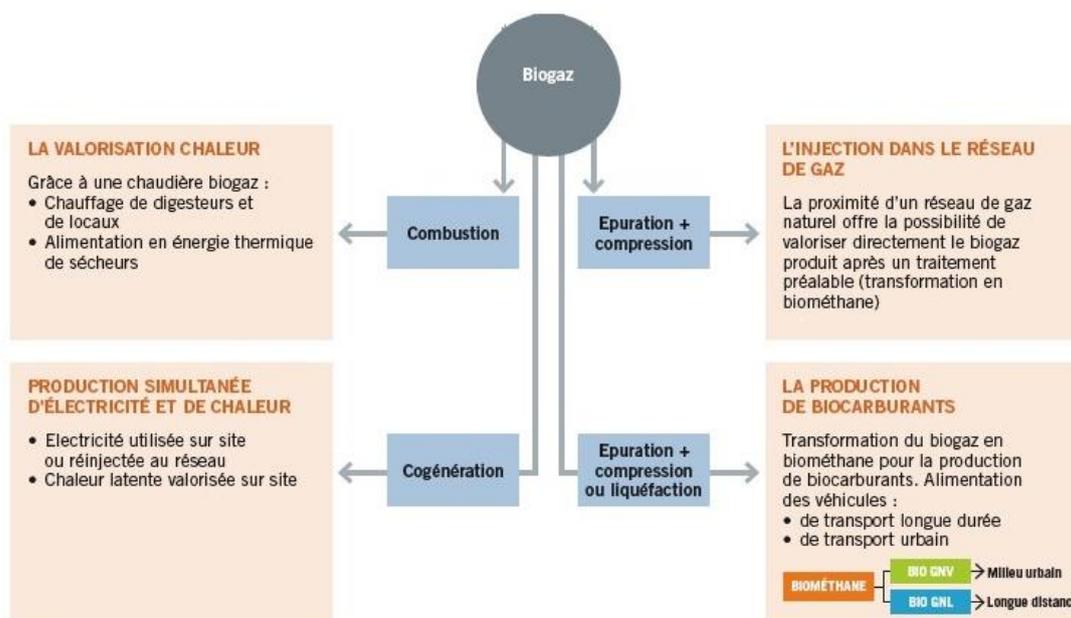


Figure IV.6 : Modes de valorisation du biogaz.

IV-3-1 Production de chaleur :

Les caractéristiques requises du biogaz avant d'entré dans la chaudière sont :

Composés	Valeur limites
CH ₄	> 40 %
H ₂ S	< 300 mg/Nm ³ soit 200 ppm
Point de rosée	< 5 °C

Chlore	<25 mg/Nm ³
Fluore	< 25 mg/Nm ³
O ₂	< 4 %
Particules	< 5 µm

Tableau IV.2 : Caractéristiques d'un biogaz de chaudière. [23]

IV-3-2 Transformation en bio-méthane carburant :

Pour cette application, les spécifications de pureté du gaz sont beaucoup plus sévères que pour les autres modes de valorisation, puisque le biogaz utilisable comme carburant doit contenir au minimum 90 % de méthane. Il faut en outre d'autres critères résumés dans le tableau suivant :

Composés	Valeurs limites
CH ₄	> 90 %
H ₂ S	100 mg/Nm ³ soit 70 ppm
Point de rosée	-20 °C
CO	3-4 % vol
Huile	70-200 ppm
Particules	< 40µm

Tableau IV.3 : Caractéristiques requises pour un biogaz carburant. [23]

IV-3-3 L'injection du biogaz dans le réseau de gaz :

L'épuration du biogaz aux normes du gaz naturel d'origine fossile permet d'envisager l'injection dans le réseau de transport. Cette perspective permet d'envisager le découplage entre la production et la consommation d'énergie. La composition finale du biogaz ainsi que sa pression dépendent évidemment des spécifications imposées par le gestionnaire du réseau, ces dernières portent sur les teneurs suivantes :

Caractéristiques	Spécifications
Pouvoir calorifique supérieur (conditions de combustion 0°C et 1,01325bar)	Gaz de type H : 10,7 à 12,8 KWh/Nm ³ (combustion 25°C) Gaz de type B : 9,5 à 10,5 KWh/Nm ³ (Combustion 25°C)
Indice de Wobbe (Conditions de combustion 0°C et 1,01325bar)	Gaz de type H : 13,46 à 15,70 KWh/Nm ³ (combustion 25°C) Gaz de type B : 12,01 à 13,06 KWh/Nm ³ (Combustion 25°C)

Densité	Comprise entre 0,555 et 0,70
Point de rosée eau	Inférieur à -5°C à la pression maximale de service du réseau en aval du raccordement
Point de rosée hydrocarbures	Inférieur à -2°C de 1 à 70 bar
Teneur en soufre H ₂ S	< 30 mg/Nm ³
Teneur en soufre mercaptique	< 6 mg/Nm ³
Teneur en CO ₂	< 2,5 % (molaire)
Teneur en Tetrahydrothiophène (produit odorisé THT)	Comprise entre 15 et 40 mg/Nm ³
Teneur O ₂	< 100 ppm
Impuretés	Gaz pouvant être transporté, stocké et commercialisé sans subir de traitement supplémentaire
Hg	< 1 µg/Nm ³
Chlore	< 1 mg/Nm ³
Fluore	< 10 mg/Nm ³
H ₂	< 6 %
NH ₃	< 100 mg/Nm ³
CO	< 2 %

Tableau IV.4 : Caractéristiques requises du bio-méthane pour l'injection. [24]

IV-3-4 Production d'électricité et chaleur (cogénération) :

Le cœur d'une cogénération est la machine motrice. Elle consomme une quantité horaire de combustible correspondant à une énergie thermique, elle produit, d'une part, de l'énergie mécanique transformé en une quantité d'électricité d'autre part, des rejet thermique dont une partie est récupérée et utilisée pour du chauffage (mode cogénération).

Production d'électricité	Description	Puissance	Condition	Rendement	Applications
	Il s'agit d'une chaudière à gaz associée à une turbine à vapeur : c'est la voie de production	- Biomasse jusqu'à 5 MW.	-CH ₄ > 20 %		

<p>Turbine à vapeur</p>	<p>d'électricité qui impose le moins de contraintes technique. Les conditions de traitement du biogaz sont identiques à celle décrites pour le cas d'une chaudière à gaz (dans le cas de chaudière produisant uniquement de la chaleur).</p>	<p>- Fossile jusqu'à des centaines de MW.</p>	<p>-Débit > 100 Nm³/h Déshydratation Compression 300 mbar</p>	<p>> 0,85</p>	<p>Production d'électricité.</p>
<p>Turbine à combustion</p>	<p>Ces machines sont constituées d'une chambre dans laquelle le biogaz est brûlé, suivie d'un étage de décompression des gaz de combustion pour entrainer la turbine (énergie mécanique) qui entraine l'alternateur (énergie électrique). Ces turbines peuvent supporter des teneurs en H₂S supérieures aux moteurs à combustion interne et ne nécessitent, la plupart du temps, pas de désulfuration. L'apparition récente sur le marché de "micotacs".</p>	<p>500 KW-300 MW 20 KW-1MW</p>	<p>CH₄ > 30 % Déshydratation Compression 4-6 bar Siloxanes = 0%</p>	<p>0,6 - 0,8 0,5 - 0,7</p>	<p>Industrie et secteur tertiaire</p>
<p>Moteurs à combustion interne (gaz, diesel)</p>	<p>C'est un moteur à combustion interne (plus alternateur). Des conditions pour le biogaz doivent être respectées pour atteindre la rentabilité économique dès l'installation. Les motrices fournissent des moteurs à gaz "pauvres" adaptés à</p>	<p>2,5 KW-6100 KW (Gaz) 5 KW-1700 KW (Diesel)</p>	<p>Débit > 500 Nm³/h CH₄ > 40 % H₂S < 100 mg/Nm³ Point de rosée < 5°C pour la vapeur d'eau</p>	<p>0,8 - 0,9</p>	<p>Besoins en chaleur a basse température (hôpitaux, commercial, bâtiments..)</p>

	la combustion de biogaz. Il s'agit de moteurs lents, à étincelles, ou dual fuel. Les rendements électriques sont de l'ordre de 25 à 35 %.		$O_2 < 4 \%$ $Cl < 50$ mg/Nm^3 $F < 25mg/Nm^3$ $NH_3 < 30$ mg/Nm^3		
--	---	--	---	--	--

Tableau IV.5 : Les machines de valorisation énergétique du biogaz.

IV-4 Moralité :

Quelques soit le mode de valorisation du biogaz (chaleur ou électricité), la présence d'une très grande variété de constituants dans le biogaz, comme l'hydrogène sulfuré qui possèdent des propriétés toxiques et corrosives qui imposent la mise en œuvre d'une épuration du biogaz. Dans la prochaine étape on va calculer la quantité de biogaz si elle est suffisante pour alimenter la STEP de Boumerdes en chaleur et en électricité et voir le digesteur adéquat à ces résultats.

IV-5 Estimation de la production électrique pour la station d'épuration de Boumerdes :

La filière de valorisation de biogaz consiste en la production (chaleur, d'électricité), l'objectif de notre travail est de calculer la quantité de biogaz que l'on peut potentiellement produire à partir des substrats disponibles sur l'exploitation pour la production de l'électricité au niveau de la STEP de Boumerdes. Il faut pour cela d'abord caractériser les substrats (boues activée).

IV-5-1 Dimensionnement de l'installation :

Caractéristiques des boues avant les calculs il faut caractériser les substrats :

MS : Composition en matière sèche des boues (Kg/an).

MO : Composition en matières organiques de la matière sèche (Kg/an).

DCO : Quantité d'oxygène consommée par oxydation chimiques (Kg/an).

DBO₅ : Quantité d'oxygène nécessaire pour décomposer par oxydation la matière organique (Kg/an).

P_i : Production initiale des boues annuelle (tonne de MS/an).

1- La production de boues :a- La production initiale de boues P_i :

La production initiale de boues correspond à la production avant digestion anaérobie. Cette production initiale est basée sur 21,35 kg MS/EH/an. Cette valeur fait partie des ratios servant de référence en traitement des eaux usées.

$$MO = \frac{DCO+(2 \times DBO)}{3} \quad [7]$$

$$MO = \frac{5062,5+(2 \times 4050)}{3} = 4387,5 \text{ Kg/j.}$$

$$MS = \frac{MO}{EH} \times 365 = 21,35 \text{ Kg MS/EH/an.}$$

Cette production initiale P_i (t MS/an) est telle que :

$$P_i = 21,35 \times EH / 1000 \quad [25]$$

La STEP de Boumerdes à une capacité de traitement de 75 000 EH, d'où :

$$P_i = 1601,25 \text{ t MS/an.}$$

b- Le volume de boues produites V_i et le débit journalier Q :

Nous partons d'une boue présentant une siccité de 3 à 5% (4 % en moyenne). D'après la production initiale de boue, le volume correspondant est calculé :

$$V_i = 1601,25 \times 100 / 4 \quad [25]$$

$$V_i = 40031,25 \text{ m}^3$$

Pour éviter de sous-dimensionner le digesteur, on tiendra compte de la variabilité des teneurs en matières sèches de l'effluent arrivant à la station, soit un ratio de 25 kg MS/EH/an. Ceci conduit à prévoir un digesteur pour le traitement annuel de 46875 m³/an de boues (pour obtenir cette valeur on refait le calcul du P_i et du V_i avec 25 Kg MS/EH/an). La commune de Boumerdes a un débit journalier équivalent à :

$$Q = 128,24 \text{ m}^3/\text{j.} \quad [25]$$

2- Dimensionnement du digesteur :

a- Calcul du volume nécessaire :

Le choix du procédé de digestion anaérobie s'est porté sur un digesteur mésophile de type infiniment mélangé. Le temps de séjour dans le digesteur ou temps de rétention hydraulique (TRH) est de 25 à 30 jours. Le volume effectif du digesteur en considérant le temps de séjour le plus grand est :

$$V_e = Q \times \text{TRH} \quad [25]$$

$$V_e = 128,24 \times 30$$

$$V_e = 3847,2 \text{ m}^3.$$

En tenant compte du volume nécessaire, il faut donc un digesteur d'un volume total de :

$$V_{\text{tot}} = 3900 \text{ m}^3.$$

b- Géométrie du digesteur :

On a choisi un digesteur cylindrique respectant le rapport diamètre sur hauteur égal à 1.

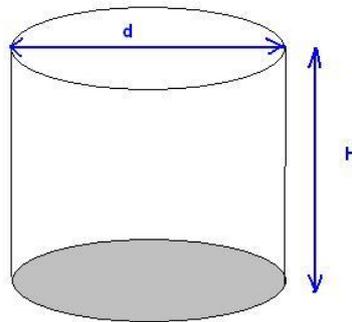


Figure IV.7 : Digesteur cylindrique.

Le volume de ce digesteur s'écrit:

$$V_{\text{tot}} = 0,25 H * \pi * d^2$$

Avec un volume total de 3900 m^3 , on en déduit la hauteur et le diamètre de notre digesteur

$H = d = 17,06 \text{ m}$. Ce calcul rapide nous permet d'avoir une idée de la taille du digesteur nécessaire.

IV-5-2 Bilan énergétique :

1- Production de méthane : (Biogaz)

Le potentiel de production de gaz (B_o) d'un substrat est le volume total de gaz produit par unité de matière organique traitée pour un temps de rétention infini ; il est fonction de la biodégradabilité du substrat. La constante B_o est de l'ordre de $0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$ quel que soit la nature du substrat. La teneur en MO est de $4387,5 \text{ kg/j}$. Le substrat représente alors une quantité annuelle de $1601437,5 \text{ kg/an}$ de MO. La production en méthane est alors telle que :

$$P_{\text{CH}_4} = \text{quantité de MO} \times B_o \quad [25]$$

$$P_{\text{CH}_4} = 1601437,5 \times 0,5$$

$$P_{\text{CH}_4} = 800718,75 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{an}.$$

2- Energie totale E_t disponible annuellement :

Le PCI du méthane vaut 9,94 kWh/m³ dans les conditions normales de température et de pression (Lafarge, 1995). A 60 % de méthane, il vaut 6 kWh/m³.

On en déduit l'énergie totale E_t :

$$E_t = P_{CH_4} \times PCI \quad [25]$$

$$E_t = 800718,75 \times 6$$

$$E_t = 48004,3 \text{ MWh/an.}$$

2- Energie valorisable E_v annuellement :

L'énergie valorisable correspond à 95 % de l'énergie potentiellement disponible à partir du biogaz. En général, 5 % de cette énergie ne va pas être valorisée. En effet, il est nécessaire de maintenir un excès de potentiel de production de méthane par rapport à la consommation des installations de combustion, de façon à garantir une alimentation à débit nominal des brûleurs. Le biogaz éliminé est alors éliminé en torchère.

D'où l'énergie valorisable annuellement:

$$E_v = 45604,08 \text{ MWh/an.}$$

3- Energie nécessaire au chauffage E_{chauff} du digesteur :

Les besoins en chaleur lors de la digestion de boues biologiques représentent 30 % de l'énergie valorisable (SOLAGRO, 2001) [26]. Le chauffage se fait par une chaudière biogaz, dont le rendement «global» de transformation énergétique est de 90 %.

Donc, l'énergie nécessaire au chauffage E_{chauff} du digesteur est de :

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

$$E_{\text{chauff}} = 15201,36 \text{ MWh/an.}$$

4- Energie utile E_{util} disponible :

$$E_{\text{util}} = E_v - E_{\text{chauff}}$$

$$E_{\text{util}} = 30402,72 \text{ MWh/an.}$$

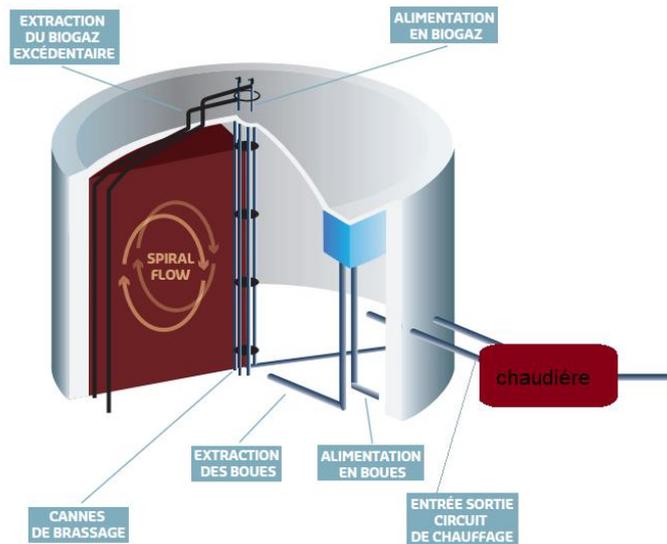


Figure IV.8 : schéma du digesteur.

5- Cas de production d'électricité :

Sachant que l'énergie valorisable vaut = 45604,08 MWh/an. On utilisant un moteur avec un rendement de 30 % pour produire de l'électricité on obtient :

$$E_E = E_v * 0,3$$

$$E_E = 13681,224 \text{ MWh/an.}$$

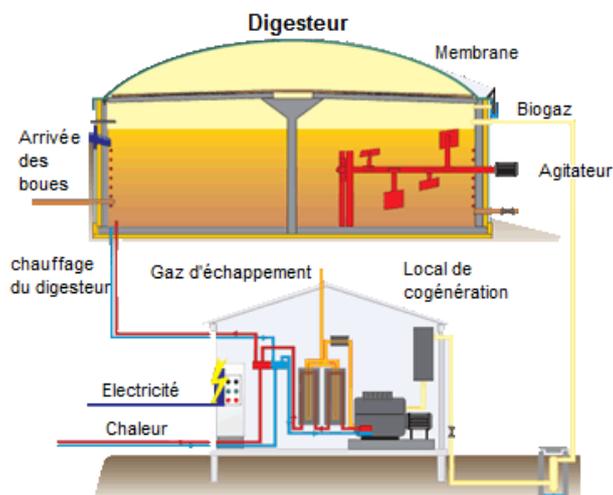


Figure IV.9 : schéma de la cogénération.

La consommation annuelle en énergie électrique de la station d'épuration vaut = 1989525 KWh/an. La différence entre l'énergie électrique produite à partir du biogaz et l'énergie consommée par la STEP nous donne 11691,699 MWh/an. On déduit que l'énergie produite par le digesteur est largement suffisante pour alimenter la station d'épuration en électricité.

IV-5-3 Analyse de la rentabilité du projet :

Par définition, la valeur actuelle nette (VAN) : c'est la comparaison entre les dépenses initiales de l'investissement et les revenus attendus (VAN=) pendant la durée de l'investissement.

$$VAN = \sum_{i=1}^n CF (1 + t)^n - I_0$$

La VAN mesure l'avantage absolu susceptible d'être retiré d'un projet d'investissement.

- I_0 : Montant de l'investissement initial (supposé engager en début de période).
- CF : Cash-flow.
- n : Durée de crédit.

Préparation :

Avant de faire le calcul de la VAN du projet, on doit suivre les instructions suivantes :

- Le cout de l'investissement initial I_0 .
- Les futures sortie d'argent du projet, le Cash-flow à venir sera le même chaque année (encaissement, décaissement).Le Cash-flow varie d'un projet à l'autre.
- Le taux d'actualisation (t) prévu pour le projet, est donné par la banque.
- Le nombre d'année (n) pendant lesquels on va évaluer la rentabilité du projet.
- Le prix du digesteur = 6000 000 DA = I_0 .
- Taux d'actualisation = 10% = t.
- L'encaissement = 500 000 DA.
- Décaissement = 50000 DA. (les frais de fonctionnement du digesteur).
- Cash-flow = Encaissement - Décaissement.

VAN =	$\sum_{i=1}^n CF (1 + t)^n - I_0$
VAN ₀ =	-6000 000 DA
VAN ₁ =	-5505000 DA
VAN ₂ =	-4960500 DA
VAN ₃ =	-4361550 DA
VAN ₄ =	-3702705 DA
VAN ₅ =	-29779775,5 DA
VAN ₆ =	-2180773,05 DA
VAN ₇ =	658149,645 DA

Tableau IV.6 : Calcul de la valeur actuelle net.

Le tableau IV.6 donne les valeurs de la VAN (valeur actuelle net) obtenues lors de l'étude de la rentabilité, on constate qu'à partir de la 7^{ème} année que notre projet devient rentable.

Conclusion :

La valorisation énergétique du biogaz confirme que le procédé est avantageux, pour cela nous avons proposé l'installation d'un digesteur qui va assurer la consommation électrique de la STEP de Boumerdes.

CONCLUSION GENERALE

Une station d'épuration est un centre de traitement de l'eau qui peut recycler les eaux usées en éliminant les polluants avant leur rejet dans le milieu naturel, à l'aide des quatre procédés suivants :

- Traitement mécanique : élimination des déchets par dégrillage et tamisage ;
- Traitement biologique : élimination des matières organiques et minérales par la culture microbienne et par ajout d'oxygène via l'aération ;
- Traitement de clarification : séparation par décantation de l'eau dépolluée et les boues ou résidus secondaires issus de la dégradation des matières organiques ;
- Désinfection : traitement par le chlore pour tuer les germes pathogènes.

Compte-tenu des éléments présents dans les eaux usées, la réutilisation d'une eau de mauvaise qualité peut présenter des risques pour la santé et l'environnement, et poser des problèmes d'ordre technique en colmatant les conduites et les systèmes d'irrigation.

D'un point de vue sanitaire, la quantité de contaminants qui parvient dans l'environnement est appelée la charge expulsée, sa composition dépend de la population à l'origine de la production des eaux usées et notamment de la proportion d'individus infectés et des conditions d'hygiène. Pour les eaux traitées de la station d'épuration de Boumerdes, la charge expulsée est considérablement réduite, grâce à la performance du traitement par boue activée.

Les résultats d'analyses de l'effluent traité, respectent les normes Algérienne de valorisation dans le domaine agricole.

Les principaux déchets produits par une station d'épuration à partir des effluents liquides, sont les boues d'épuration (urbaines ou industrielles). Ces sédiments résiduels sont surtout constitués de bactéries mortes et de matière organique minéralisée.

La valorisation énergétique des boues d'épuration par procédé biologique (digestion anaérobie) permet de transformer les boues en un combustible renouvelable. L'énergie produite peut être utilisée directement au sein de la station d'épuration (cogénération, chaleur) ou être revendue.

Parmi les solutions, il est recommandé de prévoir, au niveau de la STEP de Boumerdes l'installation d'un digesteur nécessaire pour la production du biogaz pour une utilisation selon le type et le choix de la valorisation, exemple : production d'électricité.

Pour cette application, la production d'énergie électrique va dépendre principalement de la quantité du biogaz produit par la STEP de Boumerdes. Théoriquement la quantité de biogaz calculée est suffisante pour alimenter la STEP en énergie électrique. L'analyse de rentabilité

montre que l'installation d'un digesteur au sein de la station d'épuration de Boumerdes, donne des résultats satisfaisants en matière de rentabilité.

L'exploitation du potentiel énergétique et non énergétique des eaux usées a donc un double intérêt : d'une part, la préservation du cadre environnemental de la vie et avantage l'économie des ressources hydrique, d'autre part, les déchets d'épuration peuvent être considéré comme une importante source d'énergie.

Annexe 2

Interprétation des différentes catégories des métaux lourds :

1- Catégorie n°1 :

les résultats figurant sur les figures suivante (II.8 et II.9) montrent que les concentration du Manganèse et du Fer des eaux épurées sont bien au-dessous de la réglementation Algérienne pour l'irrigation. Voir décret page 06.

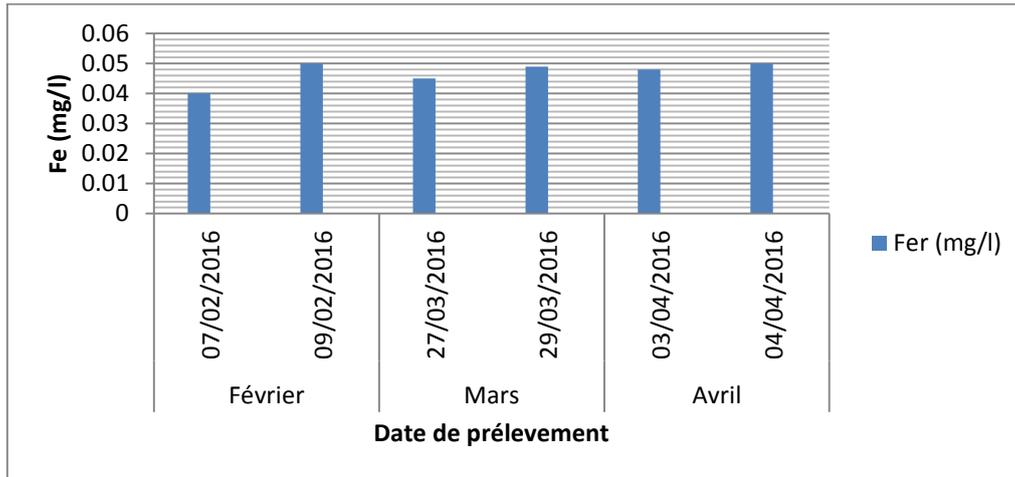


Figure II.8 : Evolution du Fer des eaux épurées pendant 3 mois.

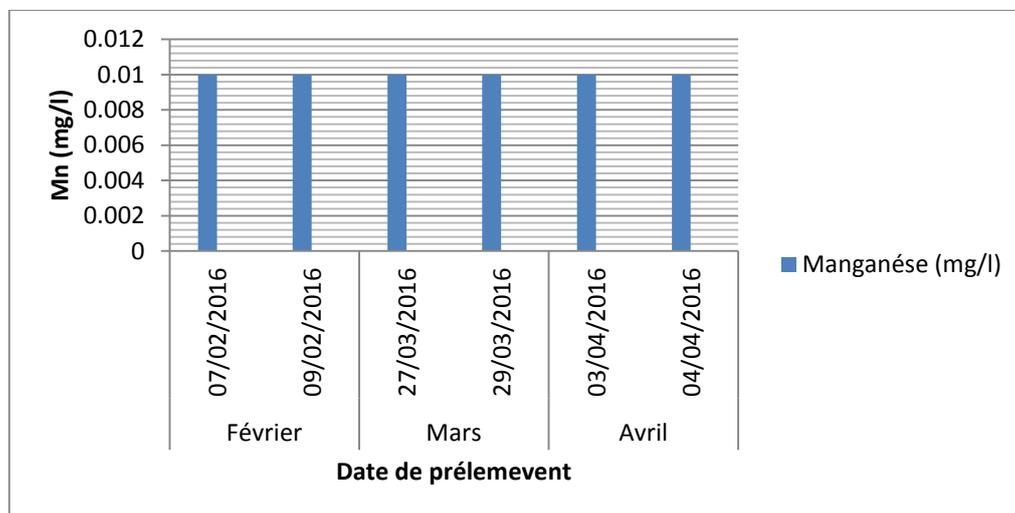


Figure II.9 : Evolution du Manganèse des eaux épurées durant les 3 mois.

Le Manganèse (Mn) et le Fer (Fe) sont tous deux indispensables au bon développement des végétaux et leur utilisation en agriculture n'engendre aucun problème pour la santé humaine. En effet, ils sont déjà naturellement présents en forte proportion dans les sols. [14]

2- Catégorie n°2:

Le chrome n'est pas indispensable pour la croissance des végétaux, mais sa présence ne présente pas non plus de danger pour l'utilisation agricole :

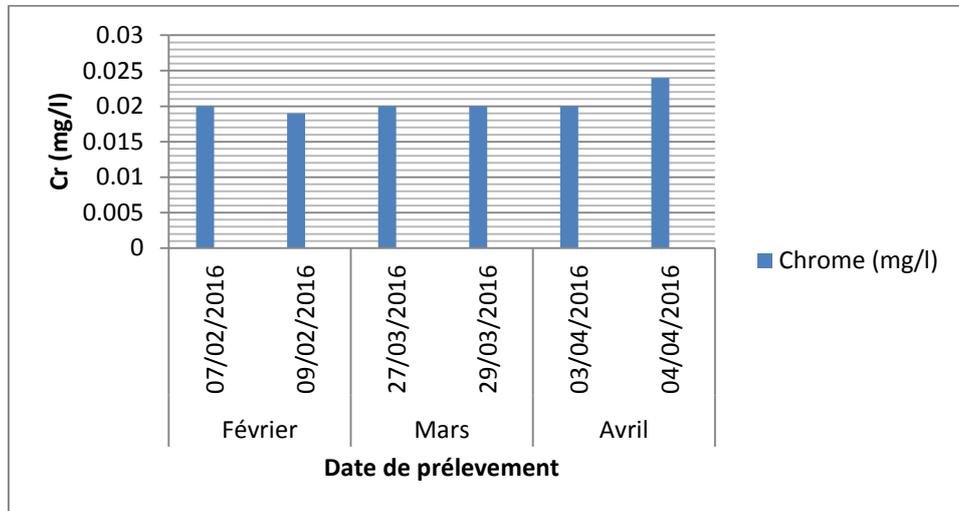


Figure II.10 : Evaluation du Chrome des eaux épurées durant les 3 mois.

La figure II.10 présente la faible variation du Chrome (Cr), les concentrations obtenues sont conformes à la norme d'irrigation Algérienne.

3- Catégorie n°3 :

Les concentrations du Cuivre et du Zinc obtenues après analyses sont sous forme de traces (voir figures 11 et 12) par rapport aux normes fixées par la réglementation Algérienne des eaux épurées destinées à l'irrigation.

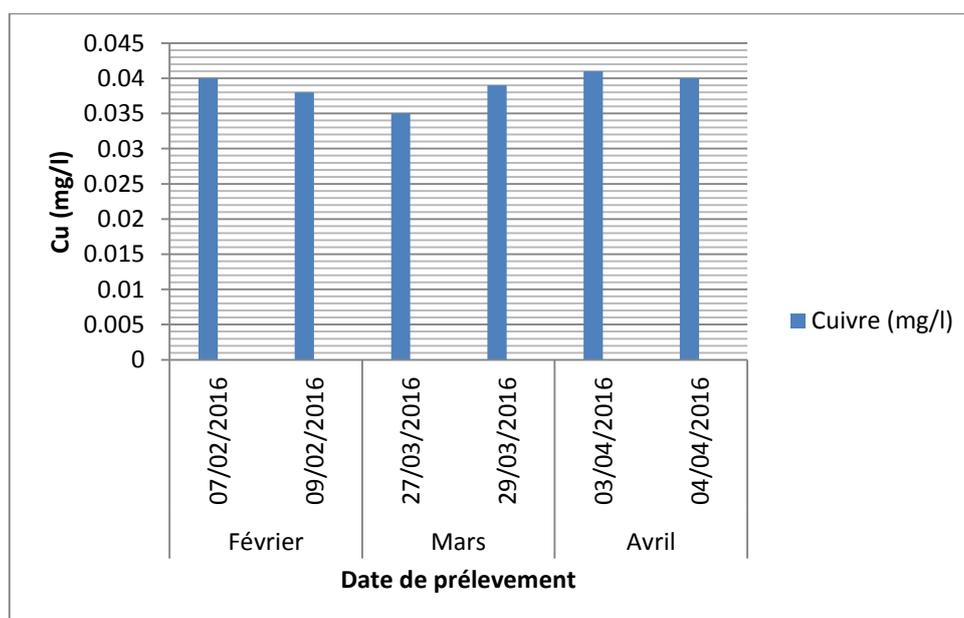


Figure II.11 : Evolution du Cuivre des eaux épurées durant 3 mois.

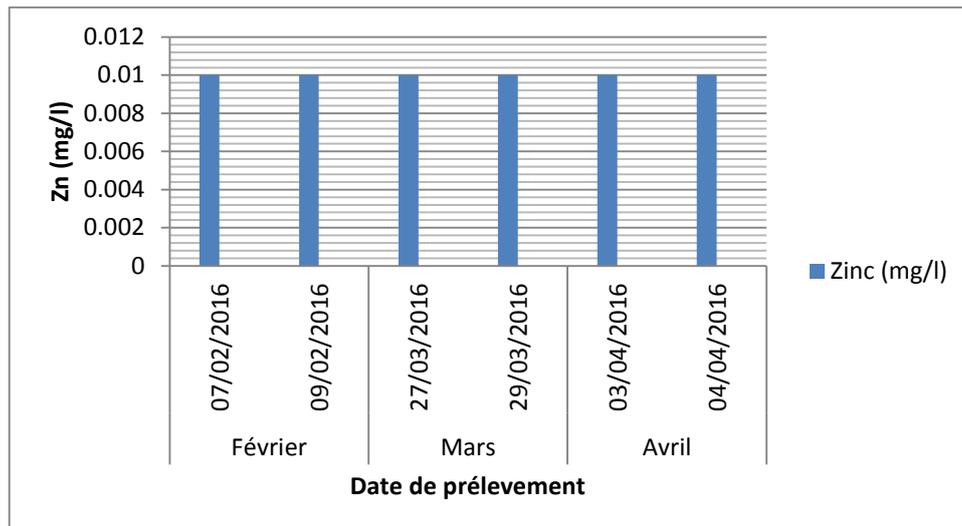


Figure II.12 : Evolution du Zinc des eaux épurées pendant 3 mois.

Le Zinc (Zn) et le Cuivre (Cu) sont indispensables pour la croissance des végétaux, mais dont l'utilisation en agriculture peut poser des problèmes. Cependant, le zinc est peu toxique d'un point de vue sanitaire, même à de fortes concentrations. [14]

4- Catégorie n°4 :

En fin, il existe trois métaux lourds qui ne sont pas indispensables au développement des végétaux, et qui de plus sont dangereux d'un point de vue sanitaire.

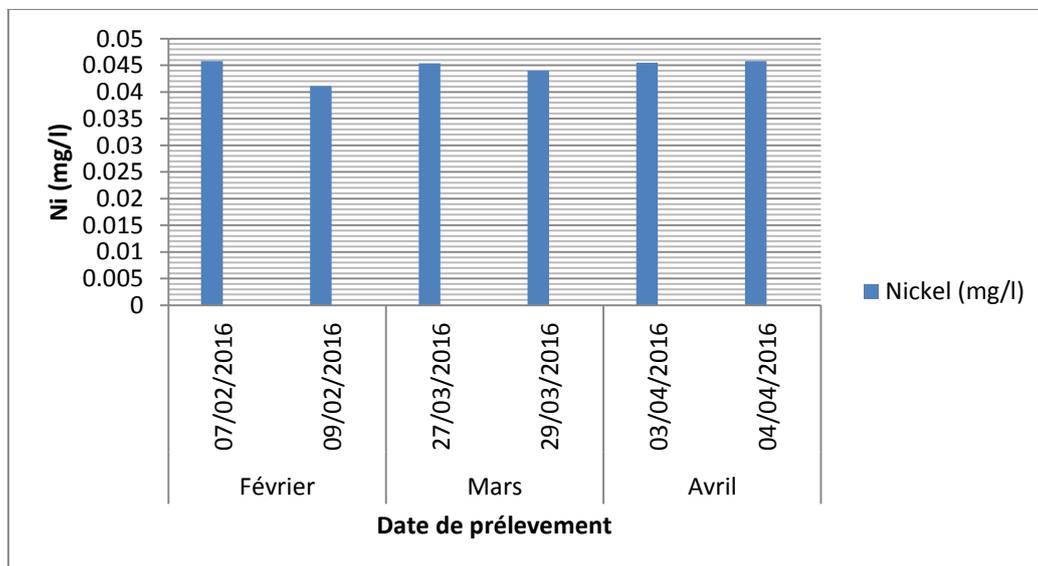


Figure II.13 : Evolution du Nickel des eaux épurées durant les 3 mois.

La figure II.13 montre une légère variation du Nickel (Ni), qui est classé parmi les substances possiblement cancérogènes pour l'homme, en s'accumulant très facilement dans les tissus végétaux. [14] Les concentrations du Zinc des eaux épurées obtenues après analyses sont conformes aux normes Algérienne d'irrigation. Voir décret page 06.

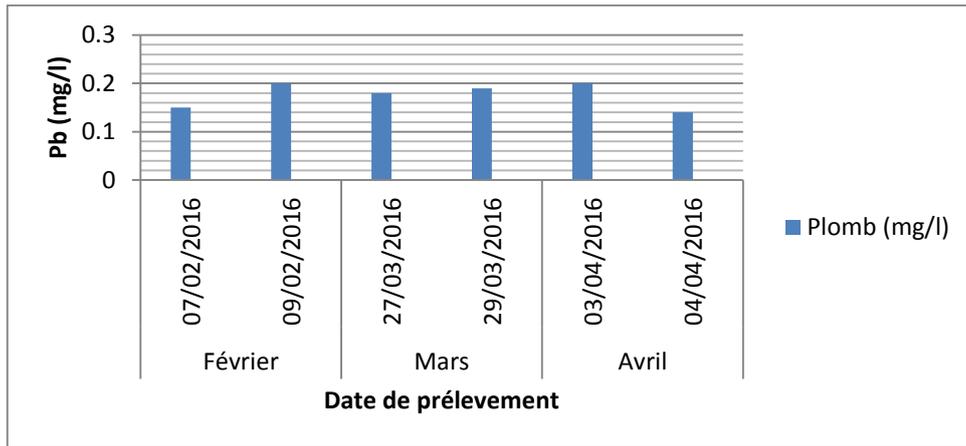


Figure II.14 : Evaluation du Plomb des eaux épurées durant les 3 mois.

La figure II.14 montre les valeurs du Plomb (Pb) des eaux épurées après analyse qui sont conformes à la norme Algérienne d'irrigation, le Plomb présent à de fortes concentrations indique un danger sanitaire préoccupant, particulièrement pour les reins et le système nerveux. [14]

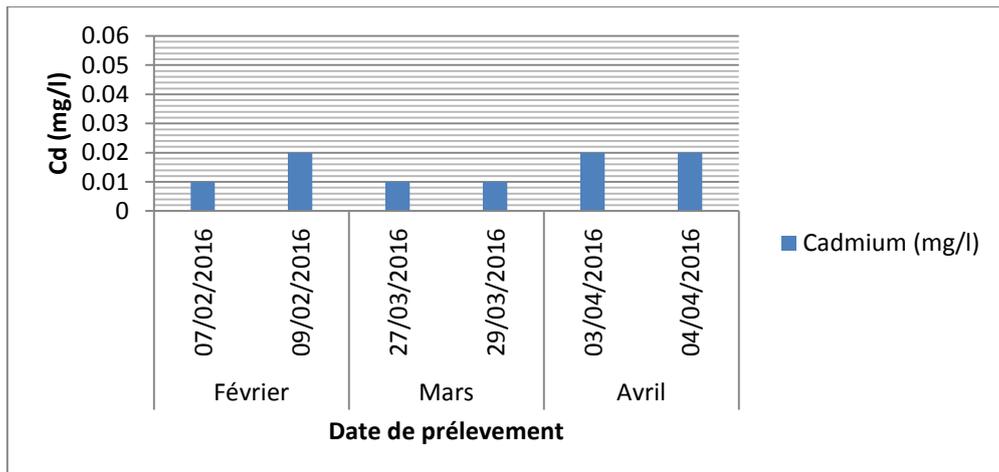


Figure II.15 : Evolution du Cadmium des eaux épurées durant 3 mois.

Le Cadmium (Cd), est de loin le micropolluant non organique le plus inquiétant. Il est parfois présent à des concentrations importantes dans les eaux usées. Il peut s'accumuler dans les plantes et atteindre des concentrations sanitaires alarmantes et provoquer une intoxication grave, il est d'ailleurs soumis à une réglementation stricte avec une valeur maximale de 0,05 mg/l pour l'eau épurée destinée à l'irrigation. [14]

Les valeurs obtenues après analyse des eaux épurées montrent que la concentration du Cadmium est inférieure par rapport au seuil recommandé par la norme Algérienne pour l'irrigation.

ANNEXE 1

Les différents modes opératoires :

Paramètres	Réactifs	Appareillage	Mode opératoire
Ph	-Néant	<p>-Electrode de verre : à l'intérieur se trouve l'électrode de référence formant le relai (calomel – kcl) la partie utile de l'électrode de verre est formée par une ampoule sphérique de 1 cm de diamètre</p> <p>-Dispositif potentiométrique : spécialement conçu pour la mesure du ph, alimente en courant continu constant</p> <p>-Pipette de précision de 50ml de volume</p> <p>-Agitateur magnétique</p>	<p>-Prélever à l'aide d'une pipette d'essai de 50 ml et l'introduire dans un bêcher propre</p> <p>-Rincer abondamment l'électrode avec de l'eau distillée</p> <p>-placer le bêcher sous agitation magnétique</p> <p>-introduire l'électrode dans la solution à analyser</p> <p>-mettre en marche le potentiomètre</p> <p>-lire la valeur affichée par le potentiomètre</p>
Conductivité	-Eau distillée	<p>-Conductimètre de type HACH modelé 44600, muni de l'élément de mesure qui consiste en une sonde constituée de deux électrodes recouvertes de noir de platine</p>	<p>-Rincer abondamment la sonde a l'eau déminéralisée avant utilisation</p> <p>-Presser la touche POWER, puis la touche CND correspondant à la mesure de la conductivité</p> <p>-Introduire la sonde dans la solution à analyser. Attendre jusqu'à stabilisation avant de faire la lecture si la valeur affichée se situe a moins de 10% de la gamme (2 à 20 mS/cm), passer à la gamme de 0 à 200 µS/cm en appuyant sur la touche</p>

			<p>200. Attendre jusqu'à stabilisation avant de faire la lecture</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rincer abondamment la sonde à l'eau déminéralisé après chaque mesure.
MES	<ul style="list-style-type: none"> - Chloroforme : si l'eau à analyser est huileuse le filtre est lavé au chloroforme - Eau distillée 	<ul style="list-style-type: none"> - Dispositif de filtration sous pression - Dispositif de filtrants en fibre de verre type AP 20 	<ul style="list-style-type: none"> - Avant la pesée du filtre à vide, laver à l'eau distillée puis le sécher à 100 – 105°C. Ce filtre est refroidi dans un dessiccateur puis pesé - Mettre en marche le dispositif de filtration sous pression - Verser la prise d'essai (≥ 100 ml) sur le filtre - Laver le récipient avant contenu la prise d'essai avec de l'eau distillée - Si l'eau à analyser est huileuse laver le récipient et le filtre avec un solvant organique (chloroforme) - Sécher le filtre à l'étuve à 105°C pendant 30 min - Refroidir le filtre au dessiccateur, puis peser
DCO	<ul style="list-style-type: none"> - Tubes DCO (0 à 150 mg/l) pour les faibles concentrations - Tubes DCO (0 à 1500 mg/l) pour les fortes concentrations - Eau déminéralisée 	<ul style="list-style-type: none"> - pipette jaugée à 2 ml - Adaptateur de tube DCO sur DR/2000 - Portoir pour tube DCO - Réacteur à 150°C (DCO 120/240 V) - Spectrophotomètre 	<ul style="list-style-type: none"> - Homogénéiser l'eau à analyser en agitant pendant deux minutes - Allumer le réacteur à DCO et préchauffer à 150°C - Retirer le bouchon d'un tube - tenir le tube incliné

			<p>à 45 degrés. Prélever 2ml d'eau à analyser Et les introduire dans le tube -Fermer hermétiquement le bouchon du tube -En tenant le tube par le bouchon au-dessus d'un évier. Le retourner plusieurs fois pour mélanger le contenu. Placer le tube dans le réacteur -Préparer un blanc en répétant les étapes 3 à 6 en remplaçant l'échantillon par de l'eau désionisée -Chauffer les tubes pendant 2 heures -Eteindre le réacteur. Attendre environ 20 minutes le refroidissement des tubes à 120°C ou au-dessous -Retourner chaque tube plusieurs fois pendant qu'il est encore chaud. Placer les tubes sur un portoir. Attendre que les tubes soient refroidis</p>
DBO ₅	<ul style="list-style-type: none"> -Pastilles de soude caustique -Mercure liquide 	<ul style="list-style-type: none"> -Flacons d'échantillons bruns en verre de 500 ml de capacité -Barreau magnétique d'agitation -Armoire thermostatée a 20°C -Flacon a pastille de soude -dispositif d'agitation 	<ul style="list-style-type: none"> -Les valeurs de la prise d'essai sont déterminées en fonction des résultats attendus et en fonction de la valeur de DCO -Mesurer la prise d'essai et l'introduire dans le flacon brun -Introduire un barreau aimanté dans le flacon

			<p>-Placer dans le col de la bouteille le support en caoutchouc qui contiendra une à deux pastilles de NaOH</p> <p>-Mettre le bouchon, sans le serrer</p> <p>-Enclencher l'agitation et pour équilibrer la température (à 20°C), agiter pendant une heure</p> <p>-Fermer les bouchons</p> <p>Du flacon et du réservoir (à mercure)</p> <p>-Ajuster l'échelle au niveau du mercure dans le capillaire</p> <p>-Noter la date et l'heure de la mise en marche</p> <p>-Lire quotidiennement les valeurs indiquées sur l'échelle</p> <p>Après le cinquième jour, lire le résultat sur l'échelle, le multiplier par le coefficient de conversion. Le résultat correspond à la consommation d'oxygène en mg/l</p>
Calcium	<p>-Solution de KOH ou NaOH à 20% préparée par dissolution de 200 g de NaOH ou KOH dans 1000 ml d'eau distillée</p> <p>-Solution d'EDTA à 0.1 N : préparée par dissolution de 37.22 g d'EDTA dans 1 L</p>	<p>-Dosimètre</p> <p>-Pipette</p> <p>-Agitateur</p>	<p>-Prélever 20 ou 25 ml d'eau à analyser et les introduire dans un bêcher</p> <p>-Ajouter dans le bêcher 5 ml de solution de KOH ou NaOH, et quelques gouttes de triéthanolamine pour masquer l'effet du</p>

	<p>d'eau distillée</p> <p>-Indicateur colore (calcon) : consiste en un mélange de 0.2g d'acide calcone carboxylique avec 100 g de chlorure de sodium. Ce mélange est broyé dans mortier en porcelaine</p> <p>-TEA : solution de triethanolamine préparée en diluant un volume de TEA dans deux volumes d'eau distillée</p>		<p>fer</p> <p>-Introduire une pincée de calcon</p> <p>-Mettre sous agitation et titrer avec la solution d'EDTA jusqu'au virage de la coloration du rose au bleu (violet)</p> <p>-Noter le volume V_1, affiché sur le dosimètre</p>
<p>La somme Calcium+Magnésium</p>	<p>-Solution tampon à pH 10 : préparé par dissolution de 67,5 g de chlorure d'ammonium (NH_4Cl) dans 750 ml de solution ammoniacale (NH_3), après homogénéisation de la solution on ajoute un litre d'eau distillé.</p> <p>-Solution EDTA : Idem que pour le dosage du calcium.</p> <p>-Indicateur coloré Noir Erichrome : peser 0,5 g de sel de sodium de l'acide et les dissoudre dans une solution composée de 75 ml de triéthanolamine et 25 ml d'éthanol.</p> <p>-Solution TEA : solution de triéthanolamine préparé en prélèvent un volume V de triéthanol amine que l'on dilue dans 2 V d'eau distillée.</p>	<p>-Dosimetre.</p> <p>-Pipette de 20 ou 25ml.</p> <p>-Agitateur.</p>	<p>-Prélever 20 ou 25 ml d'eau à analyser dans un bécher.</p> <p>- Ajouter quelques gouttes de TEA pour masquer le fer. Verser dans le bécher 5ml de la solution tampon. Ajouter 4 à 5 gouttes de l'indicateur coloré et mettre sous agitation.</p> <p>Titre à l'aide de la solution d'EDTA jusqu'au virage de la couleur rouge brunâtre au bleu, noter le Volume V_2 d'EDTA versé.</p>

Nitrates	<p>-Gélules de Nitre ver5.</p>	<p>-Cellules en verre de 25 ml de capacité. -Spectrophotomètre de type DR 2000</p>	<p>-Mettre en marche le DR 2000 en appuyant su la touche POWER. -Introduire le numéro de programme mémorisé pour le dosage des nitrates concentration moyenne, presser : 353 READ/ENTRER, l'affichage indique : R2GLER nm à 400. Tourner le bouton de réglage de longueur d'onde jusqu'à ce que l'affichage indique : 400 nm, presser alors READ/ENTER, l'affichage indique : mg/l N-NO₃⁻ M. Prendre deux cellules en verre, remplir l'une de 25 ml d'eau à analyser et l'autre de 25 ml d'eau disoionisée et ajouter dans chacune d'elles, le contenu d'une gélule de Nitra Ver 5 et les boucher. -Presser : SHIFT TIMER et agiter les deux flacons pendant une minute. -Lorsque le minuteur sonne, presser : SHIFT TIMER un temps de réaction de 5 minutes commence. -Lorsque le minuteur sonne à nouveau, l'affichage indique : mg/l N-NO₃⁻ M, placer alors le blanc dans le puits de</p>
----------	--------------------------------	--	--

			<p>mesure et fermer le capot. Presser : ZERO, l'affichage indique : ATTENDRE, puis : 0,00 mg/l N-NO₃⁻ M.</p> <p>-Placer l'échantillon préparé dans le puits de mesure, en ayant auparavant retiré le bouchon, Presser : READ/ENTER , l'affichage indique : ATTENDRE, puis le résultat en mg/l d'azote s'affiche.</p>
Phosphore	-Gélules pho ver 3 contenant le molybdate et l'acide ascorbique.	-Spectrophotomètre type DR 2000. -Cellules en verre de 25 ml de capacité.	<p>-Mettre en marche le DR2000 en appuyant sur la touche PWER.</p> <p>-Entrer le numéro de programme mémorisé pour le phosphore, presser : 490 READ/ENTER. L'affichage indique : REGLER nm 890.</p> <p>-Tourner : le bouton de réglage de longueur d'onde jusqu'à ce que l'affichage indique : 890 nm.</p> <p>-Presser : READ/ENTER, l'affichage indique : mg/l PO₄³⁻ PV ou mg/l P PV.</p> <p>-Remplir un flacon colorimétrique avec 25 ml d'échantillon.</p> <p>-Ajouter le contenu d'une gélule de réactif phor ver3 au flacon, agiter pour mélanger.</p> <p>-Lorsque le minuteur sonne, presser : SHIFT TIMER. Une période de réaction de 2 minutes</p>

			<p>commence.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Remplir un autre flacon colorimétrique avec 25 ml d'échantillon (le blanc). Le placer dans le puits de mesure, fermer le capot. -Lorsque le minuteur sonne, l'affichage indique mg/l P PV, presser : ZERO. L'affichage indique : ATTENDRE, puis 0,00 mg/l P PV. -Placer l'échantillon préparé dans le puits de mesure et fermer le capot. -Presser : READ/ENTER : l'affichage indique : ATTENDRE. Puis le résultat en mg/l P s'affiche.
Métaux lourds	-Néant.	-Spectrométrie d'absorption atomique.	<ul style="list-style-type: none"> -Allumer l'appareil, appuyer sur la touche ENTREE. -Aller vers la touche ELEMENT SELECT, choisir l'élément à doser en notant son numéro atomique, puis valider par la touche ENTREE. -Appuyer la touche PROGRAMME sur l'écran, choisir la méthode Absorption, puis faire entrer les différents paramètres de travail : courant de la lampe, temps d'intégration... etc. -Mettre la lampe à cathode creuse en position. -Ouvrir les bouteilles

			<p>de gaz, vérifier les débits affichés sur les manomètres.</p> <ul style="list-style-type: none">-Allumer l'appareil en appuyant sur la touche ON.-Appuyer la touche SETUP, elle permet le réglage visuel de la longueur d'onde et l'alignement de la lampe.-Appuyer la touche CONTENU, il apparait sur l'écran un mode qui permet d'effectuer les réglages d'optimisation.-Appuyer la touche RUN, cette touche permet le travail analytique proprement dit (calibration, lecture) dans les conditions fixées lors de la programmation.
--	--	--	---

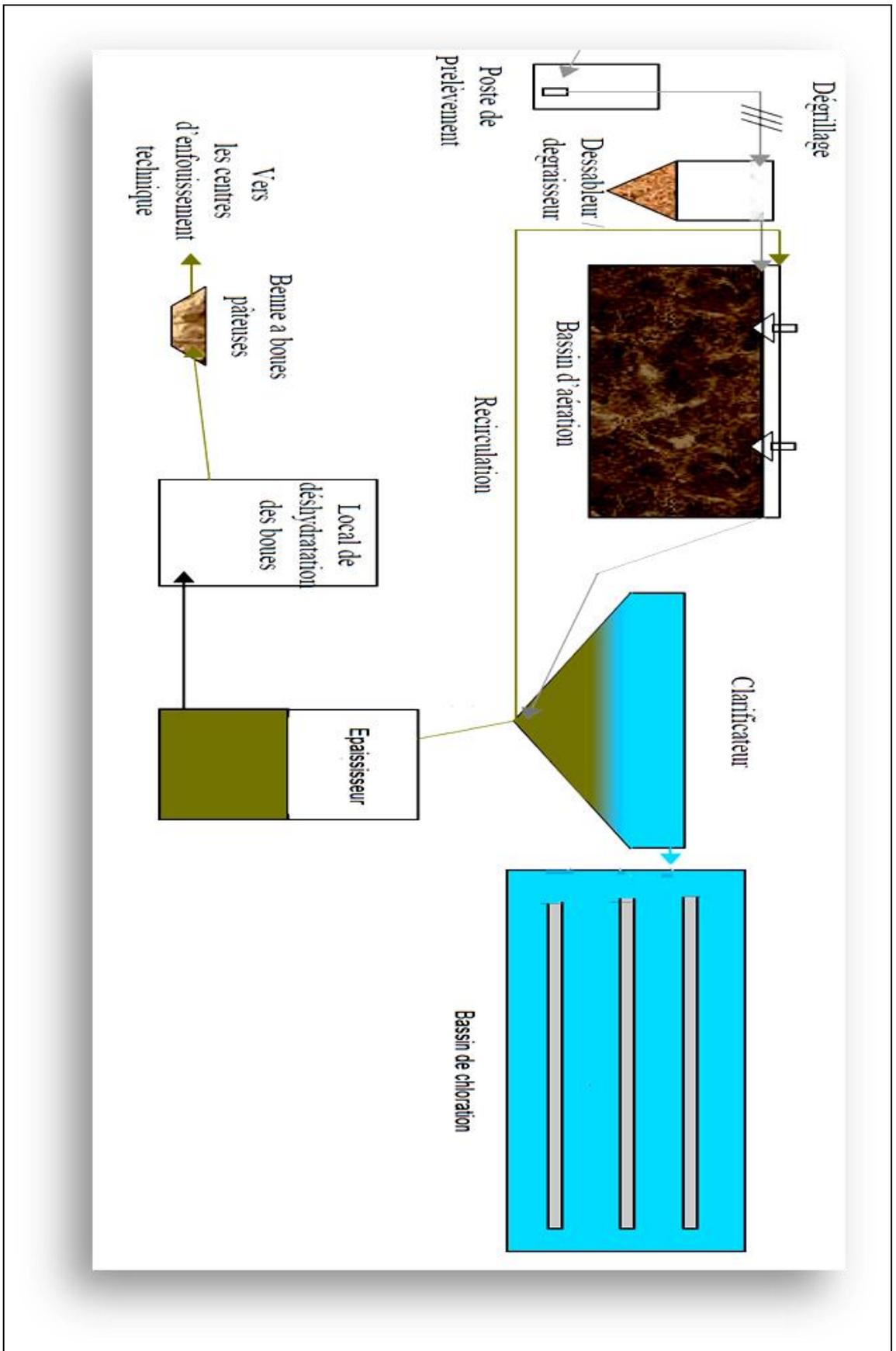


Schéma de fonctionnement de la STEP de Boumerdes

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Jean-Pierre Bechac, Pierre Boutin « Traitement des eaux usées » Paris, Eyrolles, 1984.
- [2]: Degremont, Mémento technique de l'eau, 9 édition lavoisier, Paris, 1989
- [3]: Mechkour Nacer Edine, La réutilisation des eaux usées épurées en irrigation, mémoire de 3ème cycle, France.
- [4]: Alain Damen, guide de traitement des déchets, 2^{ème} édition, Paris année 2002-2003.
- [5]: Gaid Abd El-Kader « Epuration biologique des eaux usées urbaine » tome 1,1984.
- [6]: Slim Zekri, Lamia Ghazel, Taher Aloui, Kamel Djebbi, Les externalités négatives de l'utilisation des eaux usées traitées en agriculture, Séminaire Méditerranéen 2002.
- [7]: Jean Rodier, L'analyse de l'eau, les eaux usées résiduaires, eau de mer, Duno, 2^{ème} édition, Paris, 1996.
- [8]: Brissaud.J.F et A.Faby, l'utilisation des eaux usées épurées en agriculture, Ed. office nationale de l'eau de Montpellier, 1997.
- [9]: Marcsatin, Bechir Selmi, Bourrier Regis, Guide technique de l'assainissement, 2^{ème} édition, Paris 1999.
- [10]: Lyonnais des eaux, chapitre 7, J.M Audic présentation des divers éléments des filières de traitement des eaux usées.
- [11]: Mémento, technique de l'eau, tome 2, degremont Mai 2005.
- [12]: Office national de l'assainissement, système de management environnement ISO14001, manuel environnement-juin 2012.
- [13]: ONDEO, degremont notice d'exploitation station Boumerdes, revu juillet 2001.
- [14]: Djamel Zeriri, Réutilisation des eaux usées traitées de la station d'épuration de Hassi R'Mel.
- [15]: Innovation "le traitement des eaux résiduaires urbaines et industrielles", Tech tendance, étude technologique édition : 1992.
- [16]: Office international de l'eau, 2001 (Google).
- [17]: Mémoire en ligne, différents types de boues et leur traitement, chap 14 (Google).
- [18]: R.Moletta, le traitement des boues des stations d'épuration, document d'information générale diffusion référencée libre (Rédaction 2003).
- [19]: Programme de gestion et protection de l'environnement au Maroc, Mai 2014, coopération Allemande.
- [20]: Perspective de valorisation agricole et énergétique des boues issues de STEP en Algérie. Office national d'assainissement, Oran 25 Mars 2014.
- [21]: www.biogaz-energie-renouvelable.info.

[22]: J. de Hullu, J.I.W. Maassen, P.A van Meel, S. Shazad, J.M.P. Vaessen, L. Bini, J.C Reijenga, "Comparing different biogas upgrading techniques", Eindhoven University of technology, 3 Juillet 2008.

[23]: Thibaut CHASLERIE, technique de bio-conservation : la bio-méthanisation, IUT génie thermique et énergie 2001-2002.

[24]: Qualité du bio-méthane pour l'injection dans le réseau de distribution, Colloque ATEE 12-13 octobre 2010.

[25] : Pierre HERPIN, Vincent DUBOIS, valorisation des boues de la station d'épuration en biogaz, dans le cadre du BEIERE 2004-2005.

[26] : Solagro, EDF & Ademe, 2001. From biogas to energy, an european overview : regulatory, fiscal, economic and political context for development. Toulouse, Solagro.