

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

**Modèle de prévision de la production de biogaz
issu de la station d'épuration de Baraki-Alger**

Réalisé par :

BERKANI Chakib

BIRECHE Merwane

Sous la direction de Monsieur :

Pr BERMAD.A

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2016

Composition du jury

Président

Mr A.LEFKIR

Docteur ENSTP

Promoteur

Mr A.BERMAD

Professeur ENP

Examineurs

Mr H.KHEMISSI

Docteur U. Boumerdes

Mme A.HAMRICHE

Doctorante ENP

Mr M.ZABOT

Doctorant USTHB

ENP 2016

المخلص

تسمح محطات تصفية مياه الصرف بمعالجة المياه المستهلكة في مجال الصناعة او من أصل منزلي.

حسب السياق الحالي لحماية البيئة، تشكل إزالة الحمأة أحد أهم تحديات البلاد.

من جهة أخرى، يوافق ازدياد عدد محطات التصفية ارتفاع كبير في انتاج الحمأة. معالجة هذه الحمأة تشكل فائدة مزدوجة تتمثل في خفض من كمية البقايا وتحويلها الى منبع لطاقة معتبرة. أحد سبل هذا العمل الاستفادة من انتاج الغاز الحيوي الذي سيكون مصدر لطاقة كهربائية أو حرارية.

من خلال هذا العمل، قمنا بتطوير نموذج لتوقعات انتاج الغاز الحيوي بدراسة عوامل اعتبرناها مؤثرة على الإنتاج وذلك باستعمال طريقة الانحدار الخطي والتحليل الى العناصر الأساسية.

كل المعطيات المستعملة موفرة من طرف محطة التصفية ببراقى.

Abstract

A wastewater treatment plant can treat either industrial or urban waste water. In the current context of environmental protection, disposal of sewage sludge is a major issue for our country. The increase of waste water treatment plants in Algeria is accompanied by producing significant quantities of sewage sludge.

The treatment of sludge has the double advantage of reducing their volume while producing a green source of energy.

One way of this valorization is the production of biogas. The latter could be a source of electrical and heat energy.

We have developed our work in predictive models of biogas production based on some parameters that we found dominant in its production, using the multiple regression method and the principal component analysis (PCA).

All data are from the waste water treatment plant of Baraki.

Key words: biogas, wastewater treatment plant, valorization, regression, PCA, sludge.

Résumé

Une station d'épuration permet de traiter les eaux usées qu'elles soient d'origines industrielles ou urbaines.

Dans le contexte actuel de protection de l'environnement, l'élimination des boues d'épuration constitue un des enjeux majeurs pour notre pays. L'accroissement du nombre de STEP en Algérie s'accompagne de production de quantités non négligeables de boues d'épuration.

Le traitement de ces boues présente le double avantage de réduire leur volume tout en produisant une source d'énergie valorisable.

Une des voies de cette valorisation est la production du biogaz. Ce dernier pourrait être une source d'énergie électrique et thermique.

Nous avons dans notre travail élaboré des modèles de prévision de la production du biogaz en fonction de quelques paramètres qu'on a jugé prépondérants dans sa production, en utilisant la méthode de régression multiple ainsi que l'analyse en composante principale(ACP).

Toutes les données sont tirées de la station d'épurations de Baraki.

Les mots clefs : Biogaz, STEP, valorisation, modélisation, régression, ACP, boues.

Dédicaces

A celle qui aura toujours cru en moi, celle qui m'aura soutenu et encouragé de toutes ses forces, celle qui aura fait mon bonheur et ma joie, à celle qui m'aura aimé de tout son cœur, ma mère.

A celui qui m'aura tout appris, celui qui m'aura inculqué des principes, des valeurs morales et humaines, celui à qui je dois l'homme que je suis devenu aujourd'hui, à celui qui aura été un modèle pour moi, mon père.

J'aurais tout partagé avec lui; il aura été à mes côtés dans tous les projets que j'aurais entrepris, il m'aura apporté toute son aide et son soutien, à ce grand frère que personne ne remplacera.

A tous les membres de ma famille, et plus particulièrement à ma grand-mère maternelle qui n'aura pas manqué d'égayer ma vie.

A toutes ces personnes chères à mes yeux que je porterai toujours dans mon cœur : à Fella, ami(e)s de la cellule,

Polytechniciens, CAPistes, Ami(e)s de l'EPST-Tlemcen et de Blida, que je ne saurais oublier.

A mes camarades de l'EPST-T victimes du tragique accident de l'explosion de gaz survenue à Tlemcen ancrées à tout jamais dans ma mémoire et mes pensées.

Merwane,

Dédicaces

A celle que j'aime et que j'aimerai à jamais, celle qui a toujours été présente à mes côtés, cette femme qui m'aura élevé et fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Celle à qui je dois tous mes succès dans la vie, ma mère.

A cet homme qui m'aura toujours tout donné, qui ne m'a jamais privé de rien et qui s'est toujours sacrifié pour sa famille. Je lui en serais éternellement reconnaissant, mon père.

A mon frère et mes sœurs avec qui j'ai vécu les plus beaux moments de ma vie et qui ont toujours su me faire rire et sourire même dans les moments les plus douloureux.

A tous mes amis d'enfance, de l'EPSTT, de l'école nationale polytechnique et tous mes proches et toute personne à qui je tiens.

Chakib

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir ce travail.

Nous adressons également nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Nous souhaitons tout d'abord remercier notre encadreur le professeur **A.BERMAD**, qui a accepté de nous encadrer avec patience durant la réalisation de ce travail de fin d'études. Nous tenons à le remercier aussi pour sa générosité en matière de formation. Ses conseils nous ont été très précieux.

On remercie aussi Monsieur **A.LEFKIR**, Enseignant à l'ENSTP, pour nous avoir apporté une aide précieuse dans l'élaboration de ce mémoire, ainsi que pour ses remarques et ses encouragements tout au long de ces derniers mois.

Nous remercions Monsieur **K.YAHIAOUI**, responsable de la filière de traitement des boues de la STEP de Baraki au sein de l'entreprise SEAAL, de nous avoir aidé à tout au long de la préparation de notre mémoire.

Nous exprimons toute notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger ce travail.

Enfin, un grand remerciement destiné aux enseignants et enseignantes, qui ont contribué à notre formation, depuis le cycle primaire jusqu'au cursus universitaire.

Table des matières

Liste des tableaux.....	
Liste des figures.....	
Liste des abréviations.....	
Introduction générale.....	18
Chapitre I Généralités sur la pollution	20
I. Introduction	20
II. Définition de la pollution des eaux	20
III. Origine et nature des eaux entrant en station d'épuration	20
III.1. Les rejets domestiques	20
III.2. Les rejets industriels	21
III.3. Eaux pluviales.....	21
IV. Types de pollution de l'eau.....	21
IV.1. La pollution physique	21
IV.2. La pollution organique.....	22
IV.3. La pollution chimique	22
IV.4. La pollution microbiologique.....	23
V. Les critères d'évaluation de la pollution	23
V.1. Les paramètres physiques	23
V.2. Les paramètres chimiques.....	25
V.3. Les paramètres biologiques.....	28
VI. Estimation des charges polluantes	30
VII. Les Normes de rejet.....	30
VIII. Conclusion.....	31
Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées	32

I.	Introduction	32
II.	Epuration des eaux	32
II.1.	Prétraitement	32
II.2.	Traitement primaire (Décantation primaire).....	33
II.3.	Traitement secondaire	35
II.4.	Traitement tertiaire	46
III.	Traitement des boues :	47
III.1.	Epaississement	47
III.2.	Stabilisation et hygiénisation	48
III.3.	Déshydratation	51
III.4.	Séchage	51
IV.	Conclusion	52
Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki		53
I.	Introduction	53
II.	Historique de la STEP	53
III.	Présentation de l'environnement de la STEP.....	54
III.1.	Localisation géographique	54
III.2.	L'acheminement des rejets dans la STEP	54
III.3.	Caractéristiques générales	55
III.4.	Descriptif de la filière	55
IV.	Caractéristiques techniques des ouvrages composants la STEP.....	58
IV.1.	Poste de relevage n°1 (PR1)	58
IV.2.	Poste de relevage n°2 (PR2)	58
IV.3.	Les prétraitements	59
IV.4.	Le traitement primaire.....	60
IV.5.	le traitement secondaire.....	60
IV.6.	Traitement complémentaires.....	61

IV.7. Traitement des boues	62
V. Conclusion.....	66
Chapitre IV Valorisation énergétique des boues.....	67
I. Introduction.....	67
II. Le biogaz.....	67
III. Propriétés du biogaz	67
IV. Les équivalences énergétiques du biogaz.....	68
IV.1. Le PCI.....	68
IV.2. Le PCS	68
V. Valorisation du biogaz	69
V.1. Production de chaleur	69
V.2. La cogénération.....	69
V.3. Injection dans le réseau de gaz naturel	70
V.4. Biocarburant.....	70
VI. Conditions de valorisation du biogaz	70
VII. Avantages et Inconvénients.....	71
VIII. Conclusion.....	71
Chapitre V Méthodes de calcul pour l'élaboration des modèles de prévision de la production de biogaz	72
I. Introduction.....	72
II. L'analyse en composantes principales.....	72
II.1. Introduction.....	72
II.2. Analyse de données	72
II.3. Définitions	73
II.4. Objectifs.....	75
II.5. Domaine d'application.....	76
II.6. Cadre	76

II.7.	Procédé d'application de l'ACP	76
II.8.	Résultats d'application.....	77
II.9.	Analyse des résultats.....	77
II.10.	Représentation graphique.....	78
II.11.	Conclusion.....	79
III.	Régression multiple	80
III.1.	Introduction.....	80
III.2.	Forme générale du modèle.....	80
III.3.	Objectifs de la régression multiple	80
III.4.	Moindres carrés ordinaires.....	81
	Principe	81
III.5.	Démarche de la régression multiple.....	81
	-Notation matricielle.....	83
	-Qualité de la régression	83
IV.	Validation du modèle de régression, étude des résidus	85
V.	Conclusion.....	85
Chapitre VI Elaboration d'un modèle de prévision pour la production du biogaz		86
I.	Introduction	86
II.	Choix des paramètres de pollution à prendre en considération dans l'établissement du modèle de prévision de la production de Biogaz	86
II.1.	Evolution des paramètres de pollution dans le temps.....	86
II.2.	Choix des paramètres pour l'élaboration du modèle pour la production du biogaz ⁹⁴	
II.3.	Détection des mesures aberrantes	98
III.	Les modèles de prévisions de la production du biogaz	100
III.1.	Régression multiple	100
III.2.	Application de l'ACP pour modéliser la production du biogaz.....	103

IV. Prévion de la production de biogaz en prenant en considération les boues primaires	111
V. Consommation électrique de la STEP de BARAKI	114
VI. Valorisation électrique du biogaz	114
VII. Conclusion :	115
Conclusion générale.....	116
Bibliographie.....	117

Liste des tableaux

Tableau I-1 Minéralisation de l'eau en fonction de la conductivité.....	24
Tableau I-2 Caractéristiques du rapport de la biodégradabilité K.....	26
Tableau I-3 Effets de certains métaux sur la santé	28
Tableau I-4 Les maladies liées aux différents micro-organismes [12].....	30
Tableau I-5 Les charges polluantes dans les différents systèmes.....	30
Tableau I-6 Les normes de rejet en Algérie	31
Tableau II-1 Avantages et inconvénients du traitement physico-chimique [19].....	36
Tableau II-2 Les différents systèmes d'épuration.....	38
Tableau II-3 Concentrations de quelques ions métalliques qui réduisent l'efficacité du traitement	40
Tableau II-4 Composition des boues de station d'épuration	50
Tableau III-1 Les villes raccordées et les taux de raccordement pour les collecteurs principaux	55
Tableau III-2 Charges polluantes de l'effluent à l'entrée - sortie de la station de Baraki	55
Tableau IV-1 Composition du Biogaz.....	67
Tableau V-1 Différentes notations utilisées en régression	83
Tableau VI-1 Tests de KMO et Batlett.....	95
Tableau VI-2 Matrice des composantes principales:.....	95
Tableau VI-3 Résultat du test pour l'élimination des valeurs aberrantes	99
Tableau VI-12 Statistiques descriptives des données de calage.....	100
Tableau VI-13 Critère de calage.....	101
Tableau VI-14 Critère de validation.....	102
Tableau VI-4 Matrice de corrélation entre variables et facteurs	103
Tableau VI-5 Valeurs propres des 6 axes.....	104
Tableau VI-6 Matrice A	105
Tableau VI-7 Matrice inverse de la matrice A	106
Tableau VI-8 Matrice des vecteurs propres.....	106
Tableau VI-9 Les 4 axes de la matrice des vecteurs propres	107
Tableau VI-10 Critères de calage	108
Tableau VI-11 Critères de validation	109
Tableau VI-15 Mélange optimum des boues mixtes	113

Liste des figures

Figure II-1 Décanteur circulaire	34
Figure II-2 Décanteur rectangulaire	35
Figure II-3 Synoptique d'une boue activée	37
Figure II-4 Bassin d'aération.....	37
Figure II-5 Schéma de principe de l'épuration par boues activée	41
Figure II-6 Types d'aération	42
Figure II-7 Lit bactérien	43
Figure II-8 Synoptique d'une station comportant un disque biologique	44
Figure II-9 Etang d'oxydation.....	45
Figure II-10 Lagunage	46
Figure II-11 Schéma récapitulatif des réactions biochimiques de la digestion anaérobie [27].....	49
Figure III-1 La STEP de Baraki (image satellitaire non traitée)	53
Figure III-2 Localisation de la STEP de Baraki (image satellitaire non traitée).....	54
Figure III-3 Synoptique de la station d'épuration.....	57
Figure III-4 Schéma du poste de relevage N°1	58
Figure III-5 Schéma du poste de relevage N°2	58
Figure III-6 Les bassins d'aération.....	61
Figure III-7 (a) Vue d'ensembl (b) Vis de recirculation des boues	61
Figure III-8 Principe de digestion	62
Figure III-9 Digesteurs primaires	63
Figure III-10 Digesteur secondaire	63
Figure III-11 Gazomètre.....	64
Figure III-12 Bac de conditionnement	64
Figure III-13 Table d'égouttage	65
Figure III-14 Filtre à bande	66
Figure IV-1 Exemple de rendement d'un moteur à gaz	70
Figure VI-1 Evolution journalière du débit d'entrée à la STEP.....	86
Figure VI-2 Evolution journalière du PH de l'eau brute.....	87
Figure VI-3 Evolution journalière du PH de l'eau épurée	87
Figure VI-4 Evolution journalière de la température de l'eau à l'entrée	88
Figure VI-5 Evolution journalière de la température de l'eau épurée.....	88

Figure VI-6	Evolution journalière de la conductivité de l'eau à l'entrée de la STEP	89
Figure VI-7	Evolution journalière de la conductivité de l'eau à la sortie de la STEP ...	89
Figure VI-8	Evolution journalière de la concentration des MES à l'entrée de la STEP	90
Figure VI-9	Evolution journalière de la concentration des MES à la sortie de la STEP	90
Figure VI-10	Evolution de la concentration de la DBO5 à l'entrée de la STEP.....	91
Figure VI-11	Evolution de la concentration de la DBO5 à la sortie de la STEP	91
Figure VI-12	Evolution de la concentration de la DCO à l'entrée de la STEP.....	92
Figure VI-13	Evolution de la concentration de la DCO à la sortie de la STEP	92
Figure VI-14	Evolution journalière du débit des boues en excès de la STEP.....	93
Figure VI-15	Evolution journalière du débit des boues épaissies de la STEP	93
Figure VI-16	Evolution journalière du débit des boues digérées de la STEP	94
Figure VI-17	Cercle de corrélation entre les MES, DCO et DBO5	96
Figure VI-18	Cercle de corrélation entre les différents paramètres (Selon les axes F1 et F2).....	97
Figure VI-19	Cercle de corrélation entre les différents paramètres (Selon les axes F1 et F3).....	97
Figure VI-25	Biogaz simulé en fonction du biogaz mesuré (calage)	101
Figure VI-26	Biogaz simulé en fonction du biogaz mesuré (validation)	102
Figure VI-22	Graphique des valeurs propres.....	104
Figure VI-23	Biogaz simulé en fonction du biogaz mesuré (Calage)	109
Figure VI-24	Biogaz simulé en fonction du biogaz mesuré (validation)	110
Figure VI-27	Evolution de la production de biogaz durant la période 2012-2015.....	112
Figure VI-28	Evolution de la production de biogaz durant l'année 2016.....	112
Figure VI-29	Comparaison de la moyenne de production du biogaz	113
Figure VI-30	Comparaison de la production max du biogaz	113
Figure VI-31	Consommation électrique moyenne de la STEP	114
Figure VI-32	Production de biogaz et consommation électrique	115

Liste des abréviations

<i>ACP</i>	<i>Analyse en Composante Principale</i>
<i>AGV</i>	<i>Acide Gras Volatile</i>
<i>CE</i>	<i>Conductivité de l'Eau</i>
<i>CM</i>	<i>Charge Massique</i>
<i>CP</i>	<i>Composante Principale</i>
<i>CV</i>	<i>Charge Volumique</i>
<i>DBO5</i>	<i>Demande Biologique en Oxygène</i>
<i>DCO</i>	<i>Demande Chimique en Oxygène</i>
<i>DRE</i>	<i>Direction des Ressources en Eaux</i>
<i>EH</i>	<i>Equivalent Habitant</i>
<i>GNV</i>	<i>Gaz naturel Véhicule</i>
<i>Im</i>	<i>Indice de Mohlman</i>
<i>KMO</i>	<i>Kaiser-Meyer-Olkin</i>
<i>KW</i>	<i>kilos Watt</i>
<i>KWH</i>	<i>kilos Watt heure</i>
<i>MD</i>	<i>Matière Décantable</i>
<i>MES</i>	<i>Matière en suspension</i>
<i>MMS</i>	<i>Matière Minérale Sèche</i>
<i>MND</i>	<i>Matière Non Décantable</i>
<i>MO</i>	<i>Matière oxydable</i>
<i>MS</i>	<i>Matière sèche</i>
<i>MVS</i>	<i>Matière Volatile Sèche</i>

<i>OMS</i>	<i>Organisation Mondiale de la Santé</i>
<i>PCI</i>	<i>Pouvoir Calorifique Inferieur</i>
<i>PCS</i>	<i>Pouvoir Calorifique Supérieur</i>
<i>PH</i>	<i>potentiel Hydrogène</i>
<i>PR1</i>	<i>Poste de Relevage N°1</i>
<i>PR2</i>	<i>Poste de Relevage N°2</i>
<i>SCE</i>	<i>Somme des Carrés des Erreurs</i>
<i>SCR</i>	<i>Somme des Carrés de la Régression</i>
<i>SCT</i>	<i>Somme des Carrés Totale</i>
<i>SEAAL</i>	<i>Société des eaux et de l'assainissement d'Alger</i>
<i>STEP</i>	<i>Station d'Epuration</i>
<i>TAC</i>	<i>Titre Alcalimétrique Complet</i>
<i>UV</i>	<i>Ultras Violet</i>

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'Algérie est actuellement en face de transition énergétique, il est alors devenu nécessaire de s'intéresser aux énergies renouvelables. De plus l'approvisionnement en combustible fossile (pétrole, gaz, naturel,...) reste l'un des problèmes majeurs des régions enclavées et plus particulièrement les régions montagneuses et celles du sud, ce qui a engendré une consommation accrue en bois, une dégradation poussée des forêts, une érosion des sols et une détérioration du climat et de l'environnement.

Pour répondre aux besoins en énergie de notre pays, afin d'assurer sa pérennité, réduire sensiblement la pollution locale et l'effet de serre, pour la préservation de l'environnement ; la prospection et le développement de nouvelles sources d'énergie ont été entrepris et notamment l'énergie issue de la biomasse et plus précisément le biogaz.

Cette forme d'énergie renouvelable largement disponible, peu coûteuse et non polluante est utilisée pour compléter l'énergie fossile non renouvelable.

La valorisation des déchets organiques et principalement les boues d'une station d'épuration des eaux usées urbaines pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique, à travers une autonomie énergétique et un développement agricole durable des zones rurales [1].

De nombreuses stations d'épurations ont été réalisées en Algérie, mais rares sont celles encore fonctionnelles en raison des problèmes de suivi, d'entretien ou d'inadaptation [2].

Les stations d'épurations urbaines ont pour rôle d'éliminer la pollution contenue dans les effluents domestiques et industriels avant leur rejet dans le milieu naturel. Si l'eau, en fin de traitement est épurée, la pollution initiale en revanche se trouve stockée et concentrée dans les boues issues des diverses étapes de traitement des eaux [2].

La production d'énergie à partir de la matière organique de diverses origines (matières végétales, déjections animales, sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, boues des stations d'épuration, ordures ménagères,...) au moyen de procédés de fermentation anaérobie dans des digesteurs appropriés (biométhanisation), permettra une meilleure gestion des déchets, une préservation de l'environnement et un développement ainsi qu'une diversification des ressources énergétiques (énergies alternatives).

Par ailleurs cette matière organique, au niveau local, permettra de produire de l'énergie à moindre coût pour la cuisson, le chauffage et l'éclairage.

Le biogaz reste une énergie méconnue en Algérie et même si elle ne fait pas partie de nos traditions socioculturelles et économiques, elle doit représenter la meilleure solution pour les problèmes déjà évoqués [1].

Le travail exposé dans ce mémoire a pour objectif de contribuer à la production de biogaz à partir des boues de la station d'épuration des eaux usées domestiques de Baraki

INTRODUCTION GENERALE

à Alger, à l'élaboration de modèles de prévisions de la production journalière de biogaz, et de la valorisation de ce dernier.

Partant de là, la démarche adoptée pour mener à bien ce travail est la suivante :

Nous avons commencé ce travail par une introduction générale où on a mis l'accent sur l'importance qu'on doit accorder au sujet de l'épuration des eaux usées ainsi qu'aux énergies renouvelables, à la protection du milieu récepteur des effets désastreux que peut procurer la pollution de cette ressource.

Le premier chapitre est intitulé « généralités sur la pollution des eaux » où nous avons identifié les différents polluants de l'eau.

Nous avons expliqué dans le deuxième chapitre les étapes de traitement des eaux usées.

Le troisième chapitre a été consacré à présentation et au fonctionnement de la station d'épuration de BARAKI.

Dans le quatrième chapitre nous avons brièvement introduit la valorisation énergétique des boues issues de la station d'épuration.

Le chapitre cinq qui s'intitule « Méthodes de calcul pour l'élaboration du modèle de prévision de la production de biogaz » est un rappel théorique des méthodes utilisés et qui sont l'analyse en composantes principales ainsi que la régression multiple.

L'élaboration de modèles de prévisions après avoir choisis les paramètres prépondérants et éliminé les valeurs douteuses a fait l'objet du sixième et dernier chapitre ainsi que la valorisation énergétique de la quantité de biogaz produite.

Enfin, une conclusion générale, dans laquelle nous avons fait valoir notre travail, tout en précisant la méthode suivie et l'objectif principal de cette étude.

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

Chapitre I Généralités sur la pollution

I. Introduction

Plusieurs sources de pollution menacent l'eau, qui est une source de vie. Ces dernières peuvent être domestiques, agricoles ou industrielles. En effet, les déséquilibres engendrés par ces types de pollution sont multiples, complexes et pas toujours aussi visibles. Les effets néfastes sur le milieu naturel engendrent des modifications dans le milieu récepteur, et nuisent à l'écosystème, d'où la nécessité de leur épuration.

La conception et le dimensionnement d'une station d'épuration prend en compte les charges polluantes et la charge hydraulique à traiter. Dans ce cadre, nous donnons dans ce chapitre, un aperçu sur la pollution des eaux, en tenant compte de l'origine, de la classification et des paramètres d'évaluation de cette pollution.

II. Définition de la pollution des eaux

La pollution des eaux est définie comme étant la dégradation de celle-ci par modification de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques; par des déversements, rejets, dépôts de corps étrangers ou de matières indésirables telles que les microorganismes, les produits toxiques, les déchets industriels etc...

III. Origine et nature des eaux entrant en station d'épuration

III.1. Les rejets domestiques

On distingue deux catégories d'eaux usées domestiques :

Les eaux ménagères qui ont pour origine les salles de bain et les cuisines, elles contiennent des solvants, des graisses et des débris organiques.

Les eaux vannes s'appliquent aux rejets des toilettes, elles sont chargées de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux. [3]

La composition des eaux domestiques est à peu près la même pour toutes les habitations, la qualité et la quantité du rejet urbain sont indexés sur la notion de l'« équivalent habitant ». Néanmoins, une collectivité importante consomme et donc rejette plus d'eau domestique que les petites collectivités. Équivalent-habitant ou en abrégé « EH » : est l'unité de charge polluante représentant la charge organique biodégradable, on estime que la pollution journalière produite par 1 EH consommant 80 à 250 l/j est évaluée comme suit : 130 g de DCO, 60 g de matières en suspension, 60g de matières organiques (DBO5), 15 g de matières azotées, 4 g de phosphore. [4]

Mais pour l'Algérie, la valeur de l'équivalent habitant n'est pas encore déterminée, de ce fait pour concevoir une station d'épuration d'eaux usées, on se base sur les normes européennes.

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

III.2. Les rejets industriels

Cette définition concerne les rejets des usines, mais aussi les rejets d'activités artisanales ou commerciales.

Les caractéristiques des eaux industrielles varient en fonction de l'industrie qui les produit, elles sont très différentes des eaux usées domestiques. En plus des matières organiques azotées ou phosphorées, elles contiennent également des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques, des hydrocarbures.

Ces eaux sont chargées de matières minérales ou organiques qui peuvent être en solution ou en suspension, et dont certaines peuvent avoir un caractère toxique.

Généralement, les flux de pollution sont connus si les fabrications sont régulières, mais si les industries travaillent par campagnes spécifiques (comme en chimie de synthèse, parachimie, pharmacie), l'analyse des rejets s'avère difficile, ceux-ci évoluent constamment.

Il est à noter que les usages industriels ont le choix entre trois possibilités :

- Soit déverser leurs effluents directement dans le réseau d'égouts si l'autorisation leur est donnée par la commune ;
- Soit traiter entièrement leurs effluents avant de les rejeter directement dans le milieu naturel récepteur ;
- Soit effectuer un prétraitement en usine avant le rejet dans le réseau d'égouts [3].

III.3. Eaux pluviales

Ce sont les eaux de lavages de voiries, les eaux de pluies des toits, parkings, les eaux de drainages qui ne se sont pas infiltrées dans la partie superficielles du sol.

Elles peuvent être particulièrement polluées, notamment lorsqu'elles lessivent les sols et les surfaces imperméabilisées. De plus elles sont chargées en matières en suspension, surtout lors de l'érosion des sols pentus, et peuvent contenir des métaux lourds et des toxiques : plomb, zinc, hydrocarbures...etc.

Ces eaux pluviales deviennent un enjeu de plus en plus important vis-à-vis de la protection des rivières et doivent donc être traitées.

IV. Types de pollution de l'eau

On peut classer qualitativement la pollution de l'eau en plusieurs catégories en fonction de sa nature, de sa nocivité et de ces effets. On distingue les types de pollution suivants

IV.1. La pollution physique

Elle provient de l'eau utilisée dans le refroidissement des centrales thermiques et nucléaires. L'eau prélevée dans le milieu naturel va être rejetée par ces structures à une température plus élevée. Ceci va provoquer une élévation de la température.

Un autre facteur de la pollution physique de l'eau serait celui lié aux risques de pollution provenant parfois des hôpitaux. On peut aussi constater une pollution de l'eau par des matières en suspension provenant des mines ou des cimenteries pouvant ainsi

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

modifier la turbidité de l'eau.

Cette pollution peut entraîner aussi une baisse de la teneur en oxygène surtout si le milieu est chargé en matières organiques, une augmentation de la toxicité de certaines substances ainsi la toxicité du Cyanure de potassium est multipliée par deux pour un accroissement de 10°C et une multiplication des agents pathogènes.

Par ailleurs, les conséquences que peut engendrer cette pollution sur les ouvrages de la STEP sont :

- Ensablement qui est un obstacle à la pénétration de la lumière ;
- Sédimentation dans les ouvrages (bassin d'aération) ;
- Colmatage des conduites.

IV.2. La pollution organique

La pollution organique constitue la partie la plus importante, et comprend essentiellement des composés biodégradables et se présentent aussi bien en suspension (particules solides) qu'en solution dans l'eau sont appelées à devenir des polluants lorsqu'elles sont déversées en quantités massives ou de façon répétée dans les espaces limités. Ces dernières sont estimées par la quantité d'oxygène nécessaire à leur dégradation. La concentration de la pollution organique est exprimée par les mesures de la DBO₅ et la DCO.

Cette pollution est due au rejet d'eaux usagées ou d'eaux riches en déchets provenant des industries agro-alimentaires. Ces matières vont être dégradées par des bactéries qui, pour ce faire, vont consommer beaucoup d'oxygène. Ainsi, une surconsommation d'oxygène peut entraîner la mort de la vie aquatique.

IV.3. La pollution chimique

La pollution chimique de l'eau devient de nos jours une préoccupation de la santé publique, qui prend des formes multiples. Certaines formes de pollution chimique échappent souvent aux méthodes ordinaires de traitement de l'eau et posent par conséquent des problèmes complexes de pollution, tant au niveau des eaux de surfaces, qu'au niveau des nappes souterraines. Elle peut être provoquée par le rejet de métaux lourds (cadmium, mercure, plomb ...) ou d'autres substances indésirables (nitrates, phosphates), par l'industrie, l'agriculture ou les décharges de déchets domestiques ou industriels [5].

Certaines substances toxiques, déversées dans un cours d'eau, peuvent avoir des conséquences immédiates sur les êtres vivants. D'autres peuvent pénétrer dans les chaînes alimentaires. Les espèces qui se trouvent à l'extrémité supérieure de la chaîne alimentaire, y compris l'homme, sont ainsi exposées à des teneurs en substances toxiques beaucoup plus élevées que celles qui se trouvent au départ dans l'eau.

Les polluants chimiques sont classés à l'heure actuelle en quatre catégories :

- Les substances chimiques dites « indésirables », comme le nitrate, le phosphate ;

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

- Les pesticides et produits apparents ;
- Les substances toxiques, comme, le cadmium, le mercure, le plomb ;
- Les détergents et les colorants.

IV.4. La pollution microbiologique

La pollution microbiologique des eaux est le terme utilisé pour désigner la présence de bactéries et virus. Les microorganismes à l'origine de contamination des eaux, proviennent d'hommes ou d'animaux qui hébergent dans leur appareil digestif, une quantité considérable de bactéries, voire de virus, cette pollution est liée aux agents provoquant des maladies telle que la tuberculose ou le choléra. Les foyers domestiques, les hôpitaux, les élevages et certaines industries agro- alimentaires sont à l'origine des éléments dangereux pour la santé évoqués précédemment.

V. Les critères d'évaluation de la pollution

Le degré de pollution d'une eau est caractérisé par différents paramètres, qui serviront à mesurer les performances de l'épuration d'une station. On distingue

V.1. Les paramètres physiques

V.1.a. La température

Il est indispensable de connaître la température exacte de l'eau, car elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz (en particulier O₂) dans l'eau. La température agit aussi comme facteur physiologique sur le métabolisme de croissance des microorganismes vivants dans l'eau. En effet la température optimale pour l'activité des micro-organismes, épurateurs est comprise entre 20°- 30°c, au-delà, la vitesse de réaction décroît rapidement et le floc bactérien se trouve rapidement épuisé en oxygène [6].

V.1.b. L'odeur

L'eau d'égout fraîche à une odeur fade qui n'est pas désagréable. Une odeur nauséabonde indique une eau qui commence à fermenter par stagnation soit dans le réseau d'égout soit avant le rejet.

V.1.c. La couleur

Dans les eaux usées brutes, la couleur est due à la présence de matières organiques dissoutes ou colloïdes par des composés chimiques solubles qui sont colorés. Elle est normalement grisâtre. La couleur noire indique une décomposition partielle des matières contenues dans les eaux usées, tandis que les autres teintes sont d'origine industrielle. Elle est déterminée à l'aide d'un comparateur optique.

V.1.d. La turbidité

Elle caractérise le degré de non transparence de l'eau, elle traduit la présence des matières en suspension (MES).

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

V.1.e. La conductivité

Elle permet de connaître le degré de minéralisation des eaux. La conductivité mesure la concentration des sels ioniques et nous informe sur le degré de salinité de l'eau. La conductivité d'une eau usée dépend essentiellement de la qualité de l'eau potable utilisée et des activités industrielles de la population. Le tableau suivant nous renseigne sur la minéralisation de l'eau en fonction de la conductivité [7].

Tableau I-1 Minéralisation de l'eau en fonction de la conductivité

Conductivité	Appréciation
Conductivité < 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation très faible
100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CE < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation faible
200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CE < 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation moyenne accentuée
333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CE < 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation moyenne
666 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < CE < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation importante
Conductivité > 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation excessive

V.1.f. Les matières en suspension (MES)

Théoriquement, ce sont les matières qui ne sont ni solubilisées, ni à l'état colloïdale. Les matières en suspension comportent des matières organiques et des matières minérales.

L'analyse des MES consiste à faire passer sur une membrane filtrante, préalablement pesée P1, une quantité connue d'effluent à analyser. Après passage à l'étuve à 110°C pendant 24 heures, la membrane est à nouveau pesée P2, la différence entre P2 et P1 représentera la quantité de matières retenues sur la membrane filtrante, ce sont les MES exprimées en (mg/L) [8].

V.1.g. Les matières volatiles en suspension (MVS)

C'est la fraction organique des MES. On les dit «volatiles» car elles sont mesurées en volatilisant les MES dans un four pendant 2 heures à 525 degrés C. Elles constituent environ 70 à 80 % des MES [8].

V.1.h. Les matières minérales en suspension (MMS)

Elles proviennent principalement des effluents industriels. C'est la différence entre les matières en suspension et les matières volatiles. Elles représentent donc le résidu de la calcination, et correspond à la présence de sels, silice, toutes les matières structurées autour du silicium, la poussière par exemple on y retrouve aussi les métaux lourds, l'ammoniac, les nitrates, les phosphates et...etc [8].

V.1.i. Les matières décantables (MD) et non décantables (MND)

On distingue les fractions qui décantent en un temps donné (2heures) suivant des conditions opératoires particulières (utilisation du cône Imhoff ou Coin).

Les matières non décantables sont celles qui restent dans le surnageant et qui vont donc

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

être dirigées vers le procédé de traitement biologique ou chimique [8].

V.1.j. Les huiles et les graisses

Les huiles et les graisses que l'on peut trouver dans l'eau sont très souvent sous forme d'émulsions ou saponifiées sous l'action de produits chimiques, de détergents, etc....

Il est clair que la présence de graisses et d'huiles constitue une gêne considérable pour le fonctionnement des stations d'épuration des eaux.

Indépendamment de l'origine domestique, une partie de ces produits peut provenir de rejets intempestifs qu'il peut être utile de dépister dans certains secteurs de collecte des eaux usées à savoir le centre de réparation des engins et celui de lavage des voitures... etc.

V.2. Les paramètres chimiques

V.2.a. Le pH

C'est le potentiel hydrogène qui indique la concentration en H^+ présent dans l'influent. Pour le bon fonctionnement de la station d'épuration le contrôle de ce paramètre est très important. Le pH des eaux usées urbaines seules est généralement près de la neutralité, entre 7 à 7,5 environ. Un pH différent est l'indice d'une pollution industrielle.

La valeur du pH influe la croissance des microorganismes présents dans l'eau, la plupart des bactéries par exemple peuvent croître dans une gamme de pH comprise entre 5 et 9, l'optimum étant situé entre 6,5 et 8,5. Des valeurs inférieures à 5 ou supérieures à 9 affectent la survie des microorganismes aquatiques selon l'OMS [8].

V.2.b. La demande biologique en oxygène DBO₅

L'absorption d'oxygène due au déversement d'eau usée dans un cours d'eau est fonction de la concentration de matière biodégradable qu'elle contient. D'où la notion de demande biochimique d'oxygène de cette eau (DBO). On l'exprime en milligramme d'oxygène par litre d'eau.

La DBO est la consommation en oxygène des micro-organismes présents dans le milieu en essai à 20°C et à l'obscurité pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon; temps qui assure l'oxydation biologique des matières organiques carbonées. L'épuration biologique aérobie complète d'une eau usée exige en fait, un temps de 21 jours (DBO 21 dit ultime trop longue à mesurer, remplacée par convention par la DBO₅ qui constitue une mesure semi- quantitative, internationalement admise) nécessaire pour l'oxydation des composés azotés biodégradables, ou de 28 jours sinon 35 jours, qui représentent le temps de dégradation de certaines familles d'hydrocarbures. La connaissance de cette valeur permet d'évaluer la charge polluante contenue dans l'eau usée [9].

V.2.c. La demande chimique en oxygène DCO

La DCO constitue un autre moyen de mesure du degré polluant des eaux usées. Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation par voie chimique des matières organiques et minérales oxydables contenue dans l'eau. Certaines matières

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

organiques sont très difficilement biodégradables par les micro-organismes et pour oxyder ces matières il faut donc faire appel à un oxydant chimique fort (solution de dichromate de potassium en milieu sulfurique). La DCO s'exprime aussi en milligrammes d'oxygène par litre [9].

V.2.d. La biodégradabilité

Le choix d'un procédé d'épuration est basé essentiellement sur la biodégradabilité de l'effluent à traiter, c'est-à-dire son aptitude à être décomposé par les micro-organismes, elle est exprimée par le coefficient K qui est défini par le rapport DCO/DBO5. Il représente la fraction de la DCO qui est biodégradable.

Le tableau ci-dessous, nous renseigne sur le mode de traitement à adopter en fonction du rapport DCO/DBO5.

Tableau I-2 Caractéristiques du rapport de la biodégradabilité K

Valeur de K	Caractère de l'effluent
$1 < K < 2$	Facilement biodégradable ↔ Traitement biologique (Concerne un effluent urbain)
$2 < K < 3$	Traitement biologique avec adaptation de la souche microbienne.
$K > 3$	Traitement physico-chimique, la matière organique pratiquement non biodégradable (Concerne un effluent industriel).

V.2.e. Les nutriments

Ce sont des éléments chimiques tels que l'azote et le phosphore. Ce sont des constituants essentiels de la matière vivante et leur présence est nécessaire pour assurer le traitement par voie biologique des effluents urbains.

V.2.f. Les matières azotées

Les activités industrielles, peuvent être à l'origine des rejets plus ou moins riches en azote (élément nutritif) issu des fabrications d'engrais, des cokeries, et des industries chimiques et agroalimentaires. Ce paramètre est souvent responsable de la prolifération des algues et des végétaux aquatiques dans les étendues d'eau. L'azote peut se présenter sous plusieurs formes dans l'eau usée. On distingue :

- **l'azote organique** ou l'azote se retrouve dans des molécules avec de l'hydrogène, du carbone, et du phosphore, il comprend essentiellement des composés du métabolisme protéique comme l'urée, l'acide urique, la créatinine, ainsi que des acides aminés peptides et protéines en plus faible quantité ;

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

- **l'azote ammoniacal** ou l'azote est sous forme d'ammoniac dissous dans l'eau (NH_3) ou sous forme d'ion ammoniacal (NH_4^+) ;
- **l'azote nitreux (NO^-2)** : provient d'une oxydation incomplète de l'azote ammoniacal ou par une réduction des nitrates par dénitrification. Les nitrites sont instables et sont rapidement transformés en nitrates ;
- **les ions nitrate (NO^-3)** : qui sont une forme stable de l'azote dans la nature est produit par une nitrification de l'azote ammoniacal. Il joue un rôle important dans le développement des algues et participe au phénomène d'eutrophisation des milieux aquatiques. L'ensemble des formes d'azote est appelé Azote global (NGL).
On mesure les deux premières formes par une réaction colorimétrique (la méthode Kjeldahl d'où le nom « d'azote Kjeldahl »).
Dans les eaux, l'azote se trouve principalement sous forme ammoniacale. Les concentrations des formes oxydées de l'azote sont faibles [10].

V.2.g. Les Composés phosphorés

Le phosphore a pour origine le métabolisme humain et les détergents et provient aussi des industries du traitement de surfaces des métaux, les laveries industrielles des fabrications, d'engrais agroalimentaire.

Comme l'azote, le phosphore est un élément nutritif, il est à l'origine du phénomène d'eutrophisation c'est-à-dire la prolifération excessive d'algues et de plancton dans les milieux aquatiques.

Le phosphore est présent dans les EU sous différentes formes :

- Le phosphore organique élément constitutif de biomolécules comme les phosphoprotéines ;
- Le phosphore minéral, dérivé de l'acide phosphorique comme les ortho-phosphates (PO_4^3 , H_2PO_4^- , HPO_4^{-2}), isolés soit sous forme d'ions phosphates condensés ou sous forme d'ions phosphatés condensés avec des molécules organiques. ou condensé comme les poly phosphates sont utilisés comme agents de peptisation, d'émulsification, de dispersion, d'inhibition...

Ces poly phosphates sont :

- Linéaires (pyrophosphates) ou cyclique (méta phosphates).

La somme de ces diverses formes constitue le phosphore total, dont chaque forme peut être mesurée indépendamment des autres par spectrométrie [10].

V.2.h. Les matières oxydables

Les matières oxydables correspondent à une moyenne pondérale de la DCO et de la DBO5. Elles sont mesurées après une décantation de 2h et sont données par la formule suivante [11] :

$$\text{MO} = (2\text{DBO}_5 + \text{DCO}) / 3$$

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

V.2.i. Les métaux lourds

La présence de certains métaux à faible concentration est bénéfique (cas des oligo-éléments) ; cependant, à concentration un peu plus élevée, ils peuvent devenir toxiques. C'est ainsi qu'il est nécessaire de procéder aux analyses chimiques des eaux résiduaires afin de déterminer la présence de ces métaux provenant essentiellement des rejets industrielles.

Les métaux lourds généralement mesurés durant les campagnes d'analyses sont (plomb, aluminium, cadmium, cuivre, chrome, arsenic...).

Le tableau ci-dessous, nous renseigne sur les effets de certains métaux sur la santé [12].

Tableau I-3 Effets de certains métaux sur la santé

Particules	Toxicité
Plomb	Troubles du système nerveux, affection du foie et des reins
Cadmium	Affection respiratoires, troubles rénaux
Mercure	Troubles du système nerveux (mémoire, fonctions sensorielles de coordination)
Nickel	Maladies respiratoires, asthme, malformation congénitales, cancers
Chrome	Cancers, troubles dermatologiques, anémie

V.3. Les paramètres biologiques

Les eaux résiduaires urbaines contiennent de nombreux germes (helminthes, protozoaires, bactéries, virus) dont certains sont pathogènes. La présence de coliformes et de streptocoques témoigne d'une contamination fécale de ces eaux qu'il est impératif d'épurer pour préserver le milieu naturel.

V.3.a. Les virus

Les virus se trouvent dans les eaux résiduaires à des concentrations de l'ordre de milliers d'unités infectieuses par millilitre d'eau. Un virus est une entité biologique rudimentaire de très petite taille -1/10 de micron, qui infecte une cellule hôte. Incapable de se répliquer lui-même, il utilise, pour la synthèse de ses propres constituants, les matériaux de la cellule qu'il parasite. Le virus agit à l'intérieur d'une cellule, où il se reproduit et modifie le fonctionnement normal de la cellule hôte. Ces dysfonctionnements peuvent être à l'origine de pathologies plus ou moins sévères.

Les virus existent sous une forme extracellulaire (unité matérielle indépendante appelée alors virion) ou intracellulaire (virus intégré sous forme dormante ou détournant

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

activement la machinerie cellulaire au profit de sa réplication). Sous la forme intracellulaire (à l'intérieur de la cellule hôte), les virus sont des éléments génétiques qui peuvent se répliquer de façon indépendante par rapport au chromosome, mais non indépendamment de la cellule hôte. Sous la forme extracellulaire, les virus sont des objets particuliers, infectieux, constitués au minimum d'un acide nucléique englobé dans une capsid de protéines [13].

V.3.b. Les bactéries

Les bactéries sont des organismes vivants unicellulaires procaryotes. A l'inverse des virus, elles sont capables de se reproduire par division cellulaire, une cellule mère produisant deux cellules filles, caractérisées par une absence de noyau et d'organites. La plupart des bactéries possèdent une paroi cellulaire glucidique, le peptidoglycane. Les bactéries mesurent quelques micromètres de long et peuvent présenter différentes formes : des formes sphériques (coques), des formes allongées ou en bâtonnets (bacilles), des formes plus ou moins spiralées. Les bactéries pathogènes se retransmettent par l'air, l'eau, le sol et les substances corporelles telles que le sang, les matières fécales, l'urine et les sécrétions. Leur arrivée dans notre corps déclenche une réaction de notre système immunitaire [13].

V.3.c. Les protozoaires

Les Protozoaires sont des êtres unicellulaires mobiles la plupart du temps du moins pendant une phase de leur cycle biologique. Très souvent, ils ont plusieurs noyaux et sont donc appelés plasmode. Ils comprennent une membrane nucléaire et ils sont présents dans les eaux usées à l'état de kystes. La principale forme pathogène pour l'homme est *Entamoebahistolytica*, Ils vivent exclusivement dans l'eau ou dans les sols humides ou à l'intérieur d'un organisme (dans le mucus pulmonaire, l'intestin, la panse de certains animaux...). Ils sont connus pour être responsables de nombreuses maladies telles que la malaria et certaines dysenteries, telle l'amibiase [13].

V.3.d. Les helminthes

Les helminthes sont des vers multicellulaires. Tout comme les protozoaires, ils sont majoritairement des organismes parasites. Les helminthes sont rencontrés dans les eaux usées sous forme d'œufs et proviennent des excréta des personnes ou d'animaux infectés et peuvent constituer une source de réinfection par voie orale, respiratoire ou par voie cutanée [13].

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

Tableau I-4 Les maladies liées aux différents micro-organismes [12]

Germes	Organisms	Maladies
Les bactéries Pathogènes	Salmonelles Schigelles	Typhoïde dysenterie
Enté Bactéries	Colibacilles Leptospires Mycobactéries	tuberculose
Vibrions	Vibrions coma	choléra
Les virus	Entérovirus Ribovirus Adénovirus Rota virus	Poliomyélite, méningite Affections respiratoires Diarrhées
Les parasites		Lésions viscérales
Les champignons	Tænia, ascaris	Eczémas maladies de la peau

VI. Estimation des charges polluantes

Les charges polluantes sont les résultats du produit de débit avec la concentration, comme il est indiqué ci-dessous.

$$\text{Charge (g/j)} = \text{débit (m}^3\text{/jour)} * \text{concentration (mg/l ou g/m}^3\text{)}$$

Ces charges polluantes dépendent du type de réseau d'assainissement tel qu'il est mentionné dans le tableau suivant.

Tableau I-5 Les charges polluantes dans les différents systèmes

type de système	DBO5 (g/hab/j)	MES (g/hab/j)
Système unitaire	70-80	80
Système séparatif	54	70
Système pseudo-séparatif	60	70

VII. Les Normes de rejet

Dans le domaine de l'eau, on est tenu de respecter des normes très strictes car cela touche au domaine de la sante publique, et le moindre écart peut s'avérer très dangereux pour la santé de l'homme, la préservation des espèces aquatiques...etc.

Dans le cadre de la protection de l'environnement et de la santé publique, l'organisation

CHAPITRE I GENERALITES SUR LA POLLUTION

mondiale de la santé (OMS) fixe des niveaux de rejet selon la destination de l'eau épurée.

Conformément aux recommandations de cette organisation, les normes de rejets des eaux usées en Algérie sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau I-6 Les normes de rejet en Algérie

Paramètres	Valeurs	Unités
Température	30	C°
PH	5.5 - 8.5	
MES	30	mg/l
DBO5	30-40	mg/l
DCO	90-120	mg/l
Azote total	15	mg/l
Phosphates	2	mg/l
Aluminium	5	mg/l
Cadmium	0.2	mg/l
Mercure	5	mg/l
Nickel	1	mg/l
Plomb	3	mg/l
Cuivre	3	mg/l
Zinc	5	mg/l
Huiles et graisses	20	mg/l
Hydrocarbures	20	mg/l
Phénols	0.5	mg/l
Solvants organiques	20	mg/l
Chlore actif	1	mg/l
Détergents	12	mg/l

(DRE W. Alger).

VIII. Conclusion

Les eaux usées représentent une véritable menace pour l'être humain ainsi que pour l'environnement (la vie aquatique) à cause des différents polluants qu'elles contiennent. Une bonne connaissance de la nature et des proportions des différents polluants cités auparavant est indispensable pour un choix adéquat du procédé d'épuration des eaux usées et par conséquent au respect des normes de rejets.

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

I. Introduction

L'épuration des eaux usées consiste à décanner les éléments polluants particuliers et à extraire les éléments dissous qui sont transformés en matière sédimentable suite à un traitement approprié. Ainsi, à la sortie de la station il en résulte d'une part une eau épurée rejetée dans le milieu naturel, et d'autre part, il reste des sous-produits désignés sous le terme des boues résiduaires [14].

II. Epuration des eaux

II.1. Prétraitement

II.1.a. Dégrillage

Il a pour but d'éliminer les déchets solides de dimensions plus ou moins importantes (bouteilles en plastique, bois, boîtes de conserve...), en faisant passer l'eau usée à travers une ou plusieurs grilles (placées verticalement ou inclinées de 60 à 80° sur l'horizontale) dont les mailles sont de plus en plus serrées entre 3 et 100 mm. Elles sont en général équipées de systèmes de nettoyage automatiques pour éviter leur colmatage, mais également de provoquer des dégâts aux machines et conduites des différentes unités de l'installation [15].

II.1.b. Dessablage

Il a pour but de retirer les sables présents dans les eaux usées. Les sables vont se déposer par simple effet de leurs poids en évitant que les matières organiques se déposent en même temps. Enlever les éléments grossiers et le sable est indispensable pour protéger les pompes contre l'abrasion et éviter le colmatage des canalisations et la perturbation des autres stades de traitement en particulier le réacteur biologique.

Suite à la décantation le sable est raclé ou sucé par pompes montées sur pont roulant [16].

Les dessableurs les plus utilisés sont les dessableurs rectangulaires à insufflation d'air.

Le principe de l'insufflation d'air est d'imposer un mouvement de rotation dans le but d'assurer

- La décantation des grains de sables seulement, tandis que la matière organique reste en suspension.
- Le détachement de la matière organique fixée sur le sable.
- Le rafraîchissement des eaux par l'apport de l'oxygène.
- Le temps de séjour est de 3 à 5' et l'injection de l'air de 1 à 1,7 m³/m³ eau.

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

II.1.c. Déshuilage / Dégraissage

L'élimination des huiles et des graisses se fait par le principe de flottation en injectant des bulles d'air dans le bassin de déshuilage, permettant aux graisses et huiles de remonter à la surface (différence de densité entre les huiles et l'eau) . Le dégraissage est une opération de séparation liquide-solide, par contre le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide. Le dégraissage est important s'il n'y a pas de décantation primaire.

Remarque : Le plus souvent on combine les deux opérations: dessablage et déshuilage dans un même ouvrage, muni d'un pont roulant qui sert à racler dans le fond les matières déposées et à écrémer en surface par pompe suceuse ou par un racleur de surface les matières flottantes.

II.2. Traitement primaire (Décantation primaire)

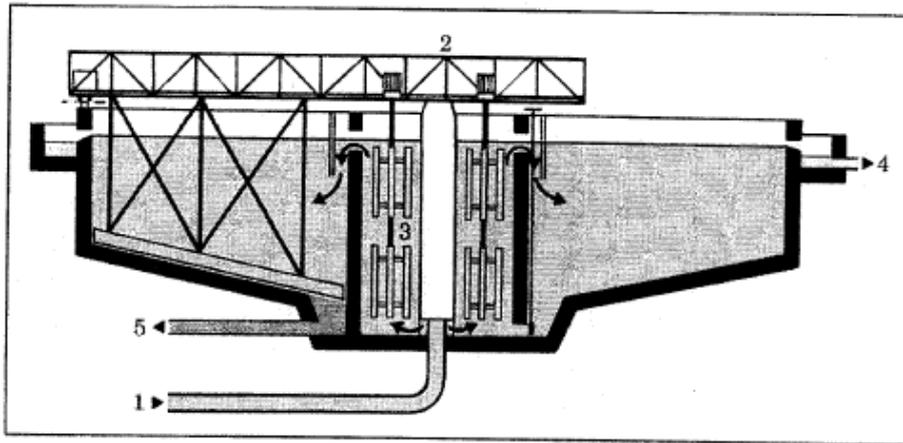
L'élimination de la matière en suspension présente dans le liquide est faite par sédimentation, en utilisant uniquement les forces de gravités.

Il existe divers types de décanteurs variables suivant leurs formes, le mouvement du liquide qui les traverse et la quantité des effluents.

II.2.a. Décanteurs circulaires

Le racleur est fixé à une charpente tournant autour de l'axe du bassin. Sa conception est différente suivant les modèles fabriqués. Il peut comporter une seule lame en forme de spirale ou une série de raclettes en jalousie. Il comprend un fût central creux où arrive l'eau brute d'où elle est répartie. De plus, un racleur de surface pousse les corps flottants vers une écumoire d'où ils peuvent être envoyés soit vers le puits à boues, soit vers un poste séparé.

Lorsque le modèle est conçu selon un entrainement central, la charpente est constituée de deux bras radiaux suspendus à une couronne d'entée centrale. Dans tous les cas, un groupe moto-réducteur assure la rotation du système. La pente du radier sur laquelle on effectue le raclage des boues est de 4 à 10 %.



1 - Arrivée d'eau brute
2 - Pont raclé.
3 - Zone de floculation.

4 - Sortie d'eau décantée.
5 - Évacuation des boues.

Figure II-1 Décanteur circulaire

La hauteur moyenne des décanteurs circulaires raclés est de 3 à 3,5 m. Le diamètre peut atteindre 90m. Mais ils deviennent sensibles aux effets du vent qui peut perturber la bonne répartition du liquide.

II.2.b. Décanteurs longitudinaux rectangulaires

Il existe deux types de décanteurs rectangulaires avec raclage : Les décanteurs à pont raclé et les décanteurs à chaînes.

Les ponts raclés se déplacent selon un système de va et vient et procèdent au raclage selon un mouvement à contre-courant.

Les décanteurs à chaîne permettent un raclage continu de la boue et des corps flottants, par une série de raclettes montées entre deux chaînes sans fin parallèles et tournant le long des parois verticales du bassin. Le gros inconvénient de ces appareils est l'usure rapide de toutes les parties mobiles immergées.

Les fosses à boues sont situées à l'arrivée de l'eau brute, et la collecte des écumes est faite en amont immédiat de la sortie de l'eau décantée [17].



Figure II-2Décanteur rectangulaire

II.3. Traitement secondaire

II.3.a. Traitement physico-chimique

Le traitement physico-chimique est le procédé le mieux adapté aux variations saisonnières de la charge polluante ou à l'existence des matières toxiques. Ils consistent à transformer chimiquement les éléments polluants non touchés par le traitement biologique [18].

Le traitement physico-chimique passe par trois opérations principales :

i. Une coagulation

La coagulation est le phénomène de déstabilisation des particules colloïdales, consistant en la neutralisation de leurs charges électriques, par addition de réactifs chimiques appelés coagulants.

ii. Une floculation

Après avoir été déstabilisées, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles rentrent en contact. La floculation a pour objectif d'augmenter le contact entre particules, ce contact est provoqué par la différence de vitesse entre ces particules colloïdales. Cette vitesse est, soit due au mouvement brownien des particules, soit à l'agitation mécanique extérieure amenant les flocons à une taille suffisamment grande pour décanter.

iii. Une décantation ou une flottation

Grace à l'osmose inverse.

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

Tableau II-1 Avantages et inconvénients du traitement physico-chimique [19]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Réponse immédiate aux variations de charge ;- Capacité des installations, meilleure intégration au site ;- Bonne élimination de la pollution toxique ;- Déphosphoration simultanée ;	<ul style="list-style-type: none">- Plus grande quantité de boues produites ;- Le coût élevé occasionné par les réactifs ;- Rendement d'épuration inférieur à l'épuration biologique ;- Risque de coloration (sels de fer sur eaux septiques) ;

II.3.b. Epuration biologique

Généralités sur les organismes microbiens :

Les transformations de nature chimique ont un rôle secondaire comparé aux transformations de nature biologique. En effet, elles se limitent le plus souvent à des réactions de fixation d'acidité ou d'alcalinité libre, ou encore à l'oxydation de substances fortement réductrices, sulfures par exemple, et de certains produits de décomposition anaérobie des impuretés organiques.

Les transformations de nature biologique sont plus importantes dans la mesure où elles mettent en jeu de multitudes de réactions de diverses natures.

Les vitesses de réaction dépendent de divers facteurs physico-chimiques (température, pression, oxygène dissous, nature des produits organiques). Les réactions biologiques font participer aussi bien des substances organiques que des substances minérales comme les phosphates et les nitrates qui sont assimilés pour la synthèse de nouvelles cellules.

Parmi les divers organismes responsables des phénomènes biologiques, les bactéries sont les plus importantes et les plus nombreuses. Une bactérie peut être considérée comme un système utilisant un substrat pour produire de l'énergie, fabriquer de nouvelles cellules, et rejeter des produits de métabolisme.

Ces différentes opérations existent chez toutes les bactéries, leur permettant de transformer le substrat en produits gazeux, liquides ou solides.

L'opération de synthèse cellulaire porte le nom d'anabolisme, et celle relative à la production d'énergie et formation de produits de dégradation s'appelle le catabolisme. L'ensemble de ces deux opérations est le métabolisme [17].

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

L'épuration des eaux usées fait appel à plusieurs types de procédés :

I. Les boues activées

C'est le processus d'épuration le plus répandu. Son développement est dû à ses excellentes performances de dépollution (rendement supérieur à 95%) par rapport aux autres procédés existants. En contrepartie, suivant le type d'effluents à traiter, ce procédé peut être difficile à maîtriser notamment pour le traitement de l'azote et du phosphore ou en cas de variations importantes des flux à traiter.

Le procédé à boues activées est un système qui fonctionne en continu dans lequel, des micro-organismes sont mis en contact avec les eaux usées contenant des matières organiques. De l'oxygène est injecté dans le mélange, permettant de fournir aux bactéries cet élément vital à leurs besoins respiratoires.

On peut considérer que le système à boues activées est une extension artificielle des phénomènes d'épuration naturels. Dans un cours d'eau ou une rivière, les phénomènes entrant en jeu sont identiques à ceux présents dans les systèmes à boues activées, seule varie la concentration en micro-organismes dans le milieu et la vitesse de la réaction de dégradation.

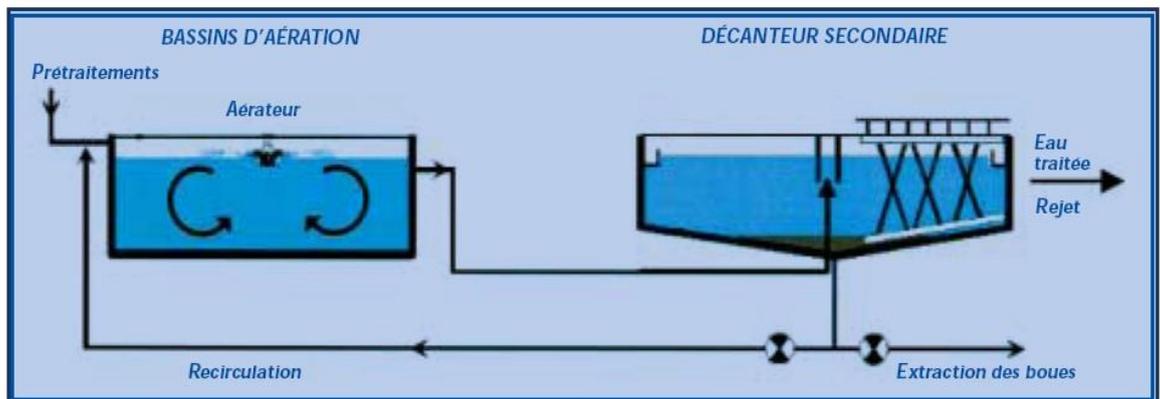


Figure II-3 Synoptique d'une boue activée



Figure II-4 Bassin d'aération

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

1. Paramètres de traitement par boues activées

a. Charges appliquées

Il est difficile de connaître dans une boue la quantité de la matière cellulaire, et elle n'est exprimée que par le poids des matières volatiles en suspension (MVS).

On définit les caractéristiques d'un réacteur par deux facteurs :

- la charge volumique
- la charge massique

Lorsque quotidiennement, un certain poids de matières organiques exprimé en DBO5 (kg/j) doit être transformé dans un réacteur aérobie de volume V (m^3), on définit la charge volumique, comme étant le rapport de la pollution apportée par unité de volume de bassin.

$$C_v = \frac{DBO5 \left(\frac{kg}{j}\right)}{\text{Volume du bassin } (m^3)}$$

En maintenant dans le bassin, une quantité de boues activées qui est la quantité totale de boues présentes, on définit alors la charge massique comme étant le rapport de la pollution entrante par unité de masse de boues.

$$C_M = \frac{DBO5 \left(\frac{kg}{j}\right)}{\text{Masse de MVS } (kg)}$$

On peut classer les différents systèmes d'épuration suivant la charge appliquée

Tableau II-II-2 Les différents systèmes d'épuration

système d'épuration	C		
aération prolongée	0,05	-	0,1
faible charge	0,1	-	0,2
moyenne charge	0,2	-	0,5
forte charge	0,5	-	1
très forte charge	1	-	5

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

b. âge des boues

Il précise le temps de séjour moyen des boues dans l'aérateur. Il a été défini comme étant le rapport entre la quantité de boues dans le bassin et celle extraites quotidiennement.

On note également que l'âge des boues est inversement proportionnel à la charge massique

c. L'indice de Mohlman

L'indice de Mohlman caractérise une boue par son aptitude à la décantation. Lorsque celui-ci est élevé, il indique une mauvaise décantation de la boue.

L'indice de Mohlman est le rapport entre le volume de boues décantées en 1/2 heure, et la masse de matières en suspension contenue dans ce volume.

Il s'écrit :
$$I_m = V/M$$

Si M est en g; I_m représente le volume en cm^3 occupé par 1g de boues. Il permet donc de traduire la bonne disponibilité ou non, des boues à la décantation.

Si I_m inférieur à 50 ml/g : mauvaise décantation ;

Si I_m compris entre 80 ml/g et 150 ml/g : bonne décantation ;

Si I_m supérieur à 150 ml/g : très mauvaise décantation (phénomène de Bulking).

d. Effet de la température

L'influence de la température est importante dans les phénomènes biologiques, dans la mesure où elle intervient sur la vitesse de croissance des bactéries.

Ceci s'explique par l'effet de la diffusion de l'oxygène dans le floc microbien, à des températures différentes. Par exemple, en boues activées, aux faibles charges et aux basses températures, la vitesse d'utilisation de l'oxygène est faible, ce qui permet en système continu, une plus grande diffusion de l'oxygène rendant le floc bactérien aérobie.

Lorsque la température s'élève, la vitesse d'utilisation augmente du fait d'une meilleure assimilation, l'oxygène se trouve rapidement épuisé rendant le floc bactérien peu aérobie.

e. Effet du pH

Les systèmes biologiques tolèrent une gamme de pH allant de 5 à 9 avec une zone optimale de 6 à 8.

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

f. Effet de quelques toxiques

La nature des toxiques est souvent d'origine métallique. La présence dans l'effluent à traiter de ces substances toxiques se traduira par une inhibition partielle ou totale de l'activité des micro-organismes. Le tableau suivant résume quelques concentrations d'ions métalliques qui réduisent l'efficacité du traitement biologique par boues activées [17].

Tableau II-II-3 Concentrations de quelques ions métalliques qui réduisent l'efficacité du traitement

Métal	concentration du métal dans l'effluent (mg/l)		
Cu	1	-	2
Ni	1	-	4
Zn	3	-	10
Cr (VI)	5	-	15
Pb	5	-	15
Hg	0,5	-	2
Al	2	-	5

2. Problèmes de décantation des boues

Différentes causes sont attribuées à cette mauvaise décantation pouvant être d'origines diverses.

a. Flocc dispersé

La boue activée ne se sépare pas de l'effluent traité. On observe un mélange trouble qui ne se clarifie quelques fois qu'après plusieurs heures de repos. La DBO₅ de l'effluent traité est alors très élevée. Ce cas peut être observé pendant la période de constitution de la flore microbienne.

Le cas devient grave lorsque cette période est trop longue, et conduit à une défloculation des boues [17].

b. Défloculation des boues activées

Ce phénomène est provoqué quelques fois dans des conditions de faible charge appliquée. En effet, la minéralisation des boues résultant de la faible proportion de matières organiques présentes dans le bassin, et des longs temps de séjour, se traduit par une suspension de flocons qui altère les conditions de rejet, surtout au niveau des MES même si, souvent la DBO₅ de l'effluent traité est satisfaisante.

Une cause de ce phénomène est l'apport accidentel de produits toxiques (minéraux ou organiques) qui tue une partie de la flore microbienne. Ceci se traduit par le rejet d'un effluent contenant des matières en suspension élevées (boues mortes) et une DBO₅ élevée [17].

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

c. Boues houleuses

Il arrive que l'on observe la formation de nuages de boues dans le décanteur secondaire. Ces nuages intermittents sont souvent le résultat d'un mauvais dimensionnement de l'ouvrage de décantation tant au niveau de sa conception que de sa réalisation.

d. Bulking

C'est le phénomène le plus grave qui peut se produire dans une station d'épuration, car il s'accompagne d'un changement de la flore microbienne. La sédimentation est nulle ou très lente [17].

3. L'aération dans les bassins à boues activées

Pour dégrader les matières organiques et se maintenir en vie, les bactéries consomment une certaine quantité d'oxygène apportée au moyen d'appareils appelés aérateurs.

On admet cependant, que les micro-organismes aérobies en suspension dans l'eau n'utilisent pas directement l'oxygène gazeux, et que celui que l'on se propose de leur fournir doit être au préalable dissous dans l'eau.

Le bassin d'aération est une zone de contact peut être placée à l'amont immédiat du bassin d'aération. Son principe est de réaliser un mélange des boues (recirculées en général) et de l'effluent à traiter dans une zone de faible volume.

Les bassins d'aération sont les réacteurs biologiques dans lesquels s'effectue la transformation de la matière organique par les microorganismes aérobies. La pollution dissoute est transformée en gaz et biomasse.

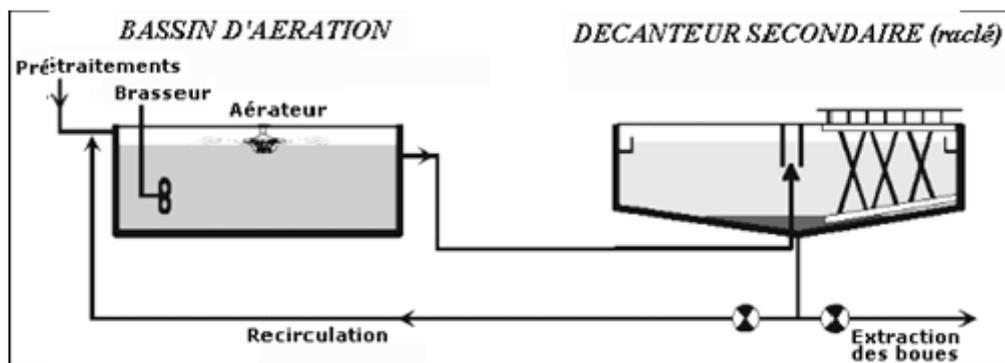


Figure II-II-5 Schéma de principe de l'épuration par boues activées

Ces bassins sont équipés de dispositif d'oxygénation et de brassage permettant :

-d'introduire une quantité d'oxygène déterminée dans l'eau, nécessaire à la satisfaction des besoins correspondant à l'oxydation de la pollution organique et à l'autodestruction de la masse bactérienne lors de la phase de respiration endogène.

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

-de brasser la suspension de boues activées pour en assurer l'homogénéité et éviter les dépôts.

Les principaux dispositifs d'oxygénation utilisés sont les aérateurs de surface : turbines et brosses ainsi que les systèmes d'injection d'air sur pressés en profondeur qui délivrent des grosses, moyennes ou fines bulles [20].

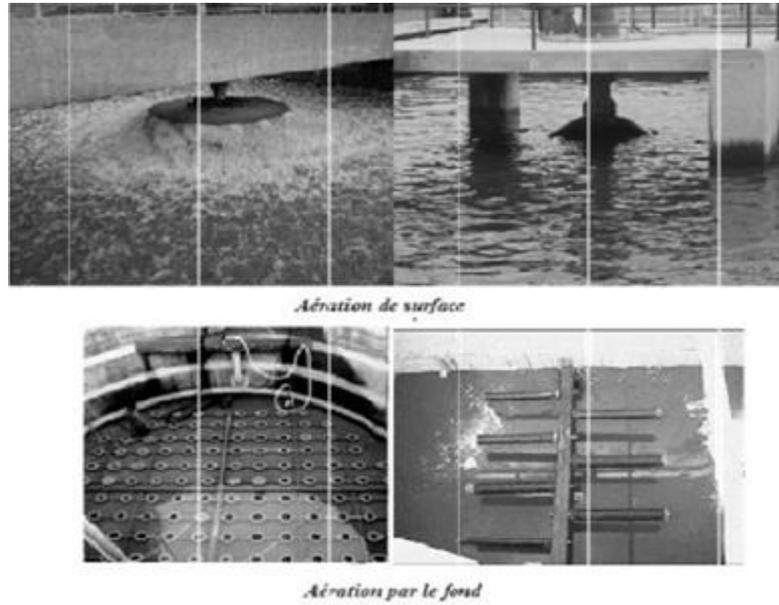


Figure II-II-6 Types d'aération

4. Clarificateur ou décanteur secondaire :

Le clarificateur a une fonction de séparation de phase (boues / eau traitée) et une fonction d'épaississement afin de ramener la boue activée la plus concentrée dans le bassin d'aération.

Il existe deux systèmes de reprises des boues : raclage des zones annulaires centrales et périphériques, succion dynamique de zones annulaires centrales et périphériques. Ces boues sont reprises par des pompes de recirculation et d'extraction. La recirculation permet de :

- Maintenir une concentration en MES constante et correcte dans le bassin d'aération,
- Eviter l'accumulation des boues dans le clarificateur et le débordement du lit de boues,
- Limiter le temps de séjour ans le clarificateur pour garantir une bonne qualité de boue,
- Ramener des boues aérées en tête de la station.

II.3.c. Les lits bactériens

La mise en œuvre des lits bactériens est relativement simple puisqu'en fait, un lit bactérien est considéré comme un tas de cailloux muni d'un dispositif de répartition de l'effluent.

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

On dispose dans une première étape, du radier qui doit supporter les matériaux. Il sera disposé de telle manière que l'effluent qui ruisselle sur le lit, s'écoule facilement sans laisser de dépôts boueux qui colmateraient rapidement le lit. [21].



Figure II-II-7 Lit bactérien

Les lits bactériens sont définis par leur charge organique c'est à dire par la quantité journalière de matières organiques admise par m^3 de matériaux. On peut ainsi, les classer en lits à faibles charge et à forte charges,

On distingue:

- les faibles charges, jusqu'à $0,4 \text{ kg DBO}_5 / m^3.j$
- les moyennes charges, jusqu'à $0,8 \text{ kg DBO}_5 / m^3.j$
- les fortes charges, supérieures à $0,8 \text{ kg DBO}_5 / m^3.j$

II.3.d. Les disques biologiques

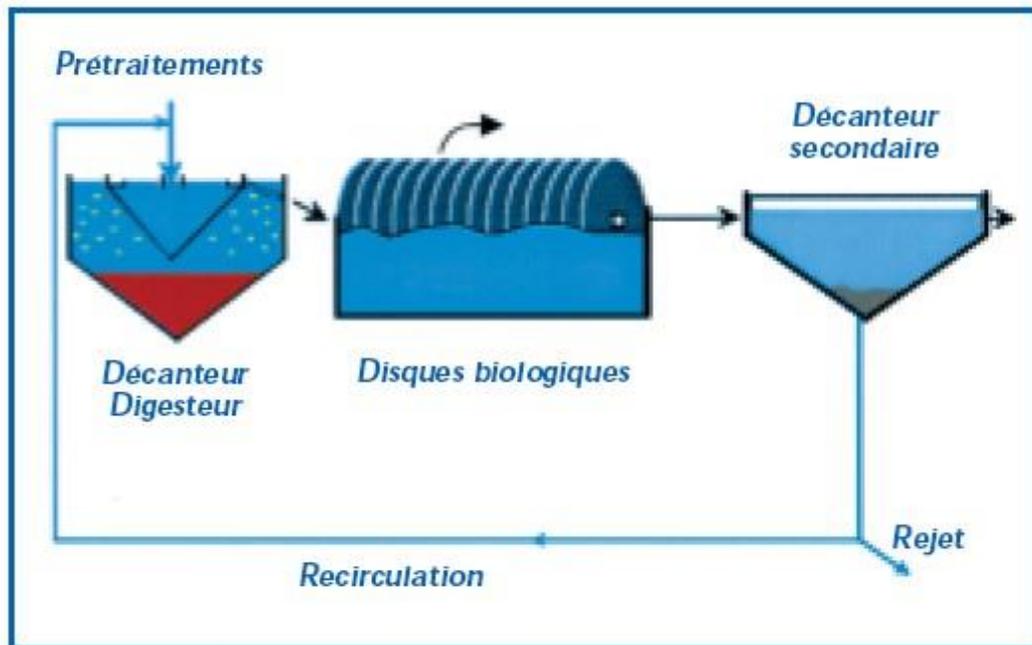


Figure II-II-8 Synoptique d'une station comportant un disque biologique

Procédé de traitement biologique aérobie à biomasse fixée. Les supports de la microflore épuratrice sont des disques partiellement immergés dans l'effluent à traiter et animés d'un mouvement de rotation lequel assure à la fois le mélange et l'aération. Les microorganismes se développent et forment un film biologique épurateur à la surface des disques. Les disques sont semi-immersés, leur rotation permet l'oxygénation de la biomasse fixée. L'effluent est préalablement décanté pour éviter le colmatage du matériau support. Les boues qui se décrochent sont séparées de l'eau traitée par clarification. L'unité de disques biologiques est constituée de disques en plastique rotatifs montés sur un arbre dans un bassin ouvert rempli d'eaux usées. Les disques tournent lentement dans le bassin et lorsqu'ils passent dans les eaux usées, les matières organiques sont absorbées par le biofilm fixé sur le disque rotatif. L'accumulation de matières biologique sur les disques en augmente l'épaisseur et forme une couche de boues. Lorsque les disques passent à l'air libre, l'oxygène est absorbé, ce qui favorise la croissance de cette biomasse. Quand cette dernière est suffisamment épaisse (environ 5 mm) une certaine quantité se détache et se dépose au fond de l'unité [22].

II.3.e. Les étangs d'oxydation

Ces dernières années, certaines techniques d'épuration naturelles des eaux déjà anciennes par leur principe, ont fait l'objet d'une mise au point et d'une normalisation qui les remettent en actualité.

En effet, la méthode la plus simple pour épurer les eaux usées est de les rejeter dans des étangs, et de laisser se développer les forces naturelles représentées par la lumière solaire, les bactéries, les algues, la température et surtout le temps.

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

Ce procédé prend, selon les auteurs, différentes appellations : étang, étang d'oxydation, étang de stabilisation, lagune.

Cette technique ne fait appel qu'à une technologie extrêmement simple, n'exigeant qu'un minimum d'ouvrage et d'appareillages de type industriel, et dont le fonctionnement ne consomme que peu ou pas du tout d'énergie.



Figure II-II-9 Etang d'oxydation

Classement des étangs d'oxydation

On classe généralement les étangs d'oxydation en trois catégories :

- Les étangs aérobies
- Les étangs anaérobies
- Les étangs facultatifs

II.3.f. Le lagunage

L'épuration biologique par lagunage s'inspire du processus de déséutrophisation. Considéré comme un système d'épuration naturel, les lagunes (bassins naturel) accueillent les eaux usées et les filtrent par les micro-organismes, algues et plantes aquatiques, c'est une technique peu coûteuse et qui ne consomme que peu d'énergie mais, néanmoins, des contraintes liées à la perméabilité du sol sont à prendre en considération.

La technique repose sur l'établissement d'un écoulement lent gravitaire des eaux usées dans plusieurs bassins de rétention ; ce qui élimine le risque d'infiltration dans les eaux souterraines [23].



Figure II-II-10 Lagunage

II.4. Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire, parfois décrit comme un traitement avancé, est généralement effectué après un traitement biologique suivi d'une étape de séparation « solide-liquide ».

Différentes méthodes de nature variée peuvent alors être utilisées :

II.4.a. Biologiques

Pour l'élimination de l'azote (processus de nitrification-dénitrification) et Biologiques du phosphore (déphosphatation)

II.4.b. Physico-chimiques

Pour la précipitation du phosphore (coagulation-décantation) ou l'élimination des dernières matières en suspension (filtration sur lits de sable, tamis métalliques ou charbon actif).

L'élimination de l'azote et du phosphore par voie biologique ou chimique évite la prolifération de végétaux dans les corps d'eau (les lacs, les étangs ou les rivières) et protège la vie aquatique.

II.4.c. Chimiques

Pour la désinfection dans le traitement final des effluents. L'élimination des risques de contamination bactériologique ou virale se fait souvent par oxydation en utilisant des agents tels que le chlore et l'ozone. Les procédés chimiques sont utilisés aussi pour l'adoucissement de l'eau et pour la neutralisation en agissant sur le pH.

II.4.d. Radioactifs

Pour les opérations de désinfection de l'eau telle que les rayonnements ultraviolets qui irradiant les cellules vivantes indésirables permettant d'éliminer les risques de

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

contamination due aux bactéries et virus. Suivant la quantité d'énergie UV reçue, elles sont soit stérilisées (effet bactériostatique) soit détruites (effet bactéricide) [24].

III. Traitement des boues :

III.1. Epaissement

Considéré comme la première étape du traitement, elle consiste à réduire une portion de la fraction liquide des boues, afin d'augmenter la matière solide. En effet si les boues issues du décanteur secondaire contiennent seulement 0,8% de matière sèche. La boue épaisie peut atteindre une siccité de 6% et réduira ainsi d'un cinquième son volume initial [25].

La portion d'eau récupérée est recyclée à la tête de la station.

-Les techniques d'épaissement des boues :

III.1.a. Epaissement gravitaire (Décantation)

Cette technique consiste à introduire les boues dans l'épaisseur pour qu'elles soient décantées au fond de l'ouvrage, tout en gardant la hauteur de boues telle qu'elle évitera toute turbulence dans l'appareil. Le temps de séjour des boues peut varier entre 5 et 15 jours selon leur nature.

Une fois concentrées au fond, les boues sont retirées et alimentent et peuvent passer à l'étape de la stabilisation.

L'exploitation de cette technique est simple et peu coûteuse, cependant sa performance est faible avec les boues biologiques.

La siccité atteinte est entre 2 et 10%.

III.1.b. Epaissement dynamique

i. Flottation :

L'épaissement peut se faire également par flottation. Conçue pour les grandes stations, cette technique est rapide et bien adaptée aux boues biologiques. En revanche, elle entraîne une dépense énergétique nettement supérieure à la décantation, mais celle-ci est compensée par les bénéfices retirés au niveau de la performance de l'épaissement.

La concentration des boues flottées est supérieure à celle atteinte par les boues gravitaires.

ii. Egouttage (drainage) :

L'épaissement peut également se faire après floculation des boues par un apport de polymère et drainage sur un champ horizontal de grilles fines, raclé en permanence par des lames de caoutchouc [26].

Considérée comme la technique d'épaissement la plus performante, elle est simple, peu coûteuse et conçue pour les moyennes et petites stations.

III.2. Stabilisation et hygiénisation

Parmi les méthodes de stabilisation et hygiénisation les plus utilisées on retrouve la digestion anaérobie.

Digestion Anaérobie (méthanisation) :

Considérée comme la méthode la plus utilisée dans le traitement des boues, la digestion anaérobie consiste à dégrader la matière organique et la transformer en biogaz. Ce biogaz est essentiellement composé de gaz carbonique et de méthane. Elle est réalisée en absence d'oxygène et présente le double avantage de traiter les déchets organiques ainsi que produire une source d'énergie valorisable. Cette méthode permet de réduire le volume des boues et augmente la siccité à un taux de 30%.

III.2.a. Les étapes biochimiques de la digestion anaérobie

i. Hydrolyse

Cette étape d'hydrolyse correspond à la dégradation des macromolécules organiques (protéines, lipides, polysaccharides...) en monomères (acide aminé, acide gras, oses...). Ce sont les bactéries dites hydrolytiques qui vont permettre de casser des structures organiques complexes en libérant des enzymes (protéases, lipases, cellulases...). Cette étape est déterminante pour la suite de la fermentation, car seules les molécules simples seront biodisponibles pour la suite du traitement. D'un point de vue cinétique l'hydrolyse est considérée comme une étape limitante

ii. L'acidogénèse

Elle transforme les molécules simples par l'action des bactéries en acides de faibles poids moléculaire, tel l'acide lactique ou des acides gras volatils de 2 à 5 atomes de carbone (acétate, propionate, butyrate); parallèlement, sont produits des alcools de faibles poids moléculaires, tel que l'éthanol, du bicarbonate (HCO_3^-) et de l'hydrogène moléculaire (H_2)

iii. Acidogénèse

Les monomères sont fermentés principalement en acide gras volatil2 (AGV), en alcools, en H_2 et en CO_2 . Les bactéries responsables de cette étape sont nombreuses, on les appelle les bactéries fermentaires. La cinétique de l'acidogénèse peut être élevée relativement aux autres étapes de la méthanisation.

iv. L'acétogénèse

Tous les produits résultants de l'étape de liquéfaction/fermentation autre que l'acétate (CH_3COO^-), le bicarbonate (HCO_3^-) et l'hydrogène moléculaire (H_2) nécessitent une transformation supplémentaire avant de pouvoir effectivement produire du méthane. C'est ici qu'interviennent des bactéries réductrices acétogènes et des bactéries sulfato-réductrices, productrices d'hydrogène, et d'hydrogène sulfuré (H_2S).

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

v. La méthanogénèse

C'est la phase, au cours de laquelle deux types de bactéries méthanogènes prennent le relais : les premières, acétogènes, réduisent l'acétate (CH_3COO^-) en méthane (CH_4) et en bicarbonate (HCO_3^-). Les secondes, hydrogéntrophiques, réduisent le bicarbonate (HCO_3^-) en méthane (CH_4).

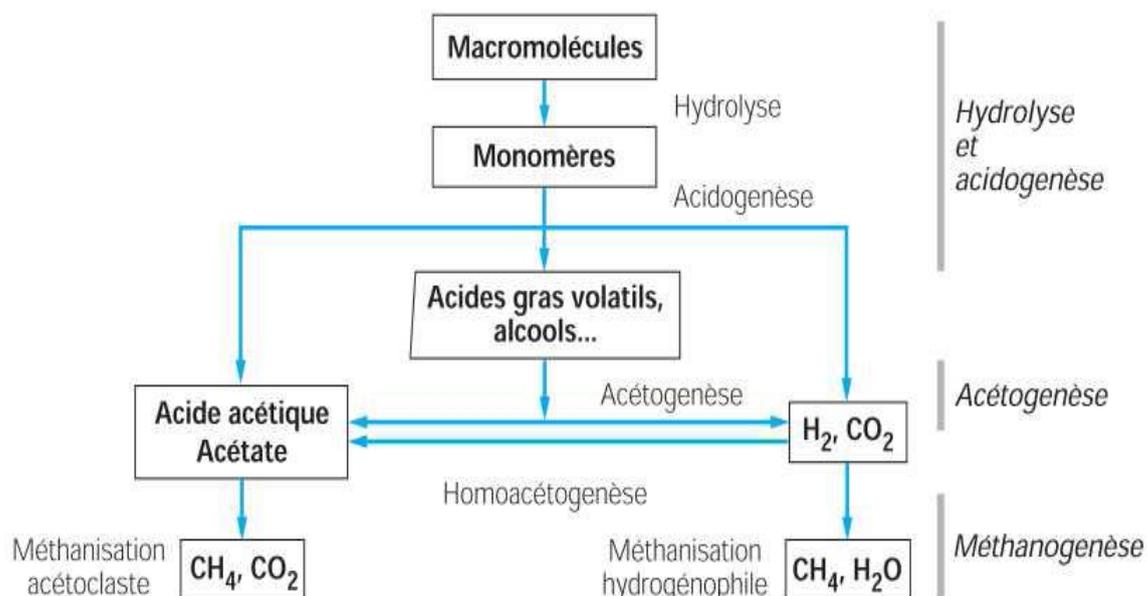


Figure II-II-11 Schéma récapitulatif des réactions biochimiques de la digestion anaérobie [27].

III.2.b. Caractéristiques des boues d'épuration :

Encore plus vrai dans le cas des boues d'épuration. Tout d'abord, il existe différents types de boues, les boues primaires généralement issues d'un procédé de décantation après les étapes de prétraitement, les boues biologiques issues d'une étape de traitement biologique et les boues physico-chimiques généralement issues d'un traitement tertiaire par coagulation-floculation.

De manière générale les boues envoyées en digestion sont déficitaires en carbone par rapport à l'équilibre nutritif des bactéries mises en jeu lors de la méthanisation. Il est reconnu, que les boues biologiques qui font déjà état d'un important degré de minéralisation, présentent un pouvoir fermentescible inférieur à celui des boues primaires. Cependant, pour apporter une solution de traitement à la fois aux boues biologiques (généralement majoritaires) et aux boues primaires, il est courant d'introduire dans le digesteur des boues mixtes issues d'un mélange de ces deux types de boues. Ce qui permet d'obtenir un substrat avec un potentiel méthanogène plus important que des boues biologiques seules.

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

La concentration de matière volatile sèche (MVS), généralement exprimée en pourcentage de matière sèche (MS) traduit la quantité de matière organique présente dans une boue [25].

Tableau II-II-4 Composition des boues de station d'épuration

Type de boues	Concentration en matière sèche (%)	Matière volatile/matière sèche (%)
Primaire	5	50 à 70
Mélangées (primaires plus biologique)	4 à 5	60 à 70
Boues activées (fraîches stabilisées) Station faible charge, aération prolongée	2 à 3	60 à 70
Mélangées primaires+lit bactérien (boues fraîches)	4 à 6	55 à 70
Boues physico-chimique -décantation statique ou accélérée -décantation lamellaire -aéroflottation	4 à 6 1 à 2 5 à 6	40 à 65 Suivant le conditionnement chimique

III.2.c. Paramètres de fonctionnement :

Dans cette partie sera abordée l'influence de certains paramètres physico-chimiques sur le processus de méthanisation. La température, le pH, le titre alcalimétrique complet (TAC), la concentration en AGV ou encore la quantité de biogaz produite sont autant de paramètres qui permettent de caractériser et d'évaluer le fonctionnement d'un digesteur.

i. La température

La température est un paramètre essentiel puisqu'elle conditionne le bon développement des bactéries. On rencontre deux types de digestion :

- Mésophile, (15 à 45 °C) avec un optimum à 37 °C
- Thermophile, (45 à 65 °C) avec un optimum à 55 °C

La régulation de ces températures est importante car certaines bactéries, en particulier les méthanogènes, sont sensibles au changement de température.

ii. Le potentiel hydrogène

Le pH optimum pour la méthanisation est proche de la neutralité, à des valeurs comprises entre 6,5 et 7,5. Les bactéries méthanogènes sont, une fois de plus, très sensibles aux importantes variations de pH, ce qui peut se produire lorsque la charge organique introduite dans le réacteur est trop importante. La concentration en AGV augmente (cinétique rapide de l'acidogénèse) avec en parallèle une acidification du milieu, ce qui peut inhiber les étapes d'acétogénèse et de méthanogènes et entraîner un arrêt du réacteur.

iii. L'alcalinité

Il est important de s'assurer que le **TAC est supérieur à 1000 mgCaCO₃/L** (mais inférieur à 6000 mgCaCO₃/L). En effet les hydrogénocarbonates (HCO₃⁻), l'azote ammoniacal (NH₄⁺) qui font l'alcalinité du milieu, permettent un fonctionnement plus stable du digesteur. Ils sont notamment responsables du pouvoir tampon du réacteur. Cependant, dans le cas d'un effluent d'entrée trop chargé en azote (rapport C/N déséquilibré). On peut avoir une accumulation d'ammoniac (NH₃) dans le réacteur qui se traduit par une augmentation de pH et une diminution des rendements épuratoires. On parle de dépassement alcalin.

iv. Les acides gras volatiles

La concentration en AGV est un indicateur direct du fonctionnement du réacteur. Son suivi permet de prévenir des phénomènes d'acidification et ainsi d'éviter une diminution trop importante des performances épuratoires. Idéalement, la concentration en AVG (exprimée en quantité d'acide acétique) doit être autour de **200-300 mg/L d'acide acétique** (pour des températures mésophiles).

III.3. Déshydratation

La déshydratation constitue la seconde étape de réduction du volume des boues sur les boues épaissies, stabilisées ou non, afin d'obtenir une siccité plus poussée (en moyenne comprise entre 20 et 30% selon la nature des boues) ; elle conditionne le choix de la filière de valorisation ou d'élimination finale. La déshydratation présente plusieurs avantages : elle facilite le stockage et réduit le coût du transport. Elle améliore par ailleurs la stabilisation des boues et facilite leur utilisation en agriculture [25].

III.4. Séchage

Le séchage est une opération unitaire du traitement des boues. Elle consiste à évacuer par évaporation l'eau présente dans les boues traitées. Le séchage s'effectue obligatoirement après une étape de déshydratation car l'élimination mécanique de l'eau est beaucoup moins coûteuse que son évaporation. La technique du lit de séchage ne nécessite pas une déshydratation préalable [28].

Chapitre II Les étapes de traitement des eaux usées

IV. Conclusion

Les stations d'épuration permettent alors de limiter la pollution des eaux en passant par plusieurs dispositifs successifs qui permet une élimination progressive de la quasi-totalité de la pollution et une réutilisation des eaux épurées et des boues d'épurations à d'autres fins.

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

I. Introduction

La station d'épuration de Baraki est de type boues activées fonctionnant en moyenne charge. Elle comporte une filière de traitement des boues avec épaissement, digestion anaérobie, déshydratation et séchage.

La capacité nominale de traitement de la première tranche est de 900 000 équivalents-habitants.

Dans ce chapitre nous allons voir les principales caractéristiques, les données de base du dimensionnement, le descriptif et le schéma de l'installation de la STEP de Baraki et l'évolution.

II. Historique de la STEP

La station de Baraki est une station parmi les 97 existantes sur le littoral algérien. Elle a été réalisée dans le cadre du schéma général d'assainissement Grand Alger (élaboré en 1976). Le système d'épuration de Baraki a été réalisé entre 1984 et 1989 par l'entreprise française OTV. Les principales étapes des études et de construction de la station ont été les suivantes :

Mars 1976 : Projet définitif : station d'épuration de Baraki pour le bassin versant central d'eaux usées de l'agglomération d'Alger.

1989 : Mise en service de la station.

En Mars 2011 le contrat avec WABAG était terminé et la SEAAL a pris le service.

Baraki reçoit les 2/3 d'eaux usées urbaines et 1/3 d'eaux usées industrielles, qui une fois traitées seront déversées dans l'oued El Harrach et par la suite dans la mer.

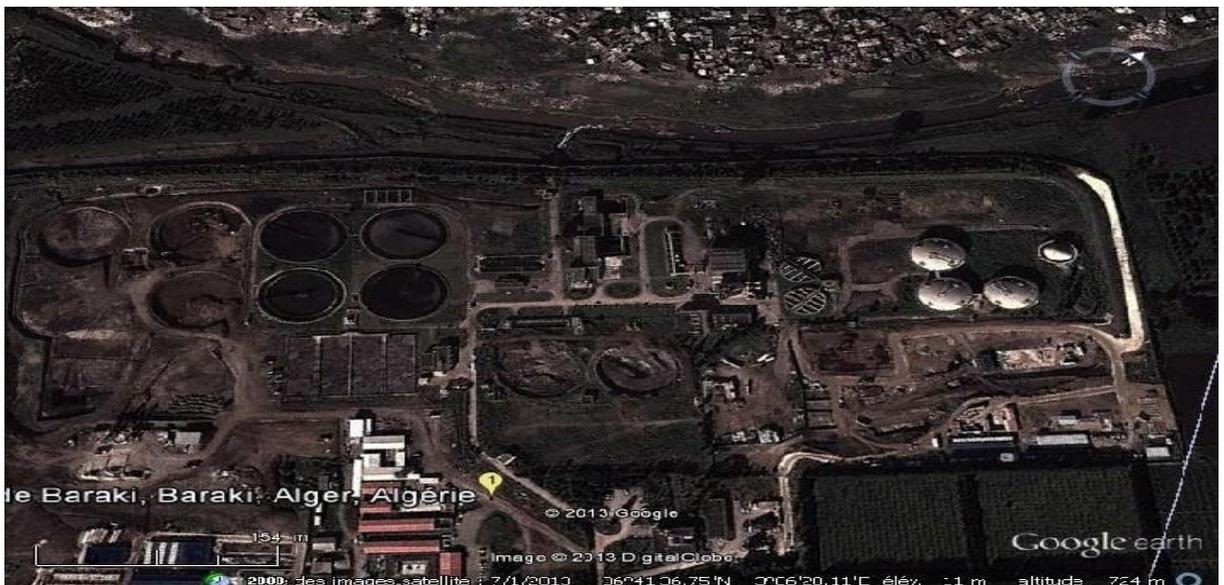


Figure III-1 La STEP de Baraki (image satellitaire non traitée)

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

III. Présentation de l'environnement de la STEP

III.1. Localisation géographique

La station est située dans la wilaya d'Alger, à Baraki à environ 18 km au Sud-Est d'Alger et à 35 km au Nord-Est de Blida sur un terrain plat. Elle s'étend actuellement sur une superficie de 10 km² qui est suffisante pour les extensions prévues.

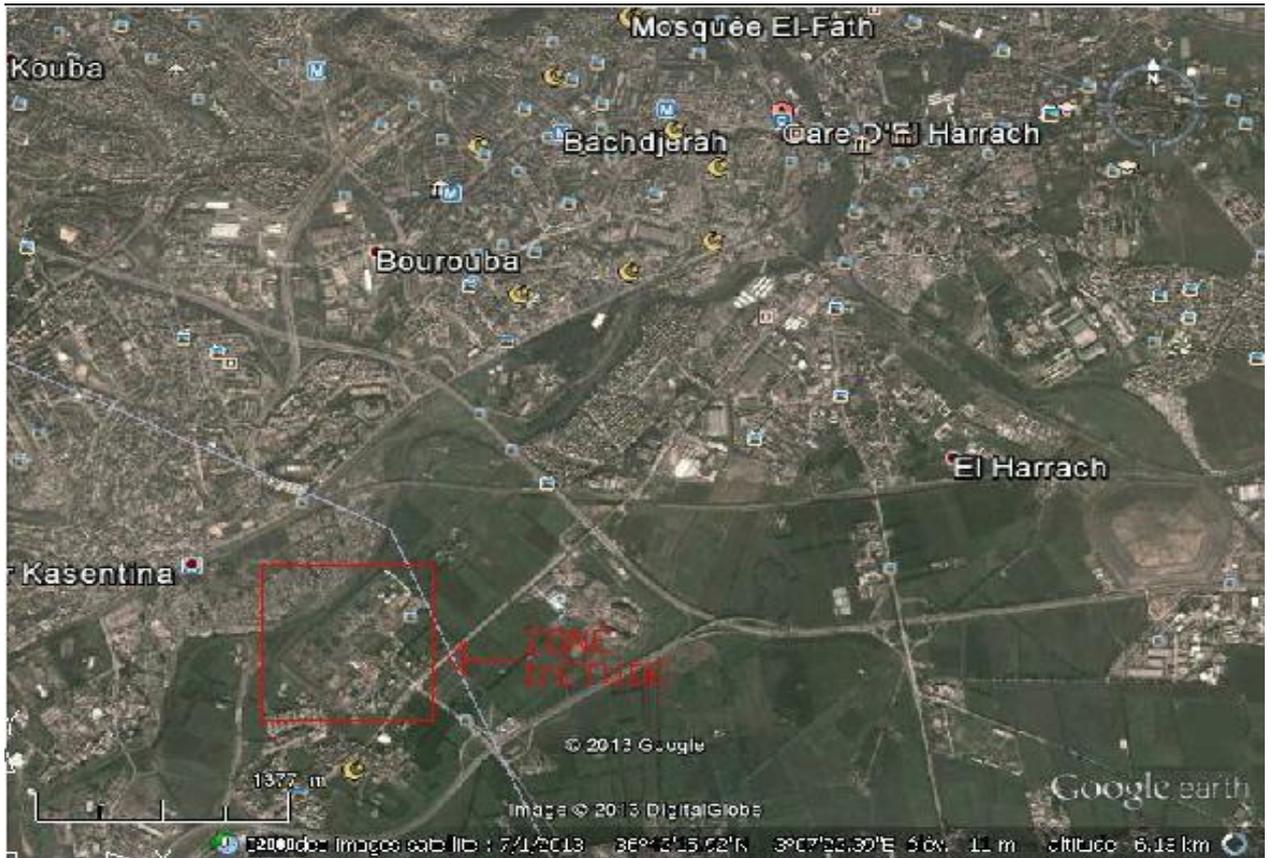


Figure III-2 Localisation de la STEP de Baraki (image satellitaire non traitée)

III.2. L'acheminement des rejets dans la STEP

Le tableau ci-après représente les principaux collecteurs aboutissant à la station d'épuration de Baraki ainsi que les taux de raccordements et les villes raccordées pour chaque collecteur.

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

Tableau III-1 Les villes raccordées et les taux de raccordement pour les collecteurs principaux

Collecteur principal	Taux de raccordement en %	Villes raccordées et agglomérations
Rive gauche	100	-Hussien Dey ; Bourouba ; Bachdjarah ; Une partie de BirKhadem ; Kouba ; -Belouizdad ; El Magharia ; Une partie de Bir Mourad Rais
Rive droite	100	-El Harrach ; Une partie d'El Mohammadia ; Une partie de Beau lieu
Littoral	50	-El Mohammadia ; Une partie de Bordj El Kifane
Oued Smar	100	-Oued Smar ; Beau lieu ; Bab Ezzouar ; -Dar El Beida
Baba Ali	-	-Birtouta ; Baba Ali ; Smar
Baraki	100	-Baraki ;

(SEAAL W. Alger).

III.3. Caractéristiques générales

Le bassin de traitement reçoit les eaux domestiques évacuées de la station de pompage d'El-Harrach (70%), et 30% qui arrivent gravitairement dans le collecteur de Baba Ali. Une fois l'eau épurée, elle est acheminée directement pour être versée dans l'oued. L'objectif de la station est de réduire 90-95% de DBO5, 75-80% de DCO et 90-95% de MES. Les estimations des charges polluantes de l'effluent à l'entrée et à la sortie de la station ont été fixées comme suit

Tableau III-2 Charges polluantes de l'effluent à l'entrée - sortie de la station de Baraki

Concentration à l'entrée	Concentration à la sortie
DBO5=300mg/l	DBO5=40mg/l
DCO=500mg/l	DCO=120mg/l
MES=450mg/l	MES=30mg/l

III.4. Descriptif de la filière

III.4.a. Filière eau

- Le relevage des eaux entrant à la station, comprend :

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

- Poste de relevage N°1 : par vis d'Archimède.
- Poste de relevage N°2 : par vis d'Archimède.
- Prétraitement mécanique constitué de :
 - Dégrilleur grossier et un dégrilleur fin : ils sont tous les deux automatiques et verticaux et l'évacuation des refus de dégrillage se fait automatiquement par convoyeur dans une benne.
 - Déshuileur / Dessableur : Aéré rectangulaire en deux canaux parallèles avec racleur et écrémage automatique, avec extraction des sables par pompage suivis d'un classificateur à sable, les graisses sont stockées dans une bêche intégrée à l'ouvrage et l'extraction se fait par pompage.
- Traitement primaire constitué de :
 - Deux décanteurs primaires : circulaires avec racleur de fond et de surface.
- Traitement biologique constitué de :
 - Deux bassins d'aération avec aération de fond au moyen des turbocompresseurs.
- Décantation secondaire et pompage des boues activées constituées de :
 - Quatre décanteurs secondaires circulaires à pont sucé et racleur de surface.
 - Ouvrage de pompage des boues en excès et de recirculation des boues par une vis d'Archimède.
- Traitement tertiaire constitués de :
 - Bassin de chloration destiné à la désinfection des eaux traitées en vue d'une valorisation en irrigation pour l'agriculture.
- Ouvrages de sortie et de rejet constitué de :
 - Bassin tampon.
 - Ouvrage d'analyse et d'échantillonnage (laboratoire).
 - Canal de comptage des eaux by passées.

III.4.b. Filière boue

- La ligne de boues est constituée de :
 - Deux épaisseurs de boues : raclés alimentés par les boues fraîches primaires et les boues en excès.
 - Digestion anaérobie des boues : comprenant deux digesteurs primaires brassés et chauffés et un digesteur secondaire brassé par des agitateurs.
 - Système de chaufferie formé par 02 chaudières et 02 échangeurs de chaleur.
 - Traitement de biogaz formé d'un Gazomètre pour stocker les gaz de la digestion, et une torchère en cas d'excès des gaz.
 - 06 lignes de déshydratation mécanique des boues digérées.
 - Séchage thermique des boues dans deux sécheurs rotatifs.

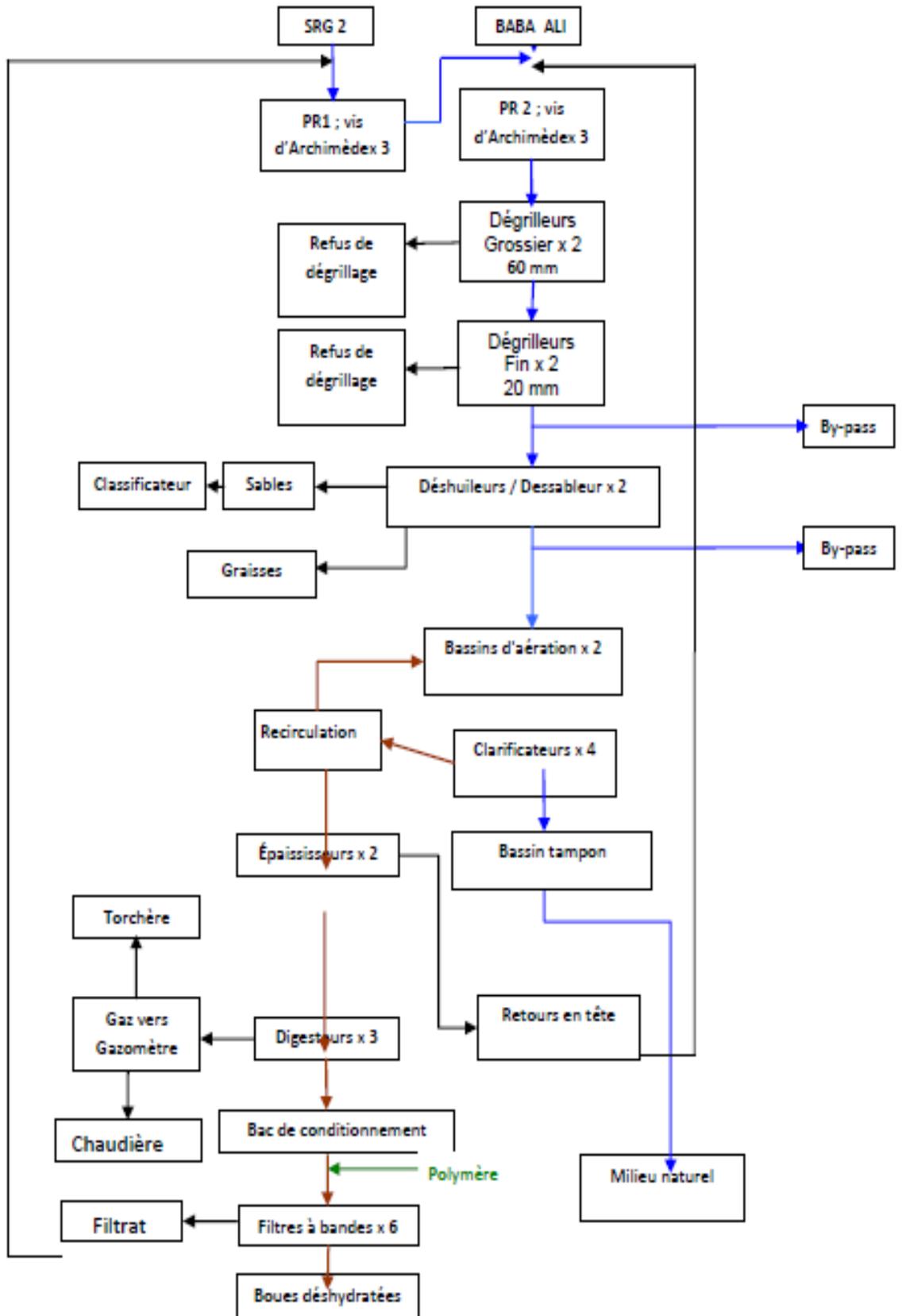


Figure III-3 Synoptique de la station d'épuration

IV. Caractéristiques techniques des ouvrages composants la STEP

IV.1. Poste de relevage n°1 (PR1)

Le Poste de relevage N°1 (PR1) est constitué d'une fosse d'aspiration et 3 vis d'Archimède. Les eaux brutes arrivant de la station de pompage SRG2 par le biais d'un émissaire, ainsi que les eaux usées internes à la station (eaux pluviales et eaux de drainage) sont reprises par les vis d'Archimède du Poste de relevage N°1 (PR1) et relevées vers le Poste de relevage N°2 (PR2).

Dimensionnement

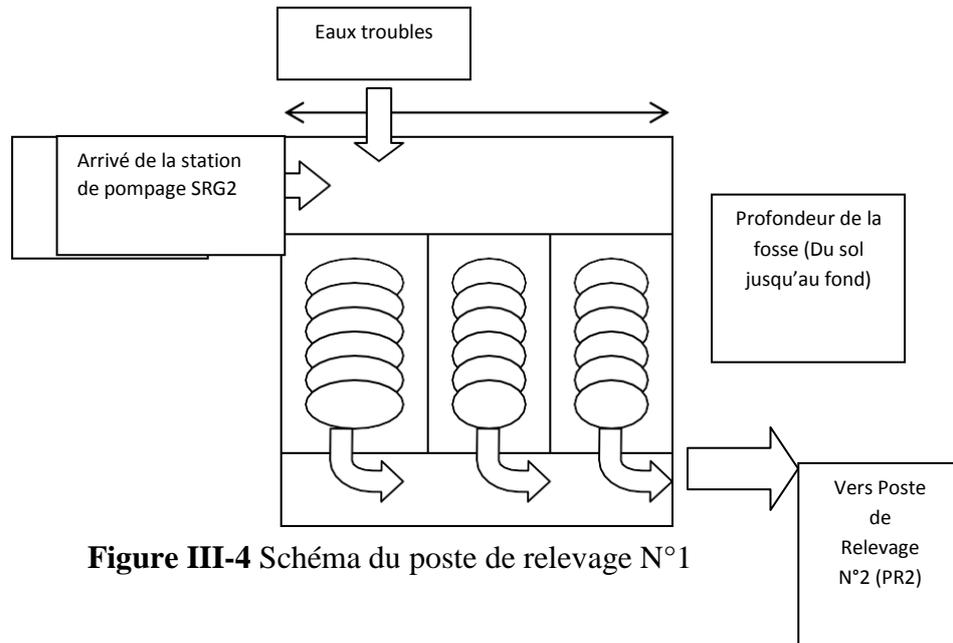


Figure III-4 Schéma du poste de relevage N°1

IV.2. Poste de relevage n°2 (PR2)

Le PR2 est constitué par une fosse d'aspiration et 3 vis d'Archimède. Les eaux brutes relevées depuis le Poste de relevage N°1 (PR1) arrivent dans la fosse du Poste de relevage N°2 (PR2) où elles sont mélangées avec les eaux provenant de l'émissaire Baba Ali puis relevées avec les vis vers le poste de dégrillage.

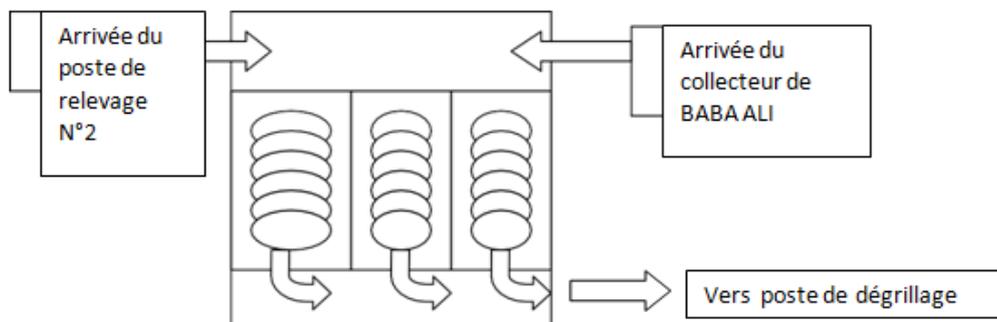


Figure III-5 Schéma du poste de relevage N°2

IV.3. Les prétraitements

IV.3.a. Le dégrillage

Dimensionnement

Largeur d'un dégrilleur grossier : 2 m

Largeur d'un dégrilleur fin : 2 m

Débit maximum admissible par dégrilleur : 7920 m³/h
Espacement entre barreaux (dégrilleur grossier) : 60 mm
Espacement entre barreaux (dégrilleur fin) : 20 mm

Temps de fonctionnement moyen (dégrilleur fin) : 10 h/j

Les refus sont envoyés vers une benne de stockage de volume 10m³.

IV.3.b. Le Dessableur/déshuileur

Dimensionnement

Longueur des deux canaux : 40

Largeur des canaux : 4 m

Hauteur d'eau max : 4,90 m

Surpresseur d'air x 2 : 1438 m³/min

Débit pompe à sable x 3 : 60 m³/h

Rétention moyenne de sable : 9 à 10 m³/j

Rétention moyenne de graisse : 4 à 5 m³/j

Vitesse coulée max : 25 m/h

Temps de séjour minimal (temps sec) : 10 min.

IV.3.c. Classificateur à sable

Le classificateur se situe au niveau du local de dégrillage. Le mélange sables/eau est pompé de la fosse à sable du dessableur vers le classificateur.

Les sables, sont extraits au moyen d'une vis sans fin pour être acheminés vers une benne à l'aide de tapis convoyeur. Les eaux de lavage sont déversées directement à l'aval du dégrillage fin.

IV.3.d. Stockage des graisses

Les graisses sont stockées dans une fosse de capacité de 5m³ et de profondeur 1m. Elles sont ensuite pompées au moyen d'une pompe de 60 m³/h pour être évacuées au moyen d'une citerne d'une contenance de 3m³.

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

IV.4. Le traitement primaire

IV.4.a. Décanteurs primaire

Il est assuré dans deux décanteurs circulaires avec racleurs de fond et de surface à entraînement périphérique. Les principales caractéristiques des ouvrages sont les suivantes:

- Diamètre : 51 m;
- Surface unitaire : 2 042 m²;
- Hauteur droite : 2,5 m;
- Volume utile unitaire : 5 100 m³.

IV.4.b. Local pompes à boues fraîches

Il comprend trois groupes moto- pompes de transfert des boues fraîches récupérées au fond des décanteurs vers les épaisseurs.

IV.5. le traitement secondaire

IV.5.a. Les Bassins d'aération

L'aération est assurée par insufflation d'air à l'aide de 03 turbo compresseurs dont la fonction est double : aération et brassage des boues activées.

Dimensionnement

Deux bassins d'aération fonctionnant en parallèle : 2 x (84 m x 63 m) sur une profondeur de 7 m, soit une capacité de $2 \times 36\,000 \text{ m}^3 = 72\,000 \text{ m}^3$.

Les équipements prévus pour l'épuration biologique sont:

- 03 turbocompresseurs dont deux en service au maximum et un de secours
- Un ensemble de conduites de répartition d'air surpressé le long des deux bassins
- 01 Déversoir de sortie du bassin avec baffle siphonide de protection pour chaque bassin
- Chaque Turbocompresseur ayant un débit max d'air de 32124 m³/h, sous conditions Standards, l'ensemble permet donc de fournir 64248 m³/h.

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki



Figure III-6 Les bassins d'aération

IV.5.b. Les clarificateurs

Dimensions :

Quatre clarificateurs circulaires de diamètre unitaire 60m;

Surface unitaire d'un clarificateur : 2375m²;

Hauteur cylindrique : 3,1m;

Volume unitaire : 8900 m³, soit un volume total de 35600m³.

Chaque clarificateur est équipé d'un pont raclé radial.

La recirculation est assurée au moyen de deux vis d'Archimède (1 en secours) d'un débit max de 3150 m³/h;

Trois pompes à boues de débit unitaire 220m³/h sont implantées au niveau du local en dessous des vis de recirculation.



Figure III-7 (a) Vue d'ensemble (b) Vis de recirculation des boues

IV.6. Traitement complémentaires

Il comprend un poste de chloration et un bassin de contact avec trois couloirs destinés à la désinfection des eaux épurées. Le bassin a pour caractéristiques :

- Longueur : 45 m
- Largeur : 3x6
- Volume : 2 100 m³

Le stockage du chlore est réalisé dans quatorze futs d'une capacité totale de 800 L.

IV.7. Traitement des boues

IV.7.a.L'Épaississement des boues

Dimensions :

Deux épaisseurs de forme cylindrique : 2 x (28m de diamètre sur 3 m de hauteur) Volume : 2 x 1848 m³

Trois pompes boues épaissies : 3 x 65 m³/h, 7.9 kW.

Un broyeur pour chaque pompe : 5.5 kW, 20 à 80 m³/h (50 g/l).

Fonctionnement

Les épaisseurs doivent être alimentés à régime régulier et à concentration pratiquement constante de l'ordre 10 g/l. 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 jusqu'à 50 g/l après épaissement.

L'alimentation d'un épaisseur doit respecter un flux massique qui est compris entre 30 et 50 Kg MES/m³/jour.

Le temps de séjour maximum des boues épaissies dans l'ouvrage est de 24 heures.

IV.7.b.Digestion anaérobie des boues

La digestion anaérobie est un procédé de réduction de la matière organique par fermentation.

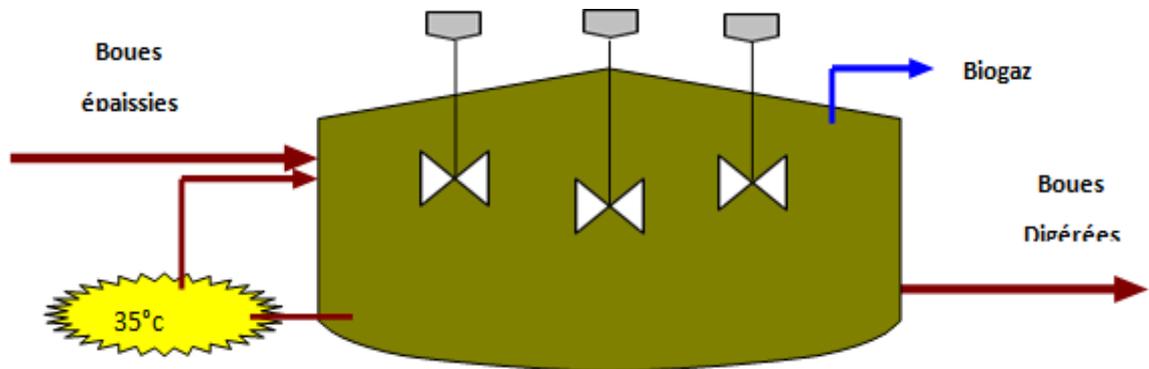


Figure III-8 Principe de digestion

Dimensions :

- Trois digesteurs de forme cylindrique et conique
- 2 digesteurs primaires brassés et chauffés
- 1 digesteur secondaire brassé et non chauffé.
- Volume : 3 x 12 000 m³ = 36 000m³.
- Cinq agitateurs par digesteur : 1 central + 4 latéraux (11 kW à 1500 tr/mn).
- Une sonde de température par digesteur.

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

- Un puits d'extraction par digesteur.
- Une vanne télescopique par digesteur.
- Une sonde de niveau par digesteur.



Figure III-10 Digesteur secondaire



Figure III-9 Digesteurs primaires

Fonctionnement

Les digesteurs primaires sont alimentés par les pompes à boues épaissies. Ils doivent être alimentés le plus régulièrement possible avec les boues épaissies de 40 à 60 g/L. La fluctuation du niveau dans les bassins doit être faible, les puits des agitateurs doivent être émergés (minimum 0.5 m), pour ne pas altérer le fonctionnement des agitateurs, ce qui signifie, que l'évacuation des boues digérées vers les bacs du conditionnement doit se faire régulièrement.

IV.7.c. Chaufferie

Les échangeurs thermiques sont alimentés à contre-courant, par l'eau chaude provenant d'une chaudière biogaz.

Dimensions :

Le système de réchauffement des boues comprend les éléments suivants :

- 2 Echangeurs thermiques boues – eaux.
- 2 Chaudières avec brûleurs.
- 4 Pompes de recirculation d'eau chaude (116 m³/h).
- 2 Pompes de recirculation des boues chauffées (220 m³/h).

En plus il y a aussi :

- 2 Détecteurs du biogaz.
- 2 Pompes à boue digérée primaire vers le digesteur secondaire (120 m³/h)
- 3 Pompes à boue digérée vers déshydratation (200 m³/h).

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

IV.7.d. Gazomètre et Torchère

Le gazomètre est une poche de stockage de biogaz produit.

La torchère est un dispositif de sécurité qui brûle le biogaz en excès non utilisé pour le chauffage. La torchère a son propre contrôle et est combinée au surpresseur qui alimente la torchère en biogaz.

Dimensions :

Gazomètre : volume 3000 m³.

Deux détecteurs du biogaz (gazomètre + local technique).

Un débitmètre électromagnétique du biogaz
Trois surpresseurs à gaz



Figure III-11 Gazomètre

Fonctionnement

Le démarrage et l'arrêt du surpresseur1 s'effectue à partir de l'armoire de commande de la chaudière, les surpresseurs à gaz (2 et 3) sont prévus pour alimenter la torchère en biogaz en excès. Le surpresseur de service est contrôlé par l'instrument de mesure de niveau du gazomètre.

IV.7.e. Bac de conditionnement des boues

Cet ouvrage permet de disposer d'un volume tampon en amont de la déshydratation pour assurer une alimentation homogène et continue des filtres à bandes.

Dimensions :

Un bac de conditionnement des boues digérées de capacité 100 m³.



Figure III-12 Bac de conditionnement

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

Fonctionnement

Le remplissage de ce bac peut se faire soit par pompage soit en mode vase communicant au moyen des puits d'extractions de chacun des digesteurs, pour garantir une continuité de l'alimentation des filtres à bandes. Un brassage suffisant est nécessaire pour éviter toute décantation de la boue dans le bac.

IV.7.f. Préparation automatique de polymère

Le conditionnement des boues par ajout de polymère est indispensable pour rendre possible leur déshydratation par filtres à bandes.

La préparation de la solution mère de polymère s'effectue en continu.

Dimensions :

- Deux bacs de préparation du polymère de 4m^3 ;
- Six pompes doseuses de polymère liquide de débit max de $2\text{m}^3/\text{h}$, 0,43 KW;
- Un dispositif de dilution composée d'un rotamètre pour chaque pompe.

Fonctionnement

Préparation d'une solution mère comprise entre 2 et 5g/L avec de l'eau potable. Injecter le polymère après ajout possible d'une eau de dilution en aval de la pompe d'alimentation en boues des filtres.

La durée de conservation maximale d'une solution de polymère est de 2 jours.

IV.7.g. Déshydratation mécanique des boues

Le système de déshydratation est composé de deux phases :

- Une phase d'égouttage et de fort épaissement de la boue.
- Une phase de pressage progressif pour éliminer le maximum d'eau pour obtenir un produit final pâteux/solide.

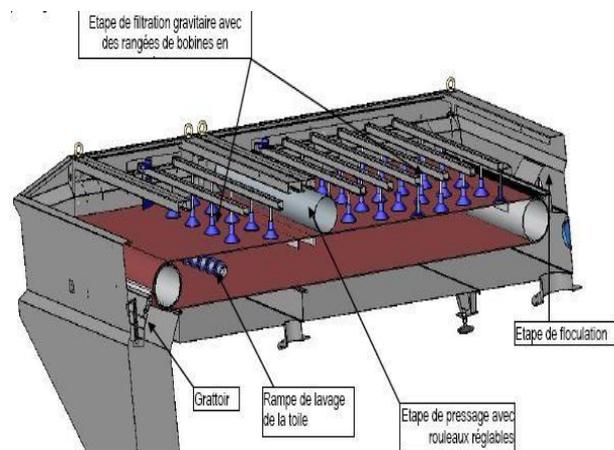


Figure III-13 Table d'égouttage

Chapitre III Présentation de la STEP de Baraki

En fin de traitement, des râteliers permettant de décoller le gâteau des toiles pour être évacué par une vis convoyeuse.

Dimensions

- Six pompes de reprises des boues digérées : 10 à 40 m³/h, 3.9 Kw.
- Six pompes de l'eau de lavage des toiles de débit unitaire 21m³/h à 6 bars.
- Six filtres à bandes : 2,5 m de largeur de bande ; 25m³/h de capacité.
- Deux convoyeurs à vis pour les machines.
- Deux convoyeurs à chaîne.
- Un convoyeur à chaîne.
- Une bande peseuse.
- Un convoyeur à chaîne ascendant vers silos.
- Deux silos de stockage de capacité unitaire 100m³.

Fonctionnement

La qualité de la déshydratation impose une constance dans la qualité et la concentration des boues, d'où l'importance d'une bonne gestion des étapes (digestion / bac de conditionnement) situées en amont de la salle de déshydratation.

Rechercher l'alimentation optimale en évitant tout phénomène de fluage [29].

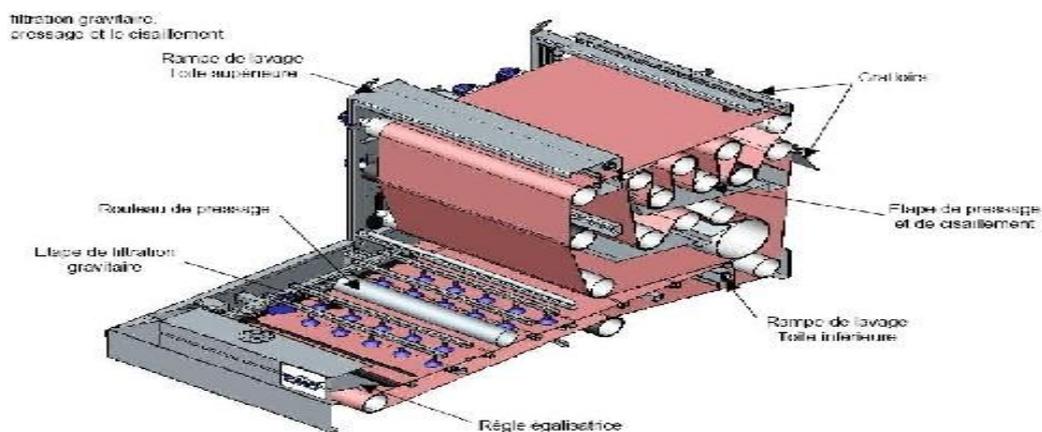


Figure III-14 Filtre à bande

V. Conclusion

Ce chapitre a eu pour but de présenter la STEP ainsi que les caractéristiques et les dimensions des différents ouvrages de la STEP de Baraki. Cependant la station a fait face à plusieurs problèmes techniques et de périodes d'arrêt notamment durant la 1990-2000. La STEP subit en ce moment une extension et sa capacité passera de 900 000 à 1 800 000 EH. Les données utilisées pour l'élaboration d'un modèle de prévision de la production de biogaz ne prennent pas en considération cette extension car nous avons utilisé les données mesurées par la SEAL qui exploite la station depuis 2012. L'extension est faite par la multinationale SUEZ environnement et n'est pas encore achevée.

Chapitre IV Valorisation énergétique des boues

Chapitre IV Valorisation énergétique des boues

I. Introduction

Il existe cinq procédés de valorisation énergétique des boues qui sont la méthanisation, l'incinération, la thermolyse la gazéification et l'oxydation par voie humide. On s'intéressera dans ce chapitre à la méthanisation qui est le procédé étudié dans notre travail et le moyen de production du biogaz.

La fermentation méthanique ou la biométhanisation est l'une des méthodes de valorisation de la biomasse pour la production du 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 directe dans le réseau du gaz naturel.

II. Le biogaz

Considéré comme une énergie renouvelable, il peut être produit à partir d'une variété de matières premières organiques et utilisé pour divers services énergétiques, tels que la chaleur, la cogénération ou comme carburant pour les véhicules. Le biogaz peut être produit par digestion anaérobie ou fermentation de matières biodégradables telles que la biomasse, le fumier, les eaux usées, les déchets municipaux, les déchets verts, les plantes matérielles et les cultures énergétiques.

La fermentation de déchets alimentaires ou végétaux dégage un gaz constitué de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂) appelé biogaz.

Les proportions respectives de méthane et de CO₂ dépendent de la nature des matières fermentées : déjections animales ou ordures ménagères. En général, le biogaz produit contient entre 55 et 65 % de méthane.

III. Propriétés du biogaz

Le biogaz est principalement constitué de méthane combustible et de gaz carbonique inerte. D'autres gaz peuvent venir s'ajouter de façon minoritaire dans la composition du biogaz : hydrogène, sulfure d'hydrogène (H₂S). La teneur de ces gaz dépend étroitement du déchet traité et du degré d'avancement de la méthanisation. Le pouvoir calorifique d'un combustible est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de l'unité de quantité de combustible.

Tableau IV-1 Composition du Biogaz

Nature du gaz	Proportion (en %)
Méthane (CH ₄)	50 - 80
Dioxyde de carbone (CO ₂)	20 - 50
Hydrogène sulfuré (H ₂ S)	0 - 0,5

Chapitre IV Valorisation énergétique des boues

IV. Les équivalences énergétiques du biogaz

Le biogaz est généralement récupéré par aspiration dans le ciel du digesteur et stocké dans un gazomètre.

IV.1. Le PCI

Le PCI est le pouvoir calorifique inférieur lorsque l'eau produite par cette combustion reste à l'état de vapeur. Le PCI du méthane à 0°C à pression atmosphérique est de 9,94 kWh/m³ [30].

Le pouvoir calorifique dépend de la teneur en méthane du biogaz, on peut calculer son PCI grâce à la relation :

$$\text{PCI} = \% \text{ CH}_4 \times 0,994 \text{ (kWh/Nm}^3\text{)}$$

par exemple, pour un biogaz contenant 70% de méthane, le PCI sera de $9,94 \times 0,7 = 6,96 \text{ kWh/m}^3$. [31]

IV.2. Le PCS

Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) d'un m³ de biogaz brut qui a une composition moyenne contenant 60% en méthane (CH₄) vaut environ 5,75 kWh et est semblable à celui de

- 0,4 litre de gaz butane;
- 0,6 litre de gasoil;
- 2 kilogrammes de charbon;
- 5 kilogrammes de bois de chauffe.

Après sa purification (élimination en grande partie du CO₂ et du gaz corrosif H₂S), son pouvoir calorifique supérieur (PCS) peut atteindre les 9,55 kWh/Nm³ ce qui représente l'équivalence de

- 1,1 litres d'essence;
- 1 litre de gasoil;
- 0,93 litre de gaz butane [32].

Chapitre IV Valorisation énergétique des boues

V. Valorisation du biogaz

En général, une partie du biogaz est utilisée pour réchauffer le digesteur, 10 à 30% de la production sur un digesteur mésophile. Le reste est généralement brûlé par une torchère, mais il peut également être valorisé par plusieurs processus les plus répandus sont [33]:

- La production de chaleur qui sera consommée à proximité du site de production ;
- La production conjointe de chaleur et d'électricité, appelée cogénération ;
- L'injection dans les réseaux de gaz naturel après une étape d'épuration (le biogaz devient alors du biométhane) ;
- La transformation du biogaz en carburant sous forme de gaz naturel véhicule (GNV).

V.1. Production de chaleur

Dans le cas d'une simple production de chaleur avec un four ou une chaudière, le traitement du biogaz se limite généralement à une élimination de l'humidité pour éviter l'entraînement de liquide dans les appareils nécessaires à la valorisation. Les rendements énergétiques atteints sont de l'ordre de 80 à 90%.

V.2. La cogénération

L'autre filière possible de valorisation du biogaz est la production d'électricité, ou plutôt la cogénération dont les rendements (70 à 90%) sont bien meilleurs qu'une simple production d'électricité (30 à 35 %). Il existe différents procédés qui permettent de mettre en œuvre cette cogénération. Les moteurs à gaz, les turbines à vapeur ou encore les piles à combustible. Cette voie de valorisation implique généralement une épuration du biogaz plus poussée. Notamment pour éliminer l'hydrogène sulfuré qui est à l'origine de phénomène de corrosion et diminue fortement la durée de vie des installations [34].

La cogénération est un principe de production simultanée d'électricité et de chaleur, cette chaleur étant issue de la production électrique. L'idée de cogénération se base sur le fait que la production électrique dégage une grande quantité de chaleur, habituellement dissipée dans l'environnement. En réponse à une demande thermique (chauffage, procès industriel, ...), elle propose d'utiliser le cycle de génération électrique également comme source thermique.

Les techniques de cogénération consistent à récupérer et à valoriser le plus possible cette énergie thermique résiduelle et disponible. L'énergie électrique de la cogénération est soit autoconsommée, soit réinjectée sur le réseau électrique public suivant des conditions techniques et économiques fixées par les pouvoirs publics.

L'énergie thermique sert le plus souvent au chauffage des bâtiments et/ou à la production d'eau chaude sanitaire ou à des procédés industriels.

Chapitre IV Valorisation énergétique des boues

La cogénération conduit donc à :

- Une production décentralisée d'électricité (au regard des grandes centrales thermiques ou nucléaires) qui, à travers le réseau électrique, peut alimenter des clients proches ou éloignés.
- Une production de chaleur qui doit être consommée à proximité (le plus souvent : site industriel ou réseau de chaleur adapté) [35].

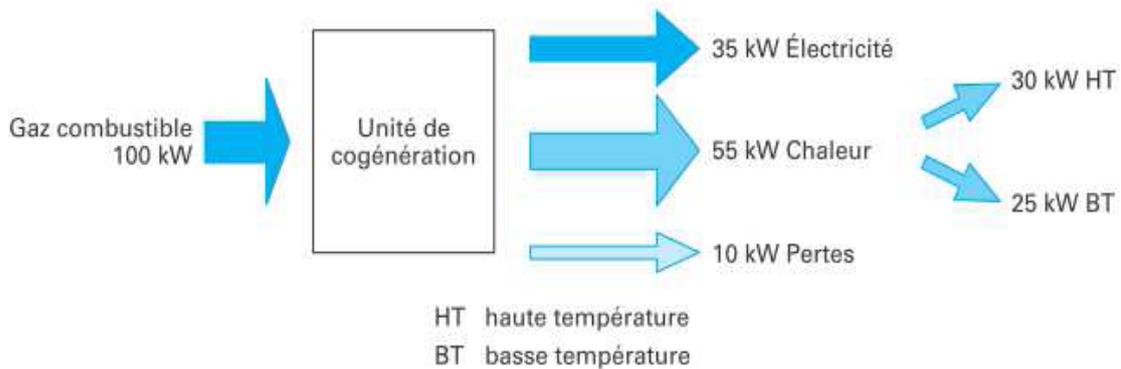


Figure IV-1 Exemple de rendement d'un moteur à gaz

V.3. Injection dans le réseau de gaz naturel

Pour être injecté dans le réseau de gaz naturel, le biométhane demande une épuration poussée du gaz puisque la grande majorité des impuretés (CO_2 , H_2S , H_2O , COV, siloxanes) doit être éliminée. La qualité du biométhane est alors équivalente à celle du gaz naturel.

V.4. Biocarburant

Le biométhane est obtenu à partir du biogaz raffiné à l'eau afin d'en extraire le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène.

VI. Conditions de valorisation du biogaz

La saturation en eau du biogaz ainsi que la présence de CO_2 et de H_2S éventuel sont susceptibles de rendre le biogaz corrosif. Le transport du biogaz s'effectue ainsi généralement par des canalisations en polyéthylène haute densité ou en inox 316. En amont de sa valorisation, le biogaz doit à minima inclure une étape de condensation de la vapeur d'eau. La désulfuration du biogaz par ajout oxydation (chimique ou biologique) est également une étape courante d'épuration. Pour des valorisations plus poussées de type biocarburant ou injection dans un réseau de distribution du gaz, une épuration plus importante (élimination du CO_2 par décarbonatation par exemple) est nécessaire afin de rendre la composition du gaz conforme et proche de celle du gaz naturel.

Chapitre IV Valorisation énergétique des boues

VII. Avantages et Inconvénients

Le biogaz possède des avantages. La combustion du biogaz dans l'air va émettre du dioxyde de carbone mais le bilan énergétique sera neutre puisque c'est la même quantité de CO₂ qui a été absorbé pendant sa fabrication qui sera rejetée lors de la combustion. La méthanisation permet d'éviter l'enfouissement des déchets et donc permet un véritable traitement des déchets. Lorsque les déchets sont digérés, ils deviennent beaucoup moins nocifs pour la nature puisque leur teneur en carbone aura diminué. Et bien sur le Biogaz peut être un véritable substitut au pétrole.

Malheureusement, le biogaz possède aussi des points faibles. Le méthane contenu dans le biogaz est un gaz inflammable ce qui peut être dangereux lors d'un accident de voiture par exemple. Le biogaz requiert énormément de place puisque il faut environ 1000 m³ pour stocker l'équivalent de 0,7 m³ de fioul. Le digesteur doit absolument être à une température de 37°C sous peine de voir la méthanisation ralentie de plusieurs mois. En cas de fuite, le biogaz libère une odeur fortement malodorante.

VIII. Conclusion

Le biogaz est une énergie renouvelable considérable et une alternative aux énergies fossiles. Plusieurs procédés de sa valorisation existent et sont bien maîtrisés d'où la nécessité de s'intéresser à sa production.

Chapitre V Méthodes de calcul pour l'élaboration des modèles de prévision de la production de biogaz

I. Introduction

Pour l'élaboration de modèles de prévision pour la production de biogaz, nous avons utilisé deux méthodes qui sont l'analyse en composante principale et la régression multiple. Nous allons détailler dans ce chapitre ces deux méthodes.

II. L'analyse en composantes principales

II.1. Introduction

Lorsqu'on étudie simultanément un nombre important de variables quantitatives, La difficulté vient de ce que les individus étudiés ne sont plus représentés dans un plan, espace de dimension 2, mais dans un espace de dimension plus importante (par exemple 4). L'objectif de l'Analyse en Composantes Principales est de revenir à un espace de dimension réduite en déformant le moins possible la réalité. Il s'agit donc d'obtenir le résumé le plus pertinent possible des données initiales. C'est la matrice des variances-covariances (ou celle des corrélations) qui va permettre de réaliser ce résumé pertinent, parce qu'on analyse essentiellement la dispersion des données considérées.

De cette matrice, on va extraire, par un procédé mathématique adéquat, les facteurs que l'on recherche, en petit nombre. Ils vont permettre de réaliser les graphiques désirés dans cet espace de petite dimension (le nombre de facteurs retenus), en déformant le moins possible la configuration globale des individus selon l'ensemble des variables initiales (ainsi remplacées par les facteurs).

C'est l'interprétation de ces graphiques qui permettra de comprendre la structure des données analysées. Cette interprétation sera guidée par un certain nombre d'indicateurs numériques et graphiques, appelés aides à l'interprétation, qui sont là pour aider l'utilisateur à faire l'interprétation la plus juste et la plus objective possible. [36]

II.2. Analyse de données

Les statistiques peuvent être vues en fonction de l'objectif fixé ; classiquement les méthodes statistiques sont employées soit pour explorer les données (nommée statistique exploratoire) soit pour prédire un comportement (nommée statistique prédictive ou décisionnelle).

La statistique exploratoire s'appuie sur des techniques descriptives et graphiques. Elle est généralement décrite par la statistique descriptive qui regroupe des méthodes exploratoires simples, uni- ou bidimensionnelles (moyenne, moments, quantiles, variance, corrélation, ...) et la statistique exploratoire multidimensionnelle. L'analyse de données s'inscrit dans ce cadre de la statistique exploratoire multidimensionnelle.

Les objectifs en analyse de données sont de répondre aux problèmes posés par des tableaux de grandes dimensions. Les objectifs sont souvent présentés en fonction du type de méthodes, ainsi deux objectifs ressortent : la visualisation des données dans le meilleur espace réduit et le regroupement dans tout l'espace.

Les méthodes de l'analyse de données doivent donc permettre de représenter synthétiquement de vastes ensembles numériques pour aider l'opérateur dans ses décisions. En fait d'ensembles numériques, les méthodes d'analyse de données se proposent également de traiter des données qualitatives, ce qui en fait des méthodes capables de considérer un grand nombre de problèmes. Les représentations recherchées sont bien souvent des représentations graphiques, comme il est difficile de visualiser des points dans des espaces de dimensions supérieures à deux, nous chercherons à représenter ces points dans des plans.

Ces méthodes ne se limitent pas à une représentation des données, ou du moins pour la rendre plus aisée, elles cherchent les ressemblances entre les individus et les liaisons entre les variables. Ces proximités entre individus et variables vont permettre à l'opérateur de déterminer une typologie des individus et des variables, et ainsi il pourra interpréter ses données et fournir une synthèse des résultats des analyses. [37]

II.3. Définitions

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) fait partie du groupe de méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles.

Elle propose à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de m variables quantitatives pour p unités (appelées aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. Ces données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage ou bien de l'observation d'une population entière. Les représentations des unités permettent de voir s'il existe une structure non connue à priori, sur cet ensemble d'unités de façon analogue, les représentations des variables permettent d'étudier les structures de liaisons linéaires sur l'ensemble des variables considérées. Ainsi on cherchera si l'on peut distinguer des groupes dans l'ensemble des unités en regardant quelles sont les unités qui se ressemblent, celles qui se distinguent des autres. Pour les variables, on cherchera quelles sont celles qui sont très corrélées entre elles, celles qui au contraire ne sont pas corrélées aux autres. [38]

i. Notion d'individu et de caractère

• Individu

L'individu peut désigner selon les cas : une année d'observations ou une autre unité de temps. Il peut être défini comme étant tout élément de la population étudiée.

Un individu « i » est décrit dans un espace RP quelconque, par le vecteur :

$$X_i = \{X_{ij} / j = 1 \text{ à } P\}$$

Le terme X_{ij} est un nombre réel qui représente la mesure de la variable X_j relevée sur l'individu i . [39]

• Caractère

Sur un individu, on relève un certain nombre de caractères, dits aussi variables, désignant en général un paramètre intervenant dans un phénomène complexe à étudier. [39]

Le caractère (ou variable) " j " est décrit par le vecteur appartenant à RN :

$X_j = \{X_{ij} / i=1 \text{ à } N\}$

ii. Définition algébrique

L'analyse en composantes principales considère P variables pour lesquelles on dispose de N individus, on aura ainsi une matrice dite de données, qui résulte du croisement « NxP », on la note [X] et elle décrit comme suit :

$$[X] = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{ip} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & X_{Nj} & \dots & X_{Np} \end{bmatrix}$$

Nous pouvons ensuite définir les paramètres statistiques pour chaque variable de la matrice [X] :

- La moyenne

$$\bar{X}_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij}$$

\bar{X}_j : Moyenne de la j^{ième} variable

-Variance

$$\sigma_{x_j}^2 = var_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2$$

Var_j : variance de la j^{ième} variable.

σ_{x_j} : Écart type de la j^{ième} variable.

N : Nombre d'individus.

• **Covariance**

$$Cov(X_j, X_k) = \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_{ik})$$

• **Corrélation**

$$Cor(X_j, X_k) = \frac{Cov(X_j, X_k)}{S_j * S_k} = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{X}_{ij} - X_j) * (\bar{X}_{ik} - X_k)}{\left[\sum_{i=1}^N (X_{ij} - X_j)^2 * \sum_{i=1}^N (X_{ik} - X_k)^2 \right]^{1/2}}$$

- Réduire efficacement le nombre de dimensions étudiées (et ainsi simplifier l'analyse), en cherchant à exprimer le plus fidèlement possible l'ensemble original de données grâce aux relations détectées entre les variables.

II.5. Domaine d'application

Les applications sont très nombreuses. Il y a en fait deux façons d'utiliser l'ACP :

- Soit pour l'étude d'une population donnée en cherchant à déterminer la typologie des individus et des variables. Par exemple, en hydrologie, l'ACP est utilisé dans la critique, la reconstitution et/ou la cartographie de données hydrologique, et aussi en analyses de séries chronologiques provenant de réseaux de mesures hydrométéorologiques et hydrogéologiques, et enfin l'élaboration de méthodologie de simulation et de prévision des variables climatologiques aléatoires et cycliques par l'analyse en composantes principales. [40]
- Soit pour réduire les dimensions des données sans perte importante d'information, par exemple en hydrologie l'ACP intervient dans l'élaboration des bilans énergétiques en expliquant un phénomène précis, en réduisant la quantité de variables qui peuvent l'expliquer et en évitant la redondance (telle que le phénomène de l'évapotranspiration qui peut être influencé par de nombreuses variables telles que la température, l'insolation, la vitesse du vent, l'humidité...etc.

II.6. Cadre

Le tableau sur lequel on applique une analyse en composantes principales, est constitué de « N » individus qui doivent être de même nature et qui sont numérotés de (1 à n).

D'autre part les « P » variables peuvent ne pas être homogènes et avoir des unités de mesure différentes.

II.7. Procédé d'application de l'ACP

Afin de faire une Analyse en Composantes Principales, il faut procéder comme suit :

1. Formation de la matrice des données brutes [X] (composée par le croisement de N individus x P variables).
2. Calcul des paramètres statistiques :(moyenne, écart type).
3. Calcul des variables centrées réduites :

$$X_{CR} = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$

- 4- Calcul des coefficients de corrélation :

$$Cor(X, X_k) = \frac{Cov(X_j, X_k)}{S_j * S_k} = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{X}_{ij} - X_j) * (\bar{X}_{ik} - X_k)}{\left[\sum_{i=1}^N (X_{ij} - X_j)^2 * \sum_{i=1}^N (X_{ik} - X_k)^2 \right]^{1/2}}$$

5- Calcul des valeurs propres et des vecteurs propres de la matrice de corrélation obtenue.

6- Calcul des composantes principales, avec :

CP = matrice des variables centrées réduites (NxP) x matrice des vecteurs propres (NxN).

7- Calcul des composantes principales centrées réduites

$$CP'(i, j) = \frac{CP(i, j)}{\sqrt{Vp(j)}}$$

Avec $Vp(j)$: la valeur propre correspondant à l'individu j.

8-Calcul de la matrice de corrélation entre CP' et XCR ($\text{cor}(CP', XCR)$).

9-Tracé des cercles de corrélation.

II.8. Résultats d'application

Une analyse en composantes principales fournit trois sources de renseignements, toutes nécessaires à l'interprétation [40] :

- Un tableau de vecteurs et valeurs propres.
- Un tableau de corrélation des individus avec les axes factoriels.
- Un tableau de corrélation des variables avec les axes principaux.

II.9. Analyse des résultats

Analyser les résultats d'une ACP, c'est répondre à trois questions :

II.9.a. La factorisation des données

Dans un premier temps, il convient d'observer la matrice de corrélation. Si plusieurs variables sont corrélées (> 0.5), la factorisation est possible. Sinon, la factorisation n'a pas de sens et n'est donc pas conseillée.

Pour tester la corrélation parfaite, il faut calculer le déterminant de la matrice. Notons que nous recherchons un déterminant petit, ce qui constitue un bon indice de l'existence de patrons de corrélations entre les variables, mais non égal à zéro.

Dans un deuxième temps, il faut observer l'indice de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) qui doit tendre vers 1. Il indique jusqu'à quel point l'ensemble de variables retenu est un ensemble cohérent et permet de constituer une ou des mesures adéquates de concepts.

Pour juger de l'indice de KMO, on peut utiliser l'échelle suivante :

- Misérable en dessous de 0,5
- Médiocre entre 0,5 et 0,6
- Moyen entre 0,6 et 0,7
- Bien entre 0,7 et 0,8
- Très bien entre 0,8 et 0,9
- Et excellent au-delà de 0.9

Enfin, on utilise le test de sphéricité de Bartlett, dont l'échelle qui peut être utilisée est :

- Si la signification (Sig.) tend vers 0.000 c'est très significatif,
- Inférieur à 0.05, significatif,
- Entre 0.05 et 0.10, acceptable,
- Au-dessus de 0.10, on rejette.

Toutefois le test est très sensible au nombre de cas, il est presque toujours significatif lorsque le nombre de cas est grand [41].

II.9.b. Nombre de facteurs à retenir

Trois règles sont applicables :

- **1ère règle :**

La règle de Kaiser qui veut qu'on ne retienne que les facteurs aux valeurs propres supérieures à 1.

- **2ème règle :**

On choisit le nombre d'axes en fonction de la restitution minimale d'informations que l'on souhaite.

- **3ème règle:**

Le « Scree-test » ou test du coude. On observe le graphique des valeurs propres et on ne retient que les valeurs qui se trouvent à gauche du point d'inflexion. Graphiquement, on part des composants qui apportent le moins d'information (qui se trouvent à droite), on relie par une droite les points presque alignés et on ne retient que les axes qui sont au-dessus de cette ligne.

II.9.c. Interprétation des résultats

C'est la phase la plus délicate de l'analyse. On donne un sens à un axe grâce à une recherche lexicale à partir des coordonnées des variables et des individus. Ce sont les éléments extrêmes qui concourent à l'élaboration des axes.

Si la variance expliquée est trop faible, on peut choisir d'exclure certaines variables. Pour choisir les variables à éliminer, on observe leur qualité de représentation : plus la valeur associée à la ligne «Extraction » est faible, moins la variable explique la variance.

Il faut également tenir compte du positionnement de chaque variable sur chaque axe [42].

II.10. Représentation graphique

Une fois les résultats numériques obtenus nous passons à la représentation graphique.

II.10.a. La carte des variables

Nous pouvons représenter chaque variable par un point dont les coordonnées sont les covariances avec les CP réduites (car dans les représentations graphiques les axes sont orthonormés).

$$Cov(X_j, C_k) = (\lambda)^{1/2} * V_k(j)$$

Dans l'hypothèse où les variables sont bien représentées dans un plan formé par deux CP :

- La distance d'une variable à l'origine des axes est égale à sa norme (écart type).
- Le cosinus de l'angle formé par deux variables est égal à leur coefficient de corrélation.
- Deux variables fortement corrélées et éloignées l'une de l'autre possèdent une covariance élevée négative.

Si nous considérons une variable centrée réduite Y_j au lieu de la variable initiale X_j , les coordonnées de cette nouvelle variable dans le plan factoriel sont calculées par :

$$Cov(Y_j, C_i) = Cov\left(\frac{X_j}{S_j}, C_i\right) = Cor(X_j, C_i)$$

C_i : Composante principale normée ;

S_j : Ecart type de la $j^{\text{ème}}$ variable.

Comme la variance de Y_j est égale à 1, cela signifie que son point représentatif se trouve sur une sphère de rayon égal à 1. C'est pourquoi le cercle unité tracé sur chacun des plans étudiés s'appelle cercle de corrélation. La variable sera d'autant mieux expliquée, que son point représentatif se rapproche du cercle et inversement [39].

II.10.b. La carte des individus

Nous pouvons aussi observer la répartition des individus selon les principaux axes choisis. Ainsi deux individus seront proches dans l'espace R_p , s'ils sont proches dans le plan factoriel. Dans le graphique des individus on s'intéresse aux distances inter-individus qu'on peut interpréter comme étant des ressemblances.

II.11. Conclusion

L'analyse en composantes principales qui est une méthode factorielle d'analyse des données, permet d'étudier les corrélations entre les variables d'un tableau de données, tout en cherchant la réduction de sa taille, en remplaçant les variables originales par des nouvelles variables appelées composantes principales.

Elle peut être utilisée dans divers domaines, sans inconvénients et sans dangers, elle offre notamment l'avantage, lors de son application, de ne pas nécessiter au préalable d'hypothèses restrictives.

On peut y distinguer deux aspects principaux :

- **L'analyse descriptive** : s'intéresse à la structure de la matrice d'observations, basée principalement sur la représentation graphique des résultats obtenus par l'ACP et ce, afin de visualiser certains problèmes non décelables à l'état brut, vu l'indépendance des variables.
- **L'analyse opérationnelle** : l'ACP fournit un outil mathématique en apparence, pour

- Optimisation d'un réseau de mesures.
- Reconstitution des données.
- Prévision.
- Simulation.

III. Régression multiple

III.1. Introduction

Il arrive souvent que l'on veuille expliquer la variation d'une variable dépendante par l'action de plusieurs variables explicatives. Lorsque le cas se présente, on peut recourir à la méthode de régression multiple. Dans ce chapitre, nous allons voir les mécanismes et les aspects théoriques relatifs à cette technique.

III.2. Forme générale du modèle

La régression linéaire multiple est une généralisation, à P variables explicatives, de la régression linéaire simple.

Etant donné un échantillon $(Y_i, X_{i1}, \dots, X_{ip})$, $i = 1, \dots, n$, nous cherchons à expliquer, avec le plus de précision possible, les valeurs prises par Y_i , dite variable dépendante, à partir d'une série de variables explicatives (ou indépendantes) X_{i1}, \dots, X_{ip} . Le modèle théorique, formulé en termes de variables aléatoires, prend la forme.

$$Y_i = b_0 + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_p X_{ip} + \varepsilon_i, i = 1 \dots n$$

Où ε_i est l'erreur du modèle qui exprime, ou résume, l'information manquante dans l'explication linéaire des valeurs observées à partir des variables explicatives. Les a_i sont les paramètres à estimer.

L'équation de régression multiple est celle d'un hyperplan à P dimensions qui ne peut pas être représenté concrètement (au-delà de 2 dimensions), les paramètres b_i sont les pentes de cet hyperplan dans les dimensions considérées et sont appelés « coefficients de régression ».

L'hyperplan est ajusté selon le principe des moindres carrés-qui sera traité plus en détail dans ce qui suit.

III.3. Objectifs de la régression multiple

La régression multiple peut être utilisée à plusieurs fins:

- Trouver la meilleure équation linéaire de prévision (modèle) et en évaluer la précision et la signification.
- Estimer la contribution relative de deux ou plusieurs variables explicatives sur la variation d'une variable à expliquer; déceler l'effet complémentaire ou, au contraire, antagoniste entre diverses variables explicatives.

- Juger de l'importance relative de plusieurs variables explicatives sur une variable dépendante en lien avec une théorie causale sous-jacente à la recherche.

III.4. Moindres carrés ordinaires

Principe

Lorsque la relation entre Y_i et les X_{i1}, \dots, X_{ip} existe, les données mesurées n'appartiennent pas forcément à la droite de régression. Pour tenir compte dans le modèle mathématique des erreurs observées, on considère les données $\{Y_1, Y_2, \dots, Y_p\}$ comme autant de réalisations d'une variable aléatoire Y et parfois aussi les données $\{(X_{11}, \dots, X_{1p}), \dots, (X_{p1}, \dots, X_{pp})\}$ comme autant de réalisations de variables aléatoires X_1, X_2, \dots, X_p .

Les données $\{(X_{i1}, \dots, X_{ip}, Y_i), i = 1, \dots, n\}$ peuvent être assimilées à un nuage de n points.

Rechercher une relation affine entre les variables X_i et Y revient à rechercher une droite qui s'ajuste le mieux possible à ce nuage de points. Parmi toutes les droites possibles, on retient celle qui rend minimale la somme des carrés des écarts des valeurs observées Y_i à la droite de régression. S_i représente cet écart, appelé aussi résidu. Le principe des moindres carrés consiste à rechercher les valeurs des paramètres qui minimisent la somme des carrés des résidus, c'est-à-dire la quantité :

$$E = \sum_{i=1}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_{i1} - \dots - b_p X_{ip})^2$$

III.5. Démarche de la régression multiple

Les étapes d'une modélisation par régression multiple sont les suivantes :

- Estimer les paramètres « a_i » en exploitant les données.
- Evaluer la précision de ces estimateurs.
- Mesurer le pouvoir explicatif global du modèle, en considérant toutes les variables, et de façon individuelle en considérant les variables une à une.
- Sélectionner les variables les plus pertinentes.
- Evaluer la qualité du modèle lors de la prédiction.
- Détecter les observations qui peuvent influencer ou fausser exagérément les résultats (points atypiques).

III.5.a. Calcul des coefficients de régression

Le calcul des coefficients de régression peut se faire de plusieurs manières, l'une, utilisée dans les logiciels informatiques repose sur le calcul matriciel. L'autre, présentée ci-dessous se base sur un système de m équations à m inconnues qui permet dans un premier temps d'obtenir les coefficients de régression centrés et réduits (comme si on faisait une régression sur des variables centrées réduites).

Les valeurs des coefficients de régression pour les valeurs brutes sont ensuite obtenues par multiplication par le rapport des écarts-types de la variable dépendante et de la variable explicative considérée.

Finalement, on calcule la valeur de l'ordonnée à l'origine.

III.5.b. Calculs préliminaires

On peut calculer les coefficients de régression et l'ordonnée à l'origine d'une régression multiple en connaissant:

- Les coefficients de corrélation linéaire simple de toutes les paires de variables entre elles (y compris la variable dépendante): $r_{x_1x_2}, r_{x_1x_3} \dots r_{x_1y}, \dots$ etc.;
- Les écarts-types de toutes les variables: $S_{x_1}, S_{x_2}, S_{x_3} \dots S_y$;
- Les moyennes de toutes les variables.

III.5.c. Calcul des coefficients centrés-réduits

On calcule les coefficients centrés-réduits $b_1', b_2', \dots b_p'$ en résolvant un système de p équations normales à p inconnues ($p =$ nombre de variables explicatives).

Prenons pour exemple le cas d'une régression à trois variables explicatives ($p=3$), le système d'équations est le suivant :

$$r_{x_1y} = b_1' + r_{x_1x_2} b_2' + r_{x_1x_3} b_3'$$

$$r_{x_2y} = r_{x_2x_1} b_1' + b_2' + r_{x_2x_3} b_3'$$

$$r_{x_3y} = r_{x_3x_1} b_1' + r_{x_3x_2} b_2' + b_3'$$

Ce système se résout par substitutions successives, tel que

$$b_1' = r_{x_1y} - r_{x_1x_2} b_2' - r_{x_1x_3} b_3'$$

Est placé dans les deux dernières équations. On isole ensuite b_2' ou b_3' dans l'une des équations. Dès lors, on peut trouver une des valeurs b' et, en remontant la filière, on trouve les deux autres.

III.5.d. Coefficients de régression pour les variables d'origine

On trouve les coefficients de régression pour les variables originales $b_1, b_2, \dots b_p$ en multipliant chaque coefficient centré-réduit par l'écart-type de la variable dépendante (S_y), et en divisant le résultat par l'écart-type de la variable explicative considérée (S_{x_i}).

Pour notre exemple à trois variables explicatives :

$$b_1 = b_1' S_y / S_{x_1}$$

$$b_2 = b_2' S_y / S_{x_2}$$

$$b_3 = b_3' S_y / S_{x_3}$$

Ordonnée à l'origine

On trouve l'ordonnée à l'origine en posant la moyenne de la variable dépendante Y , et en lui soustrayant chaque coefficient de régression multiplié par la moyenne de la variable explicative correspondante:

$$b_0 = y - (b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_{ii} + \dots + b_{pp})$$

-Notation matricielle

Le système d'équations du modèle de régression peut être écrit sous la forme matricielle simplifiée suivante :

$$Y = Xb + \varepsilon$$

La somme des carrés des erreurs s'écrit

$$SCE = \varepsilon^T \varepsilon = (Y - Xb)^T (Y - Xb)$$

Les b_i sont choisis de façon à minimiser les SCE. Le minimum est atteint lorsque toutes les dérivées partielles des SCE par rapport aux différents b_i s'annulent :

$$SCE = Y^T Y - Y^T Xb - b^T X^T Y + b^T X^T Xb$$

La somme des carrés des erreurs s'écrit :

$$\frac{\delta SCE}{\delta b} = (X^T X) b - X^T Y = 0$$

D'où on tire finalement

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y$$

-Qualité de la régression

Commençons d'abord par un tableau récapitulatif comportant les différentes notations qui seront utilisées dans ce qui suit :

Tableau V-1 Différentes notations utilisées en régression

Nom	Sigle	Définition		DDL
SCT	Somme des carrés totale	$(Y - Y \text{ moy})^T (Y - Y \text{ moy})$	$\sum (Y_i - \bar{Y})^2$	n-1
SCR	Somme des carrés de la régression	$(Y \text{ sim} - Y \text{ moy})^T (Y \text{ sim} - Y \text{ moy})$	$\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	p
SCE	Somme des carrés des erreurs	$(Y - Y \text{ sim})^T (Y - Y \text{ sim})$	$\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	n-p-1

Y : Valeurs observées de la variable dépendante;

\bar{Y} : Moyenne des valeurs observées de la variable dépendante;

\hat{Y} : Valeurs simulées de la variable dépendante;

n : Taille de l'échantillon;

p : Nombre de variables indépendantes.

Afin d'évaluer la qualité d'une régression multiple, les paramètres et tests suivants sont utilisés :

i. Coefficient de détermination multiple R^2

Il permet de mesurer la variation expliquée par le modèle de régression à travers le rapport entre la dispersion expliquée par la régression (SCR) et la dispersion totale (SCT)

Le coefficient de détermination multiple est défini, lorsque le modèle de régression comporte une constante par la relation suivante :

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Cependant, l'expression suivante, prenant en compte les deux cas de présence et d'absence de constante est la plus utilisée :

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

La variance totale étant la somme des variances expliquée et résiduelle

$$SCT = SCE + SCR \quad \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$$

Les valeurs du R^2 varient dans l'intervalle [0, 1], mais contrairement à la régression simple, une valeur de R^2 proche de 1 n'est pas une indication suffisante à elle seule de la bonne qualité du modèle. Il est nécessaire d'effectuer un test sur la significativité de R afin de savoir s'il existe une relation entre Y et les X i.

ii. R^2 ajusté

Une des propriétés de la régression multiple est que l'ajout de chaque variable explicative au modèle permet d'"expliquer" plus de variation, et cela même si la nouvelle variable explicative est complètement aléatoire. Cela vient du fait que si l'on compare deux variables aléatoires, les fluctuations aléatoires de chacune d'entre elles produisent de très légères corrélations: Y et chacune des X i ne sont pas strictement indépendantes (orthogonales) même s'il n'y a aucune relation réelle entre elles. Par conséquent, le R^2 comprend une composante déterministe, et une composante aléatoire d'autant plus élevée que le nombre de variables explicatives est élevé. Le R^2 est donc biaisé.

De plus, on ne peut pas comparer des modèles de complexité différente (nombre de variables indépendantes différent) sur la base du R^2 , c'est pour ces raisons qu'un nouveau paramètre, le R^2 ajusté – noté aussi \bar{R}^2 - a été introduit par EZEKIEL (1930).

Son but est de « pénaliser » l'augmentation de la valeur du R^2 due à l'introduction de nouvelles variables dans le modèle. C'est un paramètre corrigé à l'aide des degrés de liberté.

Il est donné par la relation suivante :

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - p - 1} = 1 - \frac{\frac{SCE}{n-p-1}}{\frac{SCT}{n-1}}$$

Comme pour le R^2 , les valeurs \bar{R}^2 du varient dans l'intervalle $[0, 1]$. Une valeur proche de 1 indique une bonne qualité de l'ajustement prenant en compte le nombre de variables explicatives.

iii. Test de signification du modèle de régression multiple

Un test statistique consiste à confronter les résultats d'une expérience à une hypothèse de départ (H_0). Pour réaliser ce test, il faut connaître la distribution d'une statistique en supposant l'hypothèse de départ vérifiée.

Nous nous concentrerons sur le test le plus important en régression: est-ce que la pente de la régression est significativement différente de zéro ? (cette pente est égale à zéro lorsqu'il n'y a pas de relation entre les variables Y et X). Si les variables X expliquent vraiment Y alors la SCE sera faible car les erreurs seront faibles et SCR sera élevée.

IV. Validation du modèle de régression, étude des résidus

L'étude des résidus d'un modèle de régression vise plusieurs objectifs:

- Vérifier les postulats du modèle: normalité, homogénéité des variances des résidus (homoscédasticité) et indépendance des résidus.
- Détecter des données aberrantes qui s'écartent considérablement du modèle.
- Détecter des tendances particulières (ex. comportement quadratique des résidus) et des relations des résidus avec des variables externes qui permettraient d'affiner le modèle.

V. Conclusion

La régression multiple est une technique de modélisation basée sur les moindres carrés ordinaires, ses objectifs sont variés et il existe plusieurs façons de procéder en fonction de l'introduction des différentes variables dans le modèle.

Afin d'évaluer la qualité du modèle, plusieurs critères tels que le R^2 et le \bar{R}^2 ajusté sont utilisés. L'existence d'une relation entre la variable dépendante et les variables explicatives est quant à elle estimée par un test de Fisher.

Finalement, il faut faire attention aux différents problèmes que l'on peut rencontrer lors de la modélisation par régression multiple et ceci afin d'aboutir à un modèle robuste et de bonne qualité, permettant de faire des estimations ou des prédictions avec un niveau de précision appréciable.

Chapitre VI Elaboration d'un modèle de prévision pour la production du biogaz

I. Introduction

Dans ce chapitre nous allons mettre en pratique les méthodes détaillées auparavant, en les appliquant aux données de la STEP de Baraki, dans le but d'élaborer des modèles de prévision de la production du biogaz.

Les données de l'étude

Pour notre étude, nous nous sommes basés sur les données mesurées entre le **04/01/2012** et le **07/11/2015** par l'entreprise SEAAL responsable de la gestion de la STEP de Baraki.

II. Choix des paramètres de pollution à prendre en considération dans l'établissement du modèle de prévision de la production de Biogaz

II.1. Evolution des paramètres de pollution dans le temps

Pour avoir une idée générale sur l'ensemble des données recueillies on a étudié l'évolution des différents paramètres dans le temps, les résultats sont présentés dans les figures suivantes

Remarque La STEP de baraki était à l'arrêt durant la période ente **06 /12 /2013** et **09/03/2014** pour des raisons techniques

II.1.a. Evolution du débit d'entrée

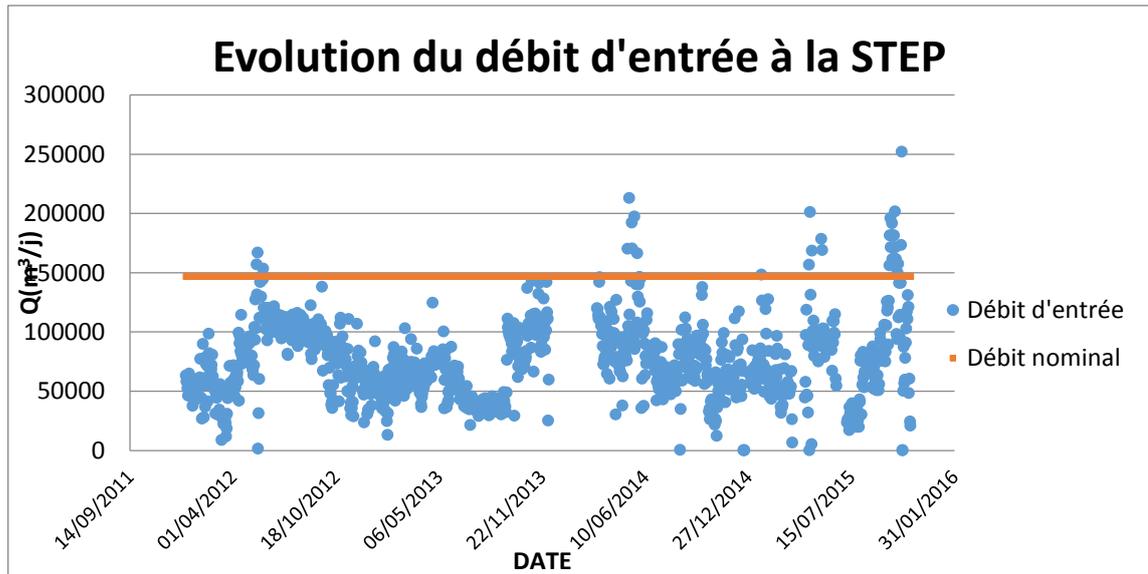


Figure VI-1 Evolution journalière du débit d'entrée à la STEP

Le débit de l'effluent d'entrée varie entre 0 et 252 00 m³/j, avec une moyenne de 74562 m³/j. Certains dépassements de la capacité nominale sont dus à des précipitations intenses.

II.1.b. Evolution du PH :

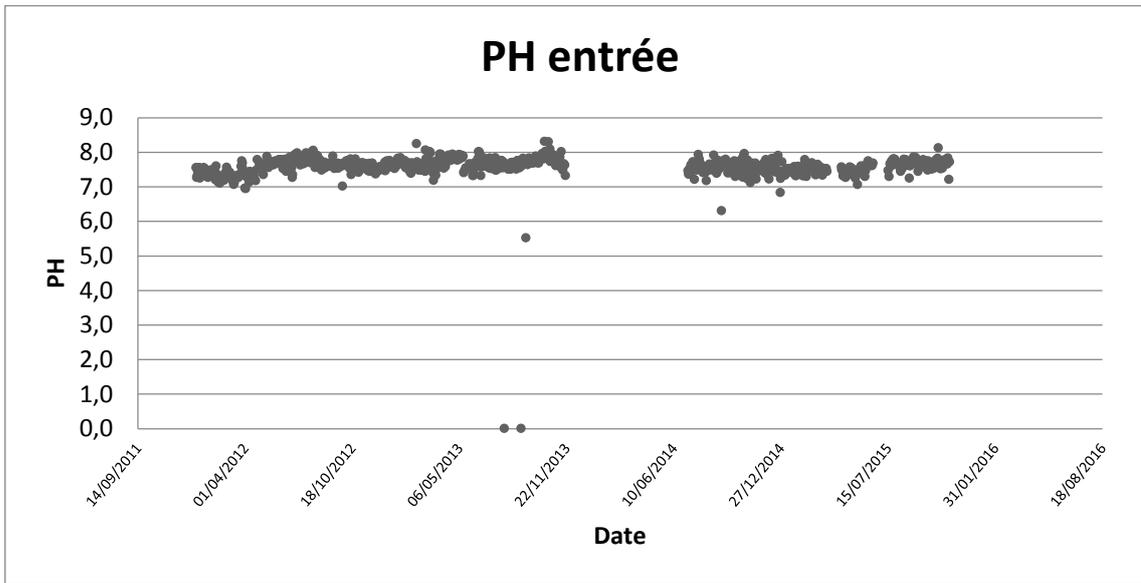


Figure VI-2 Evolution journalière du PH de l'eau brute

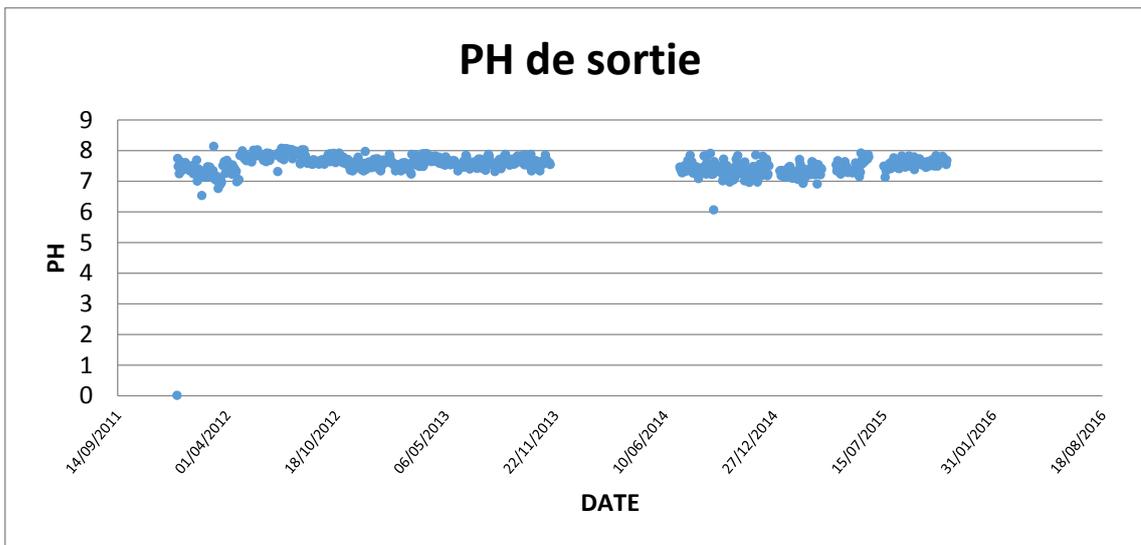


Figure VI-3 Evolution journalière du PH de l'eau épurée

Les deux figures ci-dessus montrent que le PH de l'eau brute varie légèrement et oscille entre 5.5 et 8.3 avec une moyenne de 7.6 et le PH de l'eau épurée varie légèrement et oscille entre 6.1 et 8.1 avec une moyenne de 7.5.

En comparant l'évolution du PH à l'entrée et à la sortie de la STEP, on remarque des fluctuations insignifiantes de ce paramètre, par conséquent celui-ci n'apportera aucune information pertinente pour la problématique étudiée, il ne sera pas pris en considération dans la suite de l'analyse des paramètres de la STEP.

II.1.c. Evolution de la température

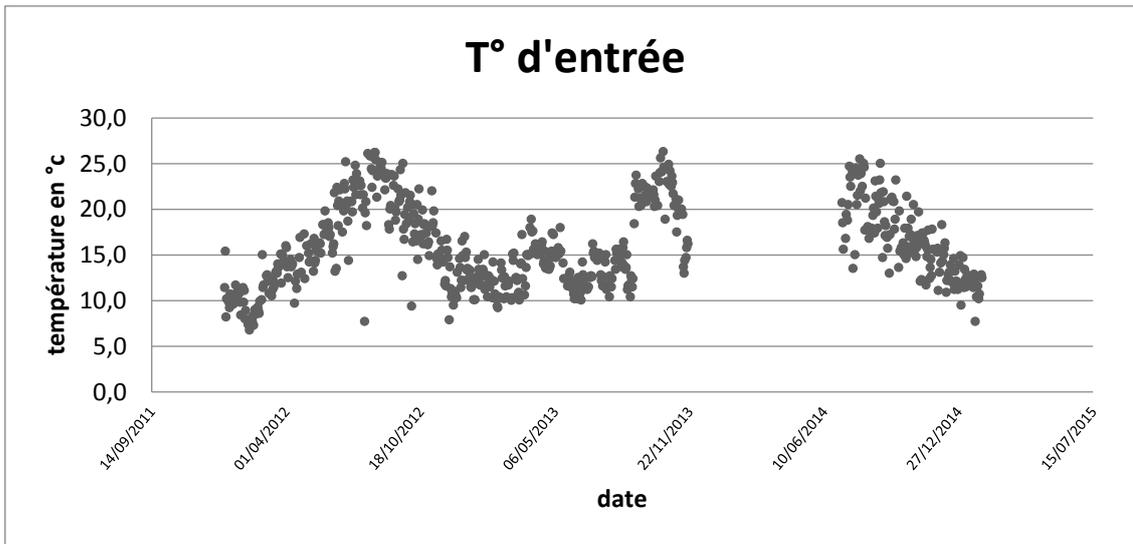


Figure VI-4 Evolution journalière de la température de l'eau à l'entrée

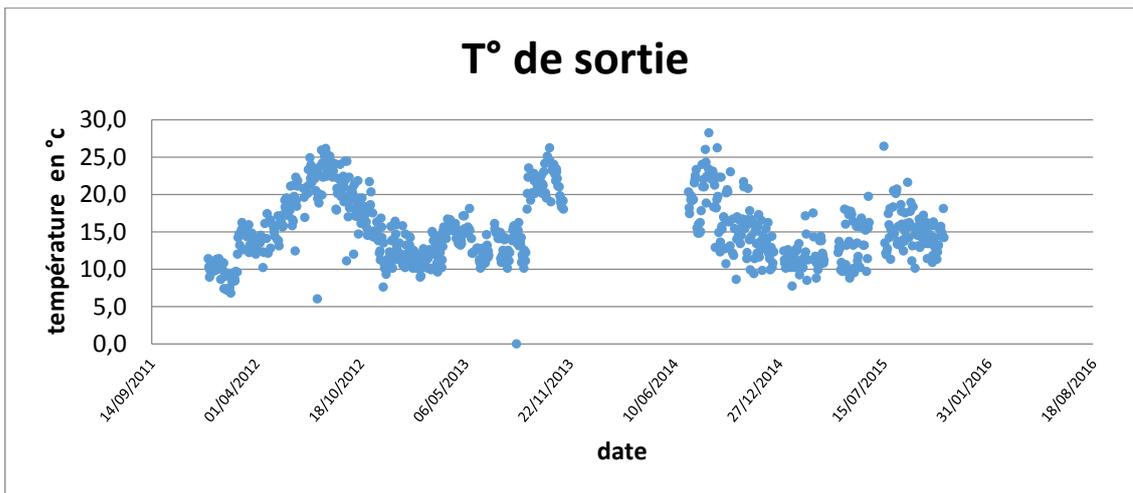


Figure VI-5 Evolution journalière de la température de l'eau épurée

On remarque que la variation de la température est cyclique à l'entrée comme à la sortie et oscille entre 6 et 28,2 °C.

On déduit que la température de l'eau brute et celle de l'eau épurée est bien cyclique, celle-ci est tout simplement due aux variations saisonnières. Ceci nous permet de retirer ce paramètre de notre analyse car il n'influera pas sur la problématique étudiée.

II.1.d. Evolution de la conductivité

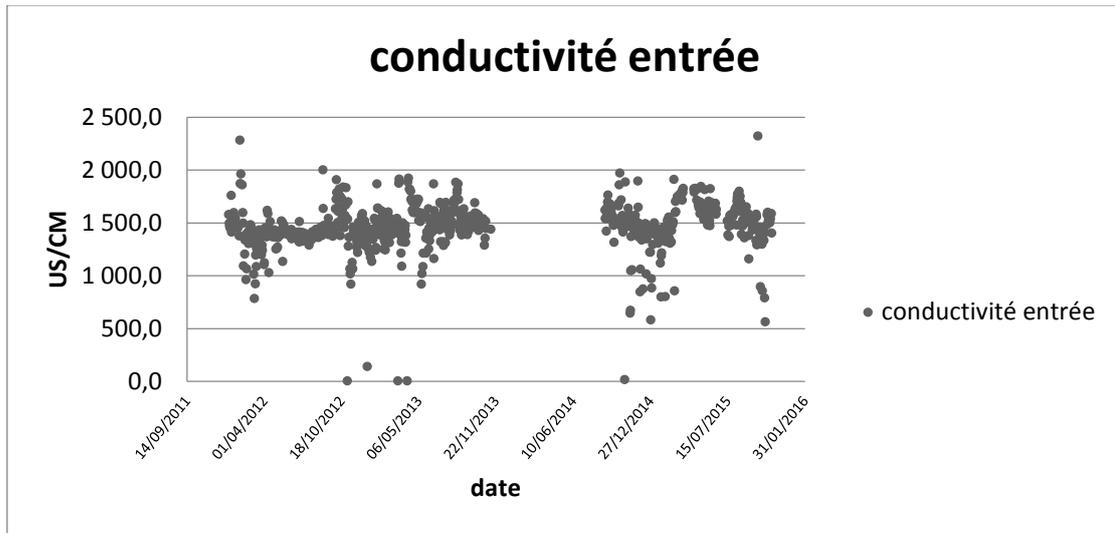


Figure VI-6 Evolution journalière de la conductivité de l'eau à l'entrée de la STEP

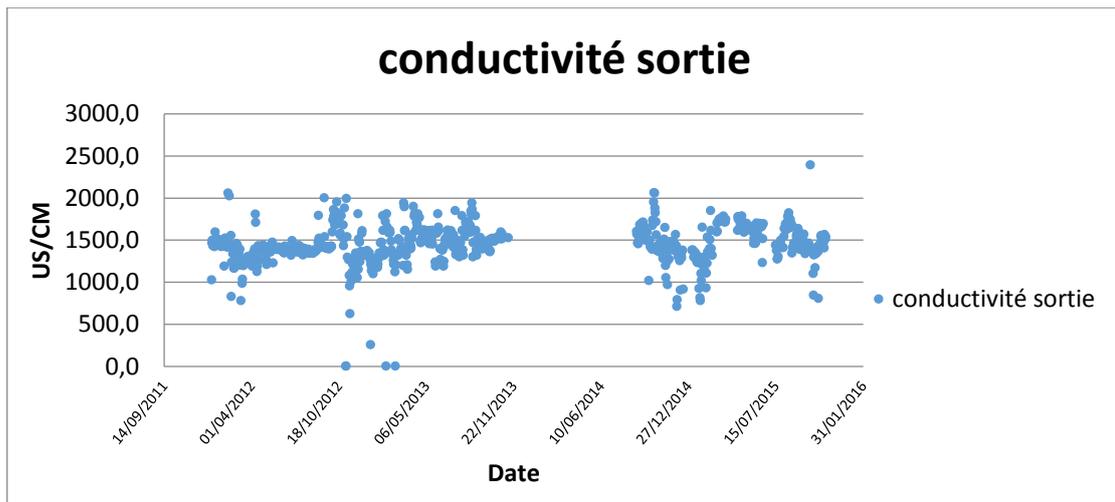


Figure VI-7 Evolution journalière de la conductivité de l'eau à la sortie de la STEP

Les deux figures ci-dessus montrent que la conductivité de l'eau brute varie et oscille entre 2.3 et 2320 us/cm avec une moyenne de 1460.7 et la conductivité de l'eau épurée varie et oscille entre 2.3 et 2390 us/cm avec une moyenne de 1448.7 us/cm.

En comparant l'évolution de la conductivité à l'entrée et à la sortie de la STEP, on remarque des fluctuations insignifiantes de ce paramètre, par conséquent celui-ci n'apportera aucune information pertinente pour la problématique étudiée, il ne sera pas pris en considération dans la suite de l'analyse des paramètres de la STEP.

II.1.e. Evolution des Matières En Suspension (MES)

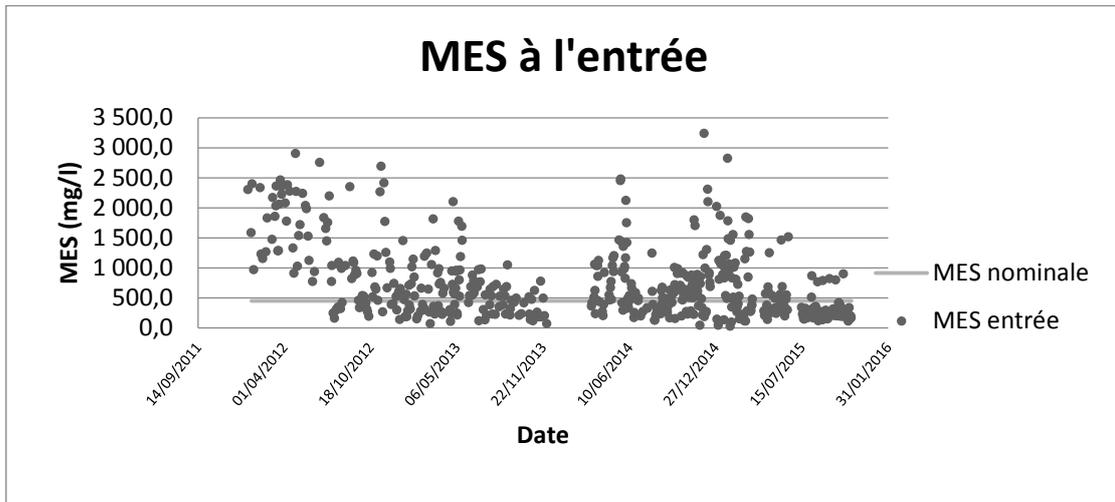


Figure VI-8 Evolution journalière de la concentration des MES à l'entrée de la STEP

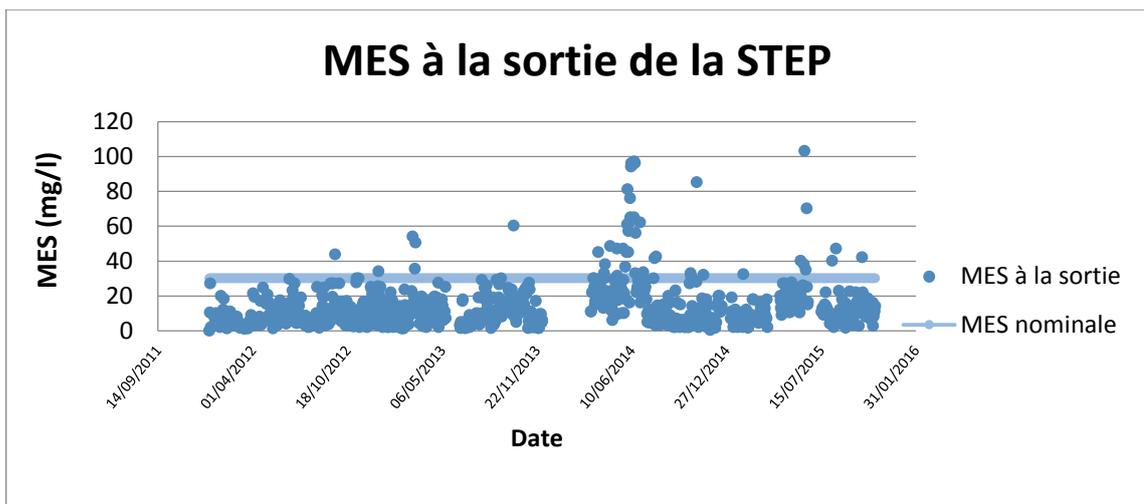


Figure VI-9 Evolution journalière de la concentration des MES à la sortie de la STEP

La concentration des MES des eaux brutes à l'entrée de la STEP a une moyenne de 695 mg/l et oscille entre 20 et 3236 mg/l, ce qui dépasse la concentration admissible par la STEP (450mg/l). Ces valeurs peuvent être expliquées par des phénomènes exceptionnels, comme l'augmentation du flux des MES par temps de pluie qui provient majoritairement de la remise en suspension des dépôts accumulés.

A la sortie de la STEP, la majorité des valeurs enregistrées sont inférieures à la norme de rejet qui est de 30 mg/l, avec certaines exceptions où les valeurs sont supérieures à cette dernière, ceci est dû à des arrêts de la station et à des dysfonctionnements.

II.1.f. Evolution de la DBO₅

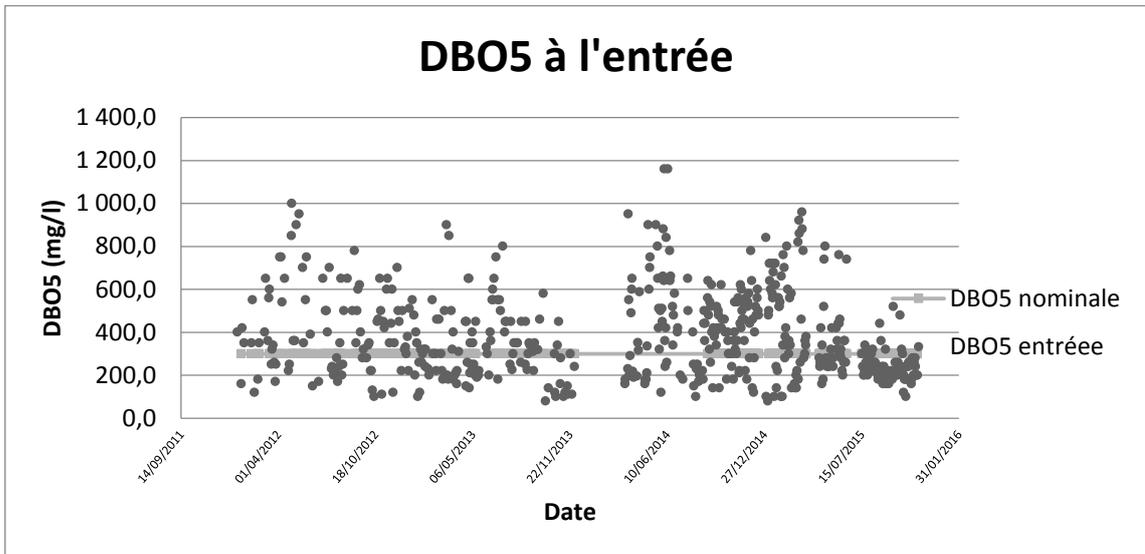


Figure VI-10 Evolution journalière de la concentration de la DBO₅ à l'entrée de la STEP

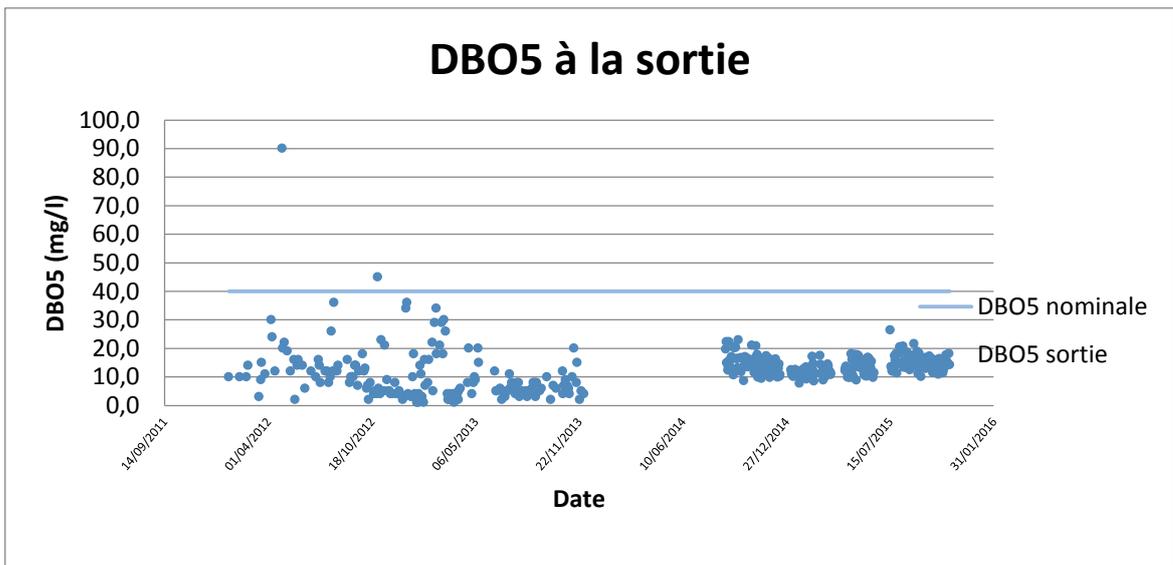


Figure VI-11 Evolution journalière de la concentration de la DBO₅ à la sortie de la STEP

La concentration de la demande biologique en oxygène (DBO₅) de l'eau brute oscille entre 50 et 1160 mg/l ce qui dépasse en majorité la concentration admissible par la STEP (300 mg/l), et tourne autour d'une moyenne de 389.7 mg/l.

La DBO₅ de l'eau épurée est généralement inférieure à la norme de rejet qui est de 40 mg/l, avec quelques exceptions qui peuvent s'expliquer soit par une charge organique entrante supérieure à la charge nominale dont les microorganismes ne peuvent pas tout dégrader, soit par un problème au niveau du bassin d'aération.

II.1.g. Evolution de la DCO

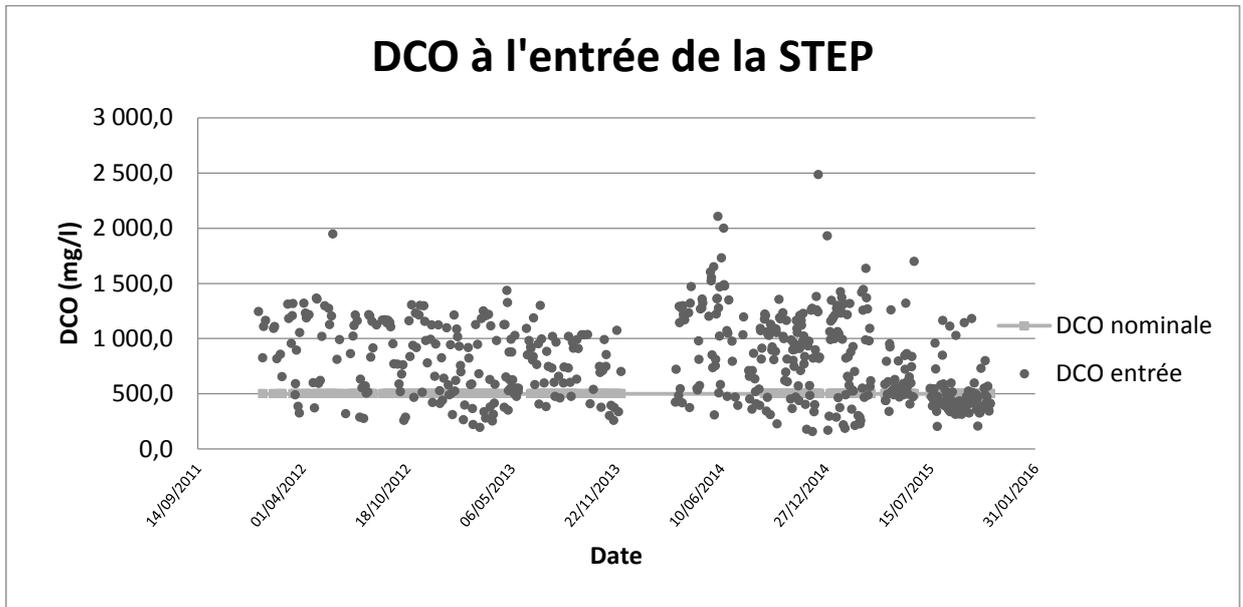


Figure VI-12 Evolution journalière de la concentration de la DCO à l'entrée de la STEP

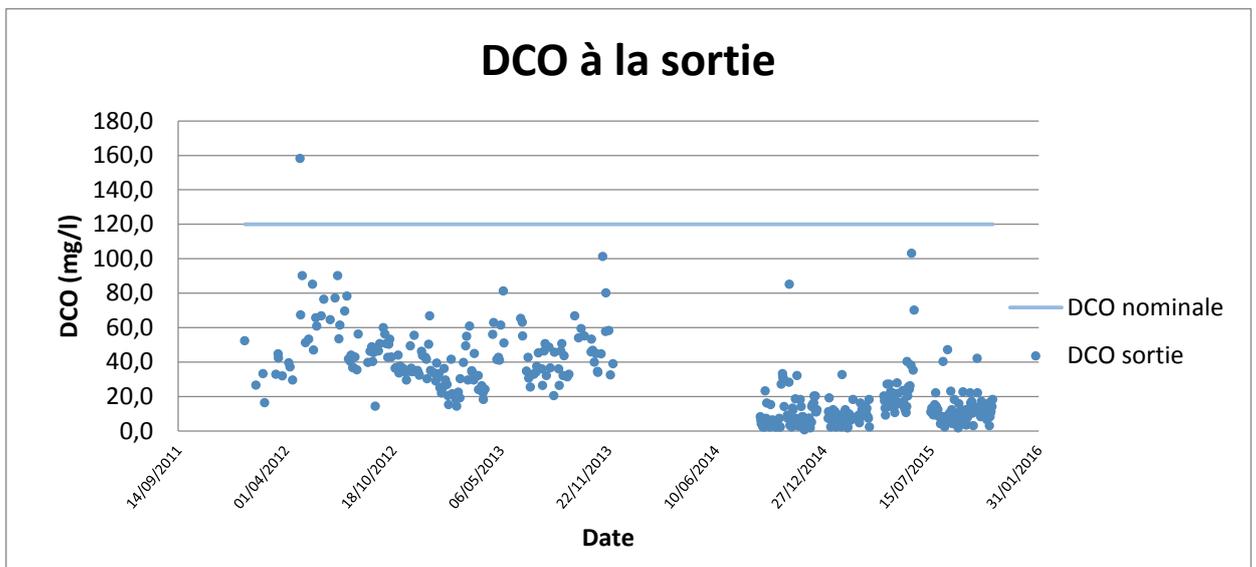


Figure VI-13 Evolution journalière de la concentration de la DCO à la sortie de la STEP

La concentration de la Demande Chimique en Oxygène (DCO) de l'eau brute oscille entre 107 et 2484 mg/l, avec une moyenne de 796.3 mg/l. On remarque que ces valeurs dépassent la concentration admissible de la STEP (500mg/l), ce qui nécessite une énergie plus importante pour le rabattement de la DCO à la norme qui est de 120mg/l.

II.1.h. Evolution du débit des boues en excès

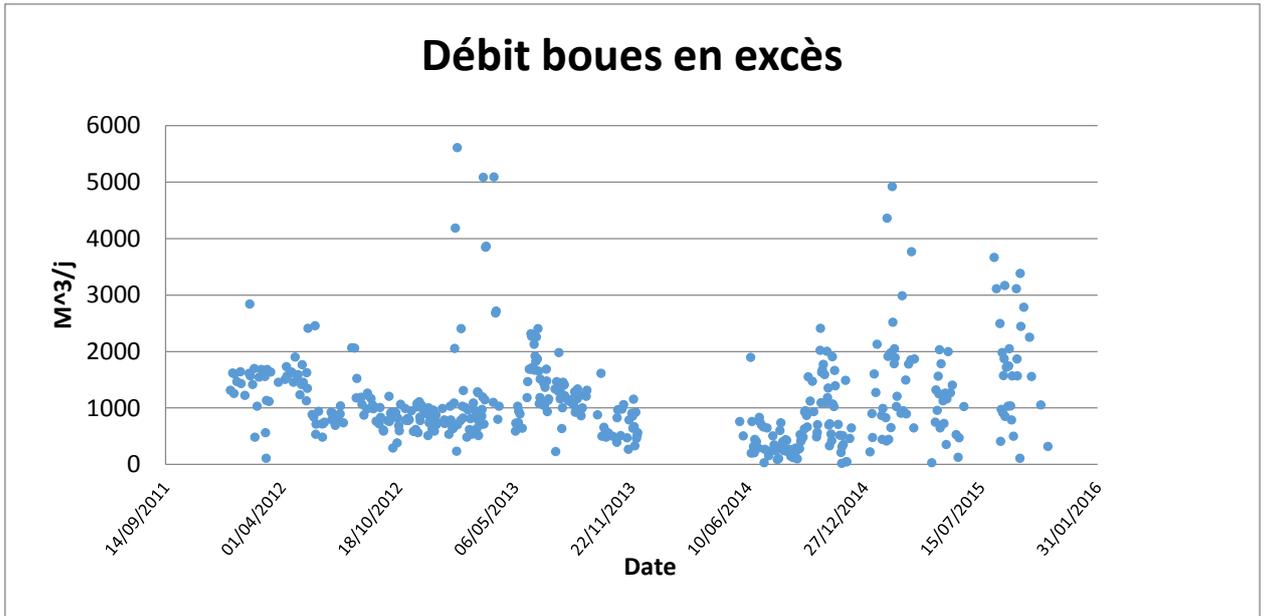


Figure VI-14 Evolution journalière du débit des boues en excès de la STEP

La moyenne journalière du débit des boues en excès de la STEP est de $1050 m^3/j$.

II.1.i. Evolution du débit des boues épaissies

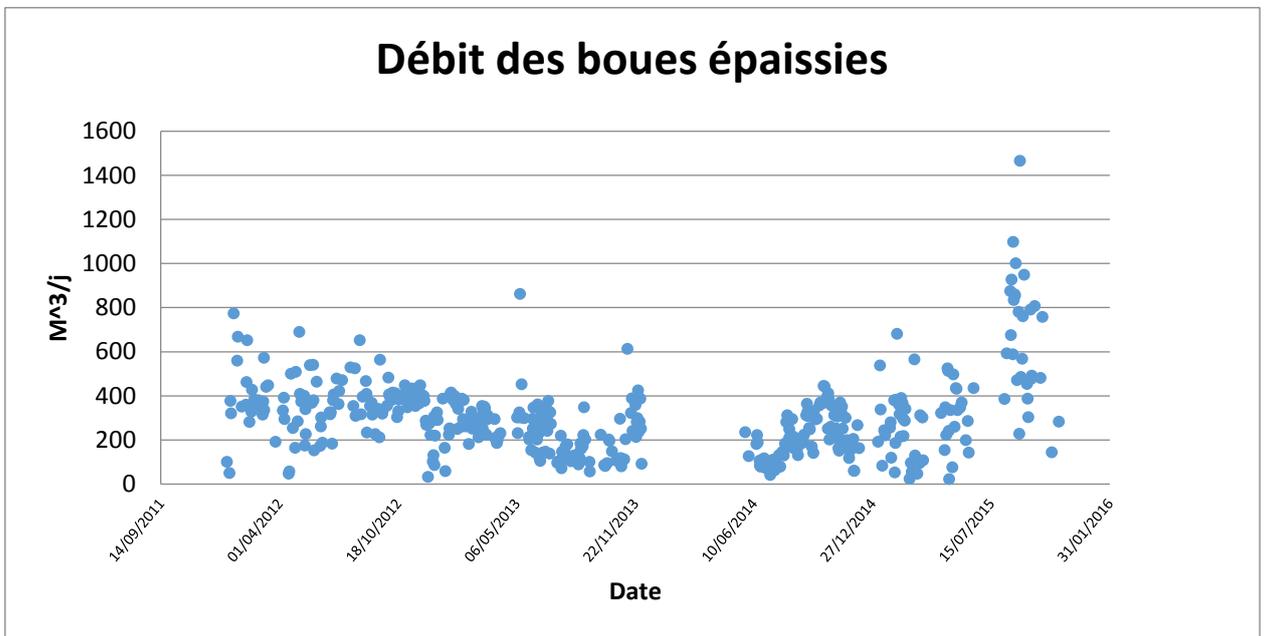


Figure VI-15 Evolution journalière du débit des boues épaissies de la STEP

La moyenne journalière du débit des boues épaissies est de $340 m^3/j$

II.1.j. Evolution du débit des boues digérées

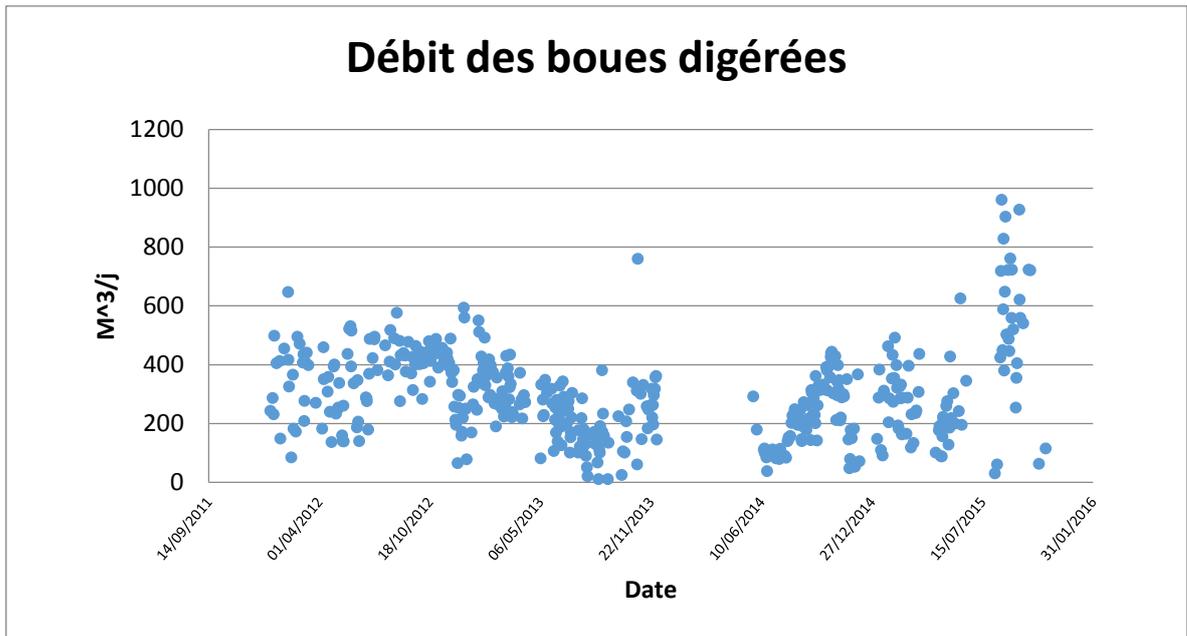


Figure VI-16 Evolution journalière du débit des boues digérées de la STEP

La moyenne journalière du débit des boues digérées est de 310 m³/j.

II.2. Choix des paramètres pour l'élaboration du modèle pour la production du biogaz

Changement de variables :

DE = Le débit d'entrée (m³/j) ;

MES = MES d'entrée (mg/l) ;

DBEX = Débit des boues en excès (m³/j) ;

DBEP = Débit des boues épaissies (m³/j) ;

DBG = Débit des boues digérées (m³/j) ;

B = Biogaz (m³/j).

Le Biogaz est constitué principalement de matière organique (entre 55 et 65 % de méthane) présente dans l'effluent. Pour cela, nous ne prendrons dans l'élaboration de nos modèles de prévision que les paramètres qui caractérisent la matière organique et son élimination de l'entrée de la station jusqu'au digesteur, là où le biogaz est extrait puis stocké dans le gazomètre.

Dans ce qui suit nous avons utilisé l'analyse en composante principale dans les différentes étapes de notre travail. Pour cela nous avons d'abord vérifié si l'ensemble des variables retenues est un ensemble cohérent et permet de constituer des mesures

adéquates grâce au test de KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) et le test de sphéricité de Bartlett. Les résultats sont représentés dans le tableau suivant:

Tableau VI-1 Tests de KMO et Bartlett

Mesure de précision de l'échantillonnage de Kaiser-Meyer-Olkin		0,61
Test de sphéricité de Bartlett	Khi deux approximé	639,51
	Signification de Bartlett	<0,0001

D'après le tableau ci-dessus, nous remarquons que la signification de Bartlett tend vers 0.000 et l'indice de KMO se situe dans la fourchette bien. Nous estimons ainsi que l'ensemble des variables est cohérent.

Les paramètres choisis sont :

II.2.a. Le débit d'entrée

Il est évident que la quantité de biogaz produite sera en fonction du débit d'entrée de l'eau brute à la STEP.

II.2.b. Matière organique

La pollution à l'entrée de la STEP est caractérisée par les MES, DCO et DBO₅. Ces trois paramètres sont corrélés entre eux.

L'ACP permet de mesurer l'importance et la contribution de chaque paramètre dans le phénomène étudié.

Nous avons appliqué cette méthode sur les données d'entrée de la STEP de Baraki et d'après la matrice et le cercle de corrélation nous voyons que les trois paramètres MES, DCO et DBO₅ sont corrélés entre eux, nous ne prendrons par conséquent que les MES en raison de la disponibilité des données.

Tableau VI-2 Matrice des composantes principales:

	F1	F2	F3	F4
Débit entrant	-0,051	0,998	-0,019	-0,016
MES	0,807	0,037	0,587	-0,047
DBO5	0,897	-0,016	-0,319	-0,307
DCO	0,916	0,038	-0,206	0,341

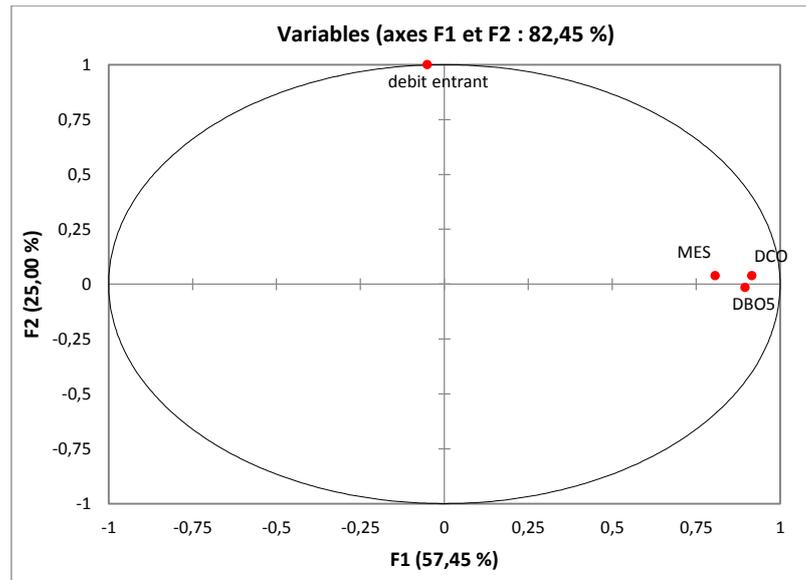


Figure VI-17 Cercle de corrélation entre les MES, DCO et DBO5

II.2.c. Débit des boues en excès

Après le traitement de l'eau, la matière organique (boue) sera dirigée vers le traitement des boues, le débit des boues en excès est donc un paramètre prépondérant pour la détermination de la quantité du biogaz qui sera produite.

II.2.d. Débit des boues épaissies vers digesteur

Les boues en excès sont épaissies mais seulement une partie sera envoyée vers le digesteur, afin de procéder à l'étape de la méthanisation.

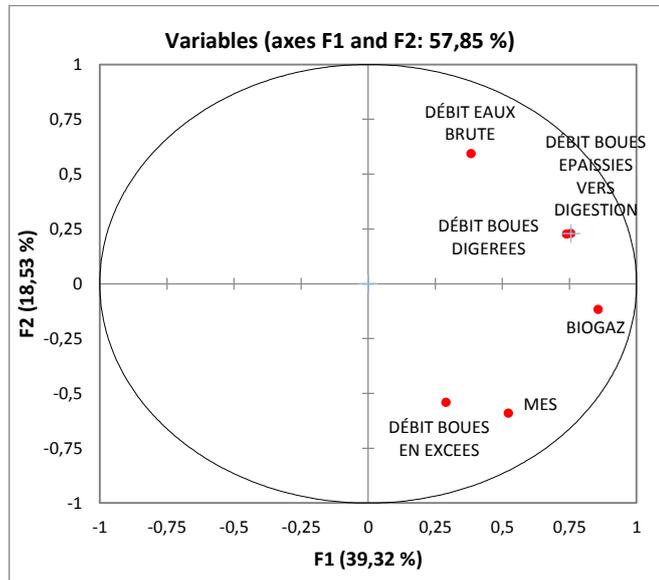
II.2.e. Débit des boues digérées

C'est les boues digérées qui dégagent le biogaz et donc la quantité de biogaz produite y est donc directement liée.

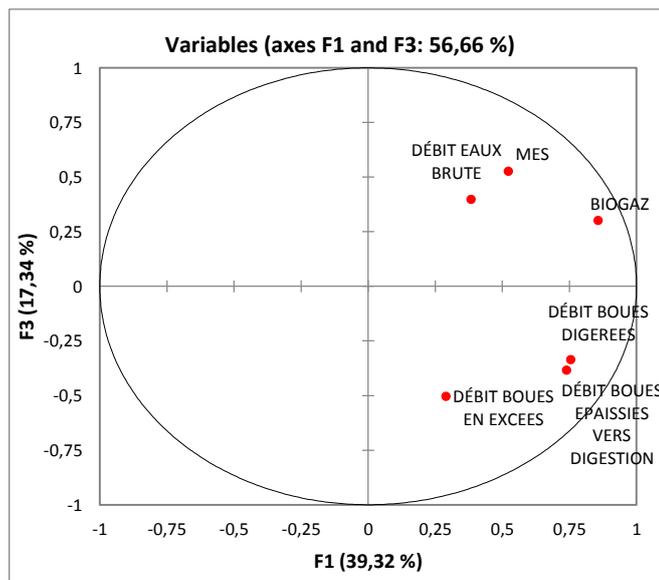
Afin de consolider le choix de ces paramètres, nous leurs avons appliqué l'analyse en composante principale (ACP) car elle permet de mesurer l'importance et la contribution de chaque paramètre dans le phénomène étudié.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
DE	0,4019	-0,2089	-0,6477	0,5944	0,0440	-0,1417
MES	0,5000	0,7989	-0,0353	-0,1551	0,1363	-0,2605
DBEX	0,2944	0,1072	0,7188	0,6157	-0,0761	-0,0169
DBEP	0,7329	-0,3961	0,1975	-0,1509	0,4914	0,0514
DBD	0,7306	-0,4143	0,1171	-0,3037	-0,3751	-0,2189
B	0,8385	0,2934	-0,1956	-0,0120	-0,1783	0,3750

Nous constatons que toutes les variables sont plus ou moins bien corrélées avec le premier axe, les variables (DE, DBEX) avec le 3^{ème} axe, les MES avec le 2^{ème} axe et finalement les variables (DE, DBEX) avec le 4^{ème} axe.



VI-18 Cercle de corrélation entre les différents paramètres (Selon les axes F1 et F2)



VI-19 Cercle de corrélation entre les différents paramètres (Selon les axes F1 et F3)

Cette analyse est confirmée par les 2 cercles de corrélation. Nous déduisons ainsi que les variables explicatives sont toutes corrélées avec le biogaz qui est la variable à expliquer. Ceci conforte notre choix de paramètres.

II.3. Détection des mesures aberrantes

L'objectif de la détection des points aberrants et influents est de repérer des points qui jouent un rôle anormal dans la série de données, jusqu'à en fausser les résultats. Il faut s'entendre sur le terme anormal, nous pourrions en résumer les différentes tournures de la manière suivante :

_ L'observation prend une valeur inhabituelle sur une des variables. Nous parlons alors de détection univariée car nous étudions les variables individuellement.

_ Une combinaison de valeurs chez les exogènes est inhabituelle.

_ L'observation est très mal reconstituée par la régression, n'obéissant pas de manière ostensible à la relation modélisée entre les exogènes et l'endogène.

L'outil le plus simple pour se faire une idée de la distribution d'une variable continue est la boîte à moustaches dite box-plot. Elle offre une vue synthétique sur plusieurs indicateurs importants : le premier quartile ($Q1$) et le troisième quartile ($Q3$).

On peut aussi jauger visuellement l'intervalle interquartile qui mesure la dispersion

$$(IQ = Q3 - Q1).$$

Il est possible d'utiliser le tableau EXCEL pour produire une boîte à moustache pour chaque variable du fichier donné en suivant ces étapes :

1. de produire le 1er et le 3ème quartile;
2. d'en déduire l'intervalle inter-quartile;
3. de calculer les bornes *LIF* et *UIF* ;
4. et de s'appuyer sur la mise en forme conditionnelle pour distinguer les points "suspects" pour chaque variable.

Avec :

$$LIF = Q1 - 1,5 * IQ$$

$$UIF = Q3 + 1,5 * IQ$$

Où :

LIF signifie « lower inner fence » et *UIF* « upper inner fence ».

Les points situés au-delà de ces limites sont souvent jugés atypiques. Il convient de se pencher attentivement sur les observations correspondantes.

Il est possible de durcir les conditions ci-dessus en élargissant les bornes des valeurs. On parle alors de « outer fence ». Elles sont définies de la manière suivante :

$$LOF = Q1 - 3 \times IQ$$

$$UOF = Q3 + 3 \times IQ$$

Dans notre cas nous avons appliqué ce test aux données choisies pour l'élaboration d'un modèle de prévision pour la production de biogaz en fonction des paramètres suivants :

- Débit des eaux brutes;
- MES
- Débit des boues en excès;
- Débit des boues épaissies vers la digestion;
- Débit des boues digérées;
- Production journalière du biogaz.

Tableau VI-3 Résultat du test pour l'élimination des valeurs aberrantes

	Q1	Q3	IQ	LOF	UOF
DE	51533,2500	91491,5000	39958,2500	-68341,5	211366,25
MES	304,7500	1051,7500	747,0000	-1936,25	3292,75
DBEX	647,5000	1432,7500	785,2500	-1708,25	3788,5
DBEP	194,0000	385,0000	191,0000	-379	958
DBD	190,0000	399,2500	209,2500	-437,75	1027
B	815,7500	1362,2500	546,5000	-823,75	3001,75

D'après le tableau si dessus, nous allons exclure toutes les valeurs qui n'appartiennent pas à l'intervalle [LIF, UIF].

Ces valeurs sont jugées inhabituelles, et pourraient jouer un rôle anormal dans la régression. Ils vont influencer ainsi la crédibilité de nos modèles.

Après l'exclusion de 53 données aberrantes, nous aboutissons à **449** observations journalières [43].

III. Les modèles de prévisions de la production du biogaz

Nous avons utilisé les mêmes données de calage et de validation dans les deux modèles suivants pour pouvoir par la suite comparer les différents résultats.

III.1. Régression multiple

Le type de régression choisi est la régression multiple car elle permet de modéliser une variable à expliquer en fonction des variables explicatives.

Nous avons élaboré un modèle de régression multiple avec les variables centrées réduites de la partie calage. Pour cela, nous avons utilisé une fonction linéaire.

Elaboration du modèle de régression

Vu le nombre important des observations, nous avons utilisé le logiciel XLSTAT pour établir notre modèle.

Tableau VI-4 Statistiques descriptives des données de calage

Statistiques	DÉBIT EAUX BRUTE	MES	DÉBIT BOUES EN EXCEES	DÉBIT BOUES EPAISSIES VERS DIGESTION	DÉBIT BOUES DIGEREES	PRODUCTION BIOGAZ PAR JOUR
observations	349	349	349	349	349	349
Minimum	5232	18	14	21	10	309
Maximum	199140	3035	5088	1456	960	2225
Moyenne	70485,98	780,62	1099,72	302,98	294,32	1039,78
Ecart type (n-1)	30421,13	612,46	732,23	183,24	155,05	365,79

Le modèle est de la forme suivante

$$Y = pr1 + pr2 \times X_1 + pr3 \times X_2 + pr4 \times X_3 + pr5 \times X_4 + pr6 \times X_5$$

En effectuant une régression multiple entre la variable à expliquer (production du biogaz) et les variables explicatives (DEB, MES, DBEX, DBE, DBD).

Le modèle de régression établi est le suivant :

$$B = 0,27 * DE + 0,49 * MES + 0,03 * DBEX + 0,09 * DBEP + 0,32 * DBD$$

Critère de calage

Tableau VI-5 Critère de calage

R ²	R ² ajusté	F
0,54	0,52	53,158

D'après le tableau ci-dessus, nous remarquons que la valeur du coefficient R² est moyenne. Il en est de même pour celle de R² ajusté. Nous remarquons également que la valeur de F est acceptable d'après la table de Fischer.

D'après les résultats numériques du calage, le modèle peut être accepté mais reste de qualité moyenne.

Afin de confirmer ces résultats, nous avons représenté graphiquement la production du biogaz simulé en fonction de la production du biogaz mesuré.

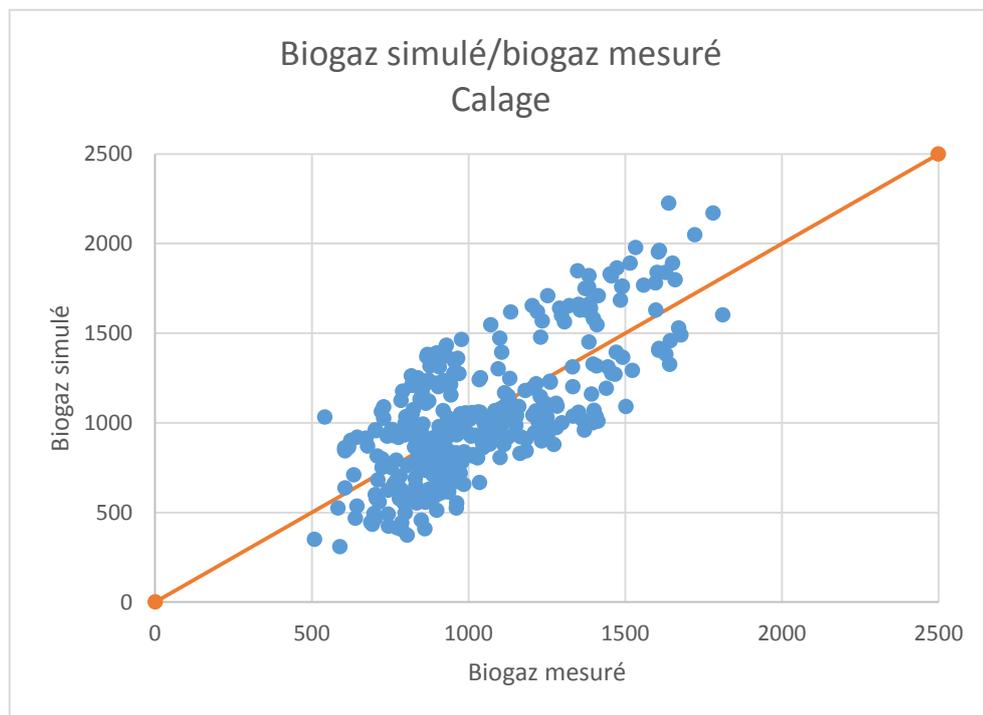


Figure VI-20 Biogaz simulé en fonction du biogaz mesuré (calage)

Interprétation graphique

D'après le graphe qui représente la régression entre le biogaz simulé et le biogaz produit, nous remarquons que les valeurs sont comprises entre 300 et 2300 m³/jour. Les

points sont légèrement dispersé et se regroupent d'une part et d'autre de la première bissectrice, avec quelques observations écartées du nuage du point.

Le résultat graphique confirme notre impression précédente sur la qualité du modèle.

Afin de vérifier la validité du modèle, nous procédons à sa validation :

Pour ce faire, nous appliquons le modèle établi dans la partie calage aux données de validation, en remplaçant les différentes valeurs des 5 paramètres dans l'équation qui décrit la production du biogaz en fonction de ces derniers.

.Critère de validation

Tableau VI-6 Critère de validation

R ²	R ² ajusté	F
0,64	0,61	61,95

D'après le tableau ci-dessus, nous constatons que la valeur du coefficient R² s'est améliorée par rapport à la partie calage. Cette augmentation confirme la bonne corrélation entre les valeurs du biogaz mesuré et du biogaz produit.

Afin de confirmer notre résultat, nous avons représenté graphiquement le biogaz produit simulé en fonction du biogaz produit mesuré.

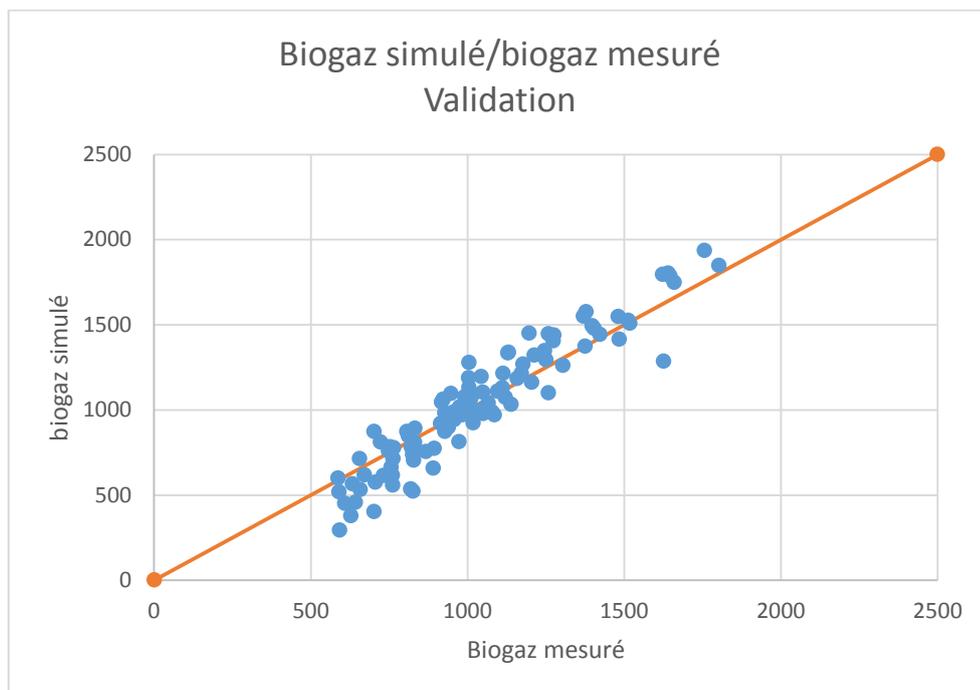


Figure VI-21 Biogaz simulé en fonction du biogaz mesuré (validation)

Interprétation graphique :

Nous remarquons que les points prennent la même allure que la première bissectrice et sont regroupés autour de cette dernière.

Il existe néanmoins quelques observations qui s'éloignent du nuage de point.

Conclusion partielle

D'après les résultats graphiques et numériques, nous pouvons dire que ce modèle possède une qualité moyenne.

III.2. Application de l'ACP pour modéliser la production du biogaz

Nous appliquons l'analyse en composantes principales sur les données de calage dans le but de simuler la production journalière du biogaz à travers un modèle qui sera une fonction linéaire des 5 paramètres mentionnés précédemment.

- Tout d'abord, nous transformons les données brutes en variables centrées réduites, en utilisant la moyenne et l'écart type des données de calage, afin d'homogénéiser les différents paramètres.
- Nous appliquons ensuite l'ACP sur les données centrées et réduites du calage :

III.2.a. Résultat de l'ACP

Tableau VI-7 Matrice de corrélation entre variables et facteurs

Variables	F1	F2	F3	F4	F5	F6
DE	0,4019	-0,2089	-0,6477	0,5944	0,0440	-0,1417
MES	0,5000	0,7989	-0,0353	-0,1551	0,1363	-0,2605
DBEX	0,2944	0,1072	0,7188	0,6157	-0,0761	-0,0169
DBEP	0,7329	-0,3961	0,1975	-0,1509	0,4914	0,0514
DBD	0,7306	-0,4143	0,1171	-0,3037	-0,3751	-0,2189
B	0,8385	0,2934	-0,1956	-0,0120	-0,1783	0,3750

Nous constatons que toutes les variables sont plus ou moins bien corrélées avec le premier axe, les variables (DE, DBEX) avec le 3^{ème} axe, les MES avec le 2^{ème} axe et finalement les variables (DE, DBEX) avec le 4^{ème} axe.

Nous calculons les valeurs propres de chaque axe :

Tableau VI-8 Valeurs propres des 6 axes

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Valeur propres	2,2723	1,1080	1,0285	0,8715	0,4403	0,2794
Variabilité(%)	37,8709	18,4673	17,1420	14,5253	7,3382	4,6564
Cumulé %	37,8709	56,3382	73,4802	88,0054	95,3436	100,0000

Afin de déterminer les composantes principales utilisées dans la modélisation ACP, nous utilisons les résultats du tableau ci-dessus.

Selon la règle de Kaiser qui veut qu'on ne retienne que les facteurs aux valeurs propres supérieures à 1. Cette analyse de variance montre qu'à partir de (6) variables réelles constituant la matrice des données, on aboutit à quatre (4) variables fictives, dites composantes principales restituant près de 88% de l'information globale, les autres composantes contribuent très faiblement à l'explication de la variance totale, alors leur rejet n'entraîne qu'une perte d'informations minime.



Figure VI-22 Graphique des valeurs propres

Selon la règle de « Scree-test », nous observons le graphique des valeurs propres et on ne retient que les valeurs qui se trouvent à gauche du point d'inflexion, en l'occurrence les 4 premiers axes.

Modèle issu de l'ACP :

Afin d'obtenir la matrice de passage, nous avons procédé comme suit :

- 1- A partir de du tableau des coordonnées des observations, nous avons effectué à l'aide de XLSTAT une régression multiple entre chaque axe et les données centrées réduites.
- 2- Nous avons obtenu une matrice A à partir des équations de chaque axe en fonction de nos paramètres.
- 3- Nous avons calculé l'inverse de cette matrice qui était égale à sa transposée.
- 4- L'inverse de la matrice A est notre matrice de passage.

A partir de la régression, nous avons obtenu les équations suivantes :

$$F1 = 0,26 * DE + 0,33 * MES + 0,19 * DBEX + 0,48 * DBEP + 0,48 * DBD + 0,55 * B$$

$$F2 = -0,20 * DE + 0,76 * MES + 0,10 * DBEX - 0,38 * DBEP - 0,39 * DBD + 0,28 * B$$

$$F3 = -0,64 * DE - 0,03 * MES + 0,71 * DBEX + 0,19 * DBEP + 0,17 * DBD - 0,19 * B$$

$$F4 = 0,64 * DE - 0,17 * MES + 0,66 * DBEX - 0,16 * DBEP - 0,33 * DBD - 0,01 * B$$

$$F5 = 0,07 * DE + 0,21 * MES - 0,11 * DBEX + 0,74 * DBEP - 0,57 * DBD - 0,27 * B$$

$$F6 = -0,27 * DE - 0,49 * MES - 0,03 * DBEX + 0,10 * DBEP - 0,41 * DBD + 0,71 * B$$

La matrice A est la suivante :

Tableau VI-9 Matrice A

Variables	F1	F2	F3	F4	F5	F6
DE	0,21	0,33	0,19	0,48	0,48	0,55
MES	0,2	0,76	0,1	-0,38	-0,39	0,28
DBEX	-0,64	0,03	0,71	0,19	0,17	0,19
DBEP	0,64	-0,17	0,66	-0,16	0,33	0,01
DBD	0,07	0,21	-0,11	0,74	-0,57	-0,27
B	-0,27	-0,49	-0,03	0,1	-0,41	0,71

L'inverse de la matrice A est obtenue à l'aide de MATLAB :

Tableau VI-10 Matrice inverse de la matrice A

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
DE	0,267	-0,2	-0,64	0,64	0,06	-0,27
MES	0,33	0,76	-0,03	-0,16	0,20	-0,5
DBEX	0,19	0,10	0,71	0,66	-0,11	-0,03
DBEP	0,48	-0,37	0,19	-0,16	0,74	0,098
DBD	0,48	-0,39	0,12	-0,32	-0,57	-0,4
B	0,55	0,28	-0,19	-0,013	-0,27	0,71

Tableau VI-11 Matrice des vecteurs propres

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
DE	0,2666	-0,1985	-0,6387	0,6367	0,0662	-0,2681
MES	0,3317	0,7590	-0,0348	-0,1661	0,2055	-0,4929
DBEX	0,1953	0,1018	0,7088	0,6595	-0,1147	-0,0320
DBEP	0,4862	-0,3763	0,1948	-0,1617	0,7406	0,0972
DBD	0,4847	-0,3936	0,1155	-0,3253	-0,5653	-0,4141
B	0,5563	0,2787	-0,1929	-0,0128	-0,2687	0,7094

Nous remarquons bien que l'inverse de la matrice A est égale à sa transposée.

Nous remarquons également que la matrice de passage obtenue n'est autre que la matrice des vecteurs propres obtenue par ACP.

En utilisant la matrice des vecteurs propres, on extrait une matrice de passage avec laquelle on forme un système linéaire de la forme :

$$F_i = \sum a_i X_i$$

Nous ne tenons compte que des 3 axes F1, F2, F3.

Tableau VI-12 Les 4 axes de la matrice des vecteurs propres

	F1	F2	F3	F4
DE	0,2666	-0,1985	-0,6387	0,6367
MES	0,3317	0,7590	-0,0348	-0,1661
DBEX	0,1953	0,1018	0,7088	0,6595
DBEP	0,4862	-0,3763	0,1948	-0,1617
DBD	0,4847	-0,3936	0,1155	-0,3253
B	0,5563	0,2787	-0,1929	-0,0128

Nous avons obtenu le système suivant :

$$F1 = 0,2666DE + 0,3317MES + 0,1953DBEX + 0,4862DBEP + 0,4847DBD + 0,5563B$$

$$F2 = -0,1985DE + 0,7590MES + 0,1018DBEX - 0,3763DBEP - 0,3936DBD + 0,2787B$$

$$F3 = -0,6387DE - 0,0348MES + 0,7088DBEX + 0,1948DBEP + 0,1155DBD - 0,1929B$$

$$F4 = 0,6367DE - 0,1661MES + 0,6595DBEX - 0,1617DBEP - 0,3253DBD - 0,0128B$$

De la même matrice, nous écrivons les variables X_i en fonction des F_i .

$$DE = 0,26F1 - 0,2F2 - 0,64F3 + 0,6367F4$$

$$MES = 0,33F1 + 0,76F2 - 0,03F3 - 0,1661F4$$

$$DBEX = 0,2F1 + 0,1F2 - 0,7F3 + 0,6595F4$$

$$DBEP = 0,48F1 - 0,37F2 + 0,2F3 - 0,1617F4$$

$$DBD = 0,48F1 - 0,4F2 + 0,11F3 - 0,3253F4$$

$$B = 0,556F1 + 0,2787F2 - 0,1929F3 - 0,0128F4$$

En remplaçant F_1 , F_2 , F_3 et F_4 par leurs expressions, nous avons exprimé la production du biogaz en fonction des 5 paramètres.

$$B = 0,18 DE + 0,69 MES + 0,15 DBEP + 0,22 DBEX + 0,24 DBD$$

Nous pouvons ainsi simuler la production du biogaz à partir des autres paramètres en utilisant les variables centrées réduites et ce en remplaçant les variables par leurs valeurs afin d'obtenir les résultats simulés.

Afin de simuler la production du biogaz, nous avons transformé les variables centrées réduites des résultats simulés en variable brute en utilisant la moyenne et l'écart type des données de calage.

Après avoir transformé les résultats centrés réduites du biogaz simulé en variables brutes, nous avons obtenu les résultats suivants :

Critères de calage :

Tableau VI-13 Critères de calage

R ²	R ² ajusté	F
0,83	0,81	112,25

Interprétation des résultats

Nous avons obtenu un coefficient $R^2=0,83$. Nous concluons que la corrélation entre la production du biogaz mesuré et la production du biogaz simulé est très bonne. Il en est de même pour le R^2 ajusté. En effet sa valeur s'approche énormément de la valeur de R^2 .

On peut conclure que la qualité de notre modèle est très bonne pour la partie calage.

Afin de confirmer notre résultat précédent, nous avons représenté graphiquement la production du biogaz mesuré en fonction du biogaz simulé.

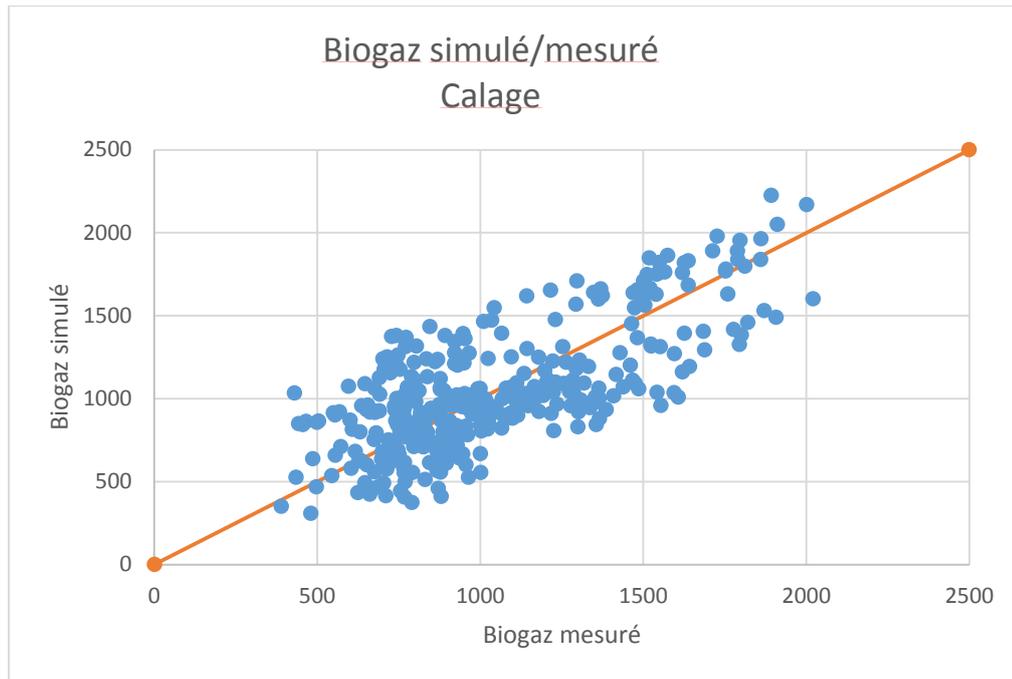


Figure VI-23 Biogaz simulé en fonction du biogaz mesuré (Calage)

Interprétation graphique

On remarque que les résultats simulés sont compris entre 400 et 2100 m³/jour. La majorité des points s’alignent bien avec la première bissectrice et prennent son allure.

On en conclut que la relation linéaire entre le biogaz produit et biogaz simulé est très bonne.

Ce dernier résultat confirme notre première impression sur la crédibilité de notre modèle dans la partie du calage.

Validation

Tout d’abord, nous avons simulé la production du biogaz en fonction des 5 paramètres en utilisant les variables centrées réduites. Par la suite nous avons transformé les résultats de biogaz simulé en variables brutes.

Finalement, nous avons établi une régression linéaire entre la production du biogaz mesuré et la production du biogaz simulé. Nous avons abouti aux résultats suivants :

Critères de validation :

Tableau VI-14 Critères de validation

R ²	R ² ajusté	F
0,82	0,80	14,2960762

Nous avons abouti à un coefficient $R^2=0,82$, nous constatons que les critères de validation sont aussi bon que ceux du calage.

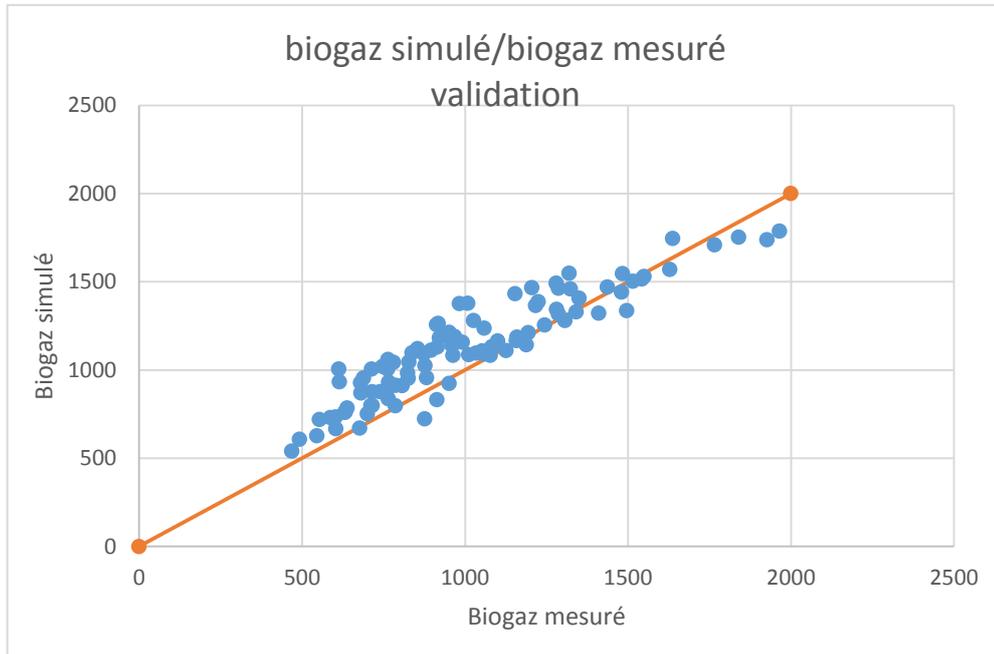


Figure VI-24 Biogaz simulé en fonction du biogaz mesuré (validation)

Interprétation graphique

D'après le graphe ci-dessus, nous remarquons que les valeurs de biogaz simulé sont comprises entre 500 et 2000 m³/jour. La majorité des points sont très proches de la première bissectrice.

Le résultat graphique confirme notre impression précédente sur la crédibilité du modèle. Il est ainsi jugé très bon.

Conclusion partielle

D'après les résultats numériques et graphiques, nous pouvons dire que notre modèle est fiable et donne de très bons résultats.

Conclusion :

Nous concluons que le modèle établi à l'aide de la régression multiple est moyen.

Le modèle linéaire établi à l'aide de l'analyse en composante principale est quant à lui jugé fiable et très bon pour la prévision de production de biogaz.

Nous pouvons ainsi conclure que le modèle choisi pour la production du biogaz est décrite par une fonction linéaire issue de l'ACP et qui est la suivante :

$$B = 0,18 DE + 0,69 MES + 0,15 DBEP + 0,22 DBEX + 0,24 DBD$$

IV. Prévision de la production de biogaz en prenant en considération les boues primaires

Dans le cas de la STEP de Baraki Les boues traitées dans les différentes étapes de traitement jusqu'au digesteur et qui rentrent donc dans la production de biogaz ne comportent que les boues secondaires en excès issues des bassins d'aération et des clarificateurs, car les bassins de décantations primaires de la STEP étaient à l'arrêt et ce depuis la prise en main de la station par la SEAAL en 2012, pour des raisons techniques.

L'aptitude à la méthanisation de ces boues biologiques dépend de leur âge et de leur charge organique. Les boues issues d'une aération forte charge seront ainsi plus aptes à la digestion anaérobie que des boues d'aération prolongée (ou faible charge).

La méthanisation des boues biologiques seules est moins justifiée que celle des boues primaires, car elles sont davantage minéralisées du fait des réactions de dégradation aérobie qui se sont déroulées dans les bassins d'aération.

Le bassin de décantation primaire de la STEP de Baraki a été mis en service depuis le début de l'année 2016 dans le cadre de l'extension de la station.

Nous allons dans cette partie voir l'apport de ces boues dans la production du biogaz à travers la comparaison de la moyenne et de la valeur maximum du biogaz produit durant la période de 2012 à 2015 (sans l'apport des boues primaires) et celle de la période de mars à mai 2016 (mise en marche du décanteur primaire).

Les 2 graphes suivants montrent l'évolution de la production de biogaz durant la période entre 2012 et 2015 et celle à partir de 2016 après la mise en marche du décanteur primaire.

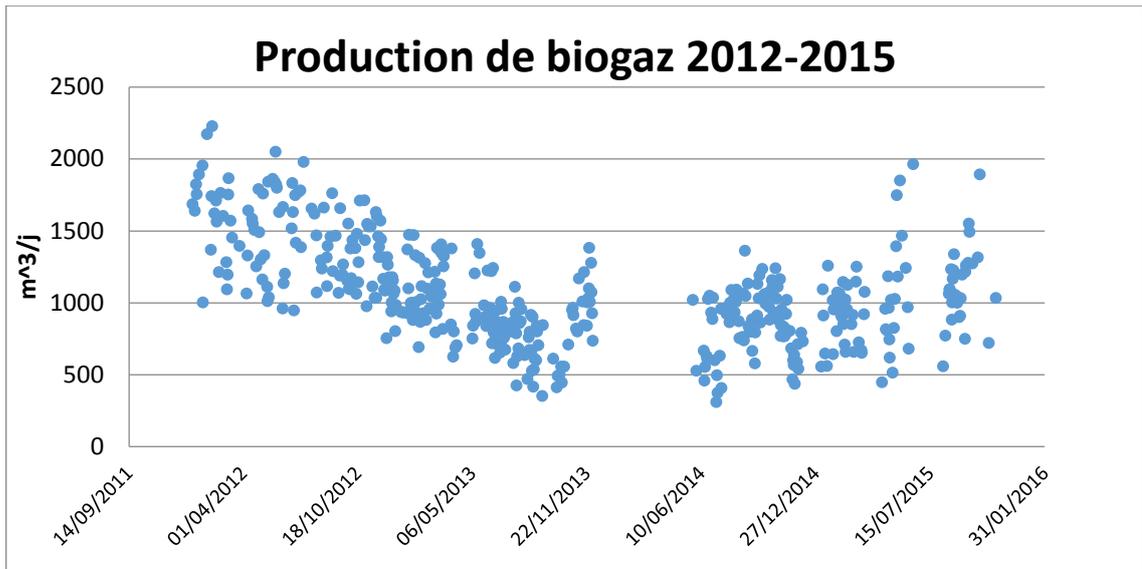


Figure VI-25 Evolution de la production de biogaz durant la période 2012-2015

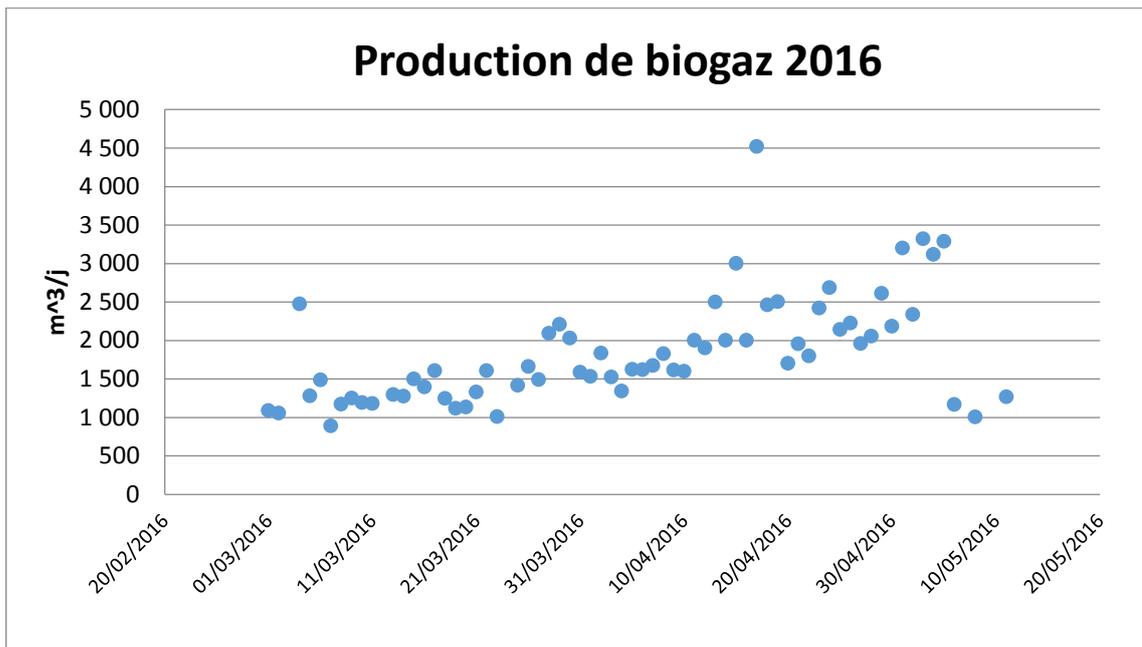


Figure VI-26 Evolution de la production de biogaz durant l'année 2016

La moyenne de production de biogaz durant la période de 2012 à 2015 est de $1060 \text{ m}^3/\text{j}$ avec une production maximum de $2225 \text{ m}^3/\text{j}$.

Tandis que la moyenne de production de biogaz durant l'année 2016 est de $2000 \text{ m}^3/\text{j}$ avec une production maximum de $4520 \text{ m}^3/\text{j}$.

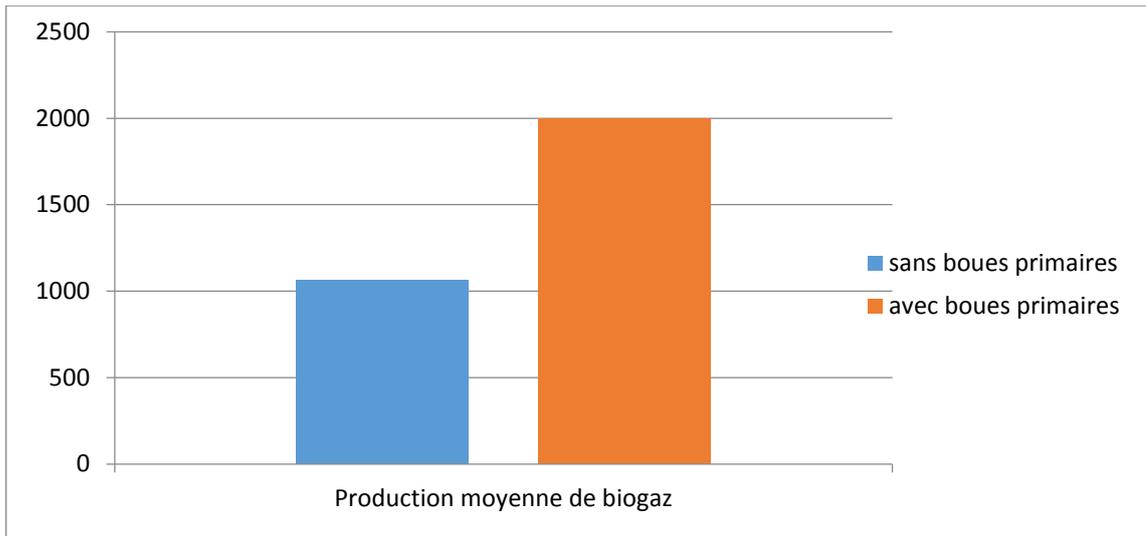


Figure VI-27 Comparaison de la moyenne de production du biogaz

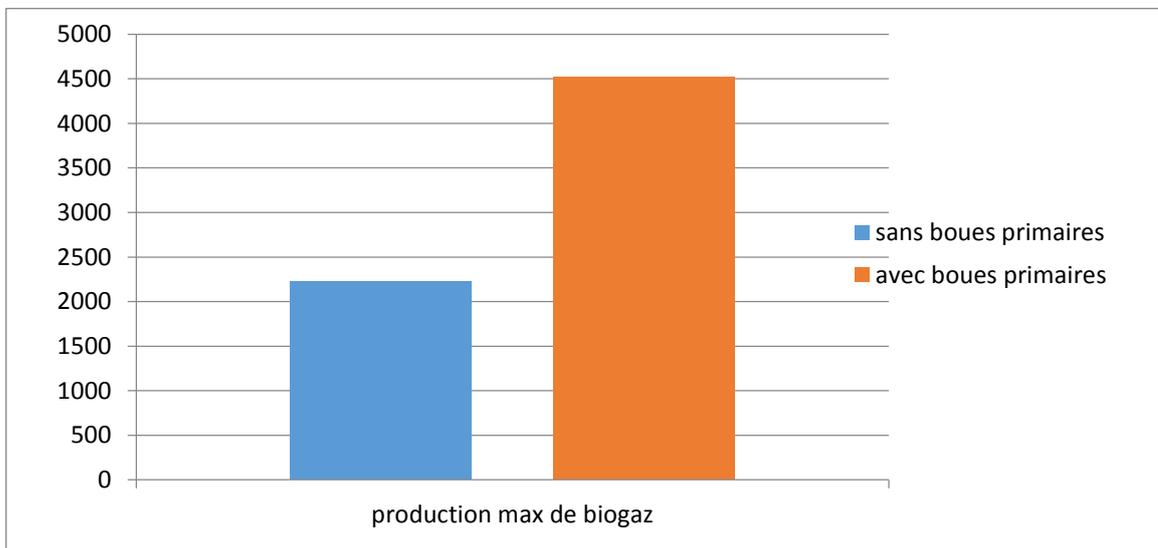


Figure VI-28 Comparaison de la production max du biogaz

Les boues primaires étant riches en matières volatiles, c'est ce qui a fait doubler la production du biogaz. De ce fait les prévisions du biogaz produit vont doubler après l'extension de la STEP de Baraki et la mise en marche définitive du décanteur primaire.

Le mélange des boues primaires et boues biologiques est appelé « boues mixtes ». Le pourcentage optimum de ce mélange pour maximiser la production est mentionné dans le tableau suivant.

Tableau VI-15 Mélange optimum des boues mixtes

Boues primaires	Boues biologiques
70%	30%

V. Consommation électrique de la STEP de BARAKI

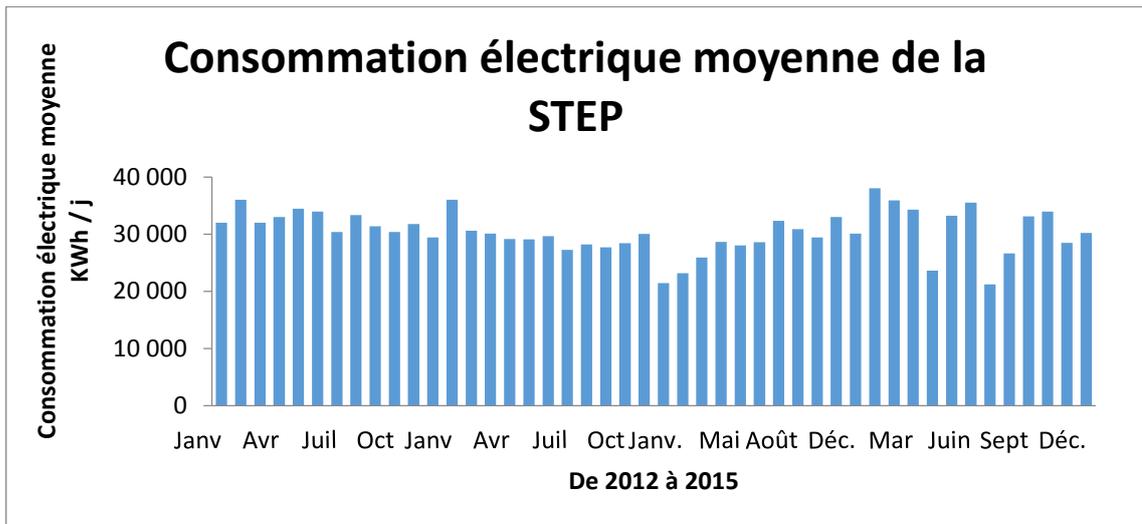


Figure VI-29 Consommation électrique moyenne de la STEP

La consommation électrique moyenne de la STEP de Baraki est de 30 442 kWh/j durant la période entre 2012 et 2015.

VI. Valorisation électrique du biogaz

Nous avons ce cas parlé de la valorisation par cogénération (production simultanée d'électricité et de chaleur). Il existe différents procédés qui permettent de mettre en œuvre cette cogénération.

La production de chaleur doit être consommée à proximité, dans le cas de la STEP pour le chauffage des digesteurs ainsi que les locaux et bureaux.

Pour la production électrique :

$$1\text{ m}^3 \text{ de biogaz} \Leftrightarrow 1/2 \text{ m}^3 \text{ de gaz naturel} \Leftrightarrow 5 \text{ kWh}$$

Si on prend la consommation journalière moyenne d'électricité de la STEP de Baraki qui est de 30 442 kWh/j et la production journalière moyenne de biogaz qui est de 1 062 m³/j.

La moyenne de production de biogaz de l'année 2016 étant de 2000 m³.

30% de cette production est utilisée pour le chauffage des digesteurs, soit 600 m³

$$2000 \text{ m}^3 \Leftrightarrow 10\,000 \text{ kWh}$$

Si on retire les 600 m³ du chauffage des digesteurs, 1400 m³ de biogaz sont quotidiennement stockés dans le gazomètre puis brûlés à l'aide de la torchère.

Cette quantité de biogaz équivaut à 70 000 kWh

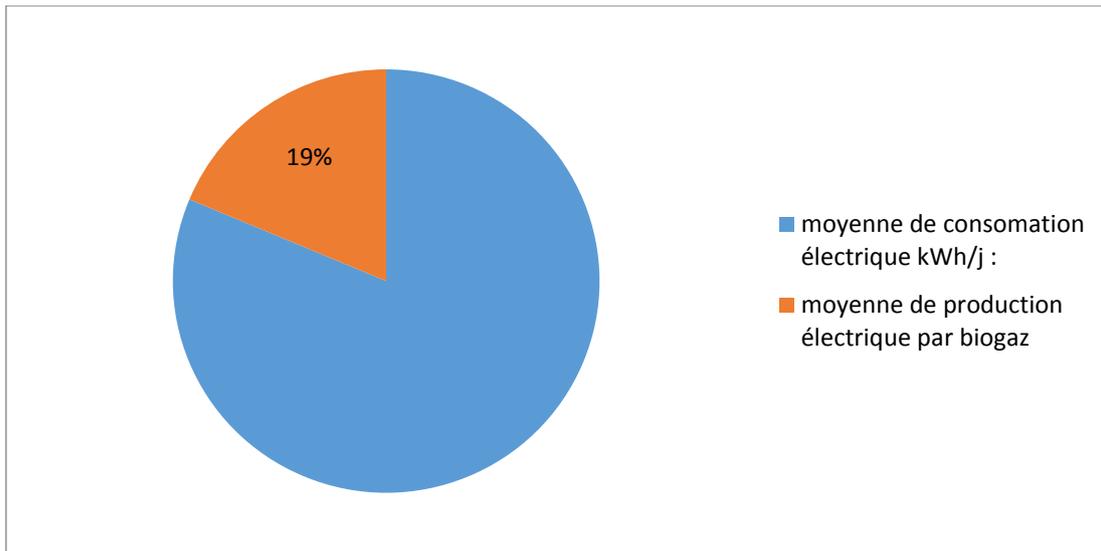


Figure VI-30 Production de biogaz et consommation électrique

La production électrique par biogaz représentera alors 19% de la consommation totale d'électricité, ce qui représente une proportion assez importante qui devrait être prise en considération pour l'optimisation de l'exploitation de la station et la réduction de la consommation électrique de la STEP de Baraki ce qui représente une économie considérable.

VII. Conclusion :

L'analyse en composantes principales nous a permis dans un premier temps d'analyser les variables et tirer des conclusions très utiles concernant les relations existant entre les variables explicatives et la variable à expliquer. Elle nous a permis également de détecter les redondances contenues dans les variables.

La régression multiple nous a permis d'établir un modèle linéaire qui a donné des résultats moyens.

Nous avons par la suite amélioré ces résultats grâce à l'ACP utilisée pour établir un modèle linéaire qui décrit la production du biogaz en fonction des autres paramètres. Le modèle a donné de meilleurs résultats.

L'apport des boues primaires fait considérablement accroître la production du biogaz.

La valorisation du biogaz pourrait faire des économies d'énergie allant jusqu'à 19% de la consommation électrique de la STEP.

CONCLUSION GENERALE

Le méthane possède une importante valeur énergétique, il peut être utilisé pour la production de l'électricité et le chauffage des chambres à digestion comme il peut même être injecté dans les réseaux de distribution de gaz naturel.

Le processus de transformation de la matière organique en biogaz est la méthanisation. Elle est réalisée en anaérobiose grâce à l'action d'une flore bactérienne. Elle présente le double avantage de traiter les déchets organiques tout en produisant une source d'énergie valorisable.

Cette valorisation des boues de la station d'épuration des eaux usées pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique et écologique.

L'analyse en composantes principales représente un premier traitement des données brutes préalable à l'application de la régression multiple.

La régression multiple nous a permis d'établir un modèle permettant de simuler la production journalière du biogaz en fonction des autres paramètres. Le modèle quadratique a donné des résultats qui restent moyens.

Le modèle extrait de l'analyse en composantes principales qui décrit la production journalière du biogaz en fonction des autres paramètres, en tirant une relation linéaire de la matrice des vecteurs propres, a quant à lui donné de très bons résultats.

Le modèle issu de l'ACP est considéré comme le plus précis avec un $R^2=0,82$.

Le modèle établi dans ce travail a été basé sur des données mesurées de 2012 à 2015. La STEP de Baraki est en cours d'extension et sera mise en marche au courant de l'année 2016.

Nous prévoyons une augmentation considérable de la production du biogaz après l'extension du fait de l'augmentation de la capacité nominale de la STEP qui passera de 900 000 à 1 800 000 EH, mais également de la mise en marche du décanteur primaire qui était à l'arrêt.

La valorisation de ce biogaz pourrait représenter une économie d'énergie qui peut atteindre 19% de la consommation électrique de la station de Baraki.

La valorisation du biogaz est une source d'énergie renouvelable et une solution écologique qui devrait être étendue aux grandes stations d'épurations.

Bibliographie

- [1] A. BAOUCHI, « Contribution à la purification du biogaz issu des déjection bovines », Mémoire PFE, Ecole Nationale Polytechnique, Juin 2003.
- [2] S. KALLOUM, «La digestion anaérobie des boues de la station d'épuration de la ville d'Adrar : une opportunité environnementale et énergétique,» Oran, 2006.
- [3] C. J.-P. L. A. F. A. BAUMONT S, «Réutilisation des eaux usées (risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France),» 2004.
- [4] S. A. G, «Méthode de calcul d'une filière de traitement INP,» Lorraine, 2002.
- [5] MEKHALIF, «Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement,» Skikda, 2009.
- [6] B. L. Z. M. HAZOURLI S, «Caractérisation de la pollution des eaux résiduaires de la zone industrielle D'EL-HADJAR,» *Larhyss*, n° %16, 2007.
- [7] R. J, L'analyse de l'eau, eaux naturelles, l'eau résiduaire, eau de mer, 8 éd., Paris: DUNOD, 1996.
- [8] S. M. Y. C. DE VILLERS J, Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface, Cadre général Fiche 2, Observatoire des Données de l'Environnement, Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement., 2005.
- [9] BASSOMPIERREC, «Procédé à boues activées pour le traitement d'effluents papetiers, De la conception d'un pilote à la validation de modèles,» Grenoble, 2007.
- [10] L. J, Epuration des eaux résiduaires urbaines, nature et paramètres de pollution, eau seine Normandie, Normandie, 2007.
- [11] GAIDA, Traitement des eaux usées urbaines, Paris: Technique de l'ingénieur, 1993.
- [12] MEZHOUD, « Conception d'une station d'épuration pour la ville de Haizer (w.bouira),» Blida.dz, 2009.
- [13] BENCHOUCHAR, Cytologie (Première année de médecine), Alger, 2011.
- [14] [. e. Ogada, [Werther et Ogada, 1999.
- [15] «Station d'épuration(disposition constructive pour améliorer leur fonctionnement et faciliter leur exploitation,» Paris, 2002.
- [16] R. N, « Conception de la station d'épuration de la ville de Meliana,» BLIDA, 2008.
- [17] A. Gaid, Epuration biologique des eaux usées urbaines, Alger: Edition Office des publications universitaires, 1985.
- [18] C. Cardot, tLes traitements de l'eau (procédés physico-chimique et biologique).

- [19] B. e. M. Boutin, *Traitement des eaux usées*, 1984.
- [20] A. Gaid, *Epuration biologique des eaux usées urbaines*, Tome I éd., Alger: Ed. OPU, 1984.
- [21] *Memento technique de l'eau*, 1972, Paris]., Ed. Technique et documentation éd., 19.
- [22] «AERM - Procédés d'épuration des petites collectivités du bassin Rhin-Meuse,» Meuse, 2007.
- [23] J. Boeglin, « *Traitement biologique des eaux usées résiduaires*,» 1998.
- [24] Victor-Hugo, Grisales Palacio. *Modélisation et commande floues de type takagi-sugeno appliquées à un bioprocédé de traitement des eaux usées*, Toulouse, 2007.
- [25] *Gestion des boues de stations d'épuration*, Série technique DT52, 2012.
- [26] «Degrémont,» 1989.
- [27] R. Moletta, *Méthanisation de la biomasse*, Les techniques de l'ingénieur.
- [28] J.-C. BOUDEZR, «*héologie et physico-chimie des boues résiduaires pâteuses pour l'étude du stockage et de l'épandage*,» 2001.
- [29] «*Station d'épuration de Baraki*,» Alger, 2011.
- [30] S. I. e. A. T. I.TOU, « *Production du biométhane à partir des déjections animales*,» *Revue des énergies renouvelables*, n° %1Publication du CDER, juin 2001.
- [31] J. Böhm, «*Cours sur la méthanisation*,» ANGERS, 1995.
- [32] L. ANGELIQUE, « *« Biométhanisation »,» chez Séminaire sur les métiers de l'énergie, Université de liège- Haute Ecole Charlemagne- Hemes, Liège, 2002.*
- [33] J.-C. B. E. D.-F. Anne-Laure Reverdy, *La digestionanaérobie des boues de station d'épuration urbaines : Etat des lieux-Etat de l'art*, Cemagref, 2011.
- [34] J. Gay, *Valorisation énergétique des boues*, Les techniques de l'ingénieur.
- [35] IDF – LA COGENERATION, 2010.
- [36] Jolliffe, *Principal Component Analysis*, 2nd edition éd., Springer-Verlag, 2002.
- [37] A. MARTIN, « *L'analyse de données*,» 2004.
- [38] S. R. C. Duby, « *Analyse en Composantes Principales*».
- [39] HAMRICHE, «*Contribution à l'étude et à la simulation des paramètres hydrométriques par l'analyse en composantes principales (ACP)*».
- [40] « [A. BERMAD, « *Elaboration d'une méthodologie de simulation et de prévision des variables climatologiques aléatoires et cycliques par l'analyse en composantes principales*,» Alger, 2004.

- [41] C. Durand, L'analyse factorielle et l'analyse de fidélité, 2005.
- [42] L. L. MOAL, L'Analyse en Composantes Principales, 2002.
- [43] «Gestion des boues de stations d'épuration,» *Série technique DT52*, Novembre 2012.
- [44] F. Dernoncourt, « La logique floue: entre raisonnement humain et intelligence artificielle.,» 2011.
- [45] A. Lefkir, «Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Beni Amrane,» *Revue des Sciences de l'Eau*, n° 119(3) 247-257, 2006.
- [46] S. B. e. al, «Système à inférences floues pour la classification phonémique.,» chez *4th international conference: Sciences of Electonic, Technologie of Information and Telecommunications.*, 2007.
- [47] O. E. Vasile, « Contributon au prognostic de défaillances par réseaneuro-flou: maîtrise de l'erreur de prédiction,» 2008.
- [48] O. E. Vasile, Contributon au prognostic de défaillances par réseaneuro-flou: maîtrise de l'erreur de prédiction., 2008.