

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Hydraulique

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en hydraulique

Thème :

**Optimisation de la consommation en énergie  
électrique de la STEP de Boumerdes**

Réalisé par :

**Mr. DJAOUI Toufik**

Sous la direction de Mr A.BERMAD professeur à l'école nationale polytechnique, d'Alger

Présenté et soutenu publiquement le (15/06/2016)

**Composition du jury :**

<b>Président :</b>	<b>Mr. EH.BENYOUSSEF</b>	<b>Professeur (ENP)</b>
<b>Promoteur :</b>	<b>Mr A.BERMAD</b>	<b>Professeur (ENP)</b>
<b>Examineurs :</b>	<b>Mr. A.LEFKIR</b>	<b>Docteur (ENTP)</b>
	<b>Mme A.HEMRICH</b>	<b>Docteur (ENP)</b>

Promotion 2016

## ملخص

تعتبر محطة تصفية المياه المستعملة هيكل هام م أجل الحفاظ على البيئة. حيث قبل رمي مياه الصرف الصحي في الوسط البيئي تتلقى معالجة خاصة حسب مكوناتها وأصلها، أذن يجب تحسين تقنيته للحصول على مردود جيد وذلك من النواحي الاقتصادية والبيئية.

في هذا السياق، سوف نركز عملنا على تطوير النموذج الأمثل لاستهلاك الطاقة الكهربائية، هذا النموذج له دور في مساعدة مسيري المحطة على اتخاذ القرار الأمثل من حيث استهلاك الطاقة وتخفيض مصاريف استغلال المحطة.

الكلمات الافتتاحية: محطة تصفية المياه المستعملة، الانحدار المتعدد، مؤشر التلوث، تحليل المكون الرئيسي.

## ABSTRACT:

**Waste water treatment plants** are the main cure to prevent environment from water pollution. Both water that originates from residences, industries and rainfall must be treated according to its composition before returning to nature. That is why water purification process must be both environmentally and economically beneficial.

In this context, our work will be interested to **develop a model of optimization** of the consumption of electrical energy which is going to help the administrators of **WWTP to run it optimally** and to reduce these operating costs.

**Key words:** Wastewater treatment, multiple regression, pollution index, principal component analysis (PCA), optimization of the electric energy consumption.

## RESUME :

La **station d'épuration** est un organe de protection de l'environnement. Avant que toute eau usée reprenne son chemin dans la nature, elle doit être traitée suivant sa composition et son origine. Il faut donc optimiser son épuration de sorte à avoir une bonne rentabilité économique et environnementale.

Dans ce contexte, notre travail s'intéressera à élaborer **un modèle d'optimisation** de la consommation en énergie électrique qui va aider à les gestionnaires de la STEP de la faire **fonctionner d'une façon optimale** et de réduire ces couts d'exploitation.

**Mots clé :** Epuration des eaux usées, régression multiple, indice de pollution, analyse en composantes principales (ACP), optimisation de la consommation en énergie électrique.

## Remerciements

Avant tout, je remercie Allah le tout puissant qui m'a donné le courage, la volonté et la patience pour accomplir ce travail.

Je saisis cette occasion pour exprimer mes vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements, en premier lieu, à mon promoteur Mr. A.BERMAD, d'abord, pour avoir accepté à superviser mon projet de fin d'étude, ensuite pour m'avoir prodigué conseils durant toute la période qu'on a passée ensemble pour concevoir et élaborer ce document. Je le remercie surtout pour son entière disponibilité et sa patience.

J'adresse également mes remerciements particuliers à toute l'équipe de l'ONA Boumerdes qui m'ont autorisé à accéder à la station et les information qui m'ont permis d'accomplir mon travail dans des conditions optimales.

Je remercie aussi Monsieur A.LEFKIR, Enseignant à l'ENTP, qui m'a apporté une aide précieuse dans l'élaboration de ce mémoire, ainsi que pour ses remarques et ses encouragements tout au long de ces cinq derniers mois.

Je tiens à remercier Mr. Pr. Benyoussef pour avoir accepté d'être Président de mon jury de Thèse. Je remercie Mme Hemrich d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Mes remerciements à tous les enseignants du département, pour la formation qu'ils nous ont donné durant les 3 années de spécialité. Merci à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet que ce soit par son amitié, ses conseils ou son soutien moral.

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mes frères et mes sœurs*

*A tous mes frères et mes sœurs pour leur encouragement et leur soutien inconditionnel.*

*Mes amis*

*A tous mes amis de l'Ecole préparatoire d'Oran avec qui j'ai passé de très beaux moments.*

*A tous mes amis et camarades de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.*

*Et à toutes personnes ayant contribué de proche ou de loin dans l'élaboration de ce travail.*

**Toufik**

## Sommaire

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Liste des abréviations**

**Liste des symboles**

**Introduction générale.....15**

### **Chapitre I : Origines de la pollution, Paramètres & Normes de rejet**

**I. INTRODUCTION..... 18**

**I.1 Origines des eaux usées..... 18**

I.1.1 Les eaux usées domestiques ..... 18

I.1.2 Les eaux usées industrielles ..... 19

I.1.3 Les eaux pluviales et de ruissellement..... 19

I.1.4 Origine agricole ..... 19

**I.2 CLASSIFICATION DES PARAMETRES DE POLLUTION ..... 20**

I.2.1 Les paramètres physico-chimiques..... 20

I.2.2 Les paramètres de la pollution organique globale..... 22

I.2.3 Paramètres de la pollution dissoute ..... 23

I.2.4 Paramètres toxiques ..... 24

I.2.5 Paramètres microbiologiques ..... 25

**I.3 La norme de rejets ..... 26**

I.3.1 Normes internationales ..... 26

I.3.2 Normes nationales selon le JORAD ..... 26

**I.4 Conclusion ..... 27**

### **Chapitre II : Epurations des eaux usées**

**II. INTRODUCTION..... 29**

**II.1 Collecte des eaux usées..... 29**

II.1.1 Assainissement collectif..... 29

II.1.2 L'assainissement autonome..... 31

<b>II.2</b>	<b>Implantation d'une station d'épuration.....</b>	<b>32</b>
<b>II.3</b>	<b>Choix du type de station d'épuration.....</b>	<b>32</b>
<b>II.4</b>	<b>Les procédés de traitement des eaux usées .....</b>	<b>32</b>
II.4.1	Prétraitement.....	33
II.4.2	Traitement primaire .....	35
II.4.3	Traitements secondaires .....	36
II.4.4	Les traitements complémentaires .....	42
II.4.5	Le traitement tertiaire.....	43
<b>II.5</b>	<b>Traitement des boues .....</b>	<b>45</b>
II.5.1	Épaississement.....	45
II.5.2	Stabilisation et hygiénisation .....	46
II.5.3	Déshydratation.....	46
II.5.4	Séchage.....	46

### **Chapitre III : Théories de la régression multiple et de l'analyse en composantes principales**

<b>III.</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>48</b>
<b>III.1</b>	<b>Régression multiple.....</b>	<b>48</b>
III.1.1	Historique .....	48
III.1.2	Objectifs de la régression multiple .....	49
III.1.3	Moindres carrés ordinaires .....	49
III.1.4	Démarche de la régression multiple .....	50
III.1.5	Notation matricielle .....	52
III.1.6	Qualité de la régression.....	52
III.1.7	Types de régression multiple.....	58
<b>III.2</b>	<b>Analyse en Composantes Principales (ACP) .....</b>	<b>59</b>
III.2.1	Définitions .....	59
III.2.2	Objectifs .....	62
III.2.3	Domaine d'application.....	62
III.2.4	Cadre .....	63
III.2.5	Procédé d'application de l'ACP .....	63
III.2.6	Résultats d'application.....	64
III.2.7	Analyse des résultats.....	64
III.2.8	Représentation graphique.....	65

<b>III.3 Conclusion .....</b>	<b>66</b>
-------------------------------	-----------

## **Chapitre IV : Présentation de la station d'épuration de Boumerdes**

<b>IV. INTRODUCTION.....</b>	<b>68</b>
------------------------------	-----------

<b>IV.1 Localisation de la STEP .....</b>	<b>68</b>
---	-----------

<b>IV.2 Caractéristiques Techniques .....</b>	<b>69</b>
---	-----------

IV.2.1 Paramètres de pollution de conception .....	69
--	----

IV.2.2 Les étapes du procédé d'épuration .....	69
--	----

<b>IV.3 Traitement au fil de l'eau .....</b>	<b>72</b>
--	-----------

IV.3.1 Arrivée des eaux et bassin d'orage .....	72
---	----

IV.3.2 Prétraitement.....	72
---------------------------	----

IV.3.3 Procédé biologique .....	73
---------------------------------	----

IV.3.4 Traitement final .....	74
-------------------------------	----

<b>IV.4 Traitement au fil de boues .....</b>	<b>75</b>
--	-----------

IV.4.1 Epaississement des boues.....	75
--------------------------------------	----

IV.4.2 Déshydratation mécanique des boues sur bandes presseuses .....	75
---	----

<b>IV.5 CRITIQUE DES DONNEES.....</b>	<b>75</b>
---------------------------------------	-----------

IV.5.1 Statistique des données .....	76
--------------------------------------	----

IV.5.2 Evolution des paramètres de pollution dans le temps .....	77
--	----

IV.5.3 Détermination des valeurs singulières .....	89
--	----

IV.5.4 Test des horsains de Grubbs et Beck .....	89
--	----

IV.5.5 Résultat du test pour la STEP de Boumerdes .....	90
---	----

IV.5.6 Les valeurs singulières .....	91
--------------------------------------	----

## **Chapitre V : Elaboration du modèle d'optimisation**

<b>V. INTRODUCTION.....</b>	<b>93</b>
-----------------------------	-----------

<b>V.1 Répartition des coûts d'exploitation de la STEP de Boumerdes .....</b>	<b>93</b>
---	-----------

<b>V.2 La répartition de la consommation en énergie électrique.....</b>	<b>94</b>
---	-----------

<b>V.3 Formulation de la problématique .....</b>	<b>95</b>
--	-----------

V.3.1 L'indice de pollution.....	97
----------------------------------	----

V.3.2 L'abattement de la pollution (AB).....	98
--	----

V.3.3 Le débit recirculé (DR) .....	99
-------------------------------------	----





*Liste des tableaux :*

**Chapitre I : Origines de la pollution, Paramètres & Normes de rejet**

Tableau I. 1 Normes internationales des rejets.....	26
Tableau I. 2 Normes nationales des rejets.....	27

**Chapitre III : Théories de la régression multiple et de l'analyse en composantes principales**

Tableau III. 1 Récapitulatif somme des carrés.....	52
--	----

**Chapitre IV : Présentation de la station d'épuration de Boumerdes**

Tableau IV. 1 présentation de la STEP de Boumerdes .....	68
Tableau IV. 2 Paramètres de pollution de conception de la station de Boumerdes .....	69
Tableau IV. 3 Statistiques descriptives des paramètres de pollution de la STEP Boumerdes	76
Tableau IV. 4 Résultats du test de Grubbs et Beck pour la STEP de Boumerdes .....	90

**Chapitre V : Elaboration du modèle d'optimisation**

Tableau V. 1 Répartition des couts d'exploitation de la STEP de Boumerdes.....	93
Tableau V. 2 Journées sélectionnées pour un intervalle + 0.1 du rendement optimal .....	106
Tableau V. 3 Résultats des régressions multiples .....	108
Tableau V. 4 Journées sélectionnées pour un intervalle + 0.05 du rendement optimal .....	109
Tableau V. 5 Matrice de corrélation des paramètres sélectionnés .....	112
Tableau V. 6 Matrice de corrélation entre les CP' et les variables sélectionnées.....	112
Tableau V. 7 Classement et poids attribuer à chaque paramètre sélectionné.....	112
Tableau V. 8 Journées sélectionnées pour un intervalle + 0.1 du rendement optimal .....	114
Tableau V. 9 Résultats de la régression multiple .....	116
Tableau V. 10 Journées sélectionnées pour un intervalle + 0.05 du rendement optimal ....	118
Tableau V. 11 Résultats de la régression multiple .....	118
Tableau V. 12 Matrice de corrélation des paramètres sélectionnés .....	119
Tableau V. 13 Matrice de corrélation entre les CP' et les variables sélectionnées.....	120
Tableau V. 14 Classement et Poids attribuer à chaque paramètre sélectionnés.....	120
Tableau V. 15 Journées sélectionnées pour un intervalle + 0.1 du rendement optimal .....	121
Tableau V. 16 Résultats de la régression multiple pour le cas un intervalle de sélection + 0.1 du rendement optimal.....	122
Tableau V. 17 Journées sélectionnées pour un intervalle + 0.05 du rendement optimal .....	123
Tableau V. 18 Résultats de la régression multiple .....	124
Tableau V. 19 Gain totale annuel en matière de consommation en énergie électrique .....	129

## Liste des figures :

### Chapitre II : Epurations des eaux usées

Figure II. 1 Réseau séparatif.....	30
Figure II. 2 Réseau unitaire .....	31
Figure II. 3 Chaine de prétraitement (Dégrillage-Dessablage-Déshuilage).....	33
Figure II. 4 Grille courbe.....	34
Figure II. 5 Grille droite .....	34
Figure II. 6 Dessableur-Dégraisseur combiné rectangulaire .....	35
Figure II. 7 Dessableur-Dégraisseur.....	35
Figure II. 8 Décanteur primaire .....	36
Figure II. 9 Schéma d'une station d'épuration classique à boues activées .....	38
Figure II. 10 Synoptique d'une station d'épuration comportant un lit bactérien .....	39
Figure II. 11 Les mécanismes en jeu dans les bassins de lagunage naturel. ....	40
Figure II. 12 schéma de principe de fonctionnement des biodisques.....	41
Figure II. 13 Schéma du principe de la bio filtration .....	41

### Chapitre IV : Présentation de la station d'épuration de Boumerdes

Figure IV. 1 STEP de Boumerdes [Google Earth].....	68
Figure IV. 2 Vue d'ensemble des ouvrages de la STEP de Boumerdes .....	69
Figure IV. 3 Organigramme d'exploitation de la STEP de Boumerdes.....	70
Figure IV. 4 schéma des différents postes de traitement à la STEP de Boumerdes.....	71
Figure IV. 5 Bassin d'orage de la STEP de BOUMERDES .....	72
Figure IV. 6 Dégrilleur du type à champ courbe.....	72
Figure IV. 7 Dessableur-Déshuileur.....	73
Figure IV. 8 Bassin d'aération .....	73
Figure IV. 9 Décanteur-Clarificateur .....	74
Figure IV. 10 Bassin de chloration.....	74
Figure IV. 11 Presse à bande.....	75
Figure IV. 12 Evolution journalière du Ph de l'eau brute. ....	77
Figure IV. 13 Evolution journalière du Ph de l'eau épurée.....	77
Figure IV. 14 Variation journalière de la température de l'eau brute. ....	78
Figure IV. 15 Variation journalière de la température de l'eau épurée.....	78
Figure IV. 16 Evolution journalière de la concentration en MES à l'entrée de la STEP .....	79
Figure IV. 17 Evolution journalière de la concentration en MES à la sortie de la STEP .....	79
Figure IV. 18 Evolution de la Demande Biologique en Oxygène à l'entrée de la STEP.....	80
Figure IV. 19 Evolution de la Demande Biologique en Oxygène à la sortie de la STEP.....	80
Figure IV. 20 Evolution de la Demande Chimique en Oxygène à l'entrée de la STEP.....	81
Figure IV. 21 Evolution de la Demande Chimique en Oxygène à la sortie de la STEP.....	81
Figure IV. 22 Evolution de l'ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) à l'entrée de la STEP. ....	82
Figure IV. 23 Evolution de l'ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) à la sortie de la STEP.....	82
Figure IV. 24 Evolution du Nitrite (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) à l'entrée de la STEP. ....	83
Figure IV. 25 Evolution du Nitrite (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) à la sortie de la STEP.....	83

Figure IV. 26 Evolution du Nitrate (NO <sub>3</sub> -) à l'entrée de la STEP.....	84
Figure IV. 27 Evolution du Nitrate (NO <sub>3</sub> -) à la sortie de la STEP.....	84
Figure IV. 28 Evolution du NTK à l'entrée de la STEP.....	85
Figure IV. 29 Evolution du NTK à la sortie de la STEP.....	85
Figure IV. 30 Evolution de PO <sub>4</sub> -3 à l'entrée de la STEP.....	86
Figure IV. 31 Evolution de PO <sub>4</sub> -3 à la sortie de la STEP.....	86
Figure IV. 32 Evolution du débit d'entrée journalier de la STEP.....	87
Figure IV. 33 Evolution de l'énergie totale consommée à la STEP.....	87
Figure IV. 34 Evolution des Boues en excès à la STEP.....	88
Figure IV. 35 Evolution des Boues recirculées à la STEP.....	88

## **Chapitre V : Elaboration du modèle d'optimisation**

Figure V. 1 Répartition des couts d'exploitation de la STEP de Boumerdes .....	94
Figure V. 2 Répartition de la consommation en énergie électrique par poste de consommation .....	95
Figure V. 3 Principaux paramètres de l'optimisation de la consommation en énergie électrique .....	96
Figure V. 4 Rendements d'élimination de la DCO comparés au rendement optimal.....	100
Figure V. 5 Rendements d'élimination de la DBO <sub>5</sub> comparés au rendement optimal.....	101
Figure V. 6 Rendements d'élimination de la MES comparés au rendement optimal .....	101
Figure V. 7 Comparaison entre les rendements globaux .....	102
Figure V. 8 Représentation de l'intervalle de la première sélection.....	103
Figure V. 9 Etapes de la deuxième sélection.....	104
Figure V. 10 Pourcentage de chaque année sélectionnée dans la totalité des données sélectionnées.....	108
Figure V. 11 Histogramme des résidus modèle C3.....	117
Figure V. 12 Résultat de simulation modèle C3 .....	117
Figure V. 13 Histogramme des résidus modèle F1 .....	125
Figure V. 14 Résultat de simulation modèle F1 .....	125
Figure V. 15 Histogramme des résidus modèle F2 .....	126
Figure V. 16 Résultat de simulation modèle F2.....	126
Figure V. 17 Histogramme des résidus modèle F3 .....	127
Figure V. 18 Comparaison entre l'énergie simulée et l'énergie observée .....	128
Figure V. 19 Gain moyen annuel journalier en matière d'énergie .....	128
Figure V. 20 Pourcentage moyen journalier du gain en matière d'énergie .....	129
Figure V. 21 Gain moyen annuel journalier en matière de temps d'aération dans chaque bassin biologique.....	130
Figure V. 22 Présentation de l'interface graphique de l'application d'aide à la décision.....	131
Figure V. 23 Application du programme d'aide à la décision .....	132
Figure V. 24 Détection de l'arrêt de la ligne d'épuration par l'application.....	132

## ***Liste des abréviations :***

**AB** : Abattement de Pollution

**ACP** : Analyse en Composante Principale

**D** : Débit

**DBO** : Demande Biochimique en Oxygène

**DCO** : Demande Chimique en Oxygène

**DR** : Débit Recirculé

**E** : Energie

**EH** : Equivalent Habitant

**E U** : Eaux Usées

**IP** : Indice de Pollution

**JORAD** : Journal Officiel République Démocratique Algérienne

**MES** : Matières en Suspension

**MVS** : Matières Volatiles en Suspension

**MMS** : Matières Minérales en Suspension

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé

**ONA** : office National de l'Assainissement

**PH** : Potentiel Hydrogène

**PG** : Point Géométrie

**STEP** : Station d'épuration des eaux usées

**T** : Température

**WWTP** : Waste Water Treatment Plant

***Liste des symboles :***

**KW** : Kilowatt

**NH<sub>4</sub><sup>+</sup>** : Ammonium

**NO<sub>2</sub><sup>-</sup>** : Nitrite

**NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Nitrate

**NTK**: Azote Kjeldahl

**O<sub>2</sub>** : Oxygène

**PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>** : Ortho-Phosphate

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination multiple

**RDBO<sub>5</sub>** : Rendement épuratoire DBO<sub>5</sub>

**RDCO** : Rendement épuratoire DCO

**RMES** : Rendement épuratoire MES

**RNDBO<sub>5</sub>** : Rendement DBO<sub>5</sub> lié à la norme

**RNDCO** : Rendement DCO lié à la norme

**RNMES** : Rendement MES lié à la norme

**RG** : Rendement Global Epuratoire

**RGN** : Rendement Global lié à la Norme

## Introduction générale

L'eau est l'une des plus importantes ressources naturelles, indispensable à la vie, celle des hommes, des bêtes et des plantes, et à la plupart des activités de la société.

Facteur de la vie économique, l'eau a été apprivoisée par l'homme et sa maîtrise a permis l'irrigation des surfaces agricoles, la fabrication de produits industriels, la production de l'électricité...

Cependant son exploitation effrénée et sa pollution expose l'humanité au danger.

De nos jours, les eaux usées doivent être épurées avant d'être renvoyées vers les rivières ou la mer, où elles réintègrent le cycle de l'eau. A ce stade, ces eaux doivent répondre à des normes de qualité fixées par les autorités responsables de la gestion des ressources en eau.

L'eau est menacée dans sa qualité et dans sa quantité. Malgré la construction de nouveaux barrages et le recours au dessalement de l'eau de mer par notre pays, et pour subvenir aux besoins de la population, la gestion optimale d'une station d'épuration et la maîtrise des procédés et étapes de traitement reste un but et un objectif à atteindre afin de protéger au mieux l'environnement et la santé publique.

L'épuration s'applique principalement aux eaux usées ; pour les eaux pluviales ; on parle plutôt de traitement du rejet urbain en temps de pluie. L'épuration peut être assurée à l'échelle individuelle (assainissement autonome ou individuel) ; semi-collective ou plus généralement à l'échelle collective (à l'aval d'un réseau d'assainissement ; dans une station d'épuration).

Les responsables et gérants des stations d'épurations ont toujours cherché à optimiser le fonctionnement de cette dernière en fixant à chaque fois des objectifs tout en essayant de les atteindre. L'aspect économique (coût), temporel (délai) ainsi que environnemental (Rejet dans le milieu naturel) doivent être maîtrisés afin d'assurer une meilleure performance de la STEP.

L'objectif de notre travail est de mettre en place un modèle d'optimisation de la consommation en énergie électrique de la STEP de Boumerdes dans le but d'aider les gérants de celle-ci dans leurs prises de décisions optimales de temps d'aération de bassin biologique.

On a 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'à la protection du milieu récepteur des effets désastreux que peut procurer la pollution de cette ressource.

Le premier chapitre est intitulé «Origines de la pollution, Paramètres & Normes de rejet » et qui n'est qu'une synthèse des différents agents et paramètres qui entrent en jeu dans l'analyse de l'eau avant et après son traitement.

Le deuxième chapitre quant à lui a été totalement consacré à la présentation des différentes filières d'épuration des eaux usées.

La théorie de la régression multiple et celle de l'analyse en composantes principales (ACP) ont fait l'objet du troisième chapitre.

Le quatrième chapitre a été consacré à la présentation de la STEP de Boumerdes, aux critiques et aux interprétations des données recueillies.

L'élaboration et l'application de notre modèle a été expliquée dans le cinquième chapitre, on trouvera ainsi les différents résultats avec leurs interprétations.

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



*Chapitre I : Origines de la pollution,  
Paramètres & Normes de rejet*

## I. Introduction

Afin d'atteindre une gestion efficace et une préservation durable de l'environnement, une étude approfondie de la pollution des eaux et de ses impacts est indispensable.

En effet, la notion de qualité de l'eau varie en fonction de l'usage et quel que soit l'emploi fait de l'eau, il demeure essentiel que sa qualité soit préservée. Comme son contenu varie beaucoup, il s'agit de définir les valeurs moyennes des caractéristiques de la plupart des eaux naturelles et salubres.

### I.1 Origines des eaux usées

Les eaux usées proviennent de quatre sources principales :

- ✓ Les eaux usées domestique
- ✓ Les eaux usées industrielles
- ✓ Les eaux de pluie et de ruissellement dans les villes
- ✓ Le ruissellement dans les zones agricole.

#### I.1.1 Les eaux usées domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en :

- ✓ Eaux ménagères, qui ont pour origine les salles de bains et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques
- ✓ Eaux-vannes qui sont les rejets des toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux.

La pollution journalière produite par une personne utilisant 150 à 200 litres d'eau est évaluée à :

- 90 grammes de matières organiques ou minérales (en suspension dans l'eau sous forme de particules)
- 57 grammes de matières oxydables
- 15 grammes de matières azotées
- 4 grammes de phosphore (issus des détergents)
- 0,23 gramme de résidus de métaux lourds (plomb, cadmium, arsenic, mercure...)
- 0,05 gramme de composés (fluor, chlore, brome, iode...)
- 1 à 10 milliards de germes par 100 ml. [1]

### I.1.2 Les eaux usées industrielles

Les déchets et les effluents industriels définissent largement la qualité et le taux de pollution de ces eaux usées. Les établissements industriels utilisent une quantité importante d'eau qui tout en restant nécessaire à leur bonne marche, n'est réellement consommée qu'en très faible partie le reste est rejeté. On peut néanmoins, faire un classement des principaux rejets industriels suivant la nature des inconvénients qu'ils déversent :

- ✓ Pollution due aux matières en suspension minérales (Lavage de charbon, carrière, tamisage du sable et gravier, industries productrices d'engrais phosphatés....) ;
- ✓ Pollution due aux matières en solution minérales (usine de décapage, galvanisation...);
- ✓ Pollution due aux matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, équarrissages, pâte à papier...);
- ✓ Pollution due aux rejets hydrocarbonés et chimiques divers (raffineries de pétrole, porcherie, produits pharmaceutiques.....) ;
- ✓ Pollution due aux rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des industries nucléaires....).

Les eaux résiduaires d'origine industrielle ont généralement une composition plus spécifique et directement liée au type d'industrie considérée. Indépendamment de la charge de la pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propres liées aux produits chimiques transportés. [2]

### I.1.3 Les eaux pluviales et de ruissellement

Elles peuvent constituer une cause de dégradations importantes des cours d'eau, notamment pendant les périodes orageuses. Les eaux de pluie ne sont pas exemptes de pollutions : au contact de l'air, elles se chargent d'impuretés (fumées industrielles, résidus de pesticides...), puis, en ruisselant, des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus, métaux lourds...).

Lorsque le système d'assainissement est dit "unitaire", les eaux pluviales sont mêlées aux eaux usées domestiques. En cas de fortes précipitations, les contraintes de préservation des installations de dépollution peuvent imposer un déversement (délestage) de ce "mélange" très pollué dans le milieu naturel. Enfin, dans les zones urbaines, les surfaces construites rendent les sols imperméables et ajoutent le risque d'inondation à celui de la pollution. [1]

### I.1.4 Origine agricole

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Dans le contexte d'une agriculture performante et intensive, l'agriculteur est conduit à utiliser divers produits d'origine industrielle ou agricole dont certains présentent ou peuvent présenter, des risques pour l'environnement et plus particulièrement pour la qualité des eaux. Il s'agit principalement :

- ✓ Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation) ;
- ✓ Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...).

Donc ces eaux sont issues :

- ✓ Des apports directs dus aux traitements des milieux aquatiques et semi-aquatiques tels que le désherbage des plans d'eau, des zones inondables (faucardage chimique) et des fossés, ainsi que la démoustication des plans d'eau et des zones inondables (étangs et marais).
- ✓ Des apports indirects dus en particulier à l'entraînement par ruissellement, aux eaux de rinçage des appareils de traitement, aux résidus présents dans des emballages non correctement rincés ou détruits, aux eaux résiduelles des usines de fabrication et de conditionnement.[2]

## I.2 CLASSIFICATION DES PARAMETRES DE POLLUTION

Les normes de rejet des eaux usées, fixent des indicateurs de qualité physico-chimique et biologique. Ce potentiel de pollution généralement exprimés en mg/l, est quantifié et apprécié par une série d'analyses. Certains de ces paramètres sont indicateurs de modifications que cette eau sera susceptible d'apporter aux milieux naturels récepteurs. [4]

### I.2.1 Les paramètres physico-chimiques

#### I.2.1.1 Température

La température est un facteur écologique important des milieux aqueux. Son élévation peut perturber fortement la vie aquatique (pollution thermique). Elle joue un rôle important dans la nitrification et la dénitrification biologique. La nitrification est optimale pour des températures variant de 28 à 32°C par contre, elle est fortement diminuée pour des températures de 12 à 15°C et elle s'arrête pour des températures inférieures à 5°C. [4]

#### I.2.1.2 Le potentiel Hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène, plus connu sous le nom de « pH » permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une solution. Le pH de l'eau pure à 25°C, qui est égal à 7, a été choisi comme valeur de référence d'un milieu neutre.

Le pH mesure l'activité chimique des ions hydrogènes H<sup>+</sup> (appelés aussi couramment protons) en solution. En solution aqueuse, ces ions sont présents sous la forme de l'ion oxonium ou ion hydronium. Plus couramment le pH mesure l'acidité ou la basicité d'une solution. Ainsi dans un milieu aqueux à 25°C :

- une solution de  $\text{pH} = 7$  est dite neutre ;
- une solution de  $\text{pH} < 7$  est dite acide ; plus son  $\text{pH}$  s'éloigne de 7 et plus elle est acide ;
- une solution de  $\text{pH} > 7$  est dite basique ; plus son  $\text{pH}$  s'éloigne de 7 et plus elle est basique.

Le  $\text{pH}$  joue un rôle important dans l'épuration d'un effluent et le développement bactérien. La nitrification optimale ne se fait qu'à des valeurs de  $\text{pH}$  comprises entre 7,5 et 9. [5]

### I.2.1.3 Oxygène dissous

Les concentrations en oxygène dissous constituent, avec la valeur de  $\text{pH}$ , l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique.

L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. La concentration en oxygène dissous varie de manière journalière et saisonnière car elle dépend de nombreux facteurs tels que la pression partielle en oxygène de l'atmosphère, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité en nutriment. Cette concentration en oxygène dissous est également fonction de la vitesse d'appauvrissement du milieu en oxygène par l'activité des organismes aquatiques et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau. [3]

### I.2.1.4 Conductivité

La mesure en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou  $\text{mS}/\text{cm}$  (micro ou milli Siemens par cm) de la conductivité électrique d'une eau s'effectue à l'aide d'un conductimètre. Celui-ci mesure le passage de l'électricité entre deux électrodes plongées dans l'eau. La mesure s'effectue à  $20^\circ\text{C}$  ou avec un conductimètre avec compensateur automatique de température.

Si l'eau très pure est un isolant qui oppose une grande résistance au passage de l'électricité, il n'en est plus de même lorsqu'elle est chargée en sels minéraux d'origine naturelle (calcium, magnésium, sodium, potassium). A cette minéralisation naturelle liée à la nature des sols s'ajoutent aussi ...les polluants. La conductivité permet d'apprécier globalement l'ensemble des produits en solution dans l'eau.

La mesure de la conductivité est un moyen assez simple de détection d'une anomalie indiquant la présence probable d'une pollution, par comparaison de la valeur mesurée avec celle que l'on était en droit d'attendre. [6]

### I.2.1.5 Turbidité

La turbidité est inversement proportionnelle à la transparence de l'eau, elle est de loin le paramètre de pollution indiquant la présence de la matière organique ou minérale sous forme

colloïdale en suspension dans les eaux usées. Elle varie suivant les matières en suspension (MES) présentes dans l'eau. [4]

### I.2.1.6 Les matières en suspension (MES)

Elles représentent, la fraction constituée par l'ensemble des particules, organiques (MVS) ou minérales (MMS), non dissoutes de la pollution. Elles constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel. Les MES s'expriment par la relation suivante :

$$\text{MES} = 30\% \text{ MMS} + 70\% \text{ MVS}$$

- ✓ Les matières volatiles en suspension (MVS) :  
Elles représentent la fraction organique de MES et sont obtenues par calcination de ces MES à 525°C pendant 2 heures. La différence de poids entre les MES à 105°C et les MES à 525°C donne la « perte au feu » et correspond à la teneur en MVS en (mg/l) d'une eau ;
- ✓ Les matières minérales (MMS) :  
Elles représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire son « extrait sec » constitué à la fois par les matières en suspension et les matières solubles telles que les chlorures, les phosphates, etc. [4]

## I.2.2 Les paramètres de la pollution organique globale

Les matières organiques nécessitent de l'oxygène pour leur métabolisation par les micro-organismes cette demande on oxygène peut être représentée biologiquement suivant divers paramètre tels que la DBO (demande biochimique en oxygène), la DCO (demande chimique en oxygène).

### I.2.2.1 Demande Biochimique en Oxygène (DBO5)

Elle représente la quantité d'oxygène consommée par l'eau usée pendant une certaine durée. Elle correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour décomposer par oxydation, avec l'intervention des bactéries, les matières organiques de l'eau usée.

La DBO est un phénomène évolutif dans la mesure où elle permet d'étudier le comportement d'une charge organique (et plus généralement celui d'un échantillon), il est évident qu'il ne peut y avoir de détermination de D.B.O que lorsque les micro-organismes présents sont capable d'assimiler les matières organique de l'échantillon. [6]

La DBO a été standardisée en DBO5, mesurée au bout de 5 jours, considérée comme une période significative du processus global de biodégradation qui prend des semaines. Ce

paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en matières organiques biodégradables d'une eau, et il donne une indication indirecte de l'activité bactérienne. [17]

### I.2.2.2 Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée par les matières existant dans l'eau et oxydable dans des conditions opératoires définies. En fait la mesure correspond à une estimation des matières oxydables présentes dans l'eau quelle que soit leur origine organique ou minérale.

La DCO étant fonction des caractéristiques des matières présentes, de leur proportion respective, des possibilités de l'oxydation. [9]

La DCO est la concentration, exprimée en mg/L, d'oxygène équivalente à la quantité de dichromates consommée par les matières dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies par la norme. [10]

## I.2.3 Paramètres de la pollution dissoute

### I.2.3.1 Composés azotés

L'azote rencontré dans les eaux usées peut avoir un caractère organique ou minéral, il peut être d'origine anthropique comme les rejets urbains et industriels ou naturel à partir de l'atmosphère, il se présente sous quatre formes :

- ✓ L'azote organique : c'est une forme de l'azote qu'on ne peut pas mesurer directement, on effectue généralement l'analyse de l'azote KJELDAHL (NK)  $NK = N_{org} + N - NH_4^+$
- ✓ L'azote ammoniacal ( $N - NH_4^+$ ) traduit un processus d'ammonification de la matière organique azotée. Les ions ammoniums subissent une nitrification par action des bactéries nitrifiantes.
- ✓ L'azote nitreux ( $N - NO_2^-$ ) 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.
- ✓ L'azote nitrique ( $N - NO_3^-$ ) 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. [11]

### I.2.3.2 Composés phosphorés

La concentration en phosphore dans les effluents secondaires varie de 6 à 15 mg/l (soit 15 à 35 mg/l en  $P_2O_5$ ). Cette quantité est en général trop faible pour modifier le rendement [12].

Mais s'il y a excès, il est pour l'essentiel retenu dans le sol par des réactions d'adsorption et de précipitation; cette rétention est d'autant plus effective que le sol contient des oxydes de fer, d'aluminium ou du calcium en quantités importantes. On ne rencontre pas en général de problèmes liés à un excès de phosphore [13].

### I.2.4 Paramètres toxiques

#### I.2.4.1 Métaux lourds

Le suivi des concentrations des métaux lourds est particulièrement important vu leur toxicité et leur capacité de bioaccumulation le long de la chaîne alimentaire. Contrairement aux polluants organiques, les métaux ne peuvent pas être dégradés biologiquement ou chimiquement. Cependant, leur précipitation engendrerait leur mélange avec les boues décantées.

Les concentrations en cuivre, nickel, chrome, plomb, cadmium, mercure, zinc caractérisent certains types de pollution :

- ✓ La présence de cuivre et de nickel indiquent l'existence de rejets provenant d'industries de traitement de surface des métaux.
- ✓ Le chrome indique l'existence de rejets provenant d'une tannerie.
- ✓ Le plomb est lié à des pollutions diffuses.
- ✓ Le zinc est évacué par des industries qui pratiquent la galvanisation ou la préparation d'alliages tels que le laiton et le bronze, il peut provenir également du contact entre les eaux de ruissellement et les matériaux galvanisés.
- ✓ Le cadmium peut notamment être rejeté par des usines de galvanoplastie et d'industries chimiques, de textiles et de teintures. [14]

#### I.2.4.2 Tensioactifs

Ils ont la propriété d'abaisser la tension superficielle de l'eau et sont employés à cause de leur pouvoir mouillant et moussant.

La présence des tensioactifs dans les eaux usées affecte le transfert de l'oxygène dans les boues activées au niveau des bassins d'aération dans les stations d'épuration car ils réduisent la capacité d'oxygénation de 40 à 70% par rapport à l'eau claire. [15]

#### I.2.4.3 Hydrocarbures

Ce terme fait la plupart du temps référence aux huiles minérales qui comportent des substances telles que les alcanes, les alcènes, etc. Outre leur toxicité, ces substances peuvent limiter l'apport d'oxygène dans les eaux de surface lorsqu'elles sont présentes en concentrations



élevées. Ces polluants incluent également les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ainsi que les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM). [16]

### I.2.5 Paramètres microbiologiques

Une eau usée est caractérisée aussi par :

#### I.2.5.1 Les Virus

Ce sont des parasites intracellulaires qui ne peuvent se multiplier que dans leur cellule hôte. Leur concentration estimée dans les eaux usées urbaines est comprise entre 10<sup>3</sup> et 10<sup>4</sup> particules par litre. Leur isolement et leur dénombrement dans les eaux usées restent difficiles, ce qui conduit à une sous-estimation de leur nombre réel.

Une eau fortement turbide protège les virus et augmente leur transmission. La coagulation chimique peut enlever entre 88 et 99.8 % des virus. La filtration enlève une quantité variable de virus. La meilleure méthode d'élimination des virus demeure la désinfection. [17]

#### I.2.5.2 Les Bactéries

Ce sont des organismes unicellulaires simples et sans noyau. Leur taille est comprise entre 0,1 et 10 µm. La quantité moyenne de bactéries dans les fèces est d'environ 10<sup>12</sup> bactéries/g.

Les eaux usées urbaines contiennent environ 10<sup>6</sup> à 10<sup>7</sup> bactéries/100 ml dont 10<sup>5</sup> proteus et entérobactéries, 10<sup>3</sup> à 10<sup>4</sup> streptocoques et 10<sup>2</sup> à 10<sup>3</sup> clostridiums.

Parmi les plus communément rencontrées, on trouve les salmonellas dont on connaît plusieurs centaines de sérotypes différents, dont ceux responsables de la typhoïde, des paratyphoïdes et des troubles intestinaux. Des germes témoins de contamination fécale sont communément utilisés pour contrôler la qualité relative d'une eau ce sont les coliformes thermotolérants. [18]

#### I.2.5.3 Les protozoaires

Ce sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites, c'est-à-dire qu'ils se développent aux dépens de leur hôte.

Certains protozoaires adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste. Cette forme peut résister généralement aux procédés de traitements des eaux usées. Parmi les protozoaires les plus importants du point de vue sanitaire, il faut citer *Entamoeba histolytica*, responsable de la dysenterie amibienne et *Giardia lamblia*. [19]

### I.3 La norme de rejets

#### I.3.1 Normes internationales

La norme est représentée par un chiffre qui fixe une limite supérieure à ne pas dépasser ou une limite inférieure à respecter. Un critère donné est rempli lorsque la norme est respectée pour un paramètre donné. Une norme est fixée par une loi, une directive, un décret-loi.

Les normes internationales selon l'organisation mondiale de la santé (OMS) respectives pour les eaux usées.

*Tableau I. 1 Normes internationales des rejets*

Caractéristiques	Normes utilisées (OMS)
<b>PH</b>	6.5-8.5
<b>DBO<sub>5</sub></b>	< 30 mg/l
<b>DCO</b>	< 90 mg/l
<b>MES</b>	< 20 mg/l
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	< 0.5 mg/l
<b>NO<sub>2</sub></b>	1 mg/l
<b>NO<sub>3</sub></b>	< 1 mg/l
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	< 2 mg/l
<b>Température</b>	< 30°C
<b>Couleur</b>	Incolore
<b>Odeur</b>	Inodore

#### I.3.2 Normes nationales selon le JORAD

Les normes de rejets des effluents industriels résultent de la loi n° 83-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux, de l'ordonnance n° 96-13 du 15 Juin 1996 modifiant et complétant la loi n° 83-17, du décret exécutif n° 93-160 du 10 Juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides des industriels et du décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006 de la république algérienne démocratique définissant les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels.

*Tableau I. 2 Normes nationales des rejets*

<b>Paramètres</b>	<b>Unités</b>	<b>Valeurs limites</b>
<b>Température</b>	°C	30
<b>PH</b>	-	6.5-8.5
<b>DBO5</b>	mg/l	30
<b>DCO</b>	mg/l	120
<b>MES</b>	mg/l	35
<b>Azote total</b>	mg/l	30
<b>Phosphor total</b>	mg/l	10
<b>Furfural</b>	mg/l	50
<b>Hydrocarbures</b>	mg/l	10
<b>Plomb</b>	mg/l	0,5
<b>Fer</b>	mg/l	3
<b>Mercure</b>	mg/l	0,01
<b>Cuivre</b>	mg/l	0,5
<b>Plomb</b>	mg/l	0,5
<b>Zinc</b>	mg/l	3

#### **I.4 Conclusion**

Pour préserver nos ressources en eau, le patrimoine naturel ainsi que la qualité de la vie, il est impératif d'éliminer tout polluant contenu dans les eaux usées, pour cela, un processus est envisagé, afin de réduire au maximum la pollution des eaux résiduaires, « l'Épuration des eaux usées ».

## *Chapitre II : Epurations des eaux usées*

### II. Introduction

Les eaux usées sont chargées de déchets qui sont de nature à polluer les milieux dans lesquels elles seront déversées. Dans un souci de respect de l'environnement, le traitement de ces eaux sont indispensables.

Le but de ce traitement est de diminuer suffisamment la quantité de substances polluantes contenues dans les eaux usées pour que l'eau finalement rejetée dans le milieu naturel ne dégrade pas ce dernier.

#### II.1 Collecte des eaux usées

Le but d'un réseau d'assainissement des eaux usées est de collecter ces dernières afin de les conduire à une station d'épuration.

La collecte s'effectue par l'évacuation des eaux usées domestiques, industrielles et pluviales dans ces canalisations spécifiques dites collecteurs.

Le transport des eaux usées dans les collecteurs se fait en général par gravité, dans le cas où la configuration du terrain ne permet pas un écoulement gravitaire (pente faible, contre-pente) on procède par la construction d'une station de relevage (vis d'Archimède) ou bien d'une station de refoulement (pompage) afin de faciliter l'acheminement des eaux et éviter le risque de débordement lors de fortes pluies.

Le prétraitement de certaines eaux usées d'origine industrielles s'avère nécessaire avant leur rejet dans le réseau et cela pour ne pas affecter l'état des collecteurs et le bon fonctionnement de la station de traitement en aval.

On distingue deux types d'assainissement selon que l'habitation est raccordée ou non à un réseau public d'assainissement.

- ✓ L'assainissement collectif.
- ✓ L'assainissement autonome.

##### II.1.1 Assainissement collectif

On dit que l'assainissement est collectif lorsque l'habitation est raccordée à un réseau public d'assainissement, c'est le cas des villes urbanisées et côtières ou proches d'un cours d'eau.

Ce type d'assainissement regroupe deux modes de branchement réseau :

- ✓ Réseau unitaire.
- ✓ Réseau séparatif.

### II.1.1.1 Réseau séparatif

- ✓ l'un pour évacuer les eaux pluviales,
- ✓ l'autre pour évacuer les eaux usées.

Nous retenons donc que dans ce système, et en principe seules les eaux usées arriveront à la station d'épuration pour traitement.

La station d'épuration devrait donc recevoir, à l'aval du réseau d'E.U. (Eaux Usées), un effluent brut de qualité relativement "régulière" et de débit relativement "bien déterminé". [20]



Figure II. 1 Réseau séparatif

### II.1.1.2 Réseau unitaire

Ce système correspond véritablement au vocabulaire trop souvent employé de manière inexacte.

Dans ce système d'évacuation, un seul collecteur assure à la fois le transport des eaux usées et des eaux pluviales.

En principe, toutes les eaux devraient arriver à la station d'épuration qui aurait alors un effluent en tête de quantité et de qualité très variable.

Pour éviter cet écueil, des déversoirs d'orage seront répartis sur le réseau pour permettre à la station de ne pas recevoir un débit supérieur à un débit maximal préfixé.

Cependant, malgré l'option précédente, nous n'oublions pas que, lors d'un orage, l'effluent « eau usée » sera dilué par le débit pluvial et d'autre part, lors des premières pluies après une longue période sèche, c'est toute la ville qui va se "nettoyer", ceci pouvant amener sur la station un flot de pollution assez important. [20]



Figure II. 2 Réseau unitaire

### II.1.2 L'assainissement autonome

#### II.1.2.1 L'assainissement autonome (ou sur site)

Contrairement au précédent, il comprend l'assainissement individuel et semi-collectif non raccordé à un réseau public d'assainissement.

#### II.1.2.2 L'assainissement individuel

- ✓ Pour des ouvrages de gestion des excréta, on distingue :
  - Un système non amélioré : les latrines traditionnelles, les feuillets,...
  - Un système amélioré : les latrines à chasse manuelle, les fosses septiques (ou fosse toutes eaux), les fosses étanches, les latrines à fosses ventilées.
- ✓ Les ouvrages de gestion des eaux usées : ce sont les fosses septiques, les puits perdus, les fosses étanches, les puisards et les dispositifs épurateurs des effluents (épandage souterrain, plateau absorbant, etc.). [21]

#### II.1.2.3 L'assainissement communautaire (des zones à forte concentration humaine, zones publiques)

Il est constitué d'édicules publics ou blocs sanitaires. Ces ouvrages d'évacuation des excréta et des eaux usées sont installés sur des sites, comme les marchés, les gares routières, les lieux de culte et les bâtiments scolaires et administratifs. Dans les zones non couvertes par le réseau d'assainissement, les eaux usées sont le plus souvent déversées dans la rue ou dans les cours d'eau. [21]

### II.1.2.4 L'assainissement semi-collectif

Il regroupe un nombre limité de concessions. Il est constitué de deux systèmes : le réseau d'égout de petit diamètre et la cogestion des eaux usées et excréta par les propriétaires. [21]

## II.2 Implantation d'une station d'épuration

La nécessité de la mise en place d'une station d'épuration passe par un ensemble de dispositions qui sont à prendre en considération dans l'élaboration du projet en commençant par le choix du site qui est indissociable de l'étude d'impact.

A cet égard, quelques règles doivent être rappelées :

- ✓ Eviter de construire à proximité d'une zone urbaine, une zone industrielle et un environnement touristique ;
- ✓ Eviter les zones inondables ;
- ✓ Envisager des extensions et des aménagements futurs.

## II.3 Choix du type de station d'épuration

La décision d'implantation du site d'une station d'épuration étant prise, il convient après d'en choisir le type.

De nombreux critères de choix peuvent intervenir :

- ✓ **La nature des eaux usées** : il est important de bien connaître les caractéristiques des eaux à traiter et d'identifier les rejets industriels susceptibles d'être présents dans les rejets d'une ville.
- ✓ **La qualité d'eau à obtenir** : assurer une qualité d'eau en aval qui répond aux normes de rejet dans le milieu naturel, ou pour une éventuelle réutilisation, notamment dans le secteur de l'agriculture.

On peut distinguer plusieurs types de STEP dont les plus courants sont :

- Les stations primaires
- Les stations physico-chimiques
- Les stations boues activées
- Les stations lits bactériens
- Le lagunage naturel

## II.4 Les procédés de traitement des eaux usées

Le rôle d'une station d'épuration des eaux usées est l'élimination de la pollution jusqu'à un niveau définie par la réglementation en vigueur pour assurer que le rejet des eaux traitées



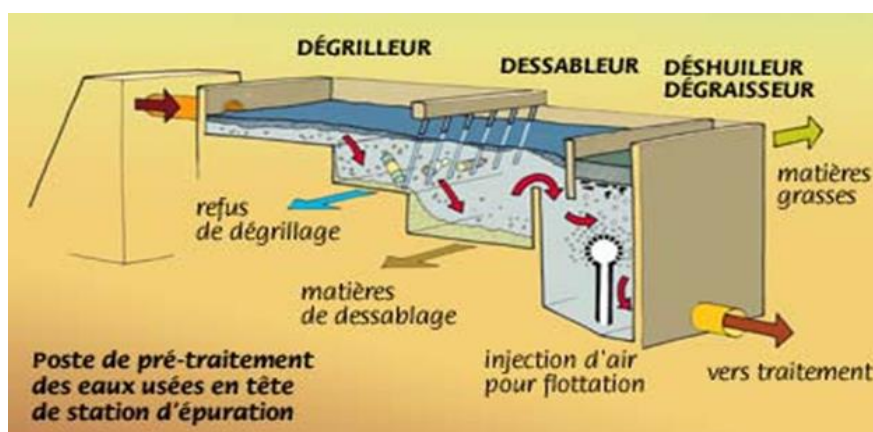
n'affecte pas le milieu récepteur, et selon cette réglementation, les procédés de traitement sont mis en œuvre selon plusieurs niveaux de traitements.

Les niveaux de traitement d'une station sont définis selon la succession suivante:

Les prétraitements, le traitement primaire et le traitement secondaire. Lorsque l'eau traitée est être rejetée en milieu particulièrement sensible, un traitement tertiaire est nécessaire.

### II.4.1 Prétraitement

Les eaux usées brutes à leur arrivée à la station doivent généralement subir, un prétraitement qui est composé d'un certain nombre d'opérations successives, uniquement physiques ou mécaniques. Il est destiné à extraire de l'eau usée, la plus grande quantité possible d'éléments dont la nature ou la dimension constitueront une gêne pour les traitements ultérieurs. Selon la nature des eaux à traiter et la conception des installations, le prétraitement peut comprendre les opérations : (le dégrillage), principalement pour les déchets volumineux, (le dessablage) pour les sables et graviers et (le dégraissage-déshuilage ou d'écumage-flottation) pour les huiles et les graisses.



*Figure II. 3 Chaîne de prétraitement (Dégrillage-Dessablage-Déshuilage)*

#### II.4.1.1 Dégrillage

Il s'agit de séparer des eaux brutes, les matières les plus volumineuses, en faisant passer l'effluent d'entrée à travers des barreaux dont l'espacement est déterminé en fonction de la nature de l'effluent, afin d'éviter les risques de colmatage. Il est donc indispensable en tête de la station d'épuration. Selon l'efficacité désirée, il est possible de distinguer entre le pré-dégrillage (espacement des barreaux 30-100mm), le dégrillage moyen (espacement des barreaux 10-30mm) et dégrillage fin (espacement des barreaux 3-10mm). [22]

Techniquement, de nombreux types de grilles existent :

- **Grilles manuelles** : Composées de barreaux le plus souvent inclinés à 60 - 80° l'horizontal, elles sont cependant réservées aux très petites stations.
- **Grilles mécaniques** : Cette mécanisation est indispensable afin d'éviter colmatage rapide des canalisations.

Les grilles mécaniques se classent en deux catégories :

- ✓ Les grilles droites ;
- ✓ Les grilles courbes.

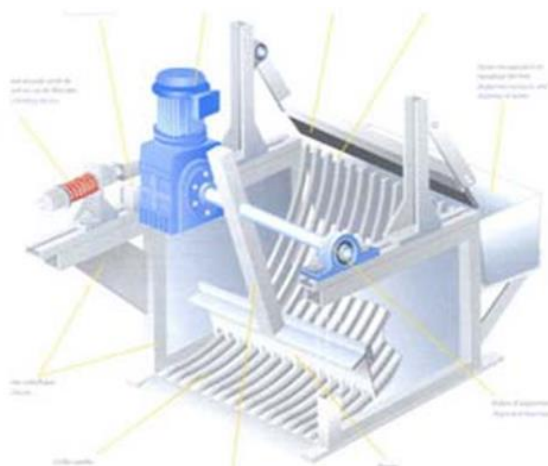


Figure II. 4 Grille courbe



Figure II. 5 Grille droite

### II.4.1.2 Le dessablage

Le dessablage s'effectue sur des particules de dimensions supérieures à 200  $\mu\text{m}$ . La vitesse de sédimentation se calcule par la loi de Stokes (chute libre). On calcule la section du dessaleur de manière que la vitesse de l'eau ne descende pas en dessous de 0,20 à 0,30 m/s, on évite ainsi que les matières organiques se déposent en même temps que les sables. [23]

Les ouvrages à prévoir pour obtenir une vitesse d'écoulement de 0,30 m/s sont, par ordre d'importance :

- ✓ Les dessableurs couloirs (à écoulement rectiligne), dont la vitesse d'écoulement est variable ou constante.
- ✓ Les dessableurs circulaires à alimentation tangentielle ou à brassage mécanique ou à insufflation d'air (pour éviter le dépôt de matières organiques, en heures creuses, avec faible débit).
- ✓ Les dessableurs rectangulaires à insufflation d'air. On insuffle de l'air qui provoque une rotation de liquide et crée ainsi une vitesse constante de balayage du fond, perpendiculaire à la vitesse du transit, laquelle, beaucoup plus faible, peut alors être variable sans inconvénient. Le sable est extrait soit mécaniquement par raclage vers un poste de réception, puis repris par pompage, soit directement par pompe suceuse montée sur pont roulant. [1]

### II.4.1.3 Dégraissage-Déshuilage

L'opération dégraissage-déshuilage consiste à séparer de l'effluent brut, les huiles et les graissages par flottation. Souvent ces opérations sont combinées dans un même ouvrage où la réduction de vitesse dépose les sables et laisse flotter les graisses. On enlève ainsi de l'eau les éléments grossiers et les sables de dimension supérieure à 200 microns ainsi que 80 à 90 % des graisses et matières flottantes (soit 30 à 40 % des graisses totales). [24]



*Figure II. 7 Dessableur-Dégraisseur*



*Figure II. 6 Dessableur-Dégraisseur combiné rectangulaire*

### II.4.2 Traitement primaire

Le traitement "primaire" fait appel à des procédés physiques naturels, filtration et décantation plus ou moins aboutie, éventuellement assortie de procédés physico-chimiques, tels que la coagulation- floculation.

#### II.4.2.1 Procédé de décantation physique

La décantation se distingue du dessablage en ce sens qu'elle enlève plus de 50% des matières en suspension, alors que le dessablage ne vise que l'élimination du sable et des autres matières minérales (plus lourdes que les matières organiques). [23]

Elle permet d'alléger les traitements biologiques et physico-chimiques ultérieurs, en éliminant une partie des solides en suspension. L'efficacité du traitement dépend du temps de séjour et de la vitesse ascensionnelle (qui s'oppose à la décantation). La décantation primaire permet d'éliminer, pour une vitesse ascensionnelle de 1,2 m/h, 40 à 60 % de MES, soit 40% de matière organique, 10 à 30 % des virus, 50 à 90 % des helminthes et moins de 50 % des kystes de protozoaires et entraîne également avec elle une partie des micropolluants. [18]

Le dépôt des matières solides au fond d'un ouvrage appelé "décanteur" produit des boues "primaires". Le raclage des boues s'effectue au moyen d'un racleur de fond entraîné par chaînes qui les ramène vers 1 ou 2 trémies. Avec un décanteur classique ou lamellaire sur des eaux domestiques, le pourcentage de matières totales en suspension éliminées est de 50 à 65 %, celui de la DBO 5 éliminée est de 20 à 35 %. [23]



*Figure II. 8 Décanteur primaire*

### II.4.2.2 Procédé de décantation chimique

Les procédés physico-chimiques de décantation consistent à alourdir les particules en suspension. Ils font appel aux techniques de coagulation ou de floculation-clarification.

Les processus de coagulation et de floculation sont employés pour séparer les solides en suspension de l'eau lorsque la vitesse de décantation naturelle est trop lente pour obtenir une clarification efficace. [24]

### II.4.3 Traitements secondaires

Généralement le taux d'épuration exigé pour le rejet des effluents dans le milieu naturel n'est pas atteint par une simple épuration préliminaire et primaire.

Les traitements secondaires, conçus à l'origine essentiellement pour l'élimination de la pollution carbonée et des matières en suspension, ont pour objet de poursuivre l'épuration de l'effluent provenant du décanteur primaire ou issu d'un prétraitement.

On distingue deux classes de procédés du traitement secondaire en fonction de la qualité de l'effluent :

- ✓ Procédés physico-chimiques.
- ✓ Procédés biologiques.

### II.4.3.1 Procédés physico-chimiques

Le principe de traitement physico-chimique se base sur l'utilisation d'adjuvants chimiques pour éliminer la pollution colloïdale. Il comporte une phase de coagulation (agglomération des colloïdes par addition par exemple de sels de fer ou d'aluminium), une phase de floculation et une phase de décantation pour assurer la séparation entre solide et liquide suite à l'injection des agents flocculant tel le charbon actif en poudre. Ces traitements acceptent les variations brutales de charges polluantes, mais ils sont très coûteux en exploitation selon les adjuvants chimiques utilisés.

La coagulation se réalise par l'utilisation essentiellement de sels de fer ou d'aluminium.

La floculation se réalise par l'ajout de polymères organiques (macromolécules à longues chaînes) [23].

### II.4.3.2 Procédés biologiques

Le traitement secondaire de nature biologique a pour but d'éliminer la pollution carbone, azote et phosphore. Il utilise la capacité auto-épuratrice de microorganismes dédiés dont l'activité est améliorée en les plaçant dans des conditions optimales. De nombreux procédés peuvent être utilisés [26]:

- ✓ Boues activées.
- ✓ Lit bactérien.
- ✓ Lagunage.
- ✓ Bio filtration.
- ✓ Disques biologiques.

#### II.4.3.2.1 Boues activées

La plupart des stations d'épuration utilisent le procédé « boues activées » pour traiter les eaux usées. Il est apparu à la fin du 19<sup>ième</sup> siècle, notamment grâce aux travaux de Pasteur sur la meilleure compréhension du rôle des bactéries dans la dégradation de la matière organique.

Des scientifiques anglais présentent pour la première fois un système de bassin d'aération en 1914 : mise en contact aérée de l'eau usée et de la biomasse (Cemagref, 2002). On parle alors de « boues activées ».

Le procédé à boues activées est l'une des techniques biologiques d'épuration des eaux usées. Il représente une alternative efficace et relativement écologique sans utilisation de produits chimiques.

Le procédé "boues activées" consiste à mélanger et à agiter des eaux usées brutes avec des boues activées liquides, bactériologiquement très actives. La dégradation aérobie de la



pollution s'effectue par mélange intime des microorganismes épurateurs et de l'effluent à traiter. Ensuite, les phases "eaux épurées" et "boues épuratrices" sont séparées [28]

La boue activée se compose principalement d'organismes hétérotrophes, c'est-à-dire qui utilisent des matières organiques et acquièrent de l'énergie par oxydation ou respiration. Ces organismes prélèvent alors dans la solution les matières ayant des caractéristiques nutritives. Ils construisent des substances organiques à partir de substances inorganiques et libèrent de l'oxygène. Afin de dégrader par oxydation tous les substances organiques et inorganiques. [28]

L'eau résiduaire pré clarifiée est introduite dans le bassin d'aération, où elle est aérée pendant environ quatre heures jusqu'à l'obtention des exigences minimales pour le rejet dans l'émissaire ou pour passer à la phase de traitement tertiaire. L'aération est théoriquement de 1 à 3 g/l. L'eau résiduaire traverse le bassin de décantation secondaire où la boue se dépose. Une partie de la boue déposée est réintroduite dans le bassin à boues activées. La boue excédentaire produite est pompée hors du bassin de décantation secondaire et amenée vers le traitement des boues.

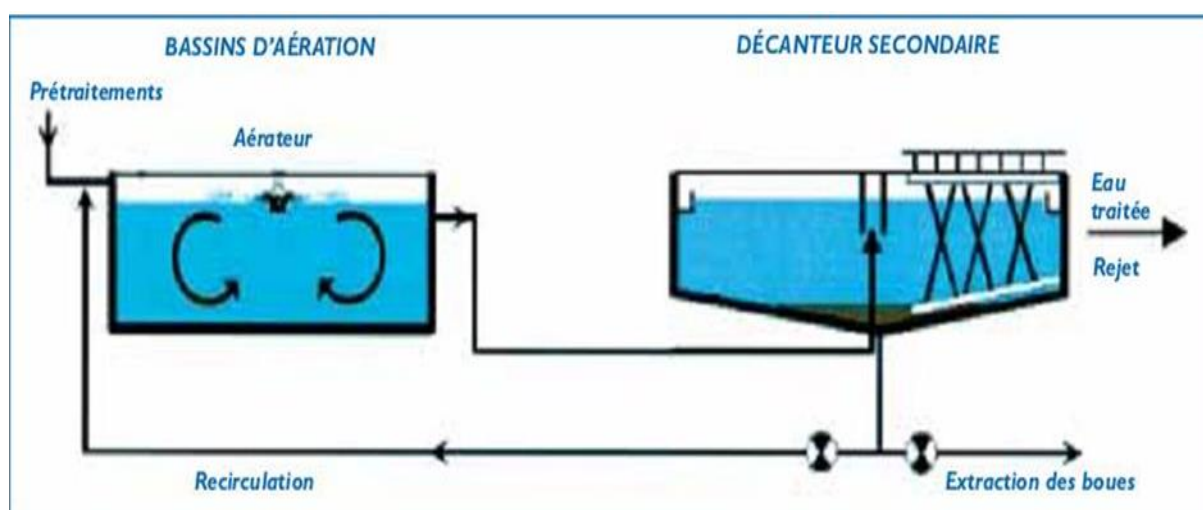
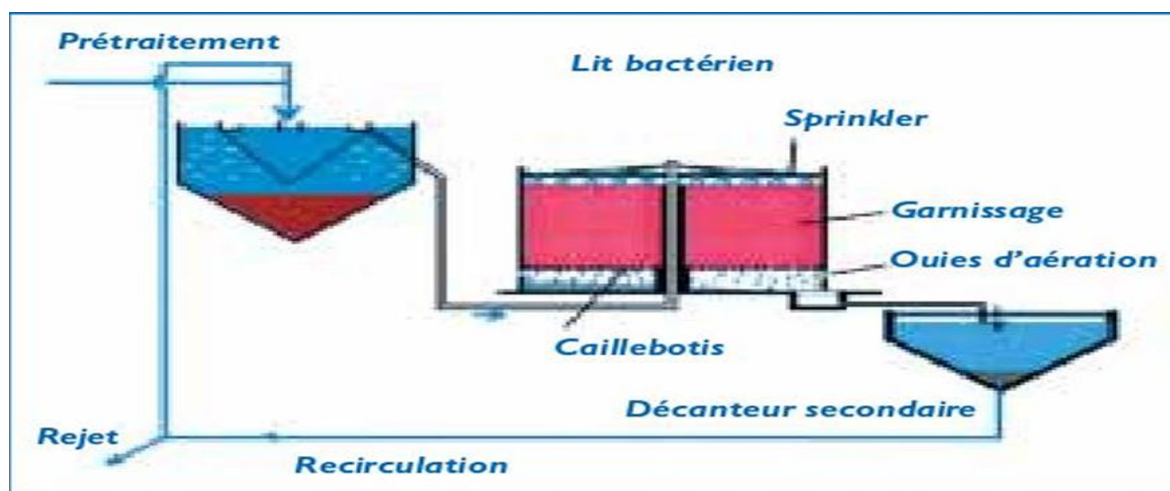


Figure II. 9 Schéma d'une station d'épuration classique à boues activées

### II.4.3.2.2 Lit bactrien

Le principe de fonctionnement d'un lit bactrien consiste à faire ruisseler les eaux usées, préalablement décantées sur une masse de matériaux poreux ou caverneux qui sert de support aux micro-organismes (bactéries) épurateurs.



*Figure II. 10 Synoptique d'une station d'épuration comportant un lit bactérien*

Une aération est pratiquée soit par tirage naturel soit par ventilation forcée. Il s'agit d'apporter l'oxygène nécessaire au maintien des bactéries aérobies en bon état de fonctionnement. Les matières polluantes contenues dans l'eau et l'oxygène de l'air diffusent, à contre-courant, à travers le film biologique jusqu'aux micro-organismes assimilateurs. Le film biologique comporte des bactéries aérobies à la surface et des bactéries anaérobies près du fond. Les sous-produits et le gaz carbonique produits par l'épuration s'évacuent dans les fluides liquides et gazeux. [27]

### II.4.3.2.3 Lagunage

L'épuration est assurée grâce à un long temps de séjour, dans plusieurs bassins étanches disposés en série. Le nombre de bassin le plus communément rencontré est de 3

.Cependant, utiliser une configuration avec 4 voire 6 bassins permet d'avoir une désinfection plus poussée.

Le mécanisme de base sur lequel repose le lagunage naturel est la photosynthèse. La tranche d'eau supérieure des bassins est exposée à la lumière. Ceci permet l'existence d'algues qui produisent l'oxygène nécessaire au développement et maintien des bactéries aérobies. Ces bactéries sont responsables de la dégradation de la matière organique. Le gaz carbonique formé par les bactéries, ainsi que les sels minéraux contenus dans les eaux usées, permettent aux algues de se multiplier. Il y a ainsi prolifération de deux populations interdépendantes : les bactéries et les algues planctoniques, également dénommées "microphytes". Ce cycle s'auto-entretient tant que le système reçoit de l'énergie solaire et de la matière organique. [27]

En fond de bassin, où la lumière ne pénètre pas, ce sont des bactéries anaérobies qui dégradent les sédiments issus de la décantation de la matière organique. Un dégagement de gaz carbonique et de méthane se produit à ce niveau. [27]

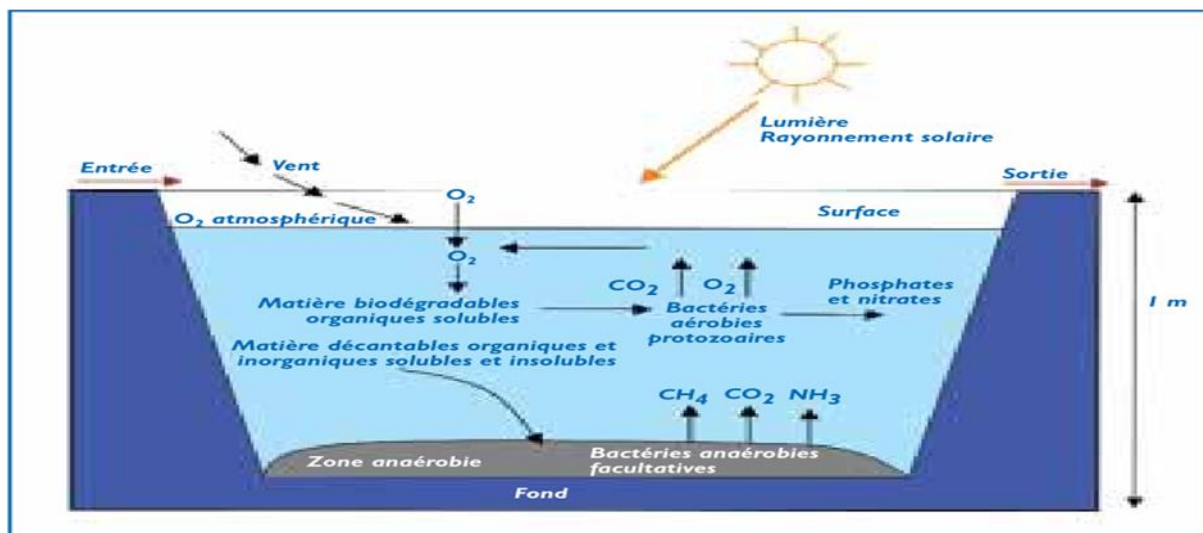


Figure II. 11 Les mécanismes en jeu dans les bassins de lagunage naturel.

### II.4.3.2.4 Disques biologiques

Le procédé de traitement des eaux usées par des disques biologiques ou biodisques, est un procédé de traitement biologique à cultures fixées. Le réacteur biologique est constitué de plusieurs disques minces en plastique montés sur un axe horizontal. Les micro-organismes responsables de la dégradation de la matière organique sont fixés naturellement sur les disques et forment un biofilm d'une épaisseur d'environ 1 à 4 mm. Environ 40% de la surface des disques est immergée.

Le mouvement rotatif des disques autour de l'axe expose alternativement la biomasse à l'atmosphère et aux eaux usées permettant ainsi l'aération et le mélange des eaux usées. Les forces de cisaillement créées par le mouvement de rotation limitent l'épaisseur du biofilm et entraînent un détachement de la biomasse excédentaire, qui est ensuite séparée de l'effluent au moyen d'un décanteur secondaire.

Une étude comparative sur l'élimination de la pollution dissoute carbonée et azotée d'eau usée urbaine a été effectuée simultanément sur deux pilotes : Un lit bactérien et un réacteur à biodisque. Les résultats montrent une intensification des réactions d'épuration sur lit bactérien où un temps de séjour inférieur à 15 minutes permet une élimination de plus de 65% de la DCO soluble, 90% de la DBO 5 soluble et 80% de l'azote ammoniacal, des valeurs analogues de rendement sur les biodisques nécessitent un temps de séjour supérieur à 3 heures [29].



Schéma de principe de fonctionnement des biodisques

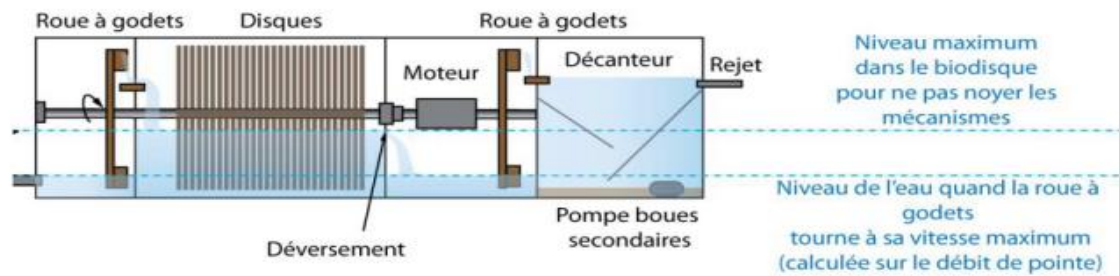


Figure II. 12 schéma de principe de fonctionnement des biodisques

### II.4.3.2.5 Bio filtration

Les biofiltres sont une innovation pour le traitement des eaux usées domestiques destinées à répondre à des exigences croissantes en matière de qualité. Ces procédés biologiques modernes ont été inspirés des lits bactériens. Ils reposent sur l'action de micro-organismes aérobies fixés sur un support granulaire immergé dans un bassin. C'est une technique qui consiste à réaliser simultanément, dans le même ouvrage, la réaction biologique aérobie de dégradation de la pollution par la biomasse épuratrice et la clarification par filtration de l'effluent traité. L'avantage des biofiltres est de pouvoir traiter les matières polluantes carbonées et éventuellement azotées, dans un volume beaucoup plus faible que dans le cas de procédés à cultures libres, avec des rendements similaires. Mais les biofiltres sont plus coûteux en investissement et plus délicats en fonctionnement. [30]

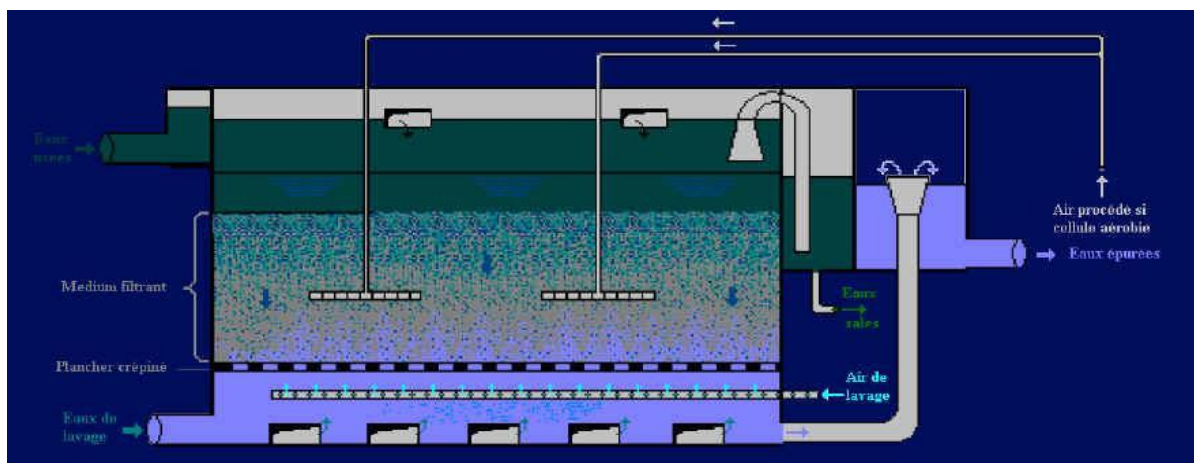


Figure II. 13 Schéma du principe de la bio filtration

### II.4.4 Les traitements complémentaires

Les eaux usées contiennent divers composés azotés provenant des déjections humaines, ainsi que du phosphore provenant pour l'essentiel des détergents utilisés pour les lessives. En effet, les phosphates sont employés pour annihiler l'action du calcaire en fixant des ions calcium permettant ainsi une meilleure performance du pouvoir nettoyant du détergent.

Si ces substances ne sont pas directement nocives, leur action sur le milieu aquatique est néfaste. Elles diffusent jusqu'à la surface éclairée où elles favorisent la prolifération excessive d'algues et autres plantes vertes qui à leur tour décomposent nitrates et phosphates dont l'oxygène passe dans l'atmosphère. Elles jouent un rôle prépondérant dans l'eutrophisation des eaux.

Dans la STEP, ce traitement se généralise de plus en plus en combinaison avec le traitement secondaire. Il s'agit d'un procédé biochimique dit de boues activées à alternance de phase. [25]

#### II.4.4.1 Elimination de l'azote

Dans la plupart des eaux usées, l'azote est sous forme organique ou ammoniacale ( $\text{NH}_4^+$ ). Une correcte oxygénation dans le bassin d'aération permet aux bactéries de transformer l'azote organique en ammoniacque puis d'oxyder l'ammoniacque en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ). Cette oxydation est une nitrification.

Les nitrates sont alors transformés en azote gazeux en condition anoxie :

- ✓ Absence d'oxygène dissout ;
- ✓ Présence d'oxygène combiné aux nitrates ;

Il faut stopper l'aération pour réaliser cette étape appelée dénitrification.

Il est à noter que dans de nombreuses installations, cette phase n'est pas distincte du traitement secondaire puisque réalisée à faible charge dans le bassin à boues. Il suffit d'alterner les phases d'aération et d'anoxie. [25]

#### II.4.4.2 Elimination du phosphore

La technique la plus utilisée pour l'épuration du phosphore consiste en la précipitation chimique par adjonction de sels métalliques (fer ou aluminium), ou de chaux. Les phosphates précipitent sous forme de sels métalliques ou d'hydroxydes et sont séparés de la phase liquide par décantation.

Les principaux réactifs sont le sulfate d'alumine, d'aluminate de soude, le sulfate ferreux, le chrome ferrique, le chlorosulfate ferrique et la chaux.

L'ajout du réactif peut-être effectué :

✓ Après les prétraitements et avant le décanteur primaire ou le bassin d'aération, c'est la précipitation.

✓ À l'aval du clarificateur, sur l'effluent épuré : c'est la post-précipitation. Nécessité d'un décanteur supplémentaire.

✓ Directement sur le bassin d'aération : c'est la précipitation simultanée, qui est la plus utilisée.

L'élimination peut également être partiellement faite par voies biologiques, l'installation doit alors être équipée d'un bassin ou d'une zone d'anoxie. L'alternance entre aérobiose et anoxie favorise un mécanisme de relargage /sur accumulation de phosphore dans la biomasse épuratrice. [25]

### II.4.5 Le traitement tertiaire

A l'issue des procédés décrits précédemment, les eaux sont normalement rejetées dans le milieu naturel. Dans le cadre d'une réutilisation des eaux usées épurées, les eaux usées nécessitent des traitements supplémentaires, en particulier, pour éliminer les micro-organismes qui pourraient poser des problèmes sanitaires.

Actuellement, il existe de nombreuses techniques de désinfection visant à améliorer la qualité bactériologique des rejets afin de protéger les milieux récepteurs sensibles comme notamment les zones de baignades et conchylicoles. [31]

#### II.4.5.1 Les procédés physiques

Les procédés de désinfection physique mettent en œuvre deux processus : une destruction et/ou une rétention des microorganismes sur un support de filtration. Dans le premier cas, il est fait appel au rayonnement ultra-violet ; dans le second, à une filtration sur sable ou sur membrane en traitement tertiaire.

L'infiltration qui peut parfois constituer une solution adaptée pour traiter des eaux usées doit être regardée comme une technique d'épuration permettant d'éviter un rejet dans une zone sensible à la pollution microbiologique. [31]

#### II.4.5.2 Les rayonnements UV

La désinfection des eaux résiduaires par rayonnement ultra-violet à 254 nm présente l'avantage de ne pas laisser de sous-produits nocifs pour les écosystèmes.

La technique est aujourd'hui mieux maîtrisée et il existe une large gamme de possibilités de mise en œuvre : réacteur ouvert ou fermé, lampes basse pression ou haute pression installées horizontalement ou verticalement. Il semble que les canaux ouverts soient plus adaptés aux

débites importants que les appareils fermés. Il est aussi admis que les lampes basses pression sont les plus performantes.

L'efficacité de la désinfection UV est liée à la qualité de l'effluent à traiter: les microorganismes sont protégés par les matières en suspension sur lesquelles ils sont absorbés. De plus, les composés chimiques dissous dans l'eau abaissent la valeur de la transmission et limitent les doses reçues par les microorganismes. [31]

### II.4.5.3 La filtration

La filtration est un procédé physique qui permet de retenir les microorganismes par rétention à l'aide d'un filtre. Qu'elle soit réalisée sur sable (L'infiltration-percolation: cette technique consiste à infiltrer l'effluent épuré dans le sol, à vitesse lente, au travers d'un massif sableux, naturel ou rapporté, réparti en plusieurs bassins.) ou sur membrane (La filtration sur membrane: les membranes d'ultrafiltration n'ont aucun pouvoir destructeur, mais assurent la rétention des micro-organismes sur le filtre, en créant une barrière physique.), cette technique exige une épuration secondaire préalable garantissant une élimination assez poussée des matières en suspension. [31]

### II.4.5.4 Les procédés chimiques

Les traitements chimiques de désinfection font, pour la plupart, appel à des oxydants. Certains ont été très utilisés, d'autres en sont restés au stade de l'expérimentation sur des installations pilotes, voire uniquement en laboratoire.

L'objet des présentes recommandations n'étant pas d'établir l'inventaire exhaustif de technologies dont l'avenir est parfois très incertain, il ne paraît pas nécessaire, dans l'état de la connaissance, d'évoquer d'autres procédés que la chloration et l'ozonation. [31]

### II.4.5.5 La chloration

La méthode la plus ancienne de désinfection est l'utilisation de chlore. Le chlore est injecté directement dans les eaux usées. Il peut être utilisé sous forme de chlore gazeux, hypochlorite de sodium et bioxyde de chlore. Cet oxydant très puissant permet l'élimination de la plupart des microorganismes pathogènes même à faible dose. En effet, il endommage les membranes des cellules. C'est une technique très facile à mettre en place et peu coûteuse. Toutefois, la désinfection des eaux usées par chloration peut avoir un impact négatif sur la faune et la flore aquatique (toxicité du chlore résiduel). De plus, les réactions entre le chlore et les matières organiques restantes dans les eaux peuvent former des sous-produits organochlorés, parfois cancérigène.

Pour éviter ces effets non désirés, une étape de déchloration est ajoutée. Elle consiste en l'ajout de bioxyde de soufre ( $SO_2$ ). Le temps de réaction entre lui et le chlore résiduel est très

rapide et permet de bloquer les effets toxiques vis-à-vis de la vie aquatique. Par contre, cette réaction fait diminuer la concentration en O<sub>2</sub> dissous, elle augmente les coûts et ne permet pas l'élimination des sous-produits potentiellement cancérigène. [32]

### II.4.5.6 Ozonation

L'ozone est un gaz oxydant très puissant, qui permet de dégrader la matière organique et d'éliminer les principales sources pathogènes présentes dans l'eau. En effet, son potentiel d'oxydation est de 2,07. Il est nettement supérieur à celui du chlore qui n'est que de 1,35. Il peut oxyder les bactéries et les virus. Les propriétés de l'ozone sont les suivantes, il est désinfectant, désodorisant, respectueux de l'environnement et purificateur.

La désinfection par l'ozone se déroule comme suit. L'eau en sortie de STEP est stockée dans une cuve tampon. Elle sera ensuite pompée pour passer à travers un ou plusieurs filtres à tamis pour ensuite être introduite dans une « chambre d'impact ». C'est dans cette chambre que sera injecté l'ozone. Un mélange parfait entre l'ozone et l'eau est alors réalisé. C'est un générateur d'ozone qui produit l'ozone nécessaire au traitement. Il n'y a pas d'utilisation de produits chimiques. Il faut juste de l'air et de l'électricité. Environ 10 g/h/m<sup>3</sup> d'eau d'ozone est suffisant pour éliminer l'ensemble des pathogènes avec un temps d'exposition est d'une heure. A la sortie de ce traitement tertiaire, l'eau peut être rejetée dans le milieu naturel ou être réutilisée. [32]

## II.5 Traitement des boues

A l'issue des différentes étapes du traitement des eaux usées, les boues produites contiennent environ 95-99% d'eau. Le traitement des boues consiste donc tout d'abord à diminuer leur teneur en eau et à réduire de manière efficace leur charge polluante et fermentescible. Il s'agit de les préparer à une étape ultime de valorisation ou d'élimination.

### II.5.1 Épaississement

L'épaississement est généralement la première étape du traitement des boues.

Il s'agit d'un procédé simple, consommant peu d'énergie. Il sert principalement à réduire le volume des boues brutes et constitue une étape préalable aux traitements suivants. Le taux de siccité obtenu peut atteindre jusqu'à 10% de matière sèche. Quelle que soit la technique utilisée, l'eau récupérée doit être recyclée en tête de station. [33]

### II.5.2 Stabilisation et hygiénisation

Bien que la stabilisation et l'hygiénisation présentent chacune une finalité différente, elles peuvent être regroupées au sein d'une seule étape visant à réduire au maximum toutes les nuisances de nature biologique que peuvent produire les boues déshydratées. Ces deux traitements sont souvent assurés par un même procédé.

La stabilisation consiste à réduire au maximum l'activité biologique de dégradation des boues et plus particulièrement leur fermentation. Elle réduit fortement la masse bactérienne et par là-même les nuisances olfactives, les émissions de méthane, les risques de lixiviation et la Demande Biologique en Oxygène (DBO 5).

L'hygiénisation est, quant à elle, destinée à réduire la présence d'agents pathogènes dans les boues afin d'éviter une contamination éventuelle dans le cas d'une utilisation pour la valorisation d'un écosystème (épandage ou re-végétalisation par exemple) ou dans le cas d'épandage sur des cultures sensibles. Ces deux étapes peuvent être assurées de manière biologique ou chimique. [33]

### II.5.3 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. [33]

### II.5.4 Séchage

Le séchage est une opération unitaire du traitement des boues consistant à évaporer l'eau dans les boues traitées. Le séchage thermique vient obligatoirement après une étape de déshydratation, mais la technique du lit de séchage ne nécessite pas de déshydratation préalable. [33]

*Chapitre III : Théories de la régression  
multiple et de l'analyse en composantes  
principales*

### III. 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.1 Régression multiple

##### III.1.1 Historique

Le terme régression a été introduit par Francis Galton (1822-1911), chercheur britannique du 19<sup>ème</sup> siècle dans son article « Regression towards mediocrity in hereditary stature » afin de décrire le phénomène biologique qui est que la taille des enfants nés de parents inhabituellement grands ou petits se rapproche de la taille moyenne de la population.

##### III.1.1.1 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

$$Y_i = b_0 + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_p X_{ip} + \varepsilon_i \quad i = 1 \dots n \quad \dots \dots \dots \text{(III-1)}$$

Où  $\varepsilon_i$  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». [36]

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



### III.1.2 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. [36]

### III.1.3 Moindres carrés ordinaires

#### III.1.3.1 Historique

La paternité des moindres carrés est souvent discutée. Il semble qu'elle ait été découverte indépendamment par Carl Friedrich Gauss en 1795 et Adrien Marie Legendre en 1805. Mais aucun document écrit n'a pu confirmer la date de 1795 qui repose sur les affirmations de C.F.Gauss lui-même. [37]

#### III.1.3.2 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.  $S_i \varepsilon$  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 :

$$E = \sum_{i=0}^n (Y_i - b_0 - b_1 X_{i1} - \dots - b_p X_{ip})^2 \dots \dots \dots (III-2)$$

### III.1.4 Démarche de la régression multiple

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

- ✓ Estimer les paramètres « ai » 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). [38]

#### III.1.4.1 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.1.4.2 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.1.4.2.1 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 (3) variables explicatives (p=3), le système d'équations est le suivant :

$$\begin{aligned} r_{x_1y} &= b_1' + r_{x_1x_2} b_2' + r_{x_1x_3} b_3' \\ r_{x_2y} &= r_{x_2x_1} b_1' + b_2' + r_{x_2x_3} b_3' \dots\dots\dots (III -3) \\ r_{x_3y} &= r_{x_3x_1} b_1' + r_{x_3x_2} b_2' + b_3 \end{aligned}$$

Ce système se résout par substitutions successives, tel que :

$$b_1' = r_{x_1y} - r_{x_1x_2} b_2' - r_{x_1x_3} b_3' \dots\dots\dots (III-4)$$

Est placé dans les équations (2) et (3). 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.1.4.2 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 :

$$\begin{aligned} b_1 &= b_1' S_y / S_{x_1} \\ b_2 &= b_2' S_y / S_{x_2} \dots\dots\dots (III-5) \\ b_3 &= b_3' S_y / S_{x_3} \end{aligned}$$

**III.1.4.3 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:

$$b_0 = y - (b_1 \bar{X}_1 + b_2 \bar{X}_2 + \dots + b_I \bar{X}_I + \dots + b_P \bar{X}_P) \dots\dots\dots (III-6)$$

Dans le cas de l'exemple précédent :

### III.1.5 Notation matricielle

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

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & \dots & X_{1p} \\ 1 & X_{21} & \dots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{n1} & \dots & X_{np} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_p \end{pmatrix} \dots\dots\dots (III-7)$$

Ou plus simplement

$$Y = X_b + \varepsilon \dots\dots\dots (III-8)$$

La somme des carrés des erreurs s'écrit

$$SCE = \varepsilon^T \varepsilon = (Y - X_b)^T (Y - X_b) \dots\dots\dots (III-9)$$

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 :

$$SCE = Y^T Y - Y^T X_b - b^T X^T Y + b^T X^T X_b \dots\dots\dots (III-10)$$

La somme des carrés des erreurs s'écrit :

$$\frac{\delta SCE}{\delta b} = (X^T X)b - X^T Y = 0 \dots\dots\dots (III-11)$$

D'où on tire finalement

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \dots\dots\dots (III-12)$$

### III.1.6 Qualité de la régression

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

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

Tableau III. 1 Récapitulatif somme des carrés

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 :

### **III.1.6.1 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 :

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (III-13)$$

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

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{SCT} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \dots\dots\dots (III-14)$$

La variance totale étant la somme des variances expliquée et résiduelle

$$SCT = SCE + SCR \longrightarrow \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 \dots\dots (III-15)$$

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.

### III.1.6.2 R<sup>2</sup> 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<sub>i</sub> ne sont pas strictement indépendantes (orthogonales) même s'il n'y a aucune relation réelle entre elles. Par conséquent, le R<sup>2</sup> comprend une composante déterministe, et une composante aléatoire d'autant plus élevée que le nombre de variables explicatives est élevé. Le R<sup>2</sup> 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<sup>2</sup>, c'est pour ces raisons qu'un nouveau paramètre, le R<sup>2</sup> ajusté – noté aussi  $\bar{R}^2$  - a été introduit par EZEKIEL (1930).

Son but est de « pénaliser » l'augmentation de la valeur du R<sup>2</sup> 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 :

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} = 1 - \frac{\frac{SCE}{n-p-1}}{\frac{SCT}{n-1}} \dots \dots \dots (III-16)$$

Comme pour le R<sup>2</sup>, les valeurs du  $\bar{R}^2$  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. [38]

### III.1.6.3 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<sub>0</sub>). Pour réaliser un 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 le SCR sera élevée.

#### III.1.6.3.1 Hypothèses du test

$$H_0 : b_1 = b_2 = \dots = b_p = 0$$

La variable Y est linéairement indépendante des variables  $X_i$ . La régression est nulle, toutes les pentes du modèle sont égales à zéro.

$$H_1: \exists i / b_i \neq 0$$

La variable Y est expliquée linéairement par au moins l'une des variables  $X_i$ . Une pente au moins est différente de zéro, la régression explique quelque chose.

La signification du modèle de régression multiple peut être testée par la variable auxiliaire F définie par :

$$F = \frac{R^2(n-p-1)}{p(R^2-1)} = \frac{SCR/P}{SCE/(n-p-1)} \dots\dots\dots (III-17)$$

L'hypothèse  $H_0$  est rejetée au seuil  $\alpha$  lorsque  $F \geq F_{1-\alpha}(p, n-p-1)$

Ce test compare la variance expliquée avec celle des résidus. Si  $H_0$  est vraie, ces deux valeurs devraient être à peu près semblables, et la statistique-test F suivra une distribution F de Fisher-Snedecor à p et (n-p-1) degrés de liberté.

Pratiquement, on calcule le rapport précédent et on le compare à la valeur lue dans la table. Si le rapport est supérieur à la valeur critique de la table c'est que la régression explique quelque chose et par conséquent  $H_0$  est rejeté.

### III.1.6.3.2 Conditions d'application du test

La régression multiple est soumise aux mêmes contraintes que la régression linéaire simple: distribution normale des résidus, équivariance, indépendance des observations et linéarité des relations entre la variable dépendante Y et chacune des variables explicatives  $X_i$ .

### III.1.6.4 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.

**La normalité** se vérifie essentiellement en construisant l'histogramme ou la fréquence cumulée des résidus. On peut vérifier l'ajustement à une loi normale visuellement ou effectuer des tests de normalité (ex. test d'ajustement du  $\chi^2$ , test de Kolmogorov-Smirnov, etc...).

**L'indépendance des résidus** peut être testée en ordonnant les résidus en fonction d'un critère donné et en effectuant un test du genre: test des signes des résidus ou test de la corrélation entre résidus successifs dans la séquence ordonnée. Le test des signes (Draper et Smith, 1966; p.95) est un test non-paramétrique qui examine si l'arrangement des signes des résidus dans la séquence est aléatoire ou anormalement groupé ou encore anormalement fluctuant. Le test de corrélation consiste à calculer la corrélation entre les résidus et eux-mêmes décalés d'un pas dans la séquence. Si la corrélation est significative, alors il n'y a pas indépendance des résidus.

Le critère servant à ordonner la séquence peut être une variable interne (ex. la variable Y) ou une variable externe.

Cette prémisse peut aussi être vérifiée avec la statistique Durbin-Watson qui se situe entre 0 et 4, une valeur de 2 indiquant une absence de corrélation, moins de 2 une corrélation positive et plus de 2, une corrélation négative. Cette statistique est donnée par la formule suivante :

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (\epsilon_i - \epsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} \dots\dots\dots (III-18)$$

**L'homogénéité des variances** des résidus se vérifie en ordonnant les résidus selon un critère comme ci-dessus et en vérifiant que les résidus montrent des variations de même amplitude pour toute la séquence ordonnée. Si ce n'est pas le cas, alors on peut tenter de corriger la situation à l'aide de transformations telles le logarithme ou la racine carrée qui ont habituellement pour effet de stabiliser la variance.

**La détection de données aberrantes** s'effectue en considérant les résidus qui s'écartent beaucoup de zéro. Les résidus situés à plus de trois écarts-types (l'écart-type des résidus est estimé par  $(\frac{SCE}{\sqrt{n-p-1}})$ ) sont suspects et doivent être examinés avec attention. Si des erreurs sont responsables de ces valeurs élevées, on doit les éliminer et reprendre la régression. Si aucune cause d'erreur ne peut les expliquer, alors il faut soit chercher à affiner le modèle pour mieux expliquer ces données, soit chercher de nouvelles observations avec les mêmes valeurs de X que ces données pour en vérifier la validité.

**La détection de tendances particulières** dans les données se fait en reportant sur des diagrammes binaires les résidus en fonction de chacune des variables X. Des diagrammes binaires entre les résidus et des variables externes peuvent suggérer l'inclusion de nouvelles variables ou la transformation de variables existantes dans le modèle afin d'en améliorer la performance.

### **III.1.6.5 Multicolinéarité**

Le terme multi colinéarité vise les phénomènes d'interdépendance (de corrélation) entre variables explicatives. On distinguera la multicolinéarité parfaite de la multi colinéarité partielle. Dans le premier cas, une variable explicative est une combinaison linéaire parfaite des



autres variables explicatives. Dans le second cas, une variable explicative est fortement corrélée à une ou plusieurs variables explicatives (ou à l'une de leurs combinaisons linéaires).

### III.1.6.5.1 Multicolinéarité parfaite

Dans ce cas, la matrice  $X$  est singulière et donc l'estimation des paramètres par MCO est impossible. Le problème de multicolinéarité parfaite est ainsi **un problème d'identification**. Les coefficients du modèle sont indéterminés et leur variance infinie.

### III.1.6.5.2 Multicolinéarité partielle

Le cas le plus habituel rencontré avec les données est celui où les variables sont fortement mais pas parfaitement corrélées. Contrairement à la multicolinéarité parfaite, on ne va pas avoir un problème d'identification mais **un problème statistique (précision)**. Les coefficients du modèle de régression peuvent être déterminés mais l'écart-type de leur estimation est important. [39]

### III.1.6.5.3 Conséquences pratiques

En cas de multicolinéarité parfaite, la sanction est simple : l'algorithme des moindres carrés "plante".

En cas de multicolinéarité classique, on constate en général :

- ✓ Que la variance de l'estimation des paramètres tend à être très forte.
- ✓ Que par conséquent, l'intervalle de confiance autour des paramètres s'élargit considérablement.
- ✓ Que l'estimation des paramètres est très sensible à la constitution de l'échantillon.

### III.1.6.5.4 Solutions possibles

Afin de remédier au problème de multicolinéarité, il existe plusieurs solutions parmi lesquelles :

- ✓ Créer une nouvelle variable synthétique (combinant les variables inter-reliées) et l'utiliser à la place des autres
- ✓ Choisir une seule des variables très inter-reliées et s'en servir comme indicatrice des autres.

**Remarque: si le seul but de la régression multiple est la prédiction (maximisation du  $R^2$ ), la multicolinéarité ne dérange pas.**

### **III.1.7 Types de régression multiple**

Il existe plusieurs types de régression multiple, en fonction de l'introduction des variables explicatives dans le modèle. On distingue :

#### **III.1.7.1 La régression hiérarchique**

Cette méthode permet de déterminer l'ordre d'entrée des variables dans le modèle à l'aide de la création des blocs de variables qui seront entrés de manière hiérarchisée dans le modèle.

Ceci permet d'observer plus en détail comment se comporte le modèle. Les résultats indiquent l'apport de chaque bloc en termes de pourcentage de variance expliquée ( $R^2$ ). Pour les blocs constitués de plus d'une variable, il est possible de faire entrer celles-ci en un seul temps (entrée forcée) ou progressivement.

#### **III.1.7.2 La régression avec entrée forcée**

Toutes les variables explicatives sont introduites au même moment, et un test F évalue l'ensemble du modèle. L'ordre d'entrée des variables n'est pas influencé, le modèle évalue donc leur effet combiné.

#### **III.1.7.3 La régression avec entrée progressive**

Contrairement aux deux autres méthodes, la sélection des variables à inclure est basée sur un critère mathématique. Une fois les variables indépendantes choisies, leur inclusion dans le modèle dépendra de leur contribution mathématique à son amélioration. Il existe trois méthodes progressives.

##### **III.1.7.3.1 Méthode rétrograde (backward selection)**

Cette méthode consiste à construire un modèle de régression complet (intégrant toutes les variables explicatives), et à en retirer une par une les variables ayant la plus faible contribution au modèle (en commençant par celle qui explique le moins de variation).

L'inconvénient de cette méthode est qu'une fois qu'une variable a été retirée, elle ne peut plus être réintroduite dans le modèle, même si, à la suite du retrait d'autres variables, elle redevenait significative.

### III.1.7.3.2 Méthode ascendante (forward selection)

Approche inverse de la précédente: elle sélectionne d'abord la variable explicative la plus corrélée à la variable dépendante. Ensuite, elle sélectionne, parmi celles qui restent, la variable explicative dont la corrélation partielle est la plus élevée (en gardant constantes la ou les variables déjà retenues). Et ainsi de suite tant qu'il reste des variables candidates dont le coefficient de corrélation partiel est significatif. L'inconvénient est que lorsqu'une variable est entrée dans le modèle, aucune procédure ne contrôle si sa corrélation partielle reste significative après l'ajout d'une ou de plusieurs autres variables. Cette technique est en général plus conservatrice que la précédente, ayant tendance à sélectionner un modèle plus restreint (moins de variables explicatives) que la sélection rétrograde.

Toutefois, des simulations récentes (Blanchet et al. 2008) montrent que même la sélection progressive laisse souvent entrer au moins une variable non significative dans le modèle. C'est la raison pour laquelle un double critère d'arrêt à la sélection est appliqué :

1. Le niveau  $\alpha$  habituel, et
2. Le  $\bar{R}^2$  du modèle comprenant toutes les variables candidates.

Pour ce deuxième critère, on calcule tout d'abord le  $\bar{R}^2$  global d'une régression multiple comprenant toutes les variables explicatives candidates. Ensuite, durant la procédure de sélection, on arrête la sélection lorsque le niveau  $\alpha$  présélectionné **ou** le  $\bar{R}^2$  global est atteint.

Cette procédure réduit fortement le nombre de variables explicatives introduites à tort dans le modèle.

### III.1.7.3.3 La méthode pas-à-pas (stepwise regression)

Cette procédure, la plus complète, consiste à faire entrer les variables l'une après l'autre dans le modèle (selon leur corrélation partielle) par sélection progressive et, à chaque étape, vérifier si les corrélations partielles de l'ensemble des variables déjà introduites sont encore significatives (une variable qui ne le serait plus serait rejetée). Cette approche tente donc de neutraliser les inconvénients des deux précédentes en les appliquant alternativement au modèle en construction.

## III.2 Analyse en Composantes Principales (ACP)

### III.2.1 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 a 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. [7]

### III.2.1.1 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  $R^P$  quelconque, par le vecteur :

$$X_i = \{X_{ij} / j = 1 \text{ à } P\} \dots \dots \dots (III.19)$$

Le terme  $X_{ij}$  est un nombre réel qui représente la mesure de la variable  $X_j$  relevée sur l'individu i. [8]

#### 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. [8]

Le caractère (ou variable) "j" est décrit par le vecteur appartenant à  $R^N$  :

$$X_j = \{X_{ij} / i = 1 \text{ à } N\} \dots \dots \dots (III.20)$$

### III.2.1.2 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 décrite comme suit :

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



$X_j$  : Vecteur variable initiale

$a_{jk}$  : Coefficient du système.

Notons au passage que les termes  $a_{j0}$  désignent le vecteur permettant la translation de l'origine de l'ancien repère vers le centre de gravité du nuage de points. Un centrage des données initiales annule les coefficients  $a_{j0}$ . [8]

### III.2.1.3 Définition géométrique

L'Analyse en Composantes Principales est puissante par son support géométrique :

La méthode consiste à rechercher un premier axe qui soit le plus près possible de tous les points au sens des moindres carrés : tel que la somme des moindres carrés des distances des  $N$  points à cet axe soit minimale, ou encore la projection de ces derniers sur cet axe ait une dispersion maximale. Cet axe est appelé « axe factoriel ».

Un second axe est obtenu après projection des  $N$  points sur un hyperplan orthogonal au premier axe, tel que la dispersion des projections des  $N$  points sur celui-ci soit toujours maximale, et le processus se réitère  $P$  fois. [8]

### III.2.2 Objectifs

L'ACP a comme objectifs finaux de :

- Fournir des outils simples et lisibles de représentation des informations traitées, permettant de faire ressortir des données brutes les éventuels liens existant entre les variables (en terme de corrélation),
- Donner des indications sur la nature, la force et la pertinence de ces liens, afin de faciliter leur interprétation et découvrir quelles sont les tendances dominantes de l'ensemble de données,
- 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.

### III.2.3 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. [36]

- 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...ect, l'ACP intervient ici et nous aide en prenant l'évapotranspiration comme variable à expliquer de trouver les variable explicatives et d'éliminer celles qui n'interviennent pas dans le phénomène). [34]

### III.2.4 Cadre

L'analyse en composantes principales s'applique à tout tableau quantitatif où la population est constituée de « N » individus numérotés de 1 à n, ainsi que de « P » caractères quantitatifs  $X_1, \dots, X_n$ , les 'individus' doivent être de même nature. Néanmoins, les caractères peuvent ne pas être homogènes, c'est-à-dire les unités de mesure peuvent être différentes.

### III.2.5 Procédé d'application de l'ACP

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 (N\*P)\*matrice des vecteurs propres (N\*N).

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 X CR (cor (CP', X CR))
9. Tracé des cercles de corrélation.

### III.2.6 Résultats d'application

Une analyse en composantes principales fournit trois sources de renseignements, toutes nécessaires à l'interprétation : [34]

- 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.

### III.2.7 Analyse des résultats

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

#### a) Les données sont-elles en factorisation ?

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. [35]

#### b) Combien de facteurs 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.

**c) Comment interpréter les 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. [8]

### III.2.8 Représentation graphique

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

**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).

$$Cov(X_j, C_k) = (\lambda)^{1/2} * V_k(j) \dots \dots \dots (III.27)$$

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 :

$$Cov(Y_j, C_i) = Cov\left(\frac{X_j}{S_j}, C_i\right) = Cor(X_j, C_i) \dots \dots \dots (III.28)$$

$C_i$  : 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. [8]

### 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.

## III.3 Conclusion

Comme nous avons pu le constater à travers ce chapitre, 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  $R^2$  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 IV : Présentation de la station  
d'épuration de Boumerdes*

## IV. Introduction

La station d'épuration des eaux usées de Boumerdes est une station à boues activées à faible charge massique et fonctionnant à aération prolongée, elle est gérée par l'Office National de l'Assainissement d'Algérie (ONA), et assurant l'épuration d'un débit journalier de 15000 m<sup>3</sup>/j.

Le tableau suivant donne une présentation de celle-ci :

*Tableau IV. 1 présentation de la STEP de Boumerdes*

Nom	STEP BOUMERDES
Adresse	Rue, Mohamed Boukeroucha, STEP Boumerdes
Maître d'ouvrage / Exploitant	ONA «Office National de l'Assainissement Algérie»
Année de mise en route	2006
Volume journalier	15000 m <sup>3</sup> /j

### IV.1 Localisation de la STEP

La STEP de Boumerdes est située en zone côtière à 50 Km à l'Est d'Alger, sur le territoire du chef-lieu de la wilaya, soit la commune de Boumerdes.

Le terrain d'assiette du projet se situe à 1.5 Kilomètre au Sud-Est de l'agglomération de Boumerdes, en contre bas de la Route Nationale 24 sur la rive gauche de l'Oued Tatareg et à proximité de la confluence de celui-ci avec l'Oued Safsaf.

Cette station occupe une superficie de 3,11 hectares et une capacité de traitement de 75000 Equivalent Habitant (EH), elle est destinée à épurer les eaux usées domestiques de la ville de Boumerdes et des communes voisines telles que Tidjellabine et Corso.



*Figure IV. 1 STEP de Boumerdes [Google Earth]*

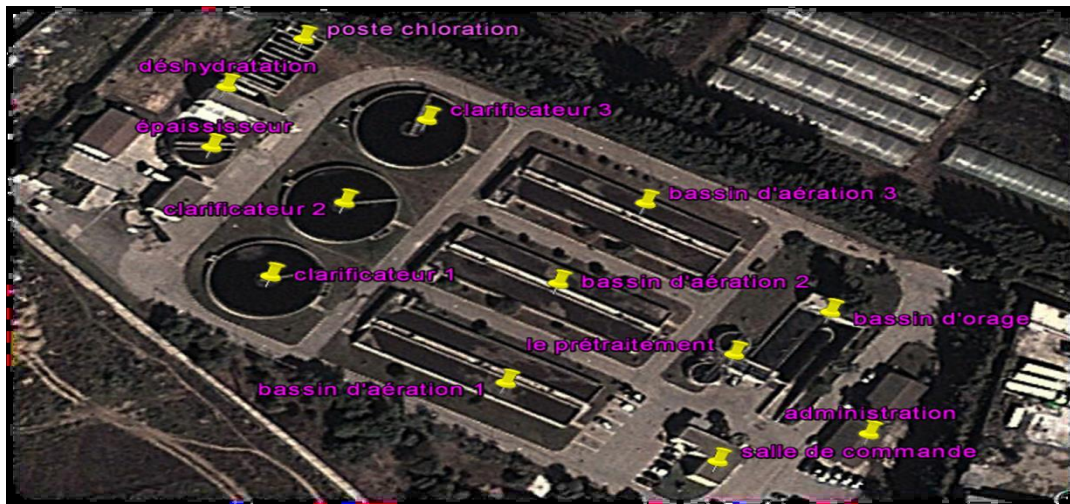


Figure IV. 2 Vue d'ensemble des ouvrages de la STEP de Boumerdes

## IV.2 Caractéristiques Techniques

La station de Boumerdes est du type « boues activées à faible charge massique à aération prolongée » ( $C_m = 0.076 \text{ kg DBO/kg MVS/Jour}$ ).

L'eau à traiter possède les caractéristiques suivantes :

- Volume journalier ..... 15000 m<sup>3</sup> /j
- Débit moyen 24 h ..... 625 m<sup>3</sup> /h
- Débit de pointe temps sec ..... 1063 m<sup>3</sup> /h
- Débit de pointe temps de pluie..... 1944 m<sup>3</sup> /h

### IV.2.1 Paramètres de pollution de conception

La station d'épuration a été conçue pour épurer les eaux usées et les rejeter selon les caractéristiques suivantes :

Tableau IV. 2 Paramètres de pollution de conception de la station de Boumerdes

	Entrée	Sortie	Abattement (%)
DBO5 (mg/l)	270	30	88,89
DCO (mg/l)	750	90	88,00
MES (mg/l)	350	30	91,43

### IV.2.2 Les étapes du procédé d'épuration

Les eaux usées arrivent à la station par gravité ou par pompage, et passent par différentes étapes de traitement qui sont schématisées dans la Synoptique suivante :



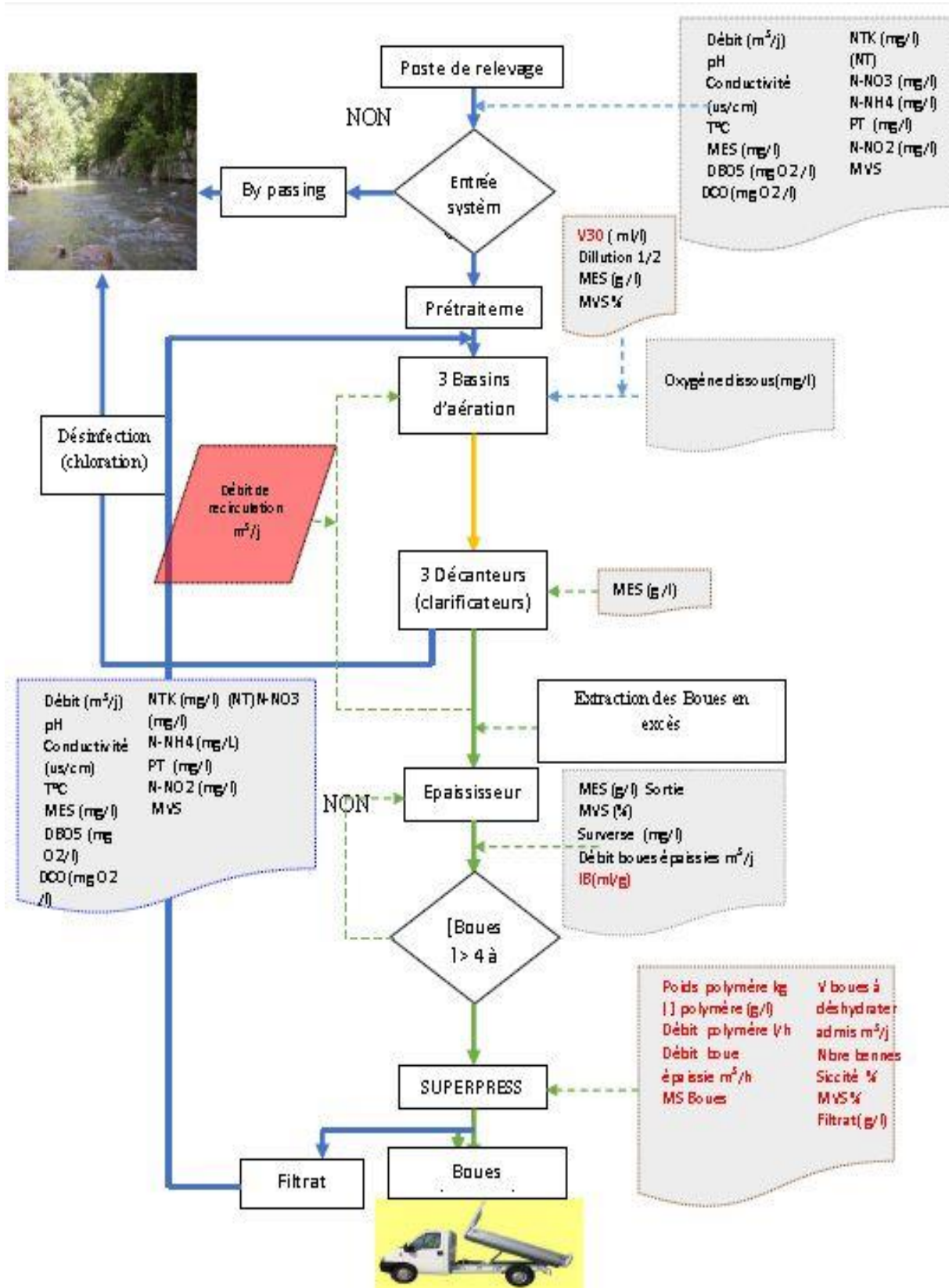


Figure IV. 3 Organigramme d'exploitation de la STEP de Boumerdes

### Description de la filière

#### Ligne eau :

- Alimentation générale de la STEP en eaux usées par pompage ou gravité ;
- Comptage des eaux brutes et bassin d'orage ;
- Dégrilleur ;
- Dessableur déshuileur ;
- Décanteurs primaires ;
- Bassin d'aération ;
- Clarificateurs ;

#### Ligne boues :

- Poste de pompage des boues primaires
- Poste de pompage des boues secondaires
- Épaississement des boues ;
- Stockage des boues épaissies ;
- Préparation automatique du polymère ;
- Déshydratation des boues par centrifugation ;

La STEP de Boumerdes comporte alors deux chaînes de traitement :

Traitement au fil de l'eau : le prétraitement, le traitement biologique à boues activées, décantation et désinfection.

Traitement au fil de boues : épaississement, déshydratation et lit de séchage.

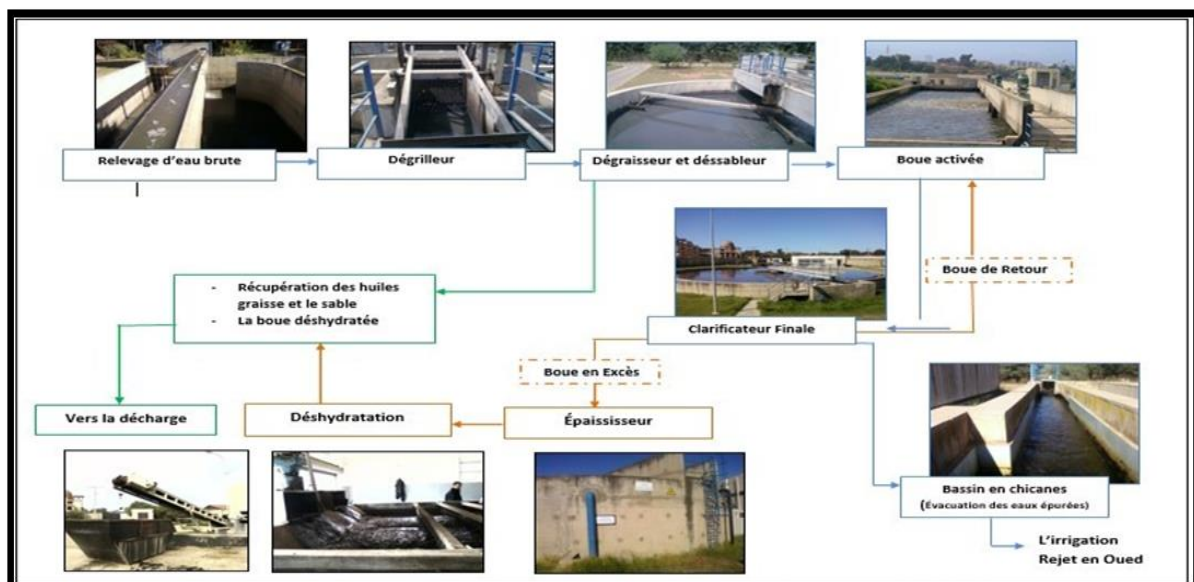


Figure IV. 4 schéma des différents postes de traitement à la STEP de Boumerdes

## IV.3 Traitement au fil de l'eau

### IV.3.1 Arrivée des eaux et bassin d'orage

Une partie des effluents est pompée directement dans le canal d'alimentation du prétraitement d'une part et par gravité dans la bache de relevage d'autre part, et ce par deux conduites de diamètre 600 mm. Ce poste de relevage permet :

- L'alimentation du prétraitement en aval.
- Le By-pass total des installations par manœuvre d'un batardeau contrôlant l'entrée générale de la station.



*Figure IV. 5 Bassin d'orage de la STEP de BOUMERDES*

### IV.3.2 Prétraitement

#### IV.3.2.1 Dégrillage

L'ensemble de dégrillage comporte un dégrilleur automatique du type à champ courbe avec espacement entre barreaux de 20 mm. Les refus sont évacués par convoyeur à vis. En cas d'avarie ou d'entretien sur le dégrilleur automatique, un canal de by-pass équipé d'un dégrilleur de secours à champ droit à nettoyage manuel et espacement entre barreaux de 20 mm est utilisé.



*Figure IV. 6 Dégrilleur du type à champ courbe.*



### IV.3.2.2 Dessableur-Déshuileur

Ouvrage circulaire de forme Cylindro-conique qui permet l'élimination par décantation de la plus grande partie des sables de dimensions supérieures à 150 mm et l'élimination d'une grande partie des matières flottantes (graisses, écumes, etc.) dans la partie supérieure de l'ouvrage.



*Figure IV. 7 Dessableur-Déshuileur*

### IV.3.3 Procédé biologique

#### IV.3.3.1 Bassins d'aération

Les eaux prétraitées sont dirigées vers 3 bassins d'aération munis de turbines type « actirotor », aérateur à axe vertical et à vitesse lente, permettant l'aération prolongée de la culture bactérienne à l'origine du traitement. Les bassins reçoivent d'autre part la « liqueur mixte » constituée par la recirculation des boues provenant des clarificateurs finaux.

Caractéristiques : Nombre de bassins : 3, volume unitaire : 3600 m<sup>3</sup>, profondeur : 4.5 m, nombre d'aérateurs : 9.



*Figure IV. 8 Bassin d'aération*

### IV.3.3.2 Clarification finale et ouvrage de recirculation

Les eaux sortantes des ouvrages d'aération sont dirigées vers 3 clarificateurs de diamètre 24 m, les boues décantées au fond de chaque ouvrage sont dirigées à l'aide d'un racleur vers un puits central de collecte. Elles sont reprises par une tuyauterie les acheminant vers la bêche de recirculation attenante aux bassins d'aération sous le nom de la liqueur mixte et une partie est extraite pour être envoyée vers l'épaississeur. Les eaux décantées sont recueillies par surverse dans une rigole périphérique pour être dirigée vers la désinfection et le canal de comptage.



*Figure IV. 9 Décanteur-Clarificateur*

### IV.3.4 Traitement final

#### IV.3.4.1 Désinfection

L'eau clarifiée transite vers un ouvrage en béton comportant un certain nombre de canaux en chicanes. Un premier canal permet la mesure du débit d'eau épurée. Une série de canaux en chicane permet d'assurer un contact prolongé entre l'eau à désinfecter et l'eau chlorée. Une fois épurée l'eau est rejetée dans le milieu naturel.



*Figure IV. 10 Bassin de chloration*

## IV.4 Traitement au fil de boues

### IV.4.1 Epaississement des boues

L'épaississeur n'est pas le dépotoir final du traitement de l'eau mais l'ouvrage intermédiaire indispensable entre la chaîne de traitement d'eau et la chaîne de traitement des boues.

Le diamètre de l'épaississeur de la STEP est de 13 m, la charge massique est de 30 kg/m<sup>2</sup> /j, concentration de sortie moyenne est de 20 g/l minimum avec un volume à transférer en déshydratation de 792 m<sup>3</sup>.

### IV.4.2 Déshydratation mécanique des boues sur bandes presseuses

Les boues épaissies sont d'abord floculées avant d'être envoyées sur une bande presseuse SUPERPRESS. L'ajout de polymère en faible quantité est nécessaire afin d'améliorer la filtrabilité des boues.

La largeur de bande de la SUPERPRESS est de 2 m, la masse journalière de boues produites est de 4 t/j de boues sèches.



*Figure IV. 11 Presse à bande*

## IV.5 CRITIQUE DES DONNEES

La STEP de Boumerdes a mis à notre disposition une série de données journalières des paramètres de la pollution à l'entrée et à la sortie, le débit et l'énergie totale consommée durant le processus d'épuration pour la période de Janvier 2006 à Mars 2016 (3712 observations).

Dans le cadre de ce travail, nous avons procédé à une analyse statistique des paramètres retenus, ainsi qu'à leurs variations en fonction du temps.

### IV.5.1 Statistique des données

Une étude statistique a été faite sur l'ensemble des données recueillies, les résultats des calculs des paramètres (moyenne, écart type, minimum et maximum) sont résumés dans le tableau suivant :

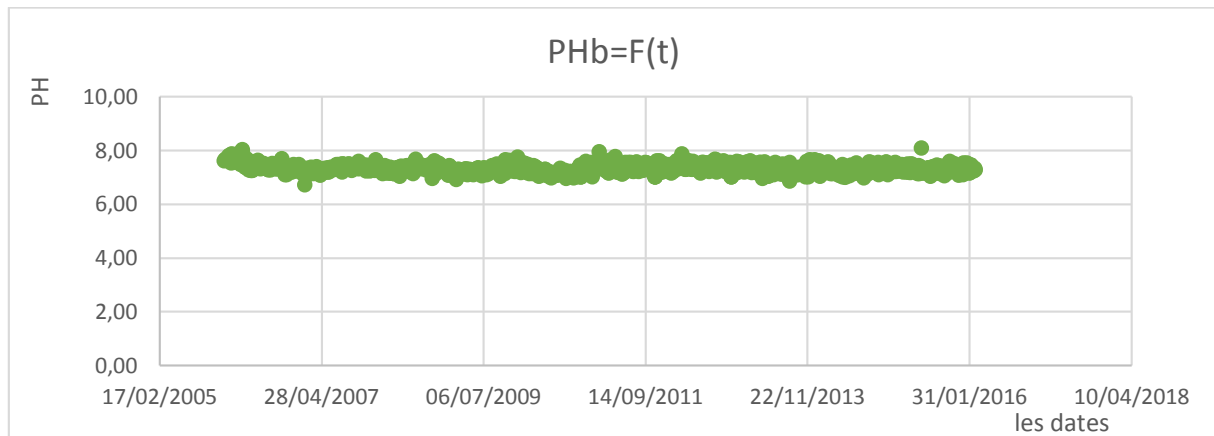
*Tableau IV. 3 Statistiques descriptives des paramètres de pollution de la STEP Boumerdes*

	Eau brute				Eau épurée			
	moyenne	Ecart-type	Min	MAX	moyenne	Ecart-type	Min	MAX
<b>PH</b>	7,32	0,14	6,71	8,08	7,27	0,16	6,39	8,03
<b>T (°C)</b>	20,36	3,82	7,55	35,93	28,23	4,3	9,4	29,9
<b>MES (mg/l)</b>	240,18	24	137,31	2400	13,53	8,21	1	160
<b>DBO5 (mg/l)</b>	248,64	20	156,38	2500	10,69	8,28	1	55
<b>DCO (mg/l)</b>	472,98	110	251,27	3264	42,14	24,83	1	173
<b>NH4 + (mg/l)</b>	30,98	18,49	0,8	126,54	5,4	8,25	0,001	60,1
<b>NO2 - (mg/l)</b>	0,2	0,28	0,001	2,7	0,44	0,96	0,0013	9,4
<b>NO3 - (mg/l)</b>	4,62	9,5	0,004	145	35,05	156,9	0,001	1529,15
<b>NTK (mg/l)</b>	48,99	21,97	1,5	218,96	14,48	32,33	0,05	644
<b>PO 4 -3 (mg/l)</b>	6,88	5,4	0,35	64,44	3,18	2,58	0,1	22,4
<b>Débit (m<sup>3</sup> /j)</b>	11994,68	42	4182,24	22491	/	/	/	/
<b>Energie (Kwh)</b>	3933,02	1083,08	11	8355	/	/	/	/
<b>Energie aérateurs (Kwh)</b>	3463,38	1098,48	0	7305,1	/	/	/	/
<b>BR (m<sup>3</sup>/j)</b>	16496,98	4885,04	0	27170	/	/	/	/
<b>Bex (m<sup>3</sup>/j)</b>	306,03	238,67	0	3913,31	/	/	/	/

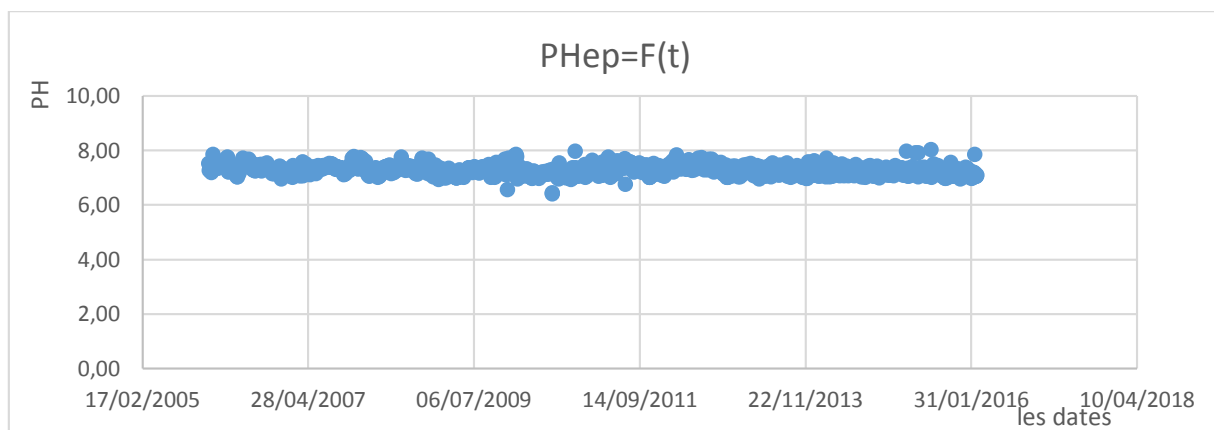
## IV.5.2 Evolution des paramètres de pollution dans le temps

Un autre moyen d'avoir une idée générale sur l'ensemble des données recueillies est d'étudier l'évolution des différents paramètres dans le temps, les résultats sont présentés dans les figures suivantes :

### IV.5.2.1 Evolution du PH



*Figure IV. 12 Evolution journalière du Ph de l'eau brute.*

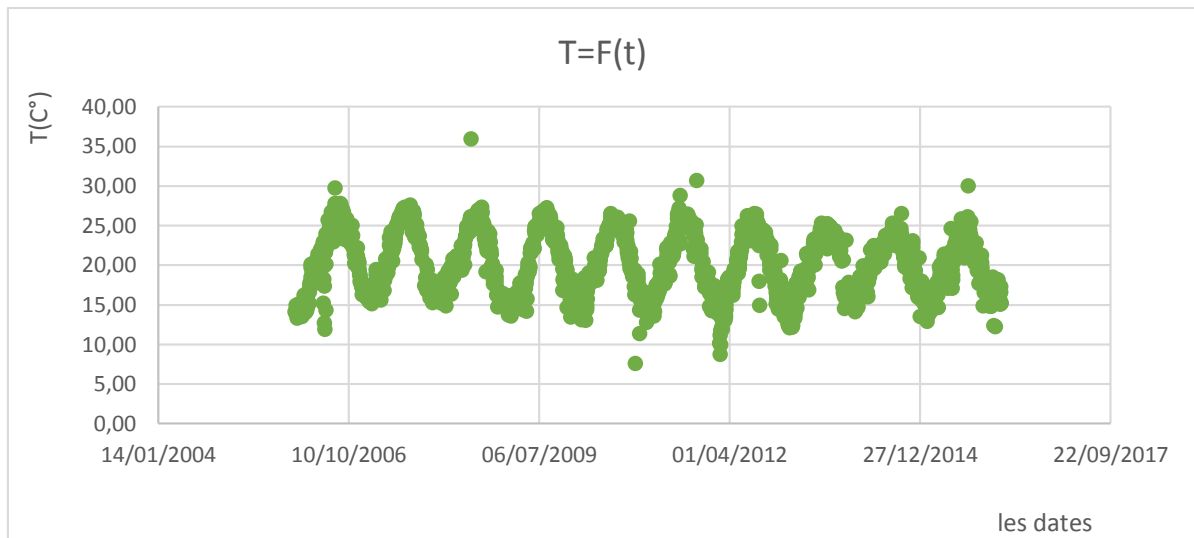


*Figure IV. 13 Evolution journalière du Ph de l'eau épurée.*

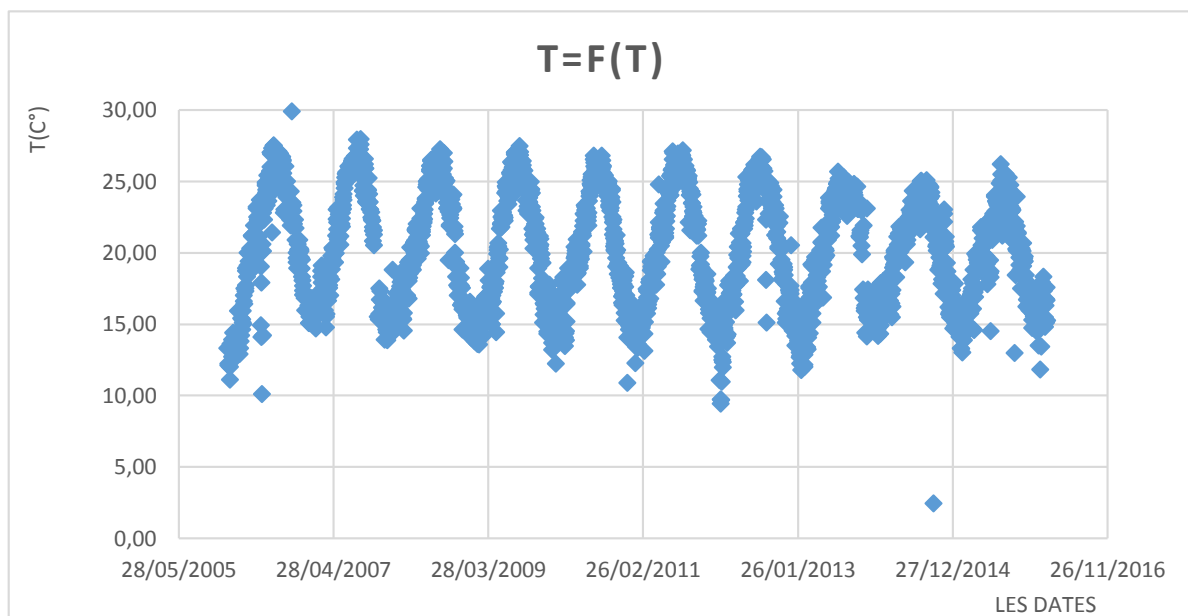
Les deux figures ci-dessus montrent que le PH de l'eau brute varie légèrement et oscille entre 6.4 et 8 avec une moyenne de 7.3.

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.

### IV.5.2.2 Evolution de la température



*Figure IV. 14 Variation journalière de la température de l'eau brute.*



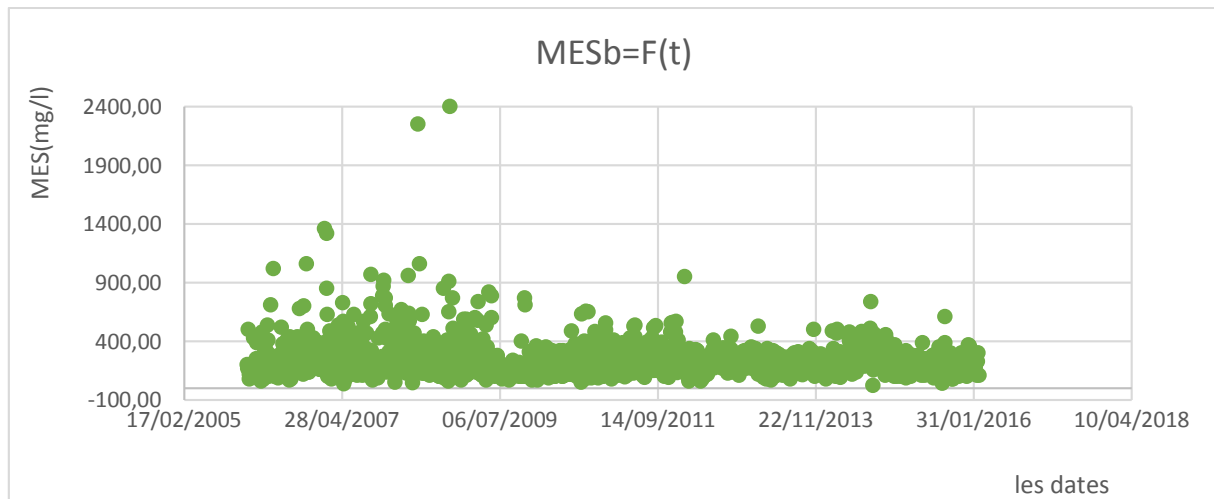
*Figure IV. 15 Variation journalière de la température de l'eau épurée.*

On remarque que la variation de la température est cyclique à l'entrée comme à la sortie et oscille entre 13 et 28 °C à l'exception de certains cas où elle a atteint un minimum de 7.5 °C et un maximum de 35.9°C.

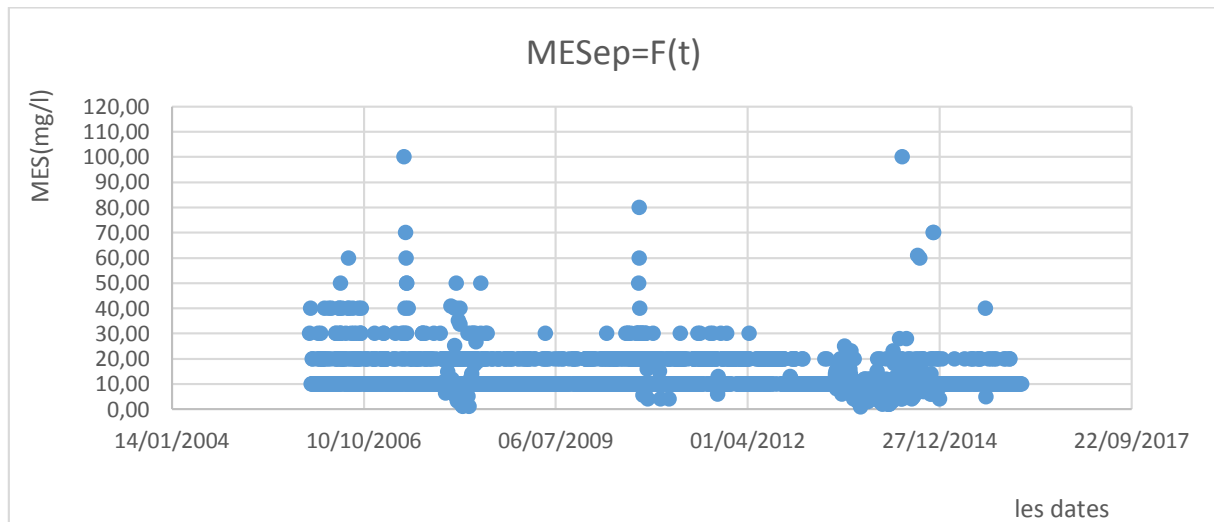
On déduit que la température de l'eau brute et celle épurée est bien cyclique, celle-ci est tout simplement due aux variations saisonnières.



### IV.5.2.3 Evolution des Matières En Suspension (MES)



**Figure IV. 16 Evolution journalière de la concentration en MES à l'entrée de la STEP**



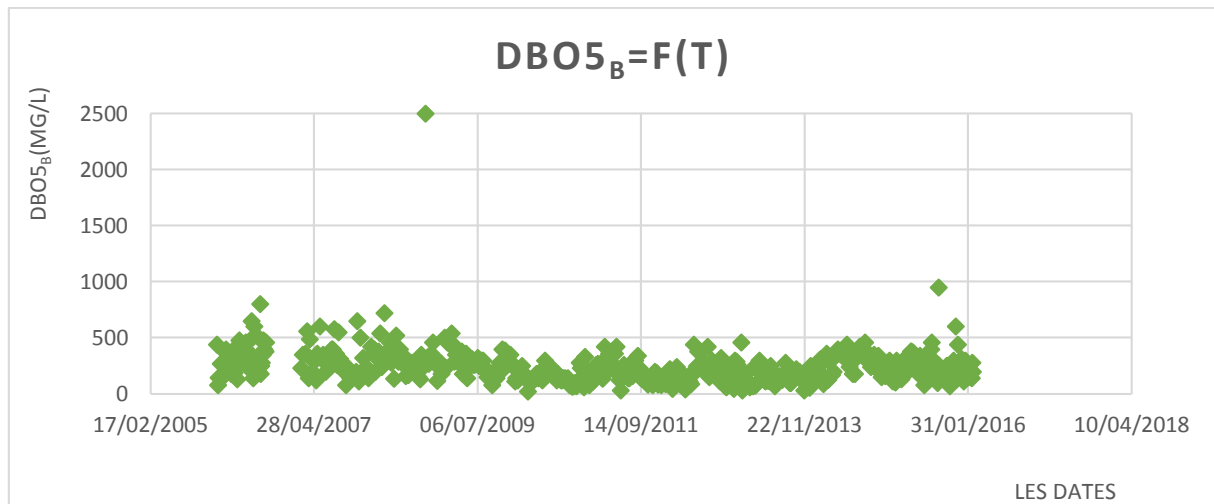
**Figure IV. 17 Evolution journalière de la concentration en MES à la sortie de la STEP**

Les eaux brutes à l'entrée de la STEP de Boumerdes sont caractérisées par une concentration moyenne de 240 mg/l en matières en suspension, les valeurs enregistrées dépassent dans certains cas la capacité nominale, ceci peut être expliqué par des phénomènes exceptionnels, comme le lessivage du bassin versant dans les périodes de crues et la remise en suspension des dépôts accumulés dans le collecteur.

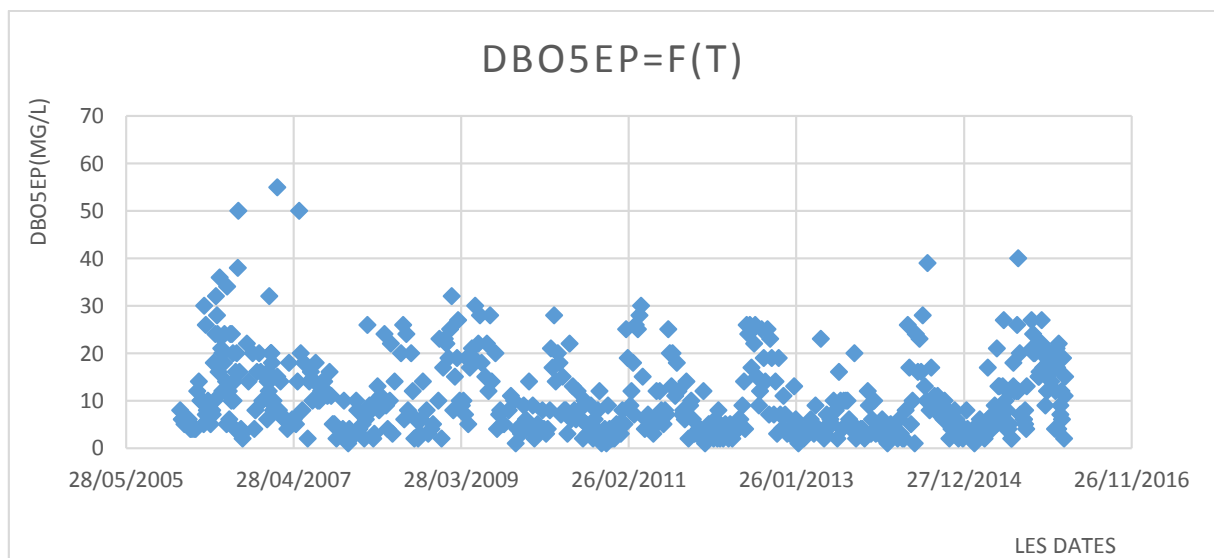
A la sortie de la STEP, la majorité des valeurs enregistrées sont inférieures à la norme de rejet qui est de 30 mg/l, avec exception de certains cas où les valeurs sont supérieures à cette dernière, ceci est dû à des arrêts accidentels du fonctionnement du décanteur secondaire.

#### IV.5.2.4 Evolution de la DBO5

Les variations de la concentration de la demande biologique en oxygène (DBO5) de l'eau brute et celle épurée sont présentées ci-après :



**Figure IV. 18 Evolution de la Demande Biologique en Oxygène à l'entrée de la STEP.**



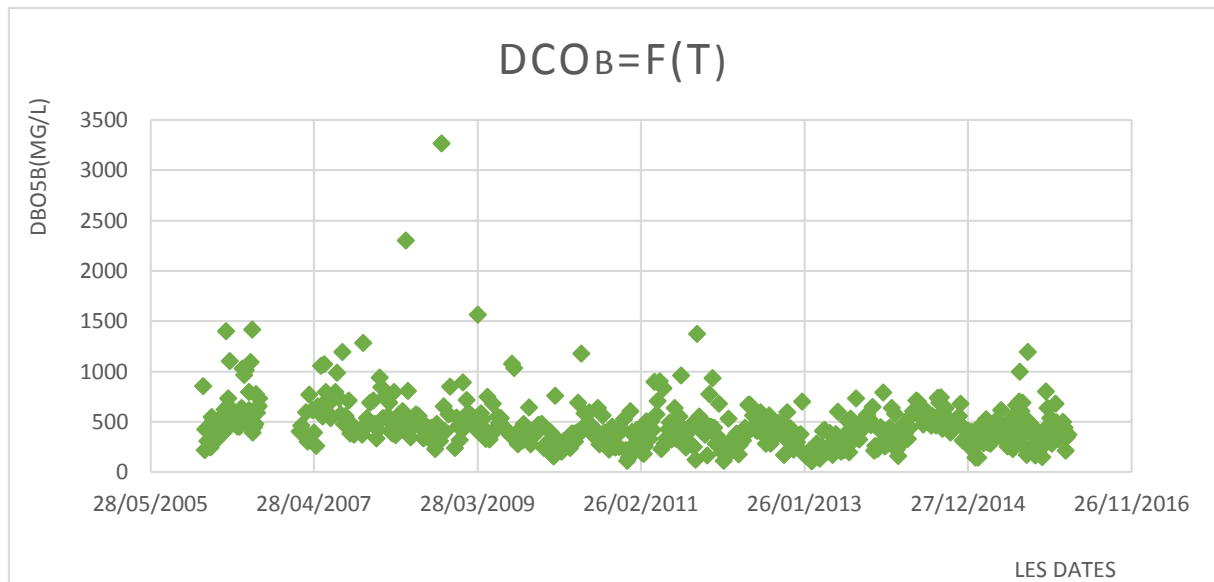
**Figure IV. 19 Evolution de la Demande Biologique en Oxygène à la sortie de la STEP.**

La concentration de la demande biologique en oxygène (DBO5) de l'eau brute oscille entre 20 et 800 mg/l ce qui dépasse en majorité la concentration admissible par la STEP 270 mg/l, et tourne autour d'une moyenne de 249 mg/l.

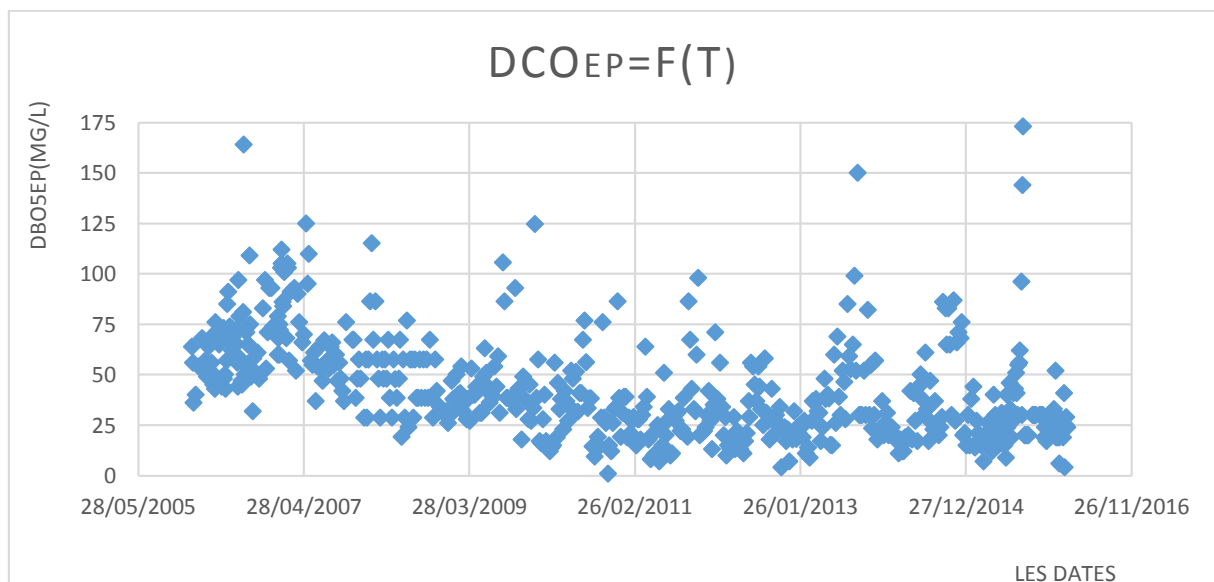
La DBO5 de l'eau épurée est généralement inférieure à la norme de rejet qui est de 30 mg/l, avec quelques exceptions dans les années 2006, 2007, 2009, et 2015 qui peuvent s'expliquer soit par une charge organique entrante supérieure à la charge nominale dont les microorganismes ne peuvent pas tout dégrader, soit par un problème au niveau du bassin d'aération.



### IV.5.2.5 Evolution de la DCO



**Figure IV. 20 Evolution de la Demande Chimique en Oxygène à l'entrée de la STEP.**

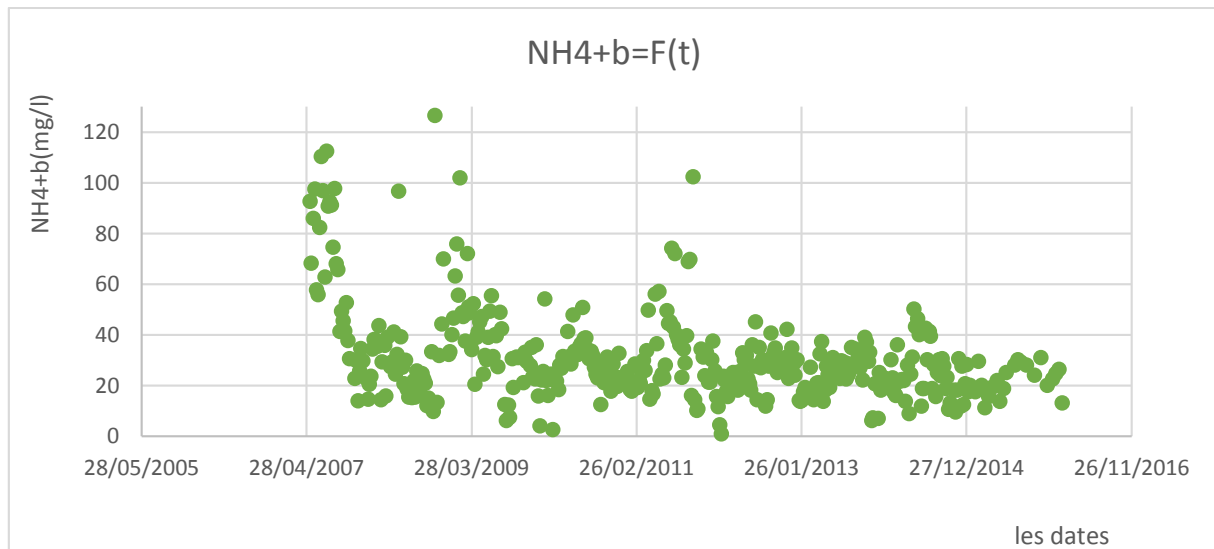


**Figure IV. 21 Evolution de la Demande Chimique en Oxygène à la sortie de la STEP.**

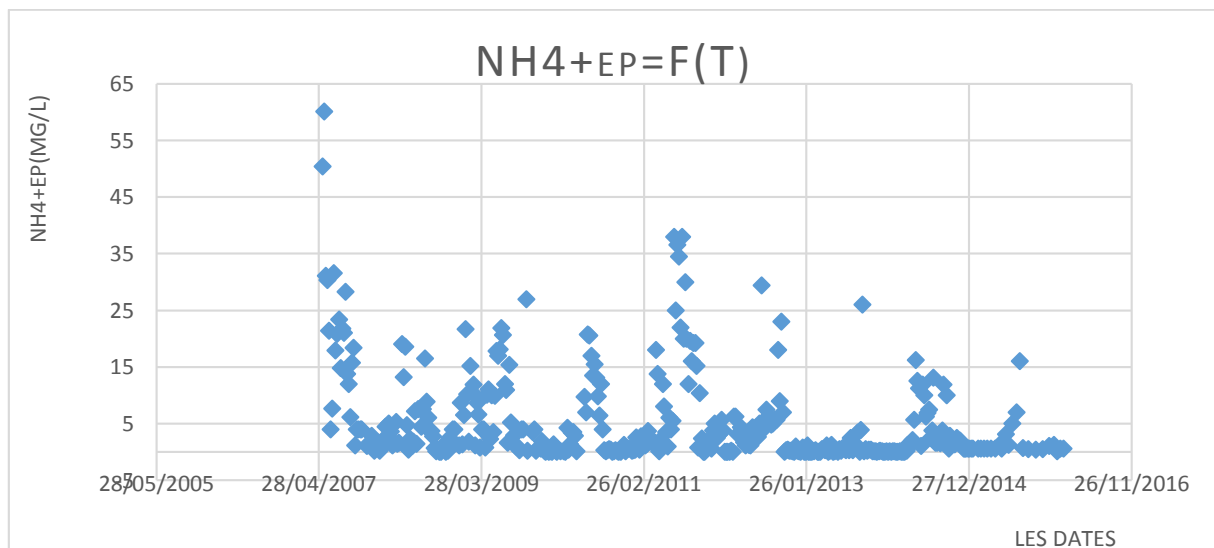
Les valeurs de la DCO enregistrées à l'entrée de la STEP de Boumerdes varient entre 115 mg/l et 1500 mg/l, avec une moyenne de 472.98 mg/l.

La DCO de l'eau épurée est généralement inférieure à la norme de rejet qui est de 90 mg/l [OMS], et même inférieure à 120 mg/l (norme de DCO prescrite dans le Journal Officiel de la République Algérienne), avec quelques exceptions dans les années 2006, 2009, et 2014 ceci est dû à une forte concentration en DCO qui ne peut pas être métabolisée par les bactéries (pollution industrielle).

### IV.5.2.6 Evolution de l'ammonium (NH<sub>4</sub> +)



**Figure IV. 22 Evolution de l'ammonium (NH<sub>4</sub> +) à l'entrée de la STEP.**

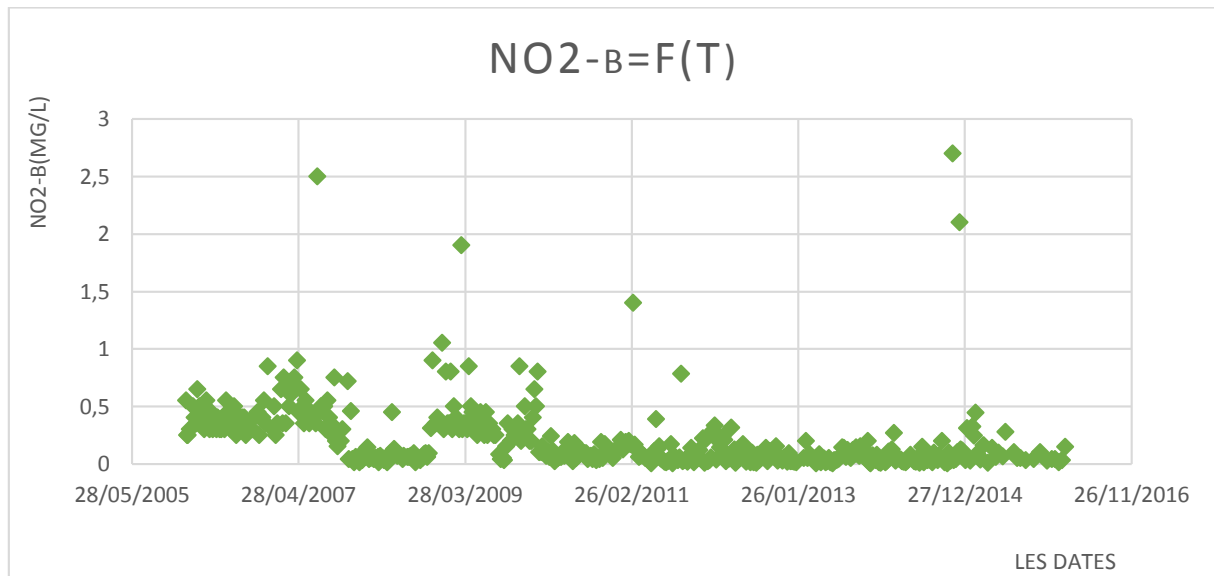


**Figure IV. 23 Evolution de l'ammonium (NH<sub>4</sub> +) à la sortie de la STEP.**

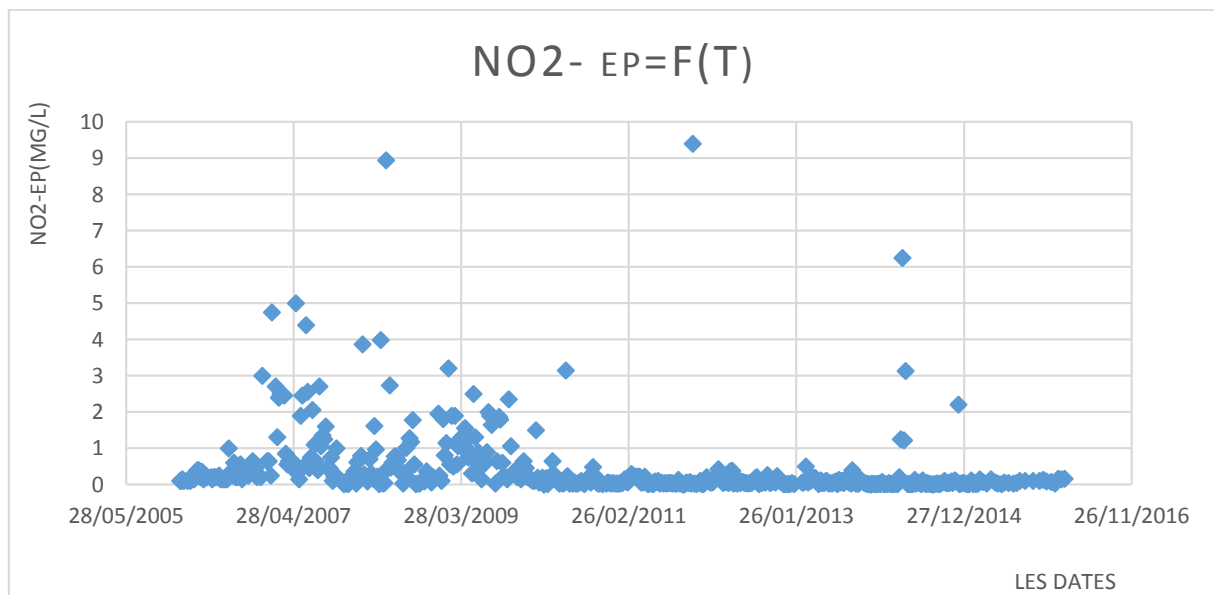
Les concentrations d'ammonium brut oscillent entre 0.8 mg/l et 126.5 mg/l avec une moyenne de 39.98 mg/l, ces variations sont fonction de la température et du temps de séjour dans le réseau de collecte.

A la sortie de la STEP, les concentrations d'ammonium sont variables, allant de 0 mg/l à 60,1 mg/l avec une moyenne de 5.4 mg/l, celles-ci étant même supérieures à la norme de rejet qui est de 5 mg/l fixée par l'OMS. Ceci est dû à de fortes charges organiques qui entraînent nécessairement un degré de nitrification plus faible.

### IV.5.2.7 Evolution du Nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)



*Figure IV. 24 Evolution du Nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) à l'entrée de la STEP.*



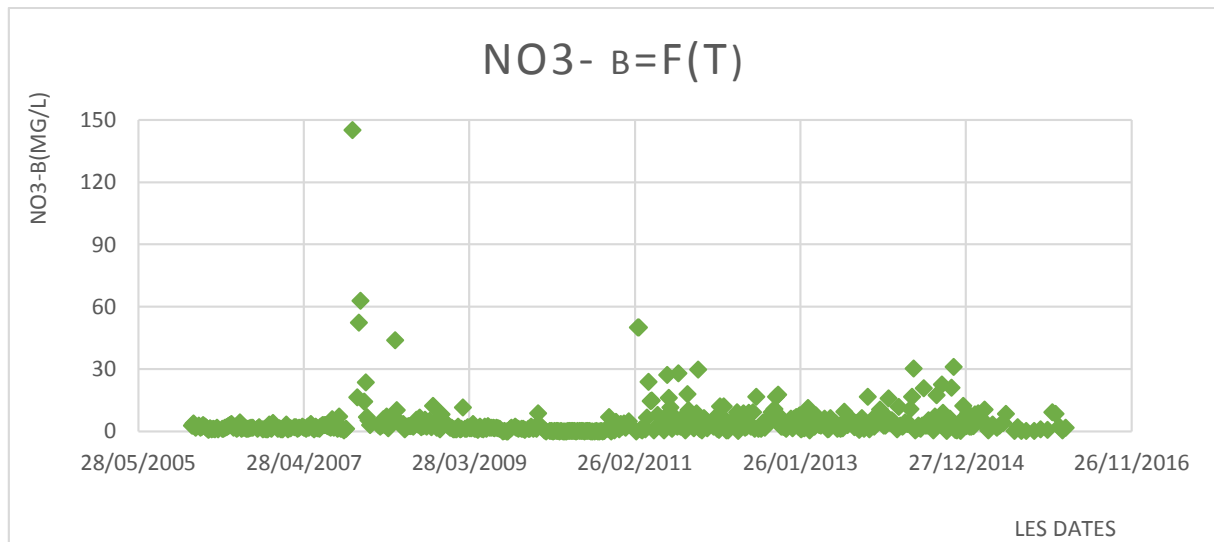
*Figure IV. 25 Evolution du Nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) à la sortie de la STEP.*

Les concentrations en nitrite brute varient entre 0,002 et 1 mg/l, avec des augmentations brusques pendant les années 2007, 2009, 2011, et 2014.

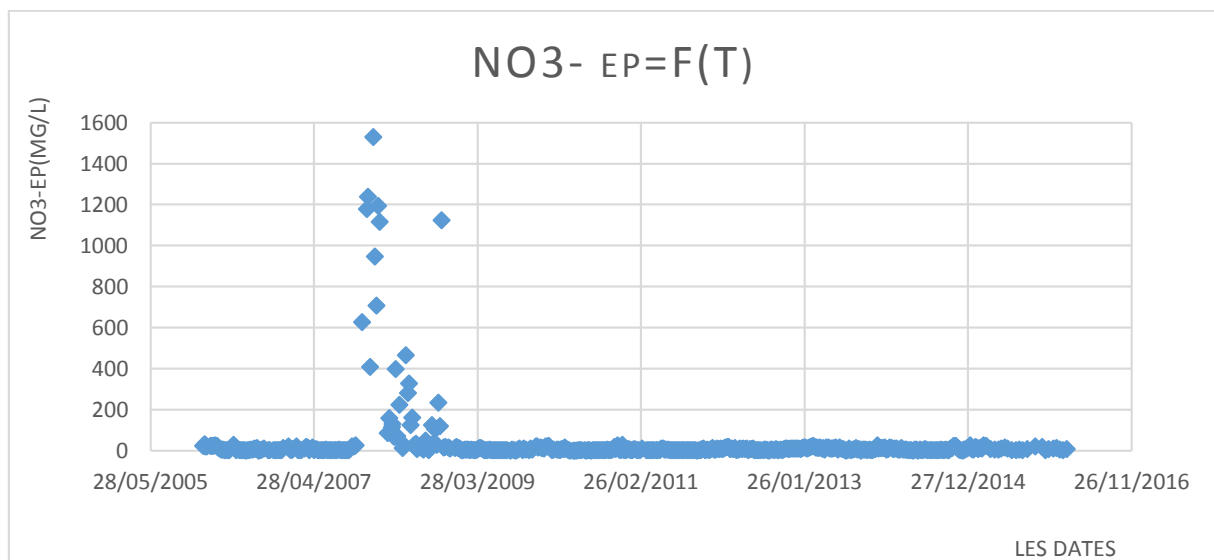
A la sortie de la STEP, ces concentrations varient de 0,003 à 5 mg/l, avec deux cas exceptionnels enregistrés, 8.84 mg/l en 2008 et 9,4 mg/l en 2011.

Cela peut s'expliquer soit par la forme des Nitrites qui sont instables durant le processus de nitrification d'une part, et l'importance des bactéries Nitrosomonas par rapport aux bactéries Nitrobacter d'autre part ou à une oxydation incomplète de l'ammonium.

### IV.5.2.8 Variation du Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)



**Figure IV. 26 Evolution du Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) à l'entrée de la STEP.**



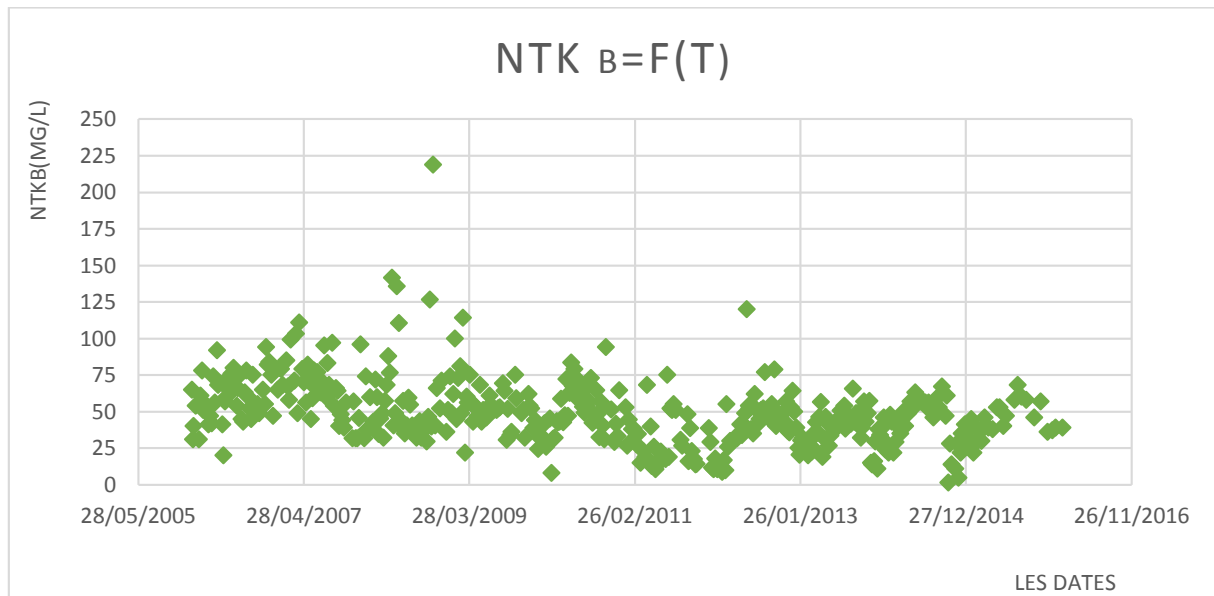
**Figure IV. 27 Evolution du Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) à la sortie de la STEP.**

Les concentrations de nitrate brute oscillent entre 0.004 à 50 mg/l avec une moyenne de 4.62 mg/l à l'exception de certains cas pouvant atteindre les 70 mg/l en 2007.

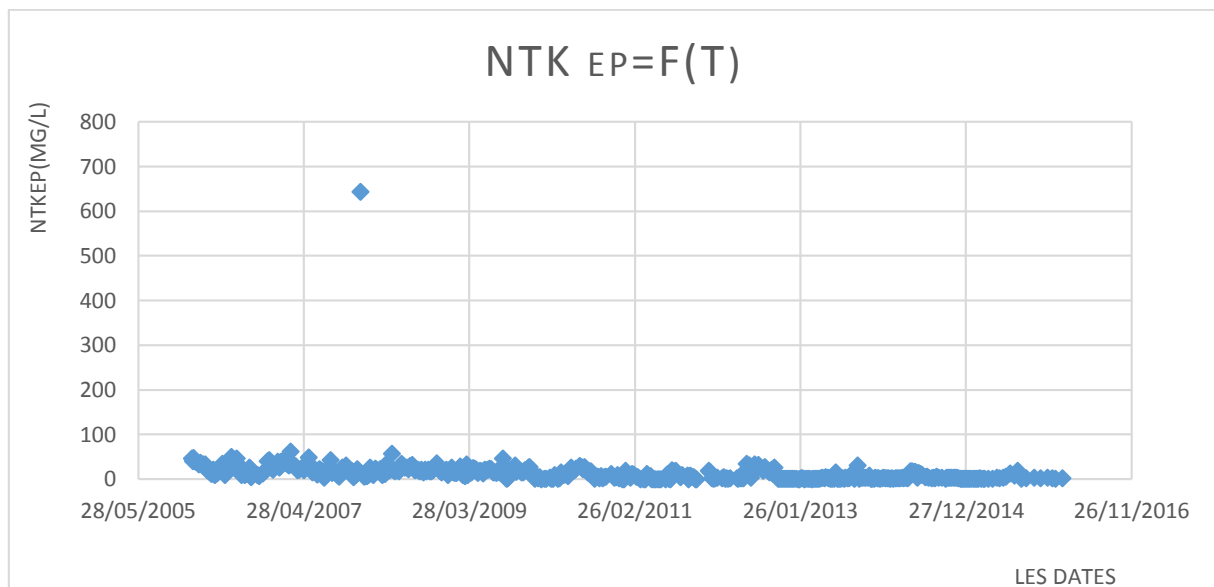
Les concentrations de nitrate enregistrées à la sortie de la STEP oscillent entre 0.001 et 30 mg/l, dépassant par moment la norme de rejet qui est de 10 mg/l fixée par l'OMS.

La période d'Octobre 2007 à Novembre 2008 présente des variations considérables atteignant un pic de 1250 mg/l. Ce dépassement laisse supposer qu'il y a un problème de manque de maîtrise du temps d'aération.

### IV.5.2.9 Evolution de l'Azote Kjeldahl NTK



*Figure IV. 28 Evolution du NTK à l'entrée de la STEP.*



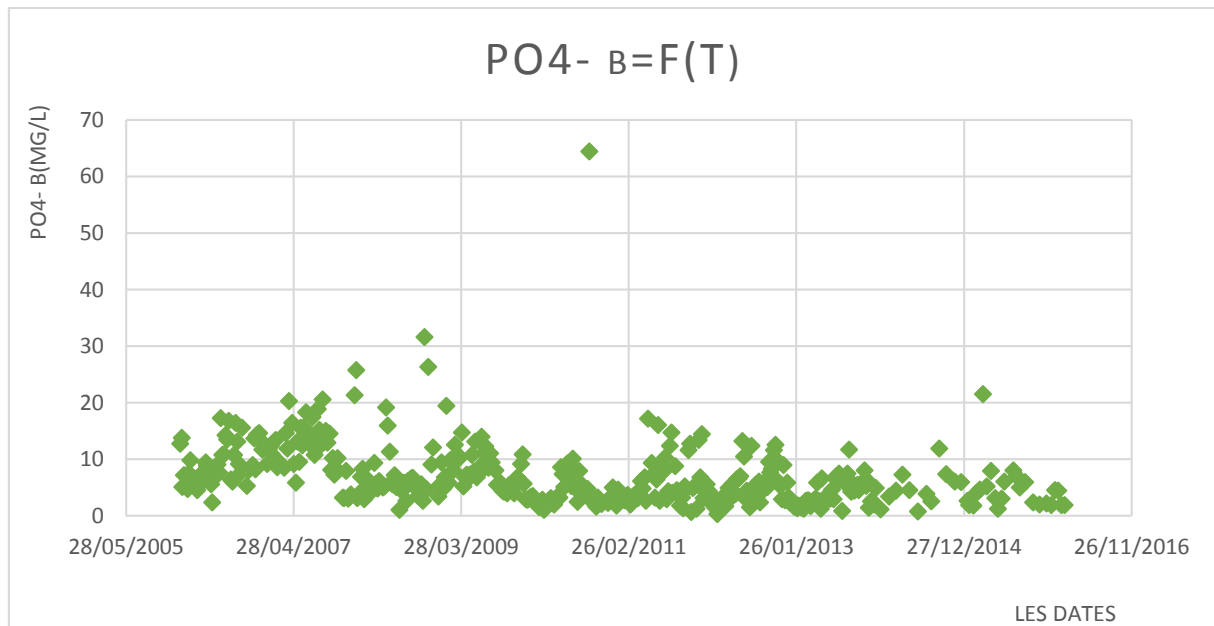
*Figure IV. 29 Evolution du NTK à la sortie de la STEP*

Les concentrations en azote Kjeldahl brute oscillent entre 8.12 et 100 mg/l, avec une moyenne de 48.99 mg/l.

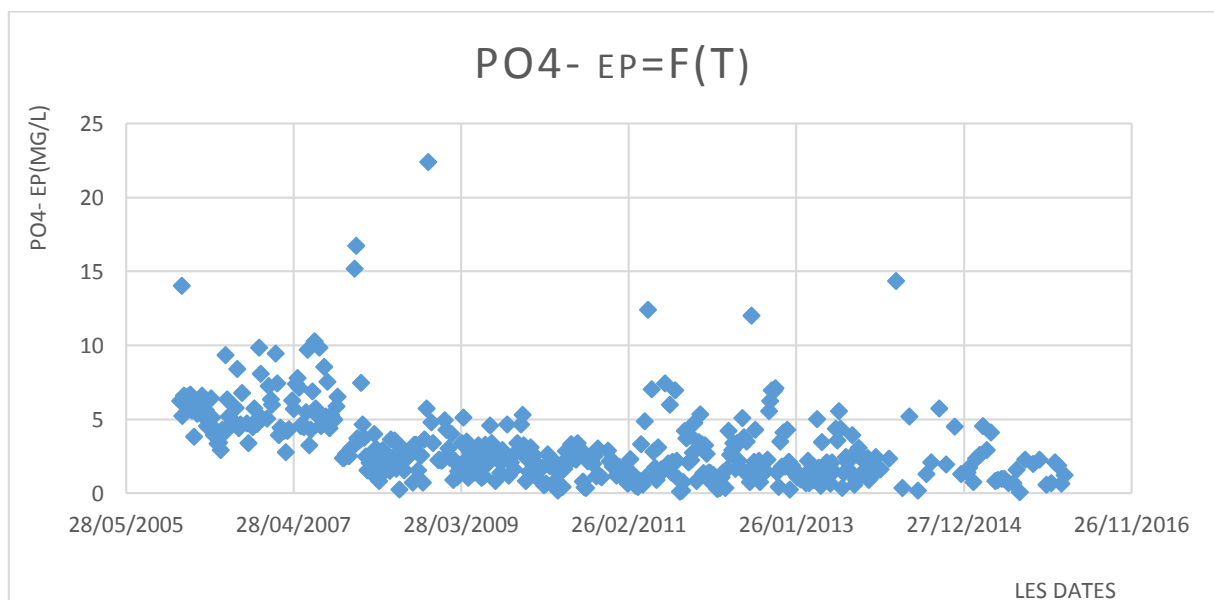
A la sortie de la STEP, les concentrations de l'azote Kjeldahl épuré sont généralement inférieures à la limite qui est de 40 mg/l, avec un pic enregistré en 2007 atteignant 644 mg/l, cette valeur étant douteuse, la fiabilité de cette mesure sera vérifiée par le test Grubbs et Beck.

Le faible rabattement du NTK peut s'expliquer par une partie de l'azote organique soluble (réfractaire) qui est difficile à dégrader.

#### IV.5.2.10 Evolution de l'ortho-phosphate (PO4 -3)



*Figure IV. 30 Evolution de PO4 -3 à l'entrée de la STEP.*



*Figure IV. 31 Evolution de PO4 -3 à la sortie de la STEP.*

Les concentrations de l'ortho-phosphate brute (PO4 -3) oscillent entre 0.35 et 31.6 mg/l, avec une moyenne de 6.88 mg/l, à l'exception d'un pic de 64.44 mg/l enregistré en 2010.

A la sortie, les concentrations enregistrées varient généralement entre 0.13 et 15.21 mg/l, avec une pointe de 22.4 mg/l enregistrée en 2008. Ces valeurs sont inférieures à la norme qui est de 10 mg/l, avec certains dépassements qui peuvent être dû à un faible pourcentage de déphosphatation.

### IV.5.2.11 Evolution du débit journalier

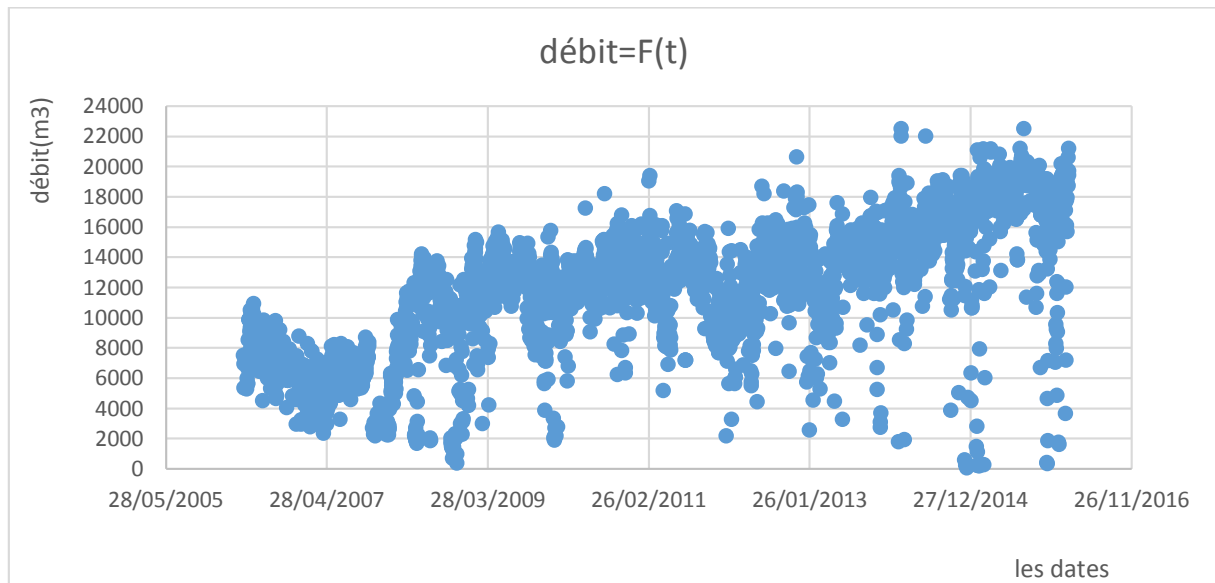


Figure IV. 32 Evolution du débit d'entrée journalier de la STEP.

Le débit de l'effluent d'entrée varie entre 0 et 22000 m<sup>3</sup> avec une moyenne de 11994 m<sup>3</sup>/j et un dépassement de capacité nominale à partir de l'année 2014 à cause d'augmentation de la population raccordée au réseau d'assainissement liée à la STEP.

### IV.5.2.12 Evolution de l'énergie

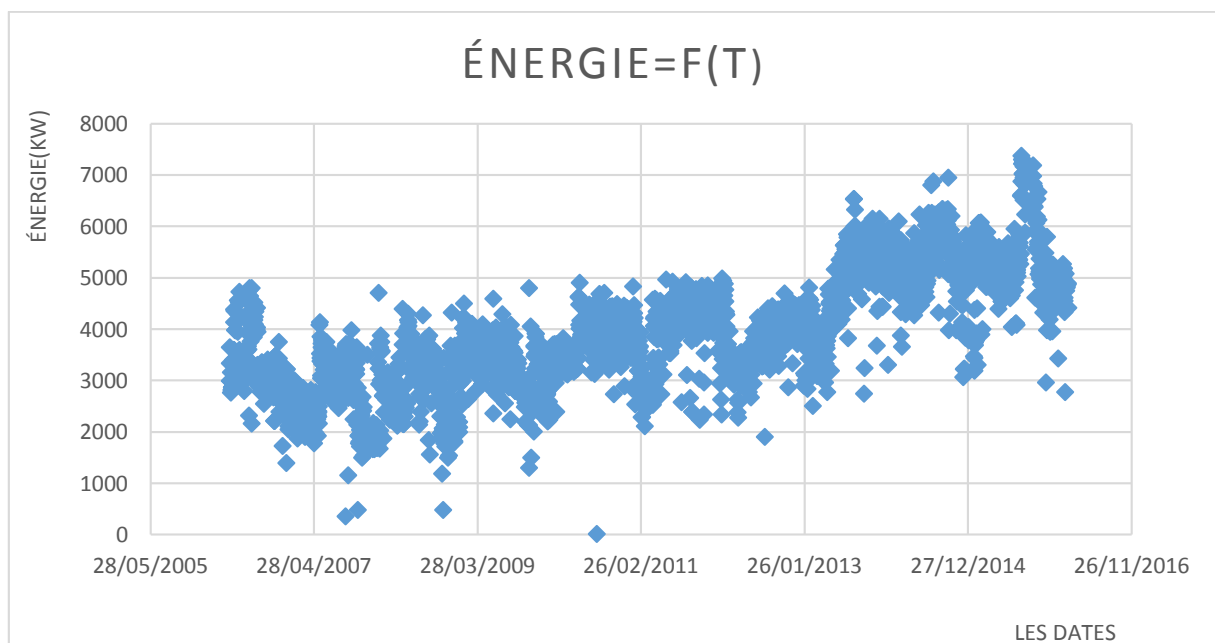
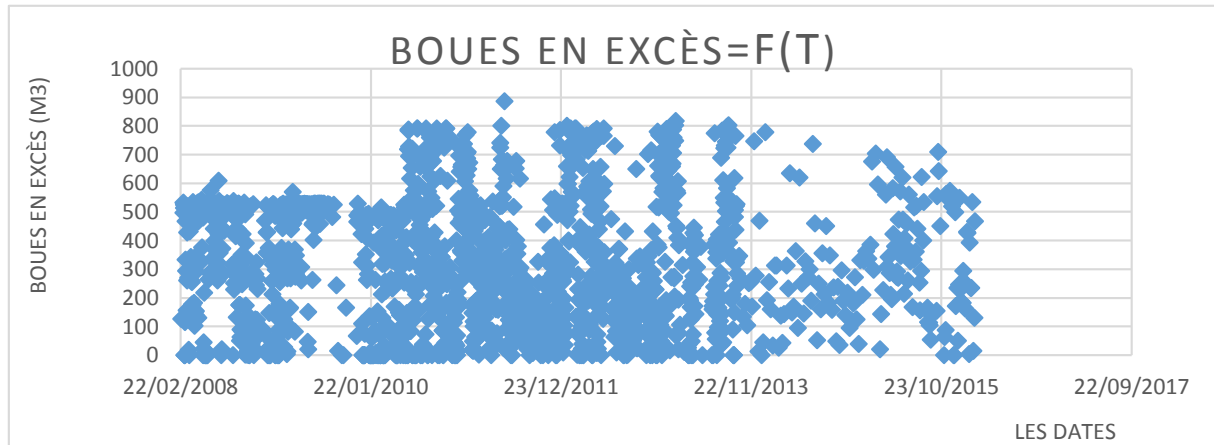


Figure IV. 33 Evolution de l'énergie totale consommée à la STEP.

La figure ci-dessus montre qu'il existe deux périodes en matière de consommation énergétique, la première période c'est la période où le débit entrant ne dépasse pas la capacité nominale de la STEP « entre 2006-2013 », où on peut remarquer que l'énergie oscille entre 2000 et 5000 (kW/j), à partir de la fin d'années 2013 en remarque une deuxième période en matière de consommation énergétique où l'énergie oscille entre 4500 et 6500 (kW/j) cette dernière est due au dépassement de la capacité nominale en matière de débit.

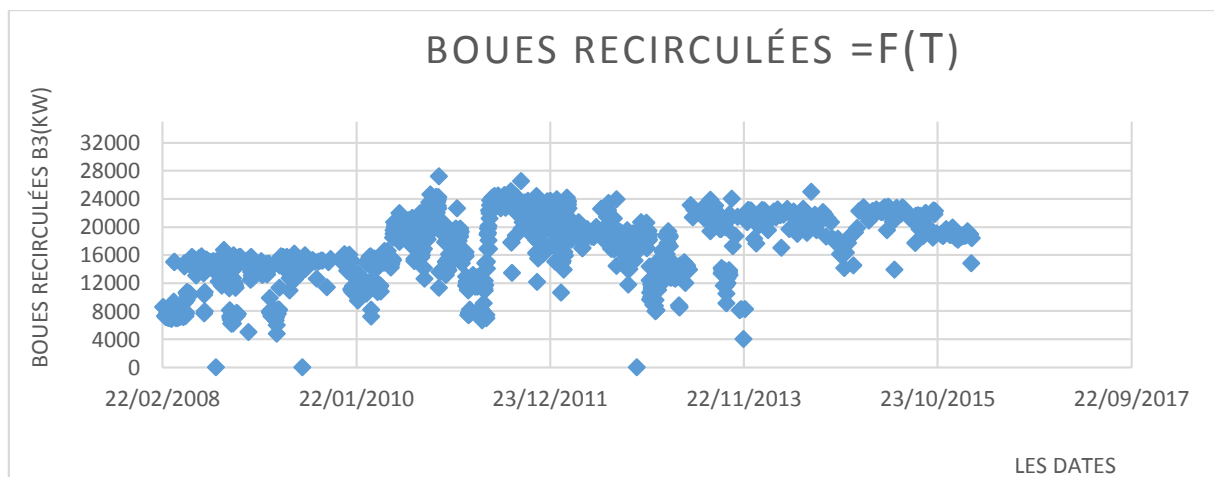
### IV.5.2.13 Evolution des Boues en excès



*Figure IV. 34 Evolution des Boues en excès à la STEP.*

Les boues en excès varient entre 2.09 et 936.43 m<sup>3</sup> /j avec une moyenne de 306.93 m<sup>3</sup> /j,

### IV.5.2.14 Evolution des boues recirculées



*Figure IV. 35 Evolution des Boues recirculées à la STEP.*



La figure ci-dessus montre qu'il y a une augmentation de la quantité de boue recirculée à partir de l'année 2011, cette augmentation est due au fonctionnement des trois bassins biologiques en même temps à partir de cette année.

### IV.5.3 Détermination des valeurs singulières

Lors des mesures des différents paramètres, ou lors de la saisie des résultats de mesures, des erreurs sont souvent commises, et les conséquences sur la série de données sont considérables, et faussent toutes les études statistiques qui lui sont appliquées.

La détection de telles erreurs, et leur élimination est donc primordiale pour la suite de toute analyse possible sur la série,

Pour cela la statistique nous offre un test efficace qui va nous permettre de détecter les données douteuses et aberrantes et décider si on doit les éliminer ou les conserver. Dans notre étude on a opté pour le test de « Grubbs et Beck ».

### IV.5.4 Test des horsains de Grubbs et Beck

Les tests de Grubbs (1950, 1969, 1972) ont été mis au point pour permettre de déterminer si la valeur la plus grande, la valeur la plus petite, la valeur la plus grande ou la plus petite, ou dans le cas du test de Grubbs double, si les deux valeurs les plus grandes, ou si les deux plus petites peuvent être considérées comme extrêmes (ou aberrantes). Ce test suppose que les données correspondent à un échantillon provenant d'une population qui suit une loi normale.

Les valeurs singulières appelées horsains, sont déduites en calculant les statistiques suivantes:

$$X_{high} = e^{\bar{x} + K_n * s_x}$$

$$X_{low} = e^{\bar{x} - K_n * s_x}$$

$\bar{x}$  Et  $s_x$  : Sont respectivement, la moyenne et l'écart type des logarithmes naturels des éléments constituant l'échantillon.

$K_n$  : Valeur statistique du test de Grubbs et Beck, tabulée pour différentes tailles d'échantillons et de niveaux de signification.

Au niveau de risque de 10%, l'approximation polynomiale suivante a été proposée par Bobée (1991) :

$$K_n = 3.62201 + 6.28446 * n^{1/4} - 2.49835 * n^{1/2} + 0.491436 * n^{3/4} - 0.03791 * n$$

n : Taille de l'échantillon.

Les valeurs de la chronique étudiée doivent appartenir à l'intervalle  $[X_{low}, X_{high}]$ .

Dans le cas où l'une des valeurs n'appartient pas à cet intervalle, on conclura que celle-ci est une valeur horsain

### IV.5.5 Résultat du test pour la STEP de Boumerdes

Le tableau suivant résume les résultats obtenus après l'application du test de Grubbs et Beck.

*Tableau IV. 4 Résultats du test de Grubbs et Beck pour la STEP de Boumerdes*

eau brute						
	n	$K_n$	$\bar{X}$	$S_x$	$X_l$	$X_h$
PH	2440	2,49	1,99	0,019	6,974	7,674
T	2440	2,49	2,99	0,194	12,335	32,38
MES	2440	3,68	5,37	0,454	40,491	1144,355
DBO5	537	10,44	5,37	0,551	0,682	67961,17
DCO	553	10,42	6,06	0,445	4,114	44314,39
NH4+	407	10,55	3,29	0,557	0,076	9477,96
NO2-	470	10,51	-2,29	1,254	0	53307,75
NO3-	464	10,51	0,53	1,8	0	282017037
NTK	42	10,52	3,78	0,503	0,22	8807,826
PO-3 4	426	10,54	1,69	0,712	0,003	9836,408
Débit	2440	2,49	9,19	0,443	3237,02	29410,16
Energie	2440	2,49	8,1	0,263	1718,97	6359,88
eau épurée						
	n	$K_n$	$\bar{X}$	$S_x$	$X_l$	$X_h$
PH	2437	2,51	1,98	0,02	6,88	7,68
T	2436	2,52	2,99	0,25	10,36	37,4
MES	2249	3,65	2,49	0,45	2,38	61,59
DBO5	561	10,41	2,07	0,81	0,001	37783,18
DCO	582	10,38	3,57	0,61	0	20647,19
NH4+	399	10,55	0,31	2,06	0	3570042220
NO2-	470	10,51	-2,15	1,65	0	37917175,9
NO3-	465	10,51	1,53	1,81	0	341581082
NTK	444	10,53	1,84	1,56	0	85335376,9
PO-3 4	427	10,54	0,86	0,82	0,004	13398,57
boue en excès	1780	6,23	5,38	1,3	0,067	696598,15
boue recirculée	1930	5,45	9,66	0,36	2254,06	108591,7

### IV.5.6 Les valeurs singulières

Pour tous les paramètres de pollution cités ci-dessous, les valeurs dont l'ordre de grandeur est soit inférieur ou supérieur à un certain seuil, seront considérées comme étant douteuses et seront éliminées par conséquent de notre analyse, pour éviter toute erreur d'appréciation,

- MES < 100 mg/l ou MES > 1000 mg/l
- DBO5 < 100 mg/l ou DBO > 800 mg/l
- DCO > 1100 mg/l
- NH4 > 100 mg/l
- NO3 > 100 mg/l.

D'autres paramètres à expliquer présentent des valeurs douteuses qui seront-elles aussi éliminées de notre analyse tels que :

- L'énergie pour les valeurs : 0, 11, 359, et 476 KWh car pour des valeurs aussi faibles, c'est due soit à des coupures de courant ou des arrêts de fonctionnement de la station, alors que pour les valeurs moyennes c'est des jours d'inondations au niveau de la STEP de Boumerdes.
- Le débit pour les valeurs 0 et < 2000 m<sup>3</sup>/j, il s'avère après enquête que les valeurs nulles correspondent aux jours où le débitmètre était en panne et toutes les valeurs de débit en dessous de 2000 m<sup>3</sup>/j correspondent aux jours du by-pass au niveau de la STEP d'après les archives consultées.

*Chapitre V : Elaboration du modèle  
d'optimisation*

## **V. Introduction**

Dans ce chapitre nous allons élaborer un modèle d'optimisation qui nous permettra d'optimiser la consommation en énergie électrique des aérateurs, celui-ci sera basé sur l'historique de gestion de la STEP de Boumerdes durant les années « 2008-2016 ».

Dans le but de faciliter l'exploitation de ce modèle dans la gestion de la STEP nous allons créer une application codée sous « Matlab » qui permettra aux décideurs et aux gérants de cette STEP de la faire fonctionner d'une façon optimale et de réduire ces couts d'exploitation.

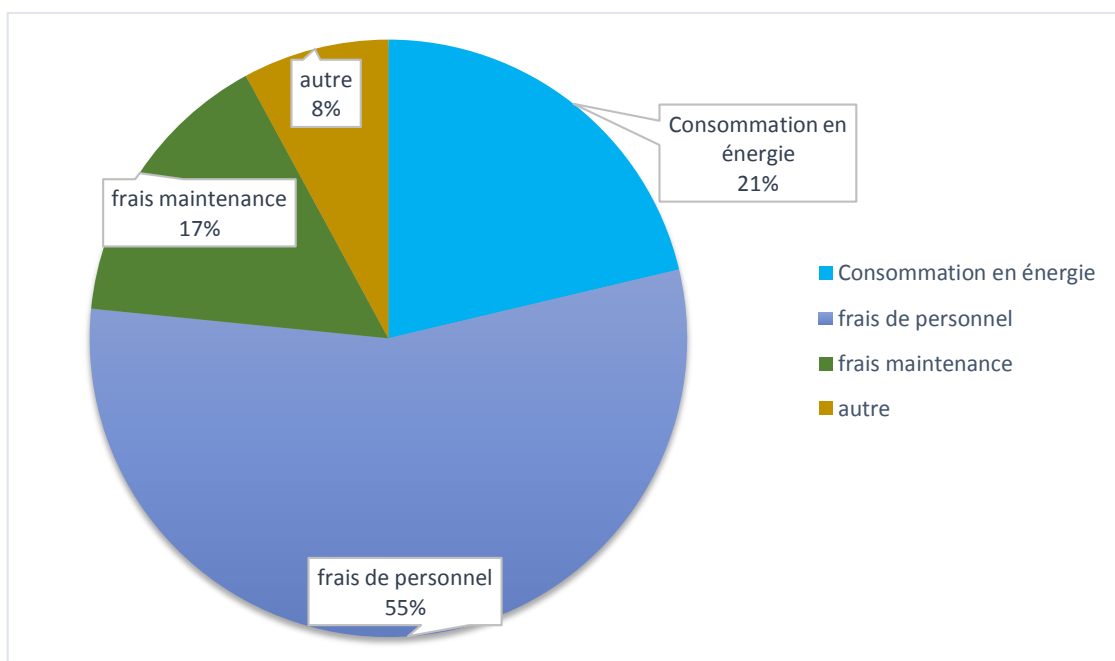
### **V.1 Répartition des coûts d'exploitation de la STEP de Boumerdes**

L'étude de la répartition des coûts d'exploitation de la STEP de Boumerdes a été faite sur des données mensuelles pour deux années d'exploitation : 2014 et 2015.

Les coûts annuels des différentes dépenses liées à l'exploitation de la STEP sont illustrés dans le tableau suivant :

***Tableau V. 1 Répartition des couts d'exploitation de la STEP de Boumerdes***

<b>2014</b>		
<b>Les différentes dépenses</b>	<b>coût annuel (DA)</b>	<b>pourcentage (%)</b>
<b>Consommation en énergie</b>	5412155	22
<b>frais de personnel</b>	13440000	54
<b>frais maintenance</b>	3961367	16
<b>autre</b>	1945023	8
<b>Coût total d'exploitation</b>	24758545	100
<b>2015</b>		
<b>Les différentes dépenses</b>	<b>coût annuel (DA)</b>	<b>pourcentage (%)</b>
<b>Consommation en énergie</b>	5105806	21
<b>frais de personnel</b>	13860000	56
<b>frais maintenance</b>	3693464	15
<b>autre</b>	1963822	8
<b>Coût total d'exploitation</b>	24623093	100



**Figure V. 1 Répartition des coûts d'exploitation de la STEP de Boumerdes**

La figure ci-dessus représente le pourcentage de chaque dépense dans le coût d'exploitation total.

On remarque que le coût en énergie électrique représente  $\frac{1}{4}$  du coût d'exploitation total. On va donc s'intéresser à optimiser cette dépense énergétique afin de réduire le coût d'exploitation de la STEP de Boumerdes.

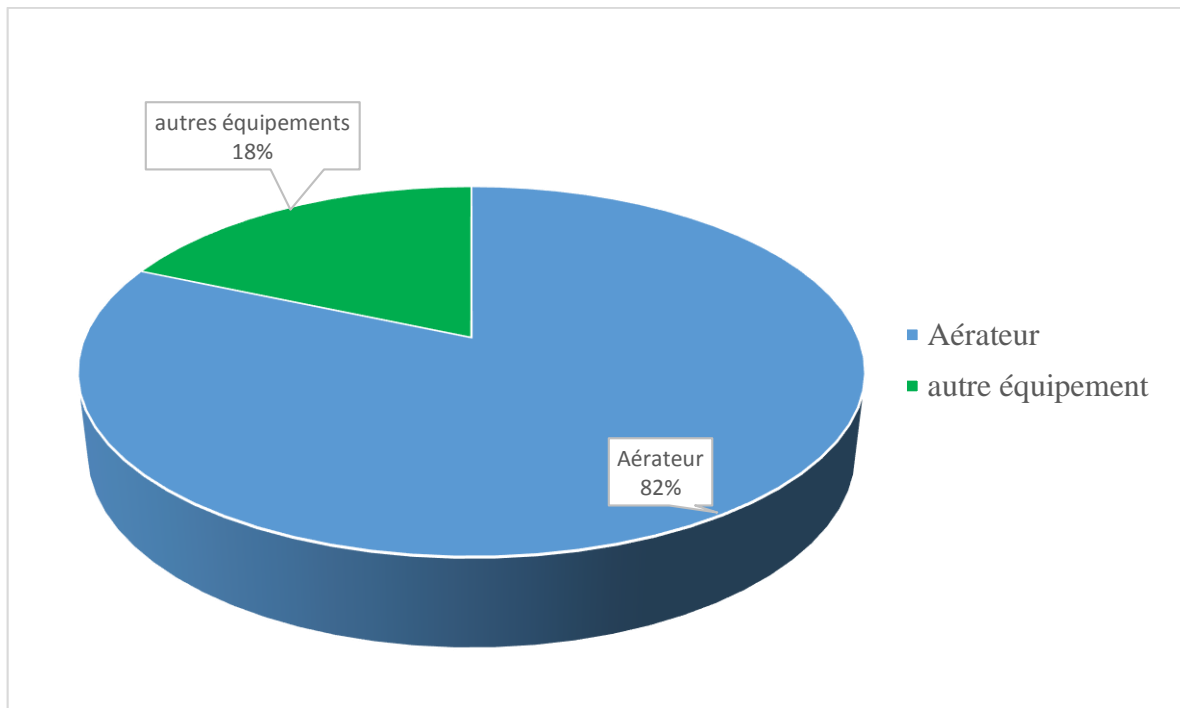
### V.2 La répartition de la consommation en énergie électrique

La consommation d'énergie représente l'impact indirect de l'assainissement sur l'environnement après les eaux rejetées et les boues d'épuration.

Les contraintes de plus en plus sévères sur la qualité des rejets tendent à augmenter les dépenses énergétiques des traitements. Actuellement, la majorité des stations utilisent un traitement à boues activées, pour lequel l'aération des bassins est l'une des clés de la qualité du traitement, mais aussi la principale dépense énergétique de la station (entre 40 et 80 % de la consommation totale).

Afin d'évaluer ce pourcentage pour la STEP de Boumerdes, une étude a été faite à partir des relevés des compteurs des 9 Actirotors.

Le graphique ci-dessous présente la répartition de la consommation électrique par poste de consommation pour la station d'épuration de Boumerdes.



*Figure V. 2 Répartition de la consommation en énergie électrique par poste de consommation*

Les autres équipements :

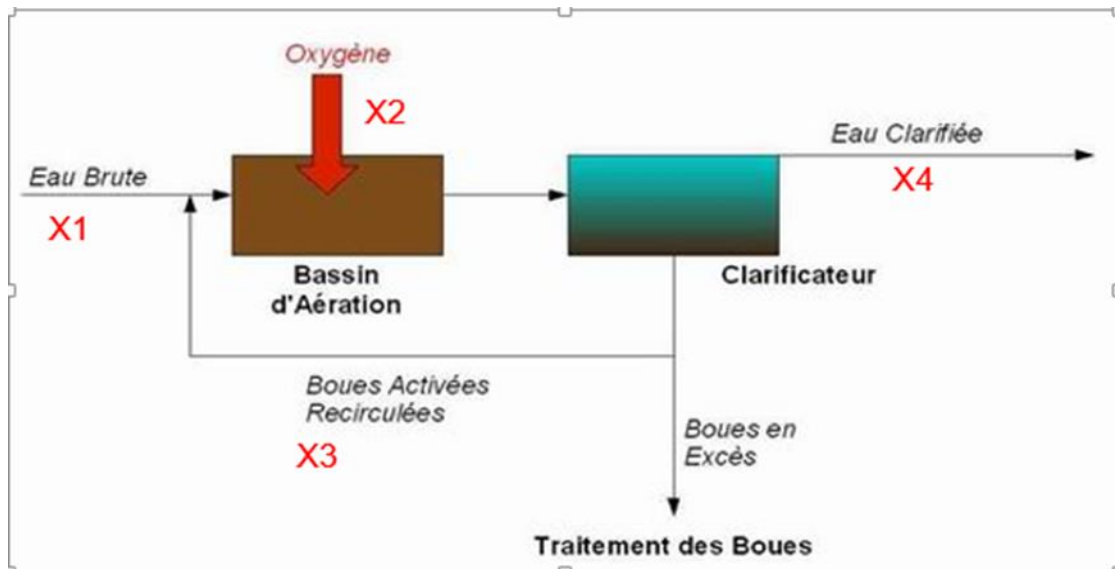
- La station de relevage à l'entrée de la STEP.
- Les pompes.
- Le traitement des boues.

On constate à partir de ce graphique que plus de 80 % de l'énergie électrique consommée par la STEP est due à l'aération des bassins biologiques.

Afin d'optimiser la consommation en énergie électrique de la STEP de Boumerdes on s'intéresse à optimiser le temps d'aération des bassins biologiques.

### V.3 Formulation de la problématique

Avant d'optimiser la consommation en énergie électrique des aérateurs, il faut connaître les différents paramètres qui influent sur le temps d'aération. Le schéma ci-dessous indique les différents paramètres ou contraintes liés à la problématique étudiée :



*Figure V. 3 Principaux paramètres de l'optimisation de la consommation en énergie électrique*

Tel que :

$X1$  : Le débit entrant et les caractéristiques de l'effluent ( $T^\circ$ , PH, DBO5, DCO, MES,.....).

$X2$  : Le temps d'aération du bassin biologique (énergie électrique consommé par les aérateurs).

$X3$  : Le débit des boues recirculées.

$X4$  : La contrainte de norme de rejet qui doit être respecté.

Afin de résoudre cette problématique d'optimisation, on va élaborer un modèle qui nous permettra d'optimiser la consommation en énergie électrique des aérateurs, ce dernier a été établi à partir des expériences jugées bonnes en matière de fonctionnement de la STEP.

L'élaboration de ce modèle est faite par la méthode de régression multiple qui a déjà été présentée dans le chapitre III.

L'équation du Modèle rechercher s'écrit sous la forme suivante :

$$E = f(X1, X2, X3, X4, X5)$$

Tel que :

- $E$  : énergie consommée par les aérateurs.
- $X1$ : paramètre de pollution à l'entrée.
- $X2$ : l'abattement de la pollution.
- $X3$ : débit recirculé.
- $X4$  : Débit entrant dans la STEP.
- $X5$  : la température.



Les paramètres X1, X2, X3, X4, et X5 correspondent aux expériences jugées bonnes en matière de fonctionnement de la STEP.

Le choix de ces paramètres permet de prendre en considération 4 effets importants :

- La qualité de l'effluent à travers les paramètres de pollution à l'entrée de la STEP.
- L'effet de la quantité à travers le débit entrant et du débit recirculé.
- L'effet du climat à travers la température.
- Le respect de la norme de rejet à travers l'abattement de la pollution.

### V.3.1 L'indice de pollution

Le principe de notre démarche pour optimiser l'aération du bassin biologique est le suivant. Plus une eau est polluée, plus elle nécessite de l'oxygène pour être traitée.

Si exprimer la quantité d'une eau est évident (donner son volume en m<sup>3</sup>) exprimer sa qualité est plus complexe et subjectif. En effet, si la structure de l'eau pure est simplement liée aux molécules de H<sub>2</sub>O qui la composent, une infinité de composants chimiques et de micro-organismes peuvent y être dissous avec toutes les propriétés qui y sont associées. De plus entre tous les paramètres polluants l'eau, comment hiérarchiser leur impact les uns par rapport aux autres ? La quantité de micro-organismes est-elle plus importante que celle de la matière organique ?

C'est là qu'intervient l'idée d'indice de qualité. Celui-ci permettra de donner une valeur à la qualité générale de l'eau selon son utilisation et donc de comparer des eaux de qualités différentes.

#### V.3.1.1 Définition

L'indice de qualité de l'eau, calculé à partir de différents paramètres caractérisant l'effluent de la STEP vis-à-vis d'une certaine utilisation (lavage industriel, baignade, eau potable...), permet de comparer et de hiérarchiser des eaux différentes en vue de leur utilisation et ceci à travers un seul nombre.

Ce concept d'associer un unique nombre à une multitude de paramètres en vue de synthétiser une réalité complexe n'est pas propre à l'eau. Il est par exemple très utilisé en économie : indice de développement humain, indice boursier, indice de GINI... Les deux premiers exemples économiques nous permettent de voir les deux utilités que peuvent avoir les indices : l'aide à la décision (indice boursier nous dit si une entreprise est en bonne santé ou pas) et exprimer une vue d'ensemble (l'IDH permet de comparer le niveau de développement des pays).

Les indices de qualité de l'eau peuvent être exprimés de deux façons : l'une dans laquelle la valeur de l'indice augmente avec le degré de pollution et l'autre dans laquelle la valeur de l'indice diminue avec le degré de pollution. On peut classer les premiers comme « indices de pollution de l'eau » et les seconds comme « indices de qualité de l'eau ».

### V.3.1.2 Elaboration d'un indice de pollution

La détermination d'un indice de pollution qui peut caractériser la qualité de l'effluent a nécessité plusieurs étapes :

Vu que la station d'épuration des eaux usées de Boumerdes a été construite pour traiter un effluent domestique, on s'intéresse beaucoup plus aux paramètres suivants :

- DBO5 (demande biologique en oxygène).
- DCO (demande chimique en oxygène).
- MES (matières en suspension).
- NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (ammonium).

Dans un premier temps on a pris le point géométrique qui regroupe ces paramètres comme premier indice de pollution :

$$PG_j = \sqrt{\frac{DBO5b^2 + DCO_b^2 + MESb^2 + NH_{4+}^2}{4}}$$

$PG_j$ : Le point géométrique qui regroupe les quatre paramètres sélectionnés.

Pour avoir un indice normé on divise par max PG.

$$IP_j = \frac{PG_j}{PG_{max}}$$

$IP_j = 1$  : L'eau très pollué.

$IP_j$  Proche de 0 : l'eau non pollué.

### V.3.2 L'abattement de la pollution (AB)

L'abattement de la pollution (AB) de l'effluent représente la charge de pollution éliminée par le processus d'épuration.

$$AB_{DBO5} = \frac{\text{charge } DBO5_b - \text{charge } DBO5_e}{\text{charge nominale } DBO5}$$

$$AB_{DCO} = \frac{\text{charge } DCO_b - \text{charge } DCO_e}{\text{charge nominale } DCO}$$

$$AB_{MES} = \frac{\text{charge } MES_b - \text{charge } MES_e}{\text{charge nominale } MES}$$

$$AB_{NH4+} = \frac{\text{charge } NH4+_b - \text{charge } NH4+_e}{\text{charge nominale } NH4+}$$

Afin de n'avoir qu'une seule valeur nous avons pris la norme du vecteur qui englobe ces quatre équations :

$$AB_{totale} = \sqrt{\frac{AB_{DBO5}^2 + AB_{DCO}^2 + AB_{MES}^2 + AB_{NH4+}^2}{4}}$$

### V.3.3 Le débit recirculé (DR)

Pour assurer un traitement biologique efficace, il faut maintenir une concentration constante (Voisine de 5g/l) dans le bassin d'aération. Pour cela, il est nécessaire de recirculer une partie des boues qui sont extraites du décanteur secondaire vers l'entrée du bassin d'aération (boues recirculées), donc c'est un paramètre essentiel dans l'optimisation de l'aération.

### V.3.4 Le débit entrant à la STEP (D)

La prise en considération du débit entrant à la STEP de Boumerdes comme paramètre du modèle d'optimisation est justifié par la très grande fluctuation de ce paramètre durant la période d'étude.

### V.3.5 La température (T)

Le temps d'aération est en fonction de la température.

La diminution de l'activité métabolique des micro-organismes diminue avec la baisse de la température du système, ainsi une fluctuation du temps d'aération du bassin biologique existe du fait de l'effet cyclique de la température.

Mais les questions de comment déterminer ces bonnes expériences ? Et quel est le critère de ce jugement ? Restent posées.

## V.4 Etude des rendements épuratoires

Dans ce qui suit, nous allons faire une étude comparative entre les rendements optimaux et les rendements observés de la station. Ces derniers correspondent à l'élimination de la matière organique.

On définit les rendements comme suit :

$$RMES : \text{Rendement épuratoire } MES = 1 - \left(\frac{MESe}{MESbr}\right)$$

$$RDBO5 : \text{Rendement épuratoire } DBO5 = 1 - \left(\frac{DBO5e}{DBO5br}\right)$$

$$RDCO : \text{Rendement épuratoire } DCO = 1 - \left(\frac{DCOe}{DCObr}\right)$$

$$RNMES : \text{Rendement } MES \text{ lié à la norme} = 1 - \left(\frac{30}{MESbr}\right)$$

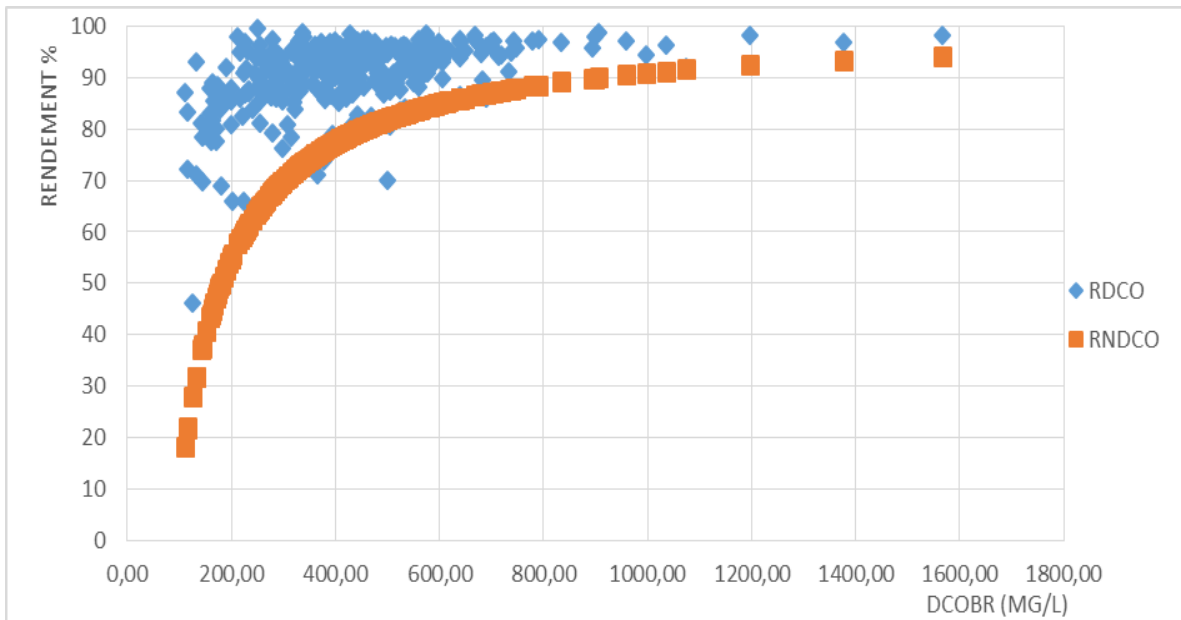
$$RNDBO5 : \text{Rendement } DBO5 \text{ lié à la norme} = 1 - \left(\frac{30}{DBO5br}\right)$$

$RNDCO$  : Rendement  $DCO$  lié à la norme =  $1 - \left(\frac{90}{DCO_{br}}\right)$

### V.4.1 Rendement épuratoire de la $DCO$ , $DBO5$ , $MES$

#### a. Rendement épuratoire de la $DCO$

La figure suivante représente le rendement épuratoire de la  $DCO$  ( $RDCO$  en %) et le rendement optimal de la  $DCO$  ( $RNDCO$  en %) en fonction de la valeur de la  $DCO$  brute ( $DCO$  brute en  $mg/L$ ).

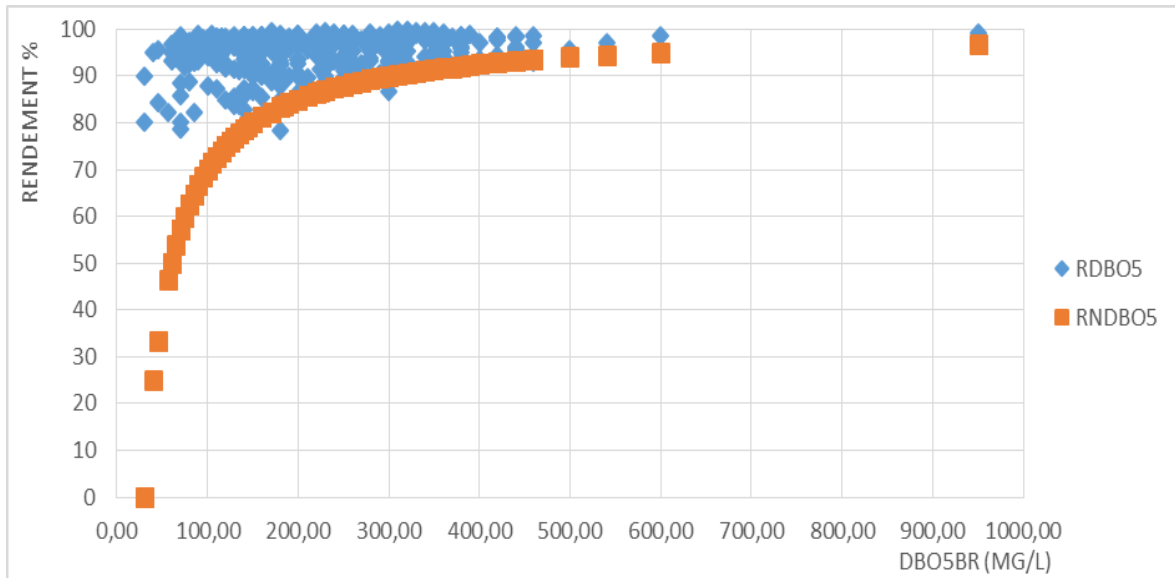


**Figure V. 4 Rendements d'élimination de la  $DCO$  comparés au rendement optimal.**

La courbe  $RDCO = f(DCO_{br})$  représente le rendement épuratoire de la station alors que la courbe  $RNDCO = f(DCO_{br})$ , représente une élimination de  $DCO$  conforme aux exigences des normes écologiques.

#### b. Rendement épuratoire de la $DBO5$

La figure suivante représente le rendement épuratoire de la  $DBO5$  ( $RDBO5$  en %) et le rendement optimal de la  $DBO5$  ( $RNDBO5$  en %) en fonction de la valeur de la  $DBO5$  brute ( $DBO5$  brute en  $mg/L$ ).

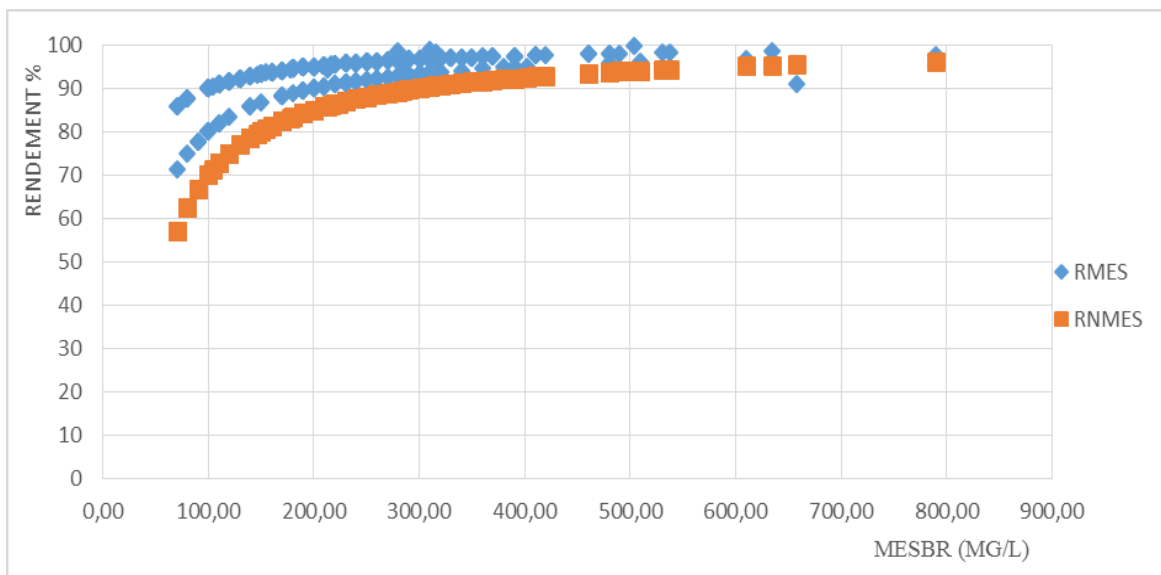


**Figure V. 5 Rendements d'élimination de la DBO5 comparés au rendement optimal**

La courbe  $RDBO5 = f(DBO5br)$  représente le rendement épuratoire de la station alors que la courbe  $RNDBO5 = f(DBO5br)$ , représente une élimination de DBO5 conforme aux exigences des normes écologiques.

**c. Rendement épuratoire de MES**

La figure suivante représente le rendement épuratoire de *MES* ( $RMES$  en %) et le rendement optimal de *MES* ( $RNMES$  en %) en fonction de la valeur de la *MES* brute (*MES* brute en *mg/L*).



**Figure V. 6 Rendements d'élimination de la MES comparés au rendement optimal**

La courbe  $RMES = f(MESbr)$  représente le rendement épuratoire de la station alors que la courbe  $RNMES = f(MESbr)$ , représente une élimination de MES conforme aux exigences des normes écologiques.

A partir des trois graphes précédents On remarque ce qui suit :

- Les rendements épuratoires de MES, DBO5, et DCO de la station de Boumerdes sont toujours supérieures aux rendements optimaux.
- Les écarts entre le rendement optimal et le rendement observé sont plus faibles lorsque les concentrations de  $MES_{br}$ ,  $DBO5_{br}$ ,  $DCO_{br}$  sont importantes.

Du moment que le comportement est le même pour les trois paramètres on va essayer de voir sur une échelle, autrement dit, on va introduire deux autres paramètres qui sont le rendement global épuratoire (qui caractérise les trois rendements RMES, RDBO5 et RDCO) et le rendement global lié à la norme (qui caractérise lui aussi les rendements RNMES, RNDBO5 et RNDCO).

On définit :

RG : rendement global épuratoire = le module du vecteur  $\begin{cases} -RDBO5 \\ -RDCO \\ -RMES \end{cases}$

RNG : rendement global lié à la norme = le module du vecteur  $\begin{cases} -RNDBO5 \\ -RNDCO \\ -RNMES \end{cases}$

On trace les mêmes graphes que les précédents pour voir si on aura les mêmes résultats.

Les résultats obtenus sont illustrés dans le graphe suivant :

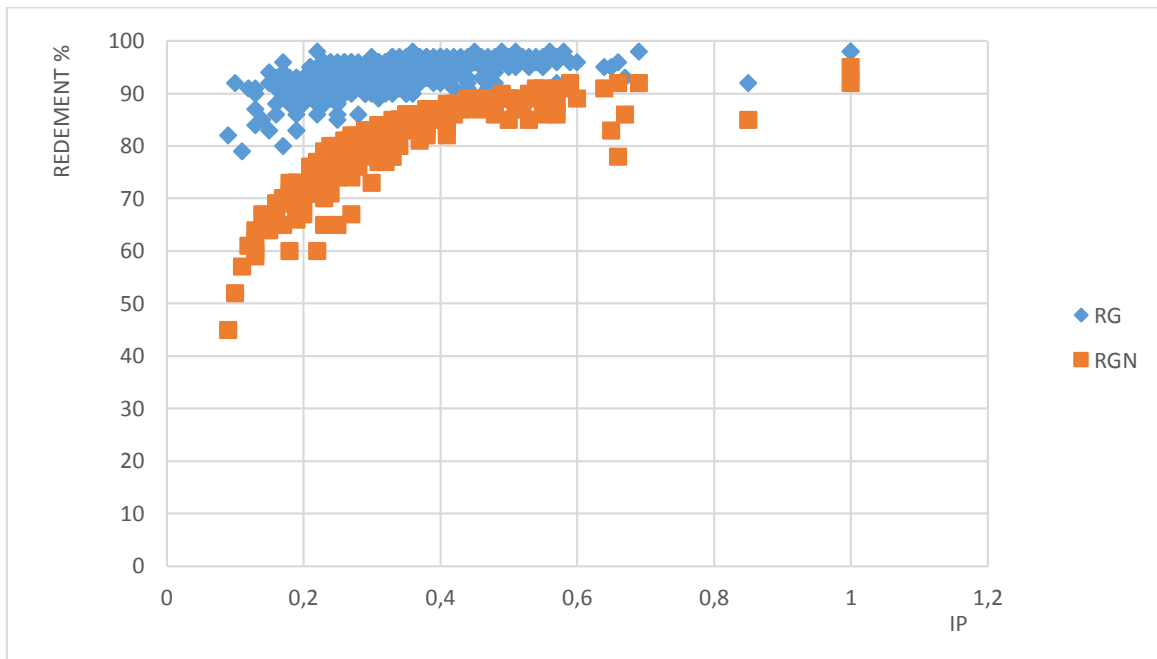


Figure V. 7 Comparaison entre les rendements globaux

Effectivement le résultat trouvé dans la première partie est confirmé dans le graph ci-dessus.

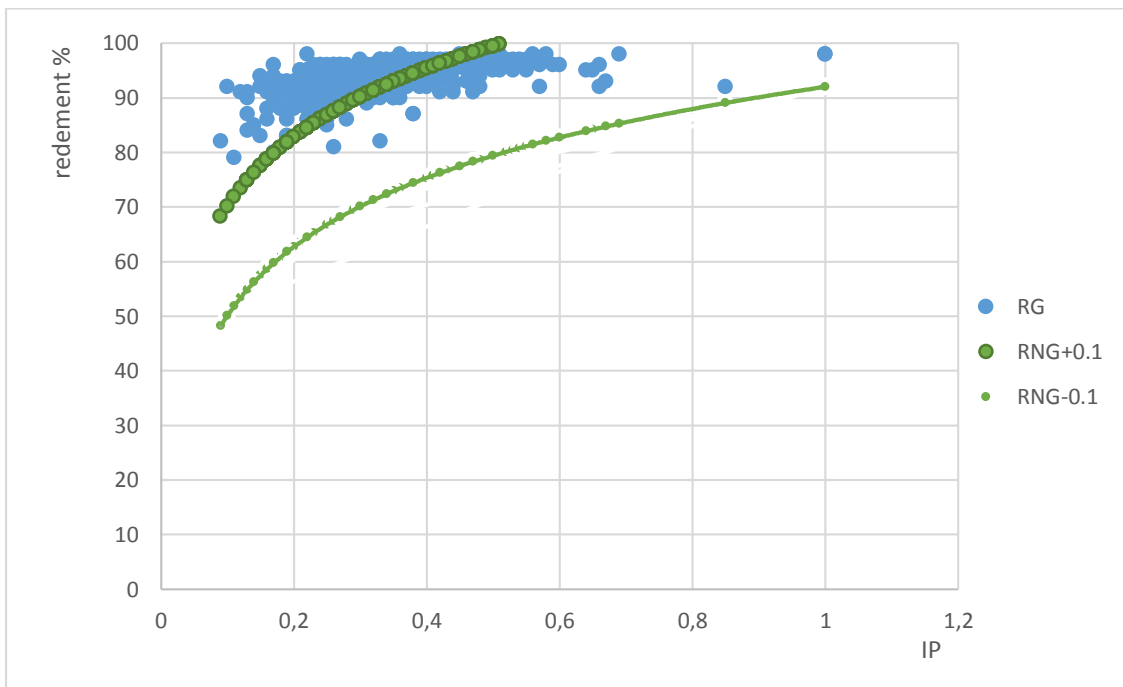
On constate qu'il y a une surestimation de la pollution où le rendement épuratoire est à chaque fois largement supérieur à celui exigé par la norme. Ainsi la STEP travaille plus qu'il n'en faut.

### V.5 La sélection des données :

Après avoir classée toutes les expériences de la station de Boumerdes, on a abouti à une matrice de 237 lignes, à partir de laquelle nous avons fait une sélection d'expériences jugées bonnes, en passant par deux étapes :

#### V.5.1 1ère Sélection :

Cette sélection est basée sur la détection des expériences où le rendement épuratoire de la station est proche du rendement optimal, autrement dit on choisit un intervalle, et on sélectionne toutes les expériences qui se trouvent à l'intérieur.



*Figure V. 8 Représentation de l'intervalle de la première sélection.*

La figure ci-dessus représente le rendement global (bleu) de 2008 à 2016 et un intervalle de 0.1 autour du rendement global lié à la norme (vert) en fonction de l'indice de pollution.

Les points bleus se trouvant dans l'intervalle vert jugés pertinents seront sélectionnés pour établir notre modèle.

### V.5.2 2<sup>ème</sup> Sélection

Cette 2<sup>ème</sup> sélection est basée sur l'énergie consommée par les aérateurs, on détecte les journées où on a le même indice de pollution et on choisit la ligne qui correspond à la consommation énergétique la plus faible.

La figure suivante explique cette méthode:

(1)			(2)		(3)
IP	RG	RGS	E	DR	
0,16	0,92	0,69	0,18	0,92	
0,16	0,93	0,69	0,24	1,11	
0,16	0,88	0,66	0,3	0,8	
0,16	0,92	0,68	0,22	1,14	
0,16	0,91	0,65	0,28	1,53	
0,16	0,86	0,69	0,3	1,88	

Figure V. 9 Etapes de la deuxième sélection

(1) : journées ayant le même indice de pollution.

(2) : déterminé la ligne qui correspond à la consommation énergétique la plus faible.

(3) : sélection de la ligne.

Ce travail de sélection des journées jugées bonnes en matière de fonctionnement de la station, a été fait grâce à un programme codé « Matlab ».

Code calcul développé sur « Matlab » :

```

tt=mean(F(:,4));tt1=mean(F(:,5));tt2=mean(F(:,6));ii1=mean(F(:,23));ii2=std(F(:,23));ii8=mean(F(:,36));%
calcul des moyennes
ii9=std(F(:,36));yy1=mean(F(:,3));yy2=mean(F(:,22));yy3=std(F(:,3));yy4=std(F(:,22));hh1=mean(F(:,6));h
h2=std(F(:,6));%calcul de l'écart-type
% F : la matrice des données
for i=1:aa(1)
    pp{1}(i,1)=d(i+1,1);
    M(i,1)=F(i,1);
    M(i,2)=sqrt(((F(i,4))^2+(F(i,5))^2+(F(i,6))^2+(F(i,6))^2)/4);% PG
    M(i,3)=sqrt((F(i,14)^2+F(i,15)^2+F(i,16)^2)/3);% RG
    M(i,4)=sqrt((F(i,18)^2+F(i,19)^2+F(i,20)^2)/3);% RGS
    M(i,5)=F(i,36)/F(i,22); % RATIO ENERGITIQUE
    M(i,6)=(F(i,23))/ii2; % DEBIT RECIRCULEE
    M(i,7)=(F(i,3))/yy3; % TEMPERATURE
    M(i,8)=(F(i,22))/yy4; % D2BIT ENTRANT A LA STEP
end
zz=max(M(:,2));
for i=1:aa(1)
    M(i,2)=M(i,2)/zz; % IP
end
M=0.01*round(M*100);
% M Matrice de départ
nb=size(M);
l=0;k=0;p=0;u=0;
    
```



```

S1=zeros(1,6);
S2=zeros(1,6);
C=zeros(1,6);

% 1 ER SELECTION PAR RAPPORT AU REDEMENT
for i=1:nb(1)
    if (M(i,3)-M(i,4))<0.1
        if M(i,3)-M(i,4)>-0.1
            l=l+1;
            for j=1:8
                S1(l,j)=M(i,j);
            end
        else k=k+1;
            for j=1:8
                C(k,j)=M(i,j); % C: Matrice de validation
            end
        end
    else k=k+1;
        for j=1:8
            C(k,j)=M(i,j);
        end
    end
end
S2=sortrows(S1,2);A=zeros(1,1);
p=size(S2);h=0;
% la 2 éme sélection
for i=1:100
    W={zeros(5,5);zeros(5,5)}; % les cellules
end
i=1;n=0;
while i <= p(1)% remplir les cellule par les journées qui correspond au même indice de pollution
    f=0;
    n=n+1;
    A=0;
    for j=1:p(1)
        if S2(i,2)==S2(j,2)
            h=h+1;
            f=f+1;
            for uu=1:8
                A(f,uu)=S2(j,uu);
            end
        else
            end
    end
    i=h+1;
    W{n}=A;
end
R=zeros(1,1);T=zeros(1,1);s=0;a=0;x=0;q=size(C); %R la dernier sélection par rapport à énergie et le
rendement
rr=size(W);
for i=1:rr(1)
    [valeur,indice]=min(W{i}(:,5));%déterminé la ligne qui correspond à la consommation énergétique la
plus faible.
    s=s+1;
    for uu=1:8
        R(s,uu)=W{i}(indice,uu);% sélectionné cette ligne
    end
    W{i}(indice,:)=[];
    x=size(W{i});
    for j=1:(x(1))

```

```

a=a+1;
for uu=1:8
T(a,uu)=W{i}(j,uu);
end
end
end
mm=size(R);lm=size(pp{1});ss=0;
for i=1:mm(1)
for j=1:lm(1)
if R(i,1)==M(j,1)
ss=ss+1;
ppp{1}(ss,1)=pp{1}(j,1); % les dates qui correspondent aux journées sélectionnées

% Abatement de la pollution
R(i,9)=sqrt((((F(i,4)-F(i,8))*F(i,22)*0.001)/5250)^2)+((((F(i,5)-F(i,9))*F(i,22)*0.001)/4050)^2)+((((F(i,6)-
F(i,10))*F(i,22)* 0.001)/5265)^2)+((((F(i,7)-F(i,11)) *F(i,22)*0.001)/50)^2)/4);

end
end

end
qq=size(T);
% les données pour l'exploitation de modèle
for i=q(1)+1:(q(1)+qq(1))
for j=1:6
C(i,j)=T((i-q(1)),j);
end
end
nn=size(C);qa=0;
for i=1:nn(1)
for j=1:lm(1)
if C(i,1)==M(j,1)
qa=qa+1;
ppp{2}(qa,1)=pp{1}(j,1);
end
end
end
end

```

Une fois ces deux étapes de sélections terminées, on aboutit aux résultats suivants :

### V.5.3 1<sup>er</sup> Cas avec un intervalle de sélection : $\pm 0.1$ du rendement optimal

Les journées sélectionnées sont illustrées dans le tableau suivant :

Pour les variables (DR, T, D) on travaille avec des variables réduites pour éliminer l'effet d'échelle.

Tableau V. 2 Journées sélectionnées pour un intervalle  $\pm 0.1$  du rendement optimal

	IP	RG	RGN	E	DR	T	D	AB
10/10/2011	0,2	0,86	0,76	0,31	5,12	5,95	4,08	1,60
13/08/2012	0,22	0,9	0,8	0,23	4,62	6,6	4,3	3,26
10/09/2012	0,24	0,91	0,81	0,2	4,4	6,23	5,54	5,35
16/08/2009	0,25	0,81	0,77	0,18	3,7	6,85	5,02	6,32

## Chapitre V : Elaboration du modèle d'optimisation

<b>26/09/2012</b>	0,26	0,91	0,82	0,2	4,74	6,14	5,25	5,28
<b>01/08/2012</b>	0,27	0,9	0,82	0,18	4,21	6,62	4,5	5,43
<b>13/10/2014</b>	0,28	0,9	0,83	0,33	4,39	5,55	4,65	2,11
<b>01/02/2009</b>	0,3	0,91	0,81	0,16	3,51	3,89	4,91	3,68
<b>27/03/2011</b>	0,31	0,93	0,84	0,15	2,78	4,62	4,72	3,04
<b>12/07/2009</b>	0,32	0,91	0,84	0,19	3,72	6,54	4,36	5,94
<b>26/11/2012</b>	0,33	0,96	0,86	0,26	4,56	4,92	4,39	2,68
<b>24/06/2012</b>	0,34	0,95	0,86	0,19	5,47	6,17	5,01	4,40
<b>07/02/2016</b>	0,35	0,95	0,86	0,2	4,69	4,31	6,75	3,67
<b>10/04/2011</b>	0,36	0,87	0,83	0,17	2,92	4,89	4,44	5,44
<b>21/06/2009</b>	0,37	0,94	0,85	0,19	3,6	6,34	4,26	2,05
<b>09/08/2011</b>	0,38	0,92	0,86	0,23	5,58	6,6	4,72	2,92
<b>12/11/2012</b>	0,39	0,93	0,85	0,18	4,1	5,01	5,16	5,35
<b>20/03/2011</b>	0,4	0,97	0,89	0,16	3,09	4,36	4,84	4,02
<b>22/07/2012</b>	0,41	0,95	0,88	0,21	4,86	5,98	4,5	3,98
<b>03/06/2014</b>	0,42	0,98	0,89	0,26	4,59	5,29	5,62	0,85
<b>16/02/2009</b>	0,43	0,92	0,88	0,16	3,18	3,95	3,94	1,19
<b>12/04/2009</b>	0,44	0,96	0,9	0,16	1,99	3,9	4,51	2,48
<b>21/09/2014</b>	0,45	0,92	0,89	0,3	5,13	6,88	5,84	2,70
<b>24/11/2014</b>	0,46	0,94	0,88	0,23	3,96	5,46	6,53	4,71
<b>29/05/2012</b>	0,47	0,96	0,89	0,25	4,53	5,55	3,08	3,16
<b>15/09/2014</b>	0,48	0,97	0,91	0,3	4,5	6,15	5,8	2,33
<b>24/08/2010</b>	0,49	0,95	0,86	0,23	4,54	6,76	4,73	2,03
<b>10/05/2009</b>	0,5	0,95	0,87	0,19	3,68	5,22	4,96	2,68
<b>29/12/2013</b>	0,51	0,97	0,87	0,22	4,44	4,16	5,86	3,61
<b>02/09/2014</b>	0,53	0,98	0,91	0,28	5,35	6,21	6,43	1,27
<b>24/04/2011</b>	0,59	0,96	0,89	0,23	1,75	4,99	5,39	1,42
<b>25/01/2009</b>	0,62	0,96	0,92	0,22	3,38	3,98	3,95	1,45
<b>16/08/2011</b>	0,63	0,95	0,91	0,24	5,58	6,52	4,98	0,56
<b>17/05/2011</b>	0,64	0,98	0,92	0,33	5,14	5,42	2,76	2,55
<b>24/10/2011</b>	0,86	0,92	0,85	0,27	5,49	5,69	4,66	2,09
<b>29/03/2009</b>	1	0,98	0,92	0,2	1,98	4,58	4,24	2,70

Au total nous avons obtenus 36 journées sélectionnées jugées des bonnes expériences où on a un rendement proche du rendement optimal et une consommation en énergie électrique minimale.

La figure ci-dessous présente la participation de chaque année dans la totalité des données sélectionnées.

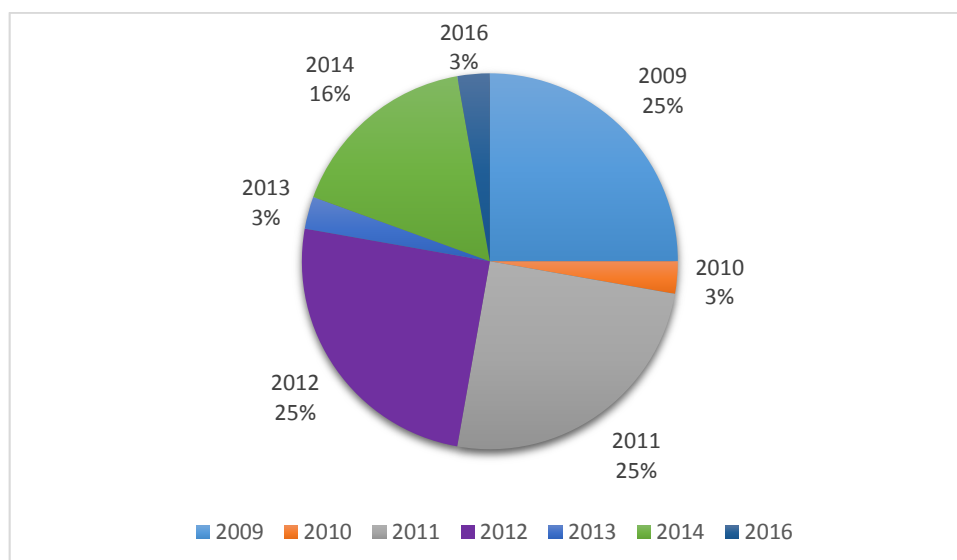


Figure V. 10 Pourcentage de chaque année sélectionnée dans la totalité des données sélectionnées.

Nous remarquons qu'à partir de 2013, peu des données ont été sélectionnées. Cela est dû au dépassement de la capacité nominale de débit qui engendre une difficulté d'exploitation de la STEP. (Figure IV.32)

### V.5.3.1 Elaboration du modèle d'optimisation

Dans cette partie nous allons exploiter les matrices résultantes de la sélection des données afin d'établir le modèle le moins contraignant permettant de simuler la consommation en énergie électrique des aérateurs avec la plus grande facilité.

Variables considérons comme a expliquer la consommation en énergie électrique des aérateurs, et comme explicatives l'indice de pollution qu'on a déjà établi «  $I_p$  », le Rabattement de la pollution «  $AB$  », débit recirculé «  $DR$  », débit entrant à la STEP «  $D$  », et la température à l'entrée de la STEP «  $T$  ».

Nous avons réalisé des régressions multiples entres les différents variables en utilisant le logiciel « XLSTAT ».

Une comparaison entre la consommation en énergie électrique des aérateurs réelle et simulée est dans notre cas, le meilleur indicateur de la qualité des modèles établis. En plus des critères d'évaluation numérique.

Tableau V. 3 Résultats des régressions multiples

<b>les modèles de la régression multiple</b>		
<b>modèle A1</b>		
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon$		
$E = 0,116 + 0,022 * DR + 0,01 * T - 0,002 * D - 0,014 * RB + 0,033 * IP$		
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$
<b>0.382</b>	0.31	12.65

<i>modèle A2</i>		
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_1X_1^2 + \dots + b_pX_p + b_pX_p^2 + \varepsilon$		
$E = 0,004 + 0,03 * DR + 0,18 * T - 0,12 * D - 0,01 * RB - 0,16 * IP - 0,002 * DR^2 - 0,01 * T^2 + 0,01 * D^2 - 0,001 * RB^2 + 0,15 * IP^2$		
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$
0.67	<b>0.55</b>	6.57

**modèle A1** : Il est clair que la valeur du  $R^2$  de ce modèle est faible, donc le modèle est rejeté sans procéder à une analyse plus approfondie.

**modèle A2** : La valeur de  $\overline{R^2}$  Ajusté de ce modèle est faible, et par conséquent il est clair qu'avec cette valeur le modèle est rejeté.

Aux vue des mauvais résultats obtenus nous avons opté pour la réduction du seuil de la 1<sup>ère</sup> sélection.

#### V.5.4 2<sup>ème</sup> Cas avec un intervalle de sélection: $\pm 0.05$ du rendement optimal.

Les journées sélectionnées sont illustrées dans le tableau suivant :

*Tableau V. 4 Journées sélectionnées pour un intervalle  $\pm 0.05$  du rendement optimal*

	IP	RG	RGN	E	DR	T	D	AB
16/08/2009	0,25	0,81	0,77	0,18	3,7	6,85	5,02	1,60
08/07/2012	0,31	0,9	0,86	0,2	4,68	6,55	5,13	3,26
24/09/2013	0,33	0,82	0,81	0,3	5,06	6,07	4,97	5,35
10/04/2011	0,36	0,87	0,83	0,17	2,92	4,89	4,44	6,32
27/07/2014	0,37	0,87	0,84	0,27	4,86	6,28	5,33	5,28
07/07/2014	0,4	0,93	0,89	0,28	4,63	5,98	5,53	5,43
16/02/2009	0,43	0,92	0,88	0,16	3,18	3,95	3,94	2,11
24/05/2009	0,44	0,92	0,88	0,19	2,65	5,58	4,45	3,68
21/09/2014	0,45	0,92	0,89	0,3	5,13	6,88	5,84	3,04
17/08/2015	0,46	0,91	0,87	0,35	4,76	6,35	5,87	5,94
25/08/2014	0,51	0,96	0,91	0,29	5,2	6,24	6,07	2,68
08/02/2009	0,53	0,96	0,92	0,3	3,25	3,52	2,41	4,40
25/01/2009	0,62	0,96	0,92	0,22	3,38	3,98	3,95	3,67
16/08/2011	0,63	0,95	0,91	0,24	5,58	6,52	4,98	5,44

On remarque une réduction significative des journées sélectionnées.

### V.5.4.1 Elaboration des modèles

Le même procédé que précédemment a été utilisé

*Tableau V. Résultats des régressions multiples*

<b>les modèles de la régression multiple</b>		
<b><u>modèle B1</u></b>		
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon$		
$E = 0,073 + 0,044 * DR - 0,017 * T + 0,007 * D + 0,010 * AB + 0,032 * IP$		
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$
<b>0.49</b>	0.21	1.67
<b><u>modèle B2</u></b>		
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_1X_1^2 + \dots + b_pX_p + b_pX_p^2 + \varepsilon$		
$E = -0,29 + 0,24 * DR + 0,06 * T - 0,22 * D + 0,03 * RB + 0,87 * Ip - 0,03 * DR^2 - 0,004 * T^2 + 0,02 * D^2 - 0,003 * RB^2 - 0,82 * Ip^2$		
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$
0.78	<b>0.44</b>	8.10

On remarque une certaine amélioration de la qualité de la régression comparé aux deux modèles précédents. Mais les valeurs de  $R^2$  pour le *modèle B1* et  $\overline{R^2}$  ajusté pour le *modèle B2* restent toujours faibles et par conséquent ont été rejetés sans procéder à une analyse plus approfondie.

Au terme de cette première partie on remarque que cette formule d'indice de pollution ne nous permettra pas de trouver un modèle de régression qui s'adapte aux problématiques étudiées. Cette formule d'indice de pollution ne prend pas en considération le poids de la contribution de chaque paramètre dans la caractérisation de l'effluent.

## V.6 2<sup>ème</sup> Indice de Pollution

Nous avons recherché un 2<sup>ème</sup> indice de pollution pour pouvoir modéliser la consommation en énergie électrique des aérateurs et nous avons pris en considération l'indice de qualité établi par l'étude Tesnim Abassi sur les indices de qualité.

### V.6.1 Les étapes d'élaboration d'un indice de pollution

Les quatre étapes suivantes sont le plus souvent associées à l'élaboration de tout indice de pollution :

- a. Sélection des paramètres.
- b. Transformation des paramètres des différentes unités et dimensions à une échelle commune.
- c. Attribution d'un poids à chaque paramètre.
- d. Agrégation des sous-indices pour obtenir un score d'indice final.

Application de ces étapes pour le cas étudié :

#### a) La sélection des paramètres

On va garder les mêmes paramètres sélectionnés dans l'indice précédent : DBO5, DCO, MES, NH4+.

#### b) Transformation des paramètres des différentes unités et dimensions à une échelle commune :

Dans notre cas, les paramètres choisis (DBO, DCO, MES, et NH4+) ont déjà la même unité (mg/l).

#### c) Attribuer un poids à chaque paramètre

Après avoir sélectionné les paramètres qu'on doit utiliser dans le calcul de l'indice de pollution, on cherche à les pondérer selon leur degré d'importance.

L'étape principale pour la détermination du poids de chaque paramètre est de faire un classement par rapport à leurs degrés d'importance. Dans la majorité des études effectuées sur les différents indices, le classement est fait par des experts dans les domaines étudiés.

N'ayant pas cette compétence, nous nous sommes tournés vers l'ACP (Analyse en Composantes Principales), méthode statistique qui permet de hiérarchiser les paramètres et de chiffrer leur importance les uns par rapport aux autres.

#### Application de la méthode d'ACP

Afin d'obtenir un classement des quatre paramètres sélectionnés, on a fait appel à l'ACP qui nous permettra de mesurer l'importance de chaque paramètre dans le phénomène étudié.

L'application de cette méthode sur les données de la STEP de Boumerdes, et nous avons obtenu le degré de participation de chaque paramètre, et qui se traduit par la quantité d'information extraite de chaque donnée après l'application de l'ACP.

Vu le grand nombre de données à manipuler, nous avons utilisé le logiciel « XLSTAT ».

Les résultats obtenus sont les suivants:

Matrice de corrélation :

*Tableau V. 5 Matrice de corrélation des paramètres sélectionnés*

Variables	$MES_b$	$DBO5_b$	$DCO_b$	$NH4 +_b$
$MES_b$	1	-	-	-
$DBO5_b$	0,328	1	-	-
$DCO_b$	0,215	0,658	1	
$NH4 +_b$	0,124	0,475	0,577	1

Matrice de corrélation entre les composantes principales CP' et les variables :

*Tableau V. 6 Matrice de corrélation entre les CP' et les variables sélectionnées*

	F1	F2	F3	F4
$MES_b$	0,198	<b>0,759</b>	0,040	0,003
$DBO5_b$	<b>0,760</b>	0,003	0,148	0,119
$DCO_b$	<b>0,755</b>	0,033	0,034	0,178
$NH4 +_b$	<b>0,580</b>	0,129	0,274	0,016

A partir de ce tableau, on remarque d'une part une bonne corrélation entre les variables ( $DBO5_b$ ,  $DCO_b$ ,  $NH4 +_b$ ) et la première composante, et d'autre part entre les variables  $MES_b$ , et la deuxième composante.

Le système de notation (classement) prend en considération la corrélation des paramètres avec les composantes principales " $F_i$ ". Les paramètres de pollution qui sont corrélés avec la première composante seront mieux classés que les paramètres corrélés avec la deuxième composante. De plus, ceux corrélés à la même composante seront eux aussi classés entre eux selon leur corrélation, etc.....

Le classement et le poids attribué à chaque paramètre de pollution est comme suit :

*Tableau V. 7 Classement et poids attribuer à chaque paramètre sélectionné*

variable	le classement	poids temporaire	poids totale
$DBO5_b$	1	1	0,48
$DCO_b$	2	0.5	0,24
$NH4 +_b$	3	0.33	0.16
$MES_b$	4	0.25	0,12

#### d) Agrégation des sous-indices pour obtenir un score d'indice final

La formule générale de l'indice de pollution est :

$$IP=1-WQI$$

WQI étant un indice de qualité des eaux établi par l'étude de (Tasnim Abassi).



Et :

$$WQI = \prod_{i=1}^n (I_i)^{W_i}$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1$$

$W_i$  : Le poids associé à chaque paramètre sélectionné.

$I_i$  : Le sous-indice de qualité associé à chaque paramètre sélectionné.

### La détermination des sous-indices de pollution

Les sous-indices sont déterminés de manière linéaire :

$$I_{DBO5} = 1 - \left( \frac{DBO5br - 30}{1000} \right)$$

$$I_{DCO} = 1 - \left( \frac{DCObr - 90}{1100} \right)$$

$$I_{MES} = 1 - \left( \frac{MESbr - 30}{1000} \right)$$

$$I_{NH4+} = 1 - \left( \frac{NH4+br - 0.5}{100} \right)$$

$I_i = 1$  : tous les paramètres polluants sont inférieurs aux normes de limite de pollution en vigueur.

$I_i = 0$  : l'eau est très polluée

Les valeurs 30, 90, 30, 0.5 représentent les normes de rejets correspondants aux paramètres sélectionnés.

### Elaboration de l'indice final

Après avoir déterminé les sous-indices, on détermine le WQI (Water Quality Indice) via la formule suivante :

$$WQI = \prod_{i=1}^n (I_i)^{W_i}$$

$$WQI = I_{DBO5}^{W1} * I_{DCO}^{W2} * I_{NH4+}^{W3} * I_{MES}^{W4}$$

Les poids  $W_i$  sont déjà déterminés dans le paragraphe précédent

$$W1=0.48, W2=0.24, W3=0.16, W4=0.12.$$

$$WQI = I_{DBO5}^{0.48} * I_{DCO}^{0.24} * I_{NH4+}^{0.16} * I_{MES}^{0.12}$$

$WQI = 1$  : la pollution est inférieure à la norme (eau presque potable).

$WQI = 0$  : l'eau est très polluée.

Pour passer d'un indice de qualité à un indice de pollution on utilise la relation suivante :

$$IP = 1 - WQI$$

$I_p=1$  : l'eau est très polluée.

$I_p=0$  : la pollution est inférieure à la norme (eau presque potable).

### V.6.2 Elaboration du modèle de régression multiple :

Dans cette partie nous allons exploiter les matrices résultantes de la sélection des données avec le nouveau indice de pollution afin d'établir un modèle de régression permettant de simuler la consommation en énergie électrique des aérateurs.

La variable à expliquer est la consommation en énergie électrique des aérateurs, les variables explicatives sont l'indice de pollution qu'on a déjà établi «  $I_p$  », Rabattement de la pollution «  $AB$  », débit recirculé «  $DR$  », débit entrant à la STEP «  $D$  », et la température à l'entrée de la STEP «  $T$  ».

#### V.6.2.1 1<sup>er</sup> Cas avec un intervalle de sélection : $\pm 0.1$ du rendement optimal

Les résultats de cette étape de sélection sont illustrés dans le tableau suivant :

*Tableau V. 8 Journées sélectionnées pour un intervalle  $\pm 0.1$  du rendement optimal*

	IP	RG	RGN	E	DR	T	D	AB
13/11/2011	0,12	0,86	0,78	0,3	4,42	5,29	4,88	0,55
16/08/2009	0,15	0,81	0,77	0,18	3,68	6,94	5,41	1,27
13/08/2012	0,17	0,9	0,8	0,23	4,6	6,69	4,63	1,94
01/02/2012	0,18	0,91	0,83	0,27	4,74	3,8	4,29	1,45
10/09/2012	0,19	0,91	0,81	0,2	4,38	6,31	5,96	1,53
01/08/2012	0,2	0,9	0,82	0,18	4,19	6,71	4,85	1,81
12/11/2012	0,21	0,93	0,85	0,18	4,08	5,08	5,55	1,42
26/09/2012	0,22	0,91	0,82	0,2	4,71	6,22	5,65	1,22
01/07/2012	0,23	0,91	0,85	0,19	4,53	6,58	4,83	1,48
08/07/2012	0,24	0,9	0,86	0,2	4,66	6,64	5,53	0,98
12/07/2009	0,25	0,91	0,84	0,19	3,7	6,63	4,70	2,33
27/03/2011	0,26	0,93	0,84	0,15	2,76	4,68	5,09	0,94
01/02/2009	0,27	0,91	0,81	0,16	3,49	3,94	5,29	5,28
24/06/2012	0,28	0,95	0,86	0,19	5,44	6,25	5,39	2,26
10/04/2011	0,29	0,87	0,83	0,17	2,91	4,96	4,78	1,10
05/04/2009	0,3	0,93	0,86	0,19	1,69	4,6	4,70	5,44
12/04/2009	0,31	0,96	0,9	0,16	1,98	3,95	4,85	2,05
12/05/2014	0,32	0,96	0,89	0,25	5,22	5,62	5,88	2,56
19/04/2009	0,33	0,95	0,88	0,2	3,5	4,32	5,06	2,92
20/03/2011	0,34	0,97	0,89	0,16	3,08	4,42	5,22	2,81
10/05/2009	0,35	0,95	0,87	0,19	3,66	5,29	5,34	3,98
24/05/2009	0,36	0,92	0,88	0,19	2,63	5,65	4,79	1,19
09/08/2011	0,37	0,92	0,86	0,23	5,55	6,68	5,08	6,53
19/05/2014	0,38	0,97	0,9	0,26	5,35	5,51	5,76	7,15

<b>16/02/2009</b>	0,39	0,92	0,88	0,16	3,17	4	4,24	2,11
<b>01/03/2009</b>	0,41	0,96	0,89	0,19	3,46	4,06	4,67	3,04
<b>10/03/2009</b>	0,44	0,95	0,89	0,22	3,51	4,25	4,10	5,94
<b>17/05/2011</b>	0,46	0,98	0,92	0,33	5,11	5,49	2,97	4,04
<b>25/01/2009</b>	0,53	0,96	0,92	0,22	3,37	4,04	4,26	6,32

Dans cette partie on va rajouter une autre forme de modèles de régression multiple :

**Modèle de la forme**  $Y = b_0 * X_1^{b1} * X_2^{b2} * ... * X_p^{bp} + \epsilon$

Cette forme de régression multiple a notamment été utilisée par l'USGS (United States Geological Survey) dans l'estimation de fréquences des inondations.

Il est possible de linéariser cette équation par l'introduction d'un logarithme comme suit :

Prenons l'exemple d'une régression à deux variables explicatives  $X_1$  et  $X_2$ .

$$Y = b_0 * X_1^{b1} * X_2^{b2} + \epsilon$$

$$\ln(Y) = \ln(b_0 * X_1^{b1} * X_2^{b2}) + \epsilon$$

$$\ln(Y) = \ln(b_0) + \ln(X_1^{b1}) + \ln(X_2^{b2}) + \epsilon$$

$$\ln(Y) = \ln(b_0) + b_1 * \ln(X_1) + b_2 * \ln(X_2) + \epsilon$$

C'est une équation de la forme :

$$Y' = b_0' + b_1 X_1' + b_2 X_2' + \epsilon$$

Cela revient à faire une régression multiple classique (linéaire) sur les nouvelles variables qui sont :

$$Y' = \ln(Y)$$

$$X_1' = \ln(X_1)$$

$$X_2' = \ln(X_2)$$

A noter que les termes  $b_0$  et  $\epsilon$  sont des termes généraux représentant respectivement la constante et l'erreur de la régression.

D'une manière générale, une régression multiple de la forme :

$$Y = b_0 * X_1^{b1} * X_2^{b2} * ... * X_p^{bp} + \epsilon$$

n'est autre qu'une régression linéaire multiple de la forme

$$Y' = b_0' + b_1 X_1' + b_2 X_2' + \epsilon$$

**Avec :**  $Y' = \ln(Y), X_i' = \ln(X_i) \quad i = 1, \dots, p.$

Les résultats de la régression multiple sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau V. 9 Résultats de la régression multiple

les modèles de régression multiple			
<b>modèle C1</b>			
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon$			
$E = 0,30 + 0,03 * DR - 0,007 * T - 0,03 * D + 0,004 * AB - 0,09 * IP$			
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.621</b>	<b>0.438</b>	7.52	1.618
<b>modèle C2</b>			
$Y = b_0 * X_1^{b1} * X_2^{b2} * \dots * X_p^{bp} + \varepsilon$			
$E = 0,313 * DR^{0.520} * T^{-0.155} * D^{-0.675} * AB^{0.038} * IP^{-0.133}$			
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.557</b>	<b>0.411</b>	7.82	1.686
<b>modèle C3</b>			
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_1X_1^2 + \dots + b_pX_p + b_pX_p^2 + \varepsilon$			
$E = 0,23 - 0,03 * DR + 0,17 * T - 0,09 * D + 0,003 * AB - 0,93 * IP + 0,008 * DR^2 - 0,02 * T^2 + 0,007 * D^2 + 0,00004 * AB^2 + 1,29 * IP^2$			
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.842</b>	0.754	9.6	1.373

**modèle C1 et C2** : La valeur de  $\overline{R^2}$  ajusté n'est pas satisfaisante, donc les deux modèles sont rejetés sans procéder à une analyse plus approfondie.

**modèle C3** Les valeurs de  $R^2$ ,  $\overline{R^2}$ , et  $F$  sont satisfaisantes, l'analyse des résidus montre qu'ils sont indépendants ( $DW = 1,373$ ) et suivent une loi normale comme on peut le constater sur l'histogramme :

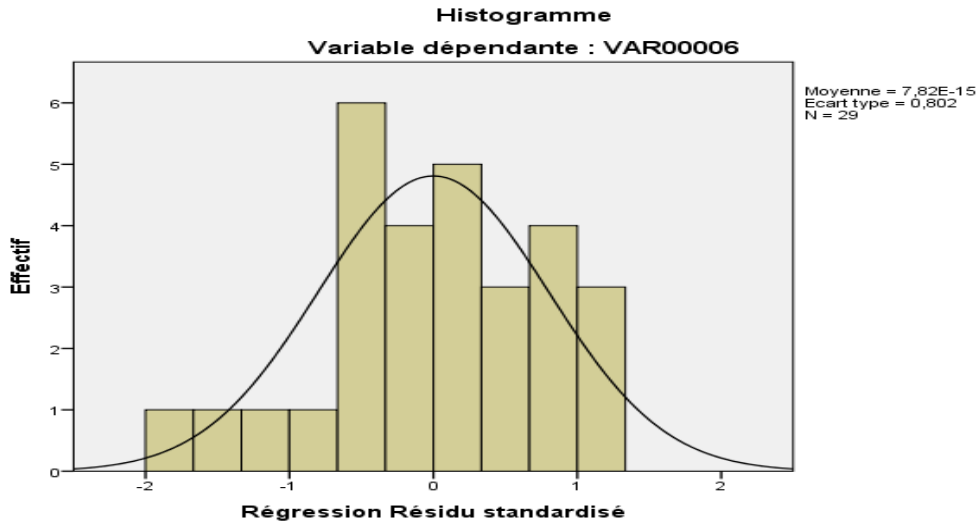


Figure V. 11 Histogramme des résidus modèle C3

Le graphe ci-dessus représente histogramme des résidus du modèle C3. L'allure de l'histogramme représentant la distribution groupée en classes des résidus estimés est une aide à la vérification du postulat de normalité.

Alors on constate à partir de ce graphe que notre résidu est normalisé.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme d'un graphe :

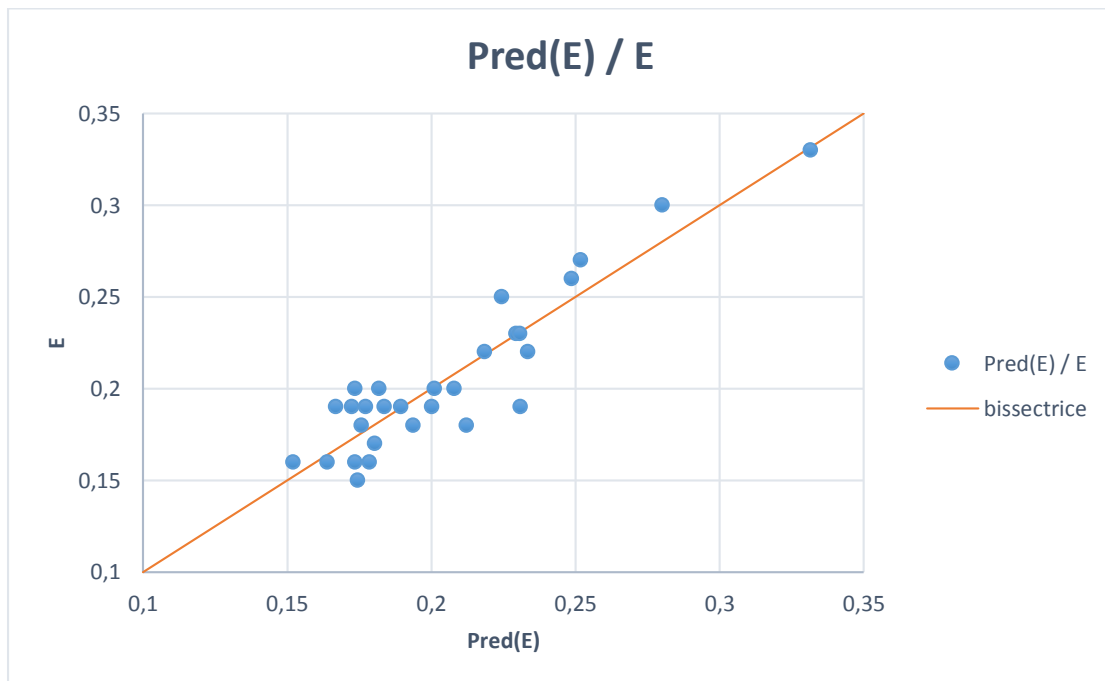


Figure V. 12 Résultat de simulation modèle C3

Le graphe ci-dessus représente l'énergie observée en fonction de l'énergie simulée à partir de modèle C3, on remarque que le nuage de point est proche de la bissectrice, ce qui confirme les résultats des critères d'évaluations numériques déjà calculé.

**V.6.2.2<sup>eme</sup> Cas avec un intervalle de sélection :  $\pm 0.05$  du rendement optimal**

Les résultats de la sélection sont illustrés dans tableau suivant :

*Tableau V. 10 Journées sélectionnées pour un intervalle  $\pm 0.05$  du rendement optimal*

	IP	RG	RGN	E	DR	T	D	AB
16/08/2009	0,15	0,81	0,77	0,18	3,68	6,94	5,41	1,27
24/09/2013	0,19	0,82	0,81	0,3	5,03	6,15	5,35	1,89
27/07/2014	0,23	0,87	0,84	0,27	4,83	6,37	5,74	0,90
08/07/2012	0,24	0,9	0,86	0,2	4,66	6,64	5,53	0,98
10/04/2011	0,29	0,87	0,83	0,17	2,91	4,96	4,78	1,10
21/09/2014	0,32	0,92	0,89	0,3	5,1	6,97	6,29	3,57
07/07/2014	0,33	0,93	0,89	0,28	4,61	6,06	5,95	2,61
09/06/2014	0,35	0,92	0,88	0,33	5,08	5,65	5,24	2,50
24/05/2009	0,36	0,92	0,88	0,19	2,63	5,65	4,79	1,19
16/08/2011	0,37	0,95	0,91	0,24	5,55	6,61	5,36	3,25
16/02/2009	0,39	0,92	0,88	0,16	3,17	4	4,24	2,11
25/01/2009	0,53	0,96	0,92	0,22	3,37	4,04	4,26	6,32

Les résultats de la régression multiple sont illustrés dans tableau suivant

*Tableau V. 11 Résultats de la régression multiple*

les modèles de régression multiple			
<b><u>modèle D1</u></b>			
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon$			
$E = -0,04 + 0,04 * DR - 0,04 * T + 0,06 * D + 0,005 * AB - 0,04 * Ip$			
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
0.730	<b>0.506</b>	<b>3.25</b>	1.617
<b><u>modèle D2</u></b>			
$Y = b_0 * X_1^{b1} * X_2^{b2} * \dots * X_p^{bp} + \varepsilon$			
$E = 0,037 * DR^{0.803} * T^{-1.034} * D^{1.394} * AB^{0.074} * IP^{-0.124}$			
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
0.754	<b>0.526</b>	<b>3.79</b>	1.675

<i>modèle D3</i>			
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_1X_1^2 + \dots + b_pX_p + b_pX_p^2 + \varepsilon$			
$E = 1,69 + 0,15 * DR + 0,87 * T - 1,54 * D + 0,03 * AB - 1,21 * Ip - 0,01 * DR^2 - 0,08 * T^2 + 0,14D^2 - 0,004 * AB^2 + 1,75 * Ip^2$			
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.930</b>	<b>0.226</b>	15.62	3.013

**modèles D1 et D2** : Les valeurs de  $R^2$  et  $\overline{R^2}$  ( $R^2$  ajusté) sont satisfaisantes, mais la valeur de  $F$  est inférieure à  $F(p, n - p - 1)$  de la table de Fisher :  $F(5,6) = 4.387$  donc les deux modèles sont rejetés sans procéder à une analyse plus approfondie.

**modèle D3** : La valeur  $\overline{R^2}$  ( $R^2$  ajusté) n'est pas satisfaisante, le modèle est rejeté.

### V.7 3<sup>ème</sup> Indice de Pollution

Dans le but de réduire le nombre de paramètre d'entrée, on a éliminé le  $NH_4 +$  et on va s'intéresser aux paramètres de pollution liés à la pollution organique.

#### a. La sélection des paramètres

Dans cette partie on va s'intéresser aux paramètres de pollutions liées à la pollution organique : DBO5, DCO, MES.

#### b. Transformation des paramètres des différentes unités et dimensions à une échelle commune :

Dans notre cas, les paramètres choisis (DBO, DCO et MES) ont déjà la même unité (mg/l).

#### c. Attribuer un poids à chaque paramètre

Afin d'obtenir un classement des trois paramètres sélectionnés, on fait appel à l'ACP qui nous permettra de mesurer l'importance de chaque paramètre dans le phénomène étudié.

L'application de l'ACP aux données de la STEP de Boumerdes a abouti aux résultats suivants :

**Matrice de corrélation :**

*Tableau V. 12 Matrice de corrélation des paramètres sélectionnés*

Variables	$MES_b$	$DBO5_b$	$DCO_b$
$MES_b$	1	-	-
$DBO5_b$	0,208	1	-
$DCO_b$	0,065	0,630	1

Matrice de corrélation entre les composantes principales CP' et les variables :

Tableau V. 13 Matrice de corrélation entre les CP' et les variables sélectionnées

	F1	F2	F3
$MES_b$	0,127	<b>0,864</b>	0,009
$DBO5_b$	<b>0,813</b>	0,006	0,180
$DCO_b$	<b>0,745</b>	0,091	0,163

Le système de notation (classement) prend en considération la corrélation des paramètres avec les composantes principales " $F_i$ ". Les paramètres de pollution qui sont corrélés avec la première composante seront mieux classés que les paramètres corrélés avec la deuxième composante. Les paramètres corrélés à la même composante seront classés entre eux de la même manière.

Le classement et le poids attribué à chaque paramètre de pollution est comme suit :

Tableau V. 14 Classement et Poids attribuer à chaque paramètre sélectionnés

variable	le classement	poids temporaire	poids totale
$DBO5_b$	1	1	<b>0,54</b>
$DCO_b$	2	0.5	<b>0,27</b>
$MES_b$	3	0,33	<b>0,19</b>

d. Agrégation des sous-indices pour obtenir un score d'indice final

$$WQI = \prod_{i=1}^n (I_i)^{W_i}$$

$$\sum_i^n W_i = 1$$

$W_i$  : Le poids associé à chaque paramètre sélectionné.

$I_i$  : Le sous-indice de qualité associé à chaque paramètre sélectionné.

La détermination des sous-indices de pollution

Les sous-indices sont déterminés de manière linéaire :

$$I_{DBO5} = 1 - \left( \frac{DBO5br - 30}{1000} \right)$$

$$I_{DCO} = 1 - \left( \frac{DCObr - 90}{1100} \right)$$

$$I_{MES} = 1 - \left( \frac{MESbr - 30}{1000} \right)$$

$I_i=1$  : tous les paramètres polluants sont inférieurs aux normes de limite de pollution en vigueur.

$I_i=0$  : l'eau est très polluée



## Elaboration de l'indice final

A prés avoir déterminé les sous-indices, on détermine le WQI (Water Quality Indice) via la formule suivante :

$$WQI = \prod_{i=1}^n (I_i)^{W_i}$$

$$WQI = I_{DBO5}^{W1} * I_{DCO}^{W2} * I_{MES}^{W3}$$

Les poids  $W_i$  sont déjà déterminés dans le paragraphe précédent.

$$W1=0.54, W2=0.27, W3=0.19,$$

$$WQI = I_{DBO5}^{0.54} * I_{DCO}^{0.27} * I_{MES}^{0.19}$$

**WQI=1** : la pollution est inférieure à la norme (eau presque potable).

**WQI=0** : l'eau est très polluée.

Pour passer d'un indice de qualité à un indice de pollution on utilise la relation suivante :

$$IP = 1 - WQI.$$

**Ip=1** : l'eau est très polluée.

**Ip=0** : la pollution est inférieure à la norme (eau presque potable).

### V.7.1 Elaboration du modèle de régression multiple

Dans cette partie nous allons exploiter les matrices résultantes de la sélection des données avec le nouveau indice de pollution afin d'établir un modèle de régression permettant de simuler la consommation en énergie électrique des aérateurs avec la plus grande facilité.

La variable a expliquer est la consommation en énergie électrique des aérateurs, les variables explicatives sont l'indice de pollution qu'on a déjà établi «  $Ip$  », Rabattement de la pollution «  $AB$  », débit recirculés «  $Dr$  », débit entrant à la STEP «  $D$  », et la température à l'entrés de la STEP «  $T$  ».

#### V.7.1.1 1<sup>er</sup> Cas avec un intervalle de sélection : $\pm 0.1$ du rendement optimal

Les résultats de la sélection sont illustrés dans le tableau suivant :

*Tableau V. 15 Journées sélectionnées pour un intervalle  $\pm 0.1$  du rendement optimal*

	IP	RG	RGN	E	DR	T	D	AB
10/10/2011	0,11	0,86	0,76	0,31	5,45	6,09	3,6	0,47
13/11/2011	0,13	0,86	0,78	0,3	4,73	5,33	3,99	0,62
16/08/2009	0,15	0,81	0,77	0,18	3,94	7,01	4,43	0,68
15/11/2015	0,16	0,91	0,81	0,24	4,87	5,63	5,48	0,87
01/08/2012	0,17	0,9	0,82	0,18	4,49	6,77	3,97	0,69
10/09/2012	0,18	0,91	0,81	0,2	4,69	6,37	4,89	0,78

<b>01/02/2009</b>	0,19	0,91	0,81	0,16	3,74	3,97	4,33	0,84
<b>12/11/2012</b>	0,2	0,93	0,85	0,18	4,37	5,12	4,55	1,08
<b>12/07/2009</b>	0,21	0,91	0,84	0,19	3,96	6,69	3,85	0,79
<b>15/07/2012</b>	0,22	0,9	0,85	0,19	5,53	6,66	4,27	0,92
<b>07/06/2009</b>	0,23	0,91	0,83	0,18	3,92	5,89	4,2	0,87
<b>27/03/2011</b>	0,24	0,93	0,84	0,15	2,96	4,72	4,17	0,89
<b>06/06/2012</b>	0,25	0,96	0,87	0,17	5,17	6,32	4,07	1,09
<b>06/07/2009</b>	0,26	0,94	0,85	0,2	3,91	6,72	3,7	0,90
<b>10/04/2011</b>	0,27	0,87	0,83	0,17	3,12	5	3,92	0,94
<b>28/08/2011</b>	0,28	0,93	0,87	0,21	6,06	6,89	4,48	1,07
<b>24/08/2010</b>	0,29	0,95	0,86	0,23	4,84	6,91	4,18	1,36
<b>24/06/2012</b>	0,3	0,95	0,86	0,19	5,83	6,31	4,42	1,08
<b>26/04/2015</b>	0,31	0,97	0,88	0,23	5,91	5,31	5,51	1,48
<b>10/05/2009</b>	0,32	0,95	0,87	0,19	3,93	5,34	4,38	1,39
<b>20/06/2012</b>	0,33	0,96	0,89	0,24	5,03	6,38	3,72	1,07
<b>13/12/2015</b>	0,34	0,96	0,88	0,15	4,87	4,35	5,08	1,47
<b>20/03/2011</b>	0,35	0,97	0,89	0,16	3,3	4,46	4,27	1,27
<b>16/02/2009</b>	0,36	0,92	0,88	0,16	3,4	4,04	3,47	1,05
<b>24/04/2011</b>	0,37	0,96	0,89	0,23	1,86	5,1	4,76	1,76
<b>25/08/2014</b>	0,38	0,96	0,91	0,29	5,54	6,38	5,36	1,86
<b>16/01/2013</b>	0,39	0,96	0,9	0,28	3,48	3,75	3,54	1,21
<b>24/05/2009</b>	0,4	0,92	0,88	0,19	2,82	5,7	3,92	1,35
<b>01/03/2009</b>	0,41	0,96	0,89	0,19	3,71	4,1	3,83	1,28
<b>05/08/2015</b>	0,42	0,93	0,86	0,23	5,58	5,81	5,87	2,43
<b>17/05/2011</b>	0,45	0,98	0,92	0,33	5,48	5,54	2,43	1,02
<b>25/01/2009</b>	0,46	0,96	0,92	0,22	3,61	4,07	3,49	1,45
<b>01/12/2015</b>	0,47	0,98	0,9	0,26	4,99	4,74	5,32	1,99
<b>29/03/2009</b>	0,62	0,98	0,92	0,2	2,11	4,69	3,74	2,24
<b>09/09/2015</b>	0,84	0,98	0,95	0,33	5,67	6,37	5,78	3,75

Les résultats de la régression sont illustrés dans le tableau suivant :

**Tableau V. 16 Résultats de la régression multiple pour le cas un intervalle de sélection  $\pm 0.1$  du rendement optimal**

<b>les modèles de régression multiple</b>			
<b><u>modèle E1</u></b>			
<b><math>Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon</math></b>			
<b><math>E = 0,24 + 0,02 * DR - 0,003 * T - 0,04 * D + 0,09 * RB - 0,17 * Ip</math></b>			
<b><math>R^2</math></b>	<b><math>\overline{R^2}</math></b>	<b><math>F</math></b>	<b><math>DW</math></b>
<b>0.386</b>	<b>0.28</b>	<b>3.65</b>	<b>1.41</b>

<b><i>modèle E2</i></b>			
$Y = b_0 * X_1^{b1} * X_2^{b2} * ... * X_p^{bp} + \varepsilon$			
$E = 0,224 * DR^{0.439} * T^{0.013} * D^{-0.945} * AB^{0.736} * Ip^{-0.450}$			
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.342</b>	<b>0.208</b>	<b>3.14</b>	<b>1.413</b>
<b><i>modèle E3</i></b>			
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_1X_1^2 + ... + b_pX_p + b_pX_p^2 + \varepsilon$			
$E = 0,92 - 0,02 * DR + 0,02 * T - 0,30 * D + 0,14 * RB - 0,81 * Ip$ $+ 0,005 * DR^2 - 0,002 * T^2 + 0,03 * D^2 - 0,03$ $* RB^2 + 0,82 * Ip^2$			
$R^2$	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.579</b>	<b>0.403</b>	<b>3.59</b>	<b>1.48</b>

**modèles E1, E2 et E3** : Les valeurs de  $R^2$ , et  $\overline{R^2}$  ne sont pas satisfaisantes, donc les trois modèles sont rejetés.

### V.7.1.22<sup>ème</sup> Cas avec un intervalle de sélection : $\pm 0.05$ du rendement optima

Les résultats de la sélection sont illustrés dans le tableau suivant :

**Tableau V. 17 Journées sélectionnées pour un intervalle  $\pm 0.05$  du rendement optimal**

	IP	RGS	RGN	E	DR	T	D	AB
<b>16/08/2009</b>	0,15	0,81	0,77	0,18	3,94	7,01	4,43	0,68
<b>24/09/2013</b>	0,16	0,82	0,81	0,3	5,4	6,21	4,39	0,85
<b>27/07/2014</b>	0,19	0,87	0,84	0,27	5,18	6,42	4,7	1,03
<b>08/07/2012</b>	0,23	0,9	0,86	0,2	4,99	6,7	4,53	0,95
<b>20/11/2011</b>	0,26	0,91	0,87	0,3	5,42	5,1	4,16	1,08
<b>10/04/2011</b>	0,27	0,87	0,83	0,17	3,12	5	3,92	0,94
<b>09/08/2015</b>	0,28	0,91	0,88	0,22	5,26	6,61	5,78	1,49
<b>07/07/2014</b>	0,31	0,93	0,89	0,28	4,94	6,11	4,87	1,35
<b>21/09/2014</b>	0,32	0,92	0,89	0,3	5,47	7,03	5,15	1,51
<b>09/06/2014</b>	0,33	0,92	0,88	0,33	5,44	5,71	4,3	1,19
<b>16/02/2009</b>	0,36	0,92	0,88	0,16	3,4	4,04	3,47	1,05
<b>25/08/2014</b>	0,38	0,96	0,91	0,29	5,54	6,38	5,36	1,86

## Chapitre V : Elaboration du modèle d'optimisation

<b>24/05/2009</b>	0,4	0,92	0,88	0,19	2,82	5,7	3,92	1,35
<b>08/02/2009</b>	0,42	0,96	0,92	0,3	3,46	3,6	2,12	0,79
<b>25/01/2009</b>	0,46	0,96	0,92	0,22	3,61	4,07	3,49	1,45
<b>09/09/2015</b>	0,84	0,98	0,95	0,33	5,67	6,37	5,78	3,75

Les résultats de la régression multiple sont illustrés dans tableau le suivant :

**Tableau V. 18 Résultats de la régression multiple**

les modèles de régression multiple			
<b><u>modèle F1</u></b>			
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon$			
$E = 0,24 + 0,03 * DR - 0,003 * T - 0,04 * D + 0,09 * RB - 0,17 * Ip$			
<b><math>R^2</math></b>	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.822</b>	0.734	9.26	1.96
<b><u>modèle F2</u></b>			
$Y = b_0 * X_1^{b1} * X_2^{b2} * \dots * X_p^{bp} + \varepsilon$			
$E = 0,122 * DR^{1.143} * T^{0.471} * D^{-1.623} * AB^{0.727} * Ip^{-0.331}$			
<b><math>R^2</math></b>	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.859</b>	0.788	12.14	2.322
<b><u>modèle F3</u></b>			
$Y = b_0 + b_1X_1 + b_1X_1^2 + \dots + b_pX_p + b_pX_p^2 + \varepsilon$			
$E = 0,92 - 0,02 * DR + 0,02 * T - 0,30 * D + 0,14 * RB - 0,81 * Ip + 0,005 * DR^2 - 0,002 * T^2 + 0,03 * D^2 - 0,03 * RB^2 + 0,82 * Ip^2$			
<b><math>R^2</math></b>	$\overline{R^2}$	$F$	$DW$
<b>0.908</b>	0.724	4.93	1.497

**Modèle F1** : Les valeurs de  $R^2$ ,  $\overline{R^2}$ , et  $F$  sont satisfaisantes, l'analyse des résidus montre qu'ils sont indépendants ( $DW = 1,96$ ) et suivent une loi normale comme on peut le constater sur l'histogramme :

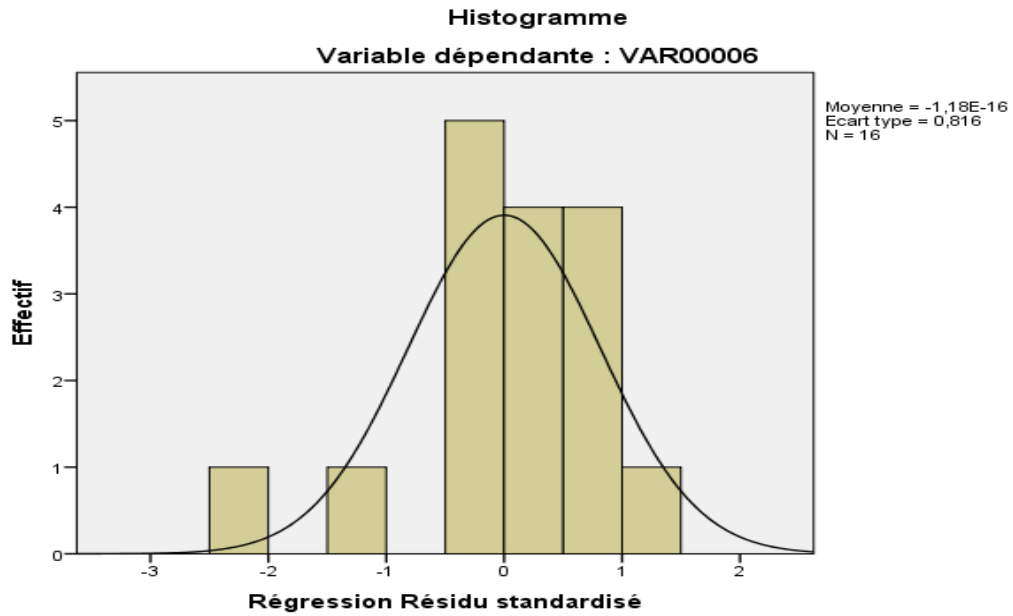


Figure V. 13 Histogramme des résidus modèle F1

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme d'un graphe :

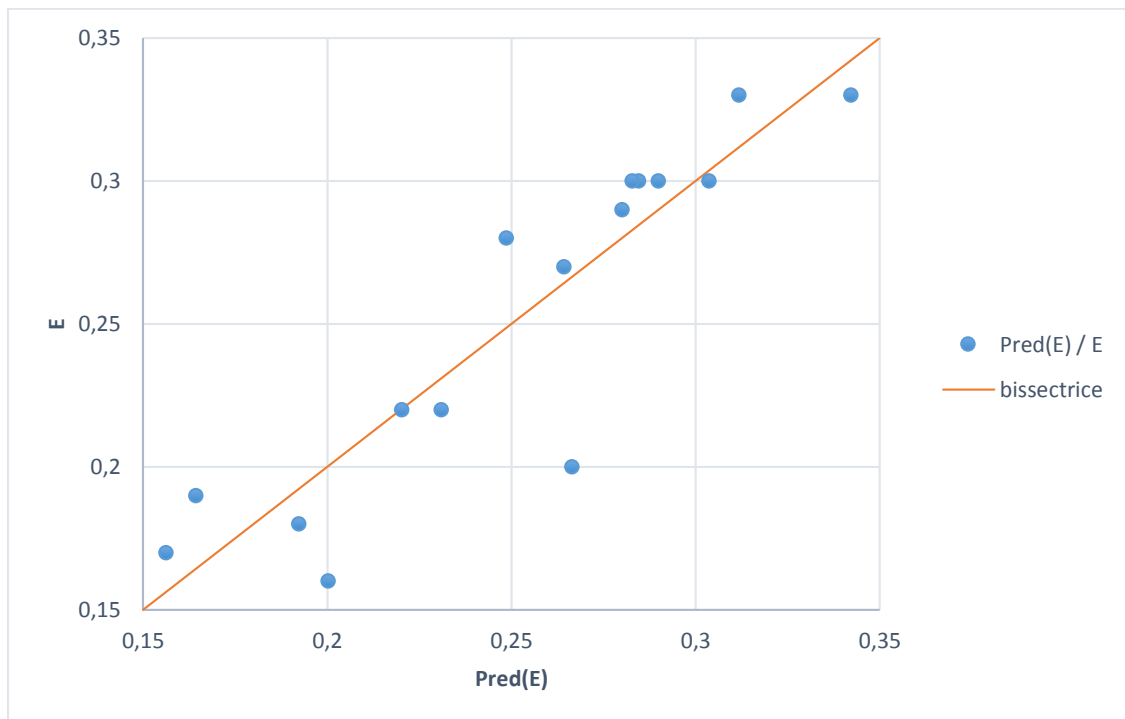


Figure V. 14 Résultat de simulation modèle F1

Le graphe ci-dessus représente l'énergie observée en fonction de l'énergie simulée à partir de modèle F1, on remarque que le nuage de point est proche de la bissectrice, ce qui confirme les résultats des critères d'évaluations numériques déjà calculé.

**Modèle F2** : Les valeurs de  $R^2$ ,  $\overline{R^2}$ , et  $F$  sont satisfaisantes, l'analyse des résidus montre qu'ils sont dépendants ( $DW = 2.322$ ), et suivent une loi normale comme on peut le constater sur l'histogramme :

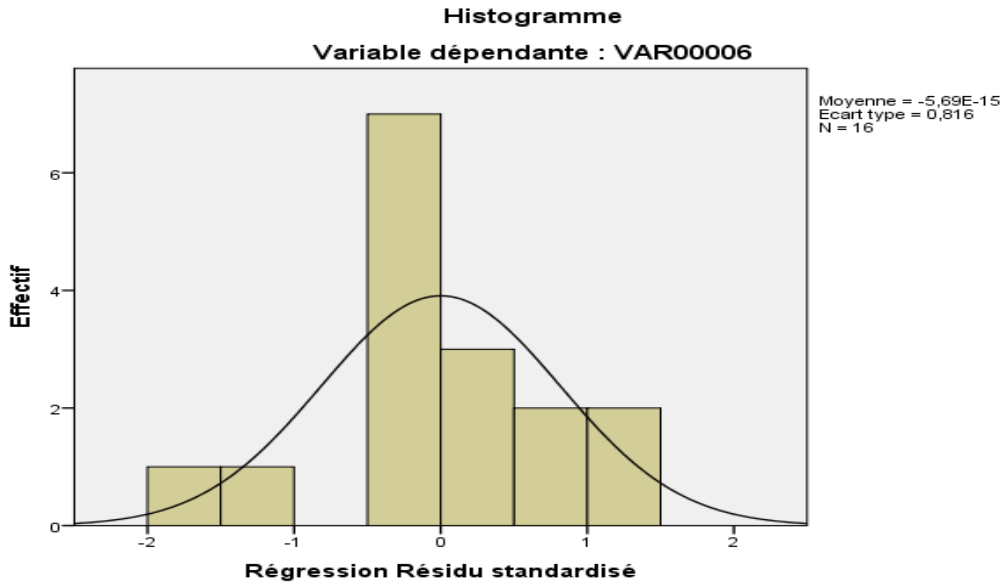


Figure V. 15 Histogramme des résidus modèle F2

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme d'un graphe :

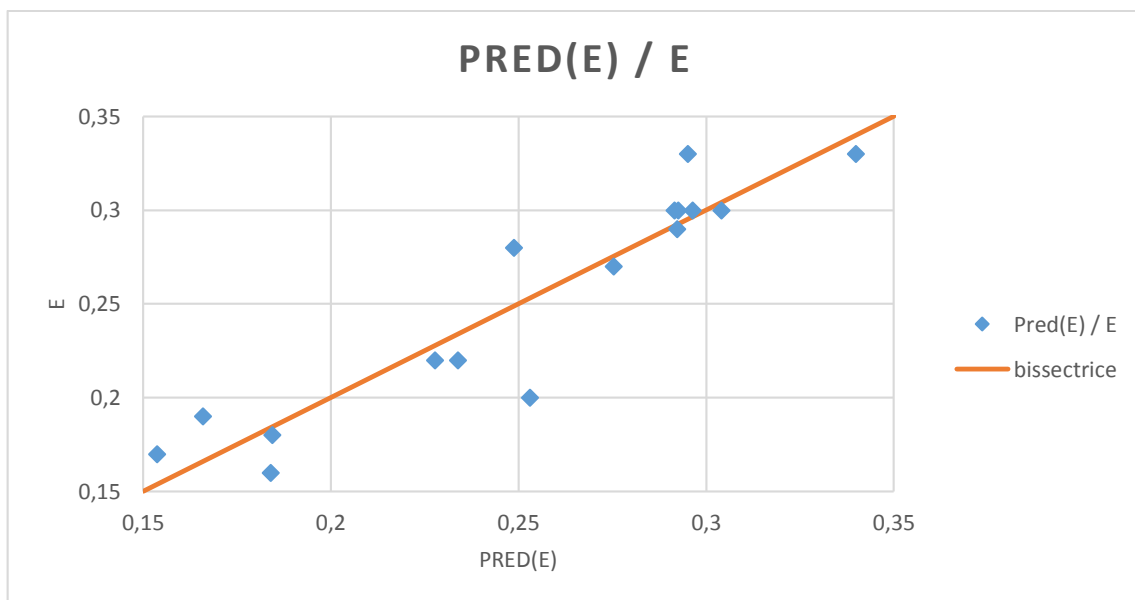
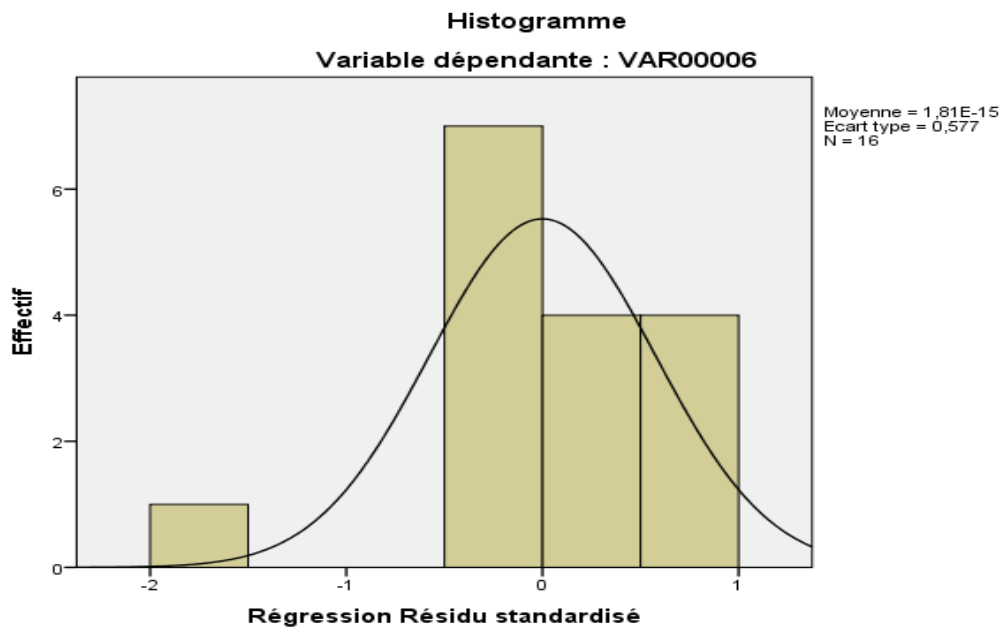


Figure V. 16 Résultat de simulation modèle F2

Le graphe ci-dessus représente l'énergie observée en fonction de l'énergie simulée à partir de modèle F2, on remarque que le nuage de point est proche de la bissectrice, ce qui confirme les résultats des critères d'évaluations numériques déjà calculé.

**Modèle F3** : Les valeurs de  $R^2$ ,  $\overline{R^2}$ , et  $F$  sont satisfaisantes, l'analyse des résidus montre qu'ils sont indépendants ( $DW = 1,497$ ), ces derniers ne suivent pas une loi normale comme on peut le constater sur l'histogramme :



**Figure V. 17** Histogramme des résidus modèle F3

La valeur de l'écart type = 0.5 le résidu n'est pas normalisé, donc le modèle est rejeté.

### Conclusion :

A partir de ces modèles on peut tirer plusieurs conclusions :

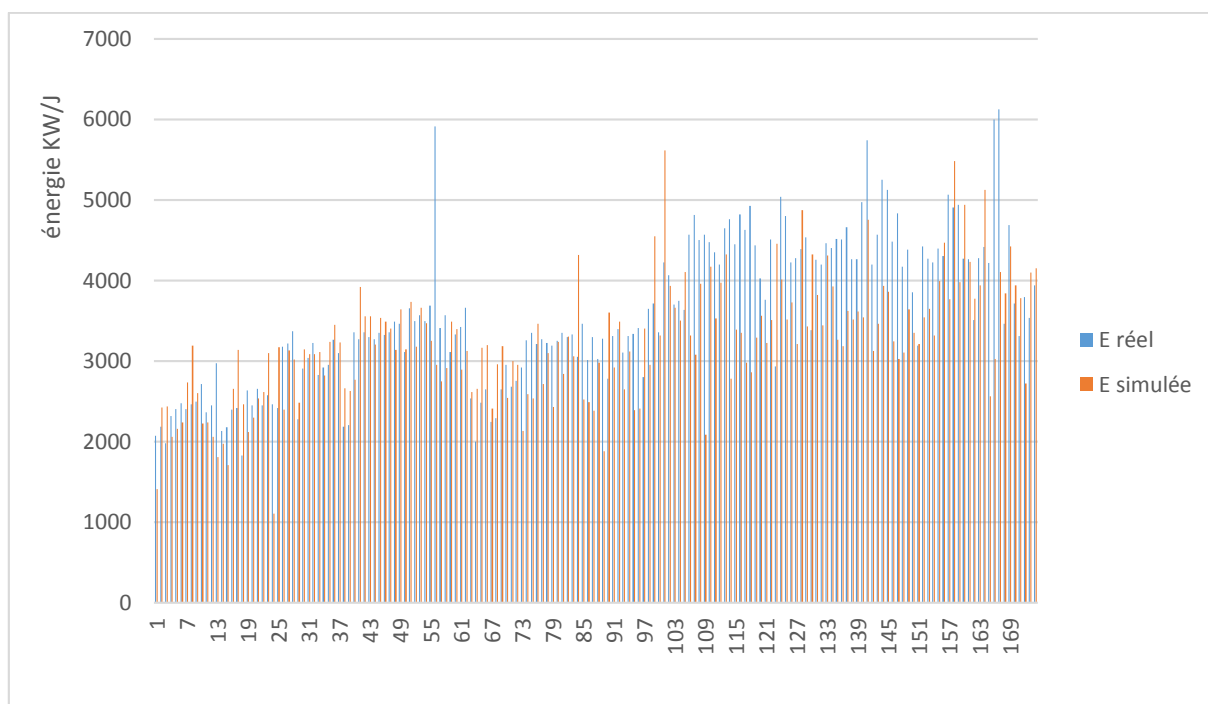
1. Le choix de l'indice de pollution « WQI » a été bien fait vu l'amélioration des résultats par rapport à la première formule de ce dernier.
2. Trois modèles ( $C3, F1, F2$ ) ont été établis. Ces modèles donnent de très bons résultats en respectant tous les critères de validation.
3. Le modèle C3, est le modèle le plus avantageux car le nombre des données de calage est plus important que les autres modèles  $F1, F2$ , c'est le modèle qui sera retenus pour l'optimisation de la consommation en énergie électrique des aérateurs pour la STEP de Boumerdes.

### V.8 Le gain en énergie électrique à partir de modèle d'optimisation « C3 » :

#### Exploitation de modèle d'optimisation

Dans cette partie nous allons exploiter le modèle choisi afin de déterminer le gain en matière d'énergie électrique durant les années « 2008-2015 ».

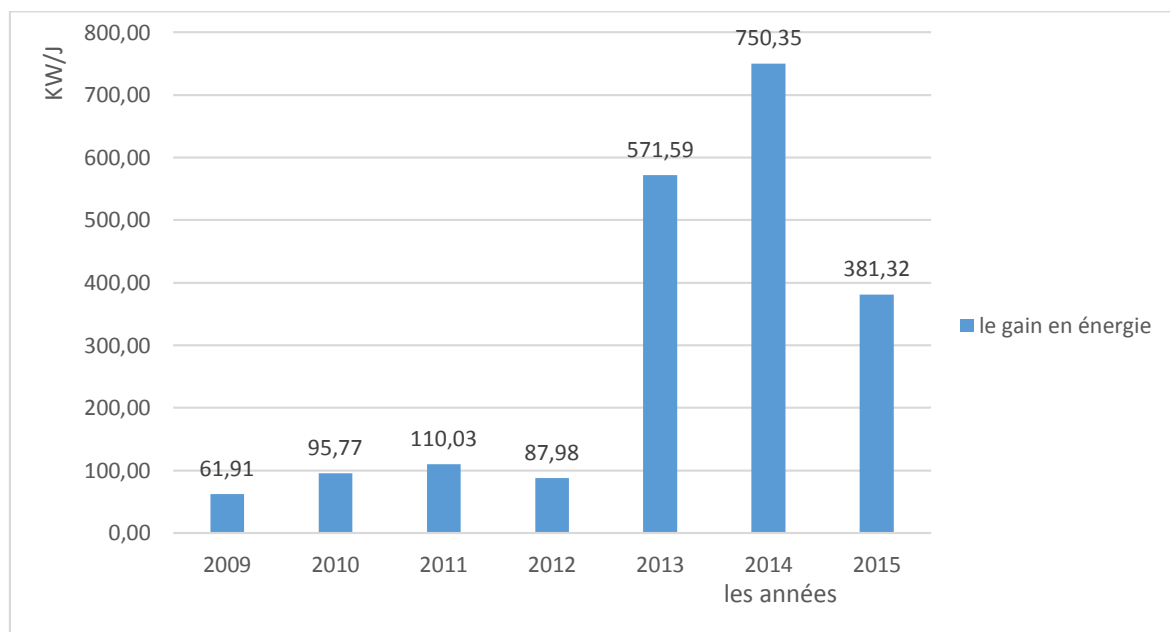
Les résultats de la simulation de l'ensemble des journées non sélectionnées sont illustrés dans l'histogramme suivant :



**Figure V. 18** Comparaison entre l'énergie simulée et l'énergie observée

L'histogramme ci-dessus représente l'énergie électrique réelle consommée par les aérateurs, et l'énergie simulée par notre modèle d'optimisation.

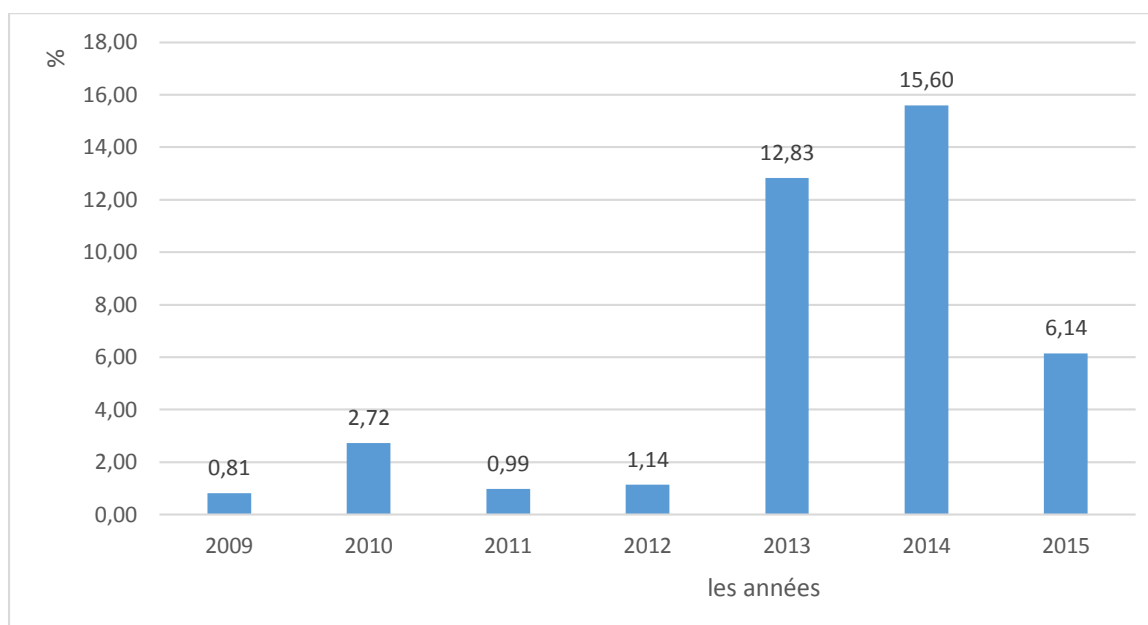
L'écart entre l'énergie réelle et l'énergie simulée représente le gain en matière d'énergie électrique, les résultats du gain moyen annuel journalier d'énergie électrique sont représentés dans l'histogramme suivant :



**Figure V. 19** Gain moyen annuel journalier en matière d'énergie

Pour bien comprendre l'histogramme précédent on va mettre les résultats du gain en matière d'énergie électrique sous forme d'un pourcentage moyen journalier :





*Figure V. 20 Pourcentage moyen journalier du gain en matière d'énergie*

On remarque à partir des deux histogrammes précédents que le pourcentage le plus élevé en matière de gain énergétique est entre les années 2013 et 2015 ce qui confirme les résultats établi précédemment lors de la sélection des journées jugées bonnes en matière de fonctionnement de la STEP où on a parlé des difficultés de la gestion pendant cette période à cause du dépassement de la capacité nominale en matière de débit.

Le tableau suivant représente la totalité du gain en énergie électrique entre l'année 2008-2015 :

*Tableau V. 19 Gain totale annuel en matière de consommation en énergie électrique*

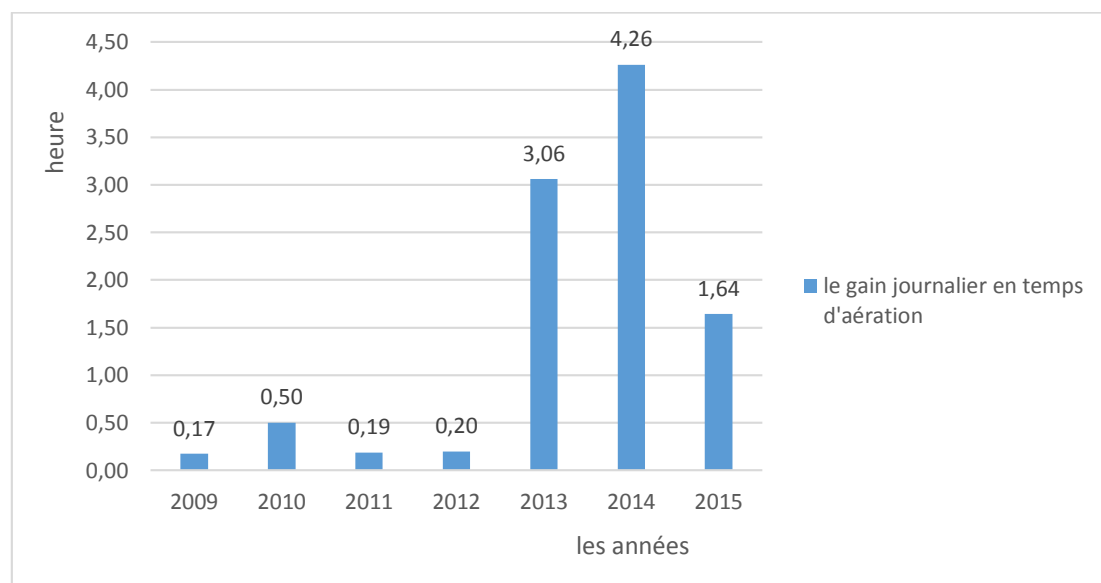
année	Gain en énergie électrique annuel journalier (KW/j)	Totalité de gain en énergie électrique (KW/ans)	Nombre de foyer
2009	61,91	22598,56	6
2010	95,77	34955,51	9
2011	110,03	40161,64	10
2012	87,98	32199,43	8
2013	571,59	208630,64	52
2014	750,35	273879,19	68
2015	381,32	139183,61	35

Remarque : un foyer consomme une moyenne d'environ 4000 KW/an.

On constate à partir de ce tableau qu'avec le gain en énergie électrique totale entre « 2008-2015 » on peut alimenter 188 foyers pendant une année.

## V.9 Le gain en matière de temps d'aération dans chaque bassin biologique :

À partir des résultats déterminés obtenus précédemment, on peut calculer le gain moyen annuel journalier en matière de temps d'aération dans chaque bassin biologique, les résultats sont présentés sous forme d'un histogramme :



*Figure V. 21 Gain moyen annuel journalier en matière de temps d'aération dans chaque bassin biologique.*

On peut constater à partir de cette figure que le gain moyen annuel journalier en matière de temps d'aération de bassin biologique est entre 10 à 30 minutes par bassin pendant les années 2009-2012, mais à partir de l'année 2013 le gain est passé à 3 à 4 heures par jour et par bassin.

## V.10 Elaboration d'une application d'aide à la décision du temps d'aération

Afin de faciliter la prise de décision du temps d'aération des bassins biologiques (décision optimale), une application sous « MATLAB » a été développée en se basant sur le modèle d'optimisation établi précédemment « modèle C3 ».

Les paramètres d'entrée dans l'application d'aide à la décision sont les mêmes que ceux utilisés dans l'élaboration de notre modèle d'optimisation telle que : DBO<sub>5</sub>, DCO, MES, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, débit à l'entrée de la STEP, la température, le débit de boue recirculée, abattement de pollution, le nombre d'Actirotor qui est en état de fonctionnement dans chaque bassin biologique.

L'interface graphique de l'application est de forme la suivante :

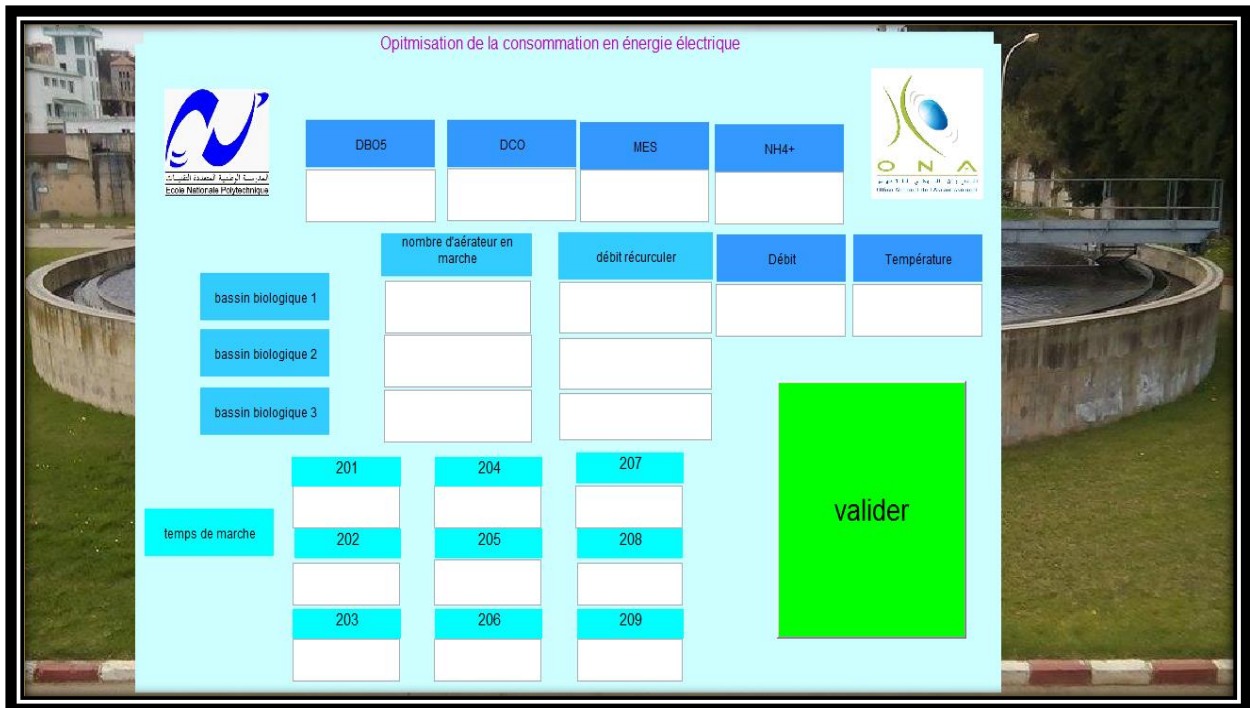


Figure V. 22 Présentation de l'interface graphique de l'application d'aide à la décision

Pour avoir les résultats du temps de marche de chaque Actirotor il faut tout d'abord insérer les paramètres d'entrées exigées par le modèle d'optimisation dans le champ approprié sur l'application toute en respectant le système d'unité.

La détermination du temps d'aération optimale est obtenue à partir du modèle d'optimisation, mais aussi en gardant le même système de gestion tel que la répartition du temps d'aération dans chaque bassin biologique (l'Actirotor centrale fonctionne plus que les actirotors latéraux pour créer des zones anaérobique afin de favoriser la dénitrification de l'azote).

Le codage de l'ensemble de ces instructions a été faite sous « Matlab », en utilisant la commande « GUIDE » qui nous permettra de créer et gérer l'interface de l'application, ainsi l'ensemble des fonctions.

## Chapitre V : Elaboration du modèle d'optimisation

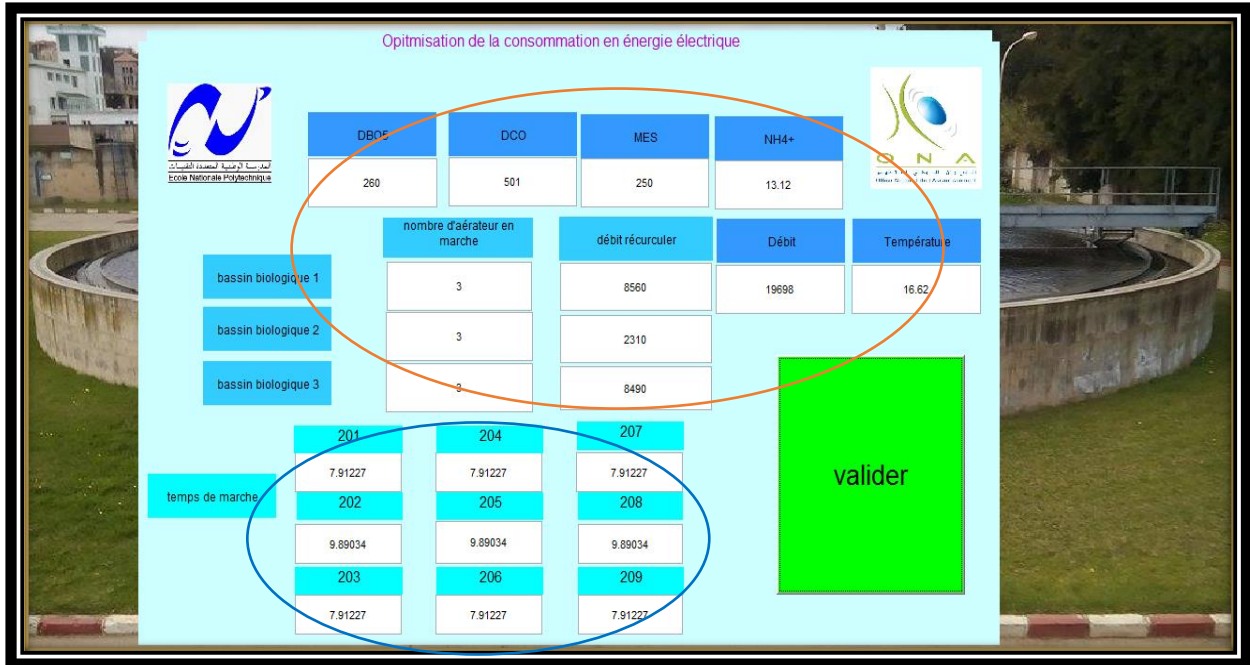


Figure V. 23 Application du programme d'aide à la décision

Les valeurs entourées par le cercle rouge représentent les paramètres d'entrés « Inputs », et les valeurs entourées par le cercle bleu représentent les résultats de la répartition de temps d'aération de chaque actirtor associé à chaque bassin biologique.

L'application prend aussi en considération l'arrêt d'un ou plusieurs Actirtors, en affichant le message suivant « arrêt ».

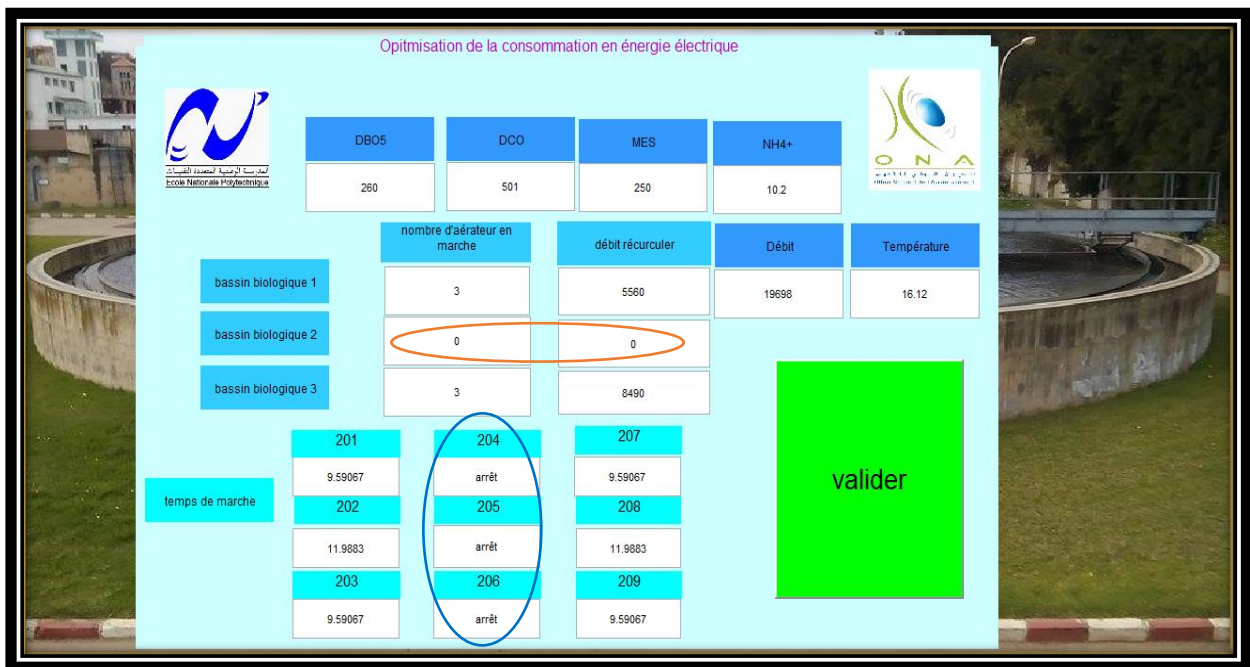


Figure V. 24 Détection de l'arrêt de la ligne d'épuration par l'application

### V.11 Conclusion

L'élaboration du modèle d'optimisation est passée par plusieurs étapes avant d'être enfin applicable et donnant des résultats fiables.

La première étape consistait à déterminer les principaux facteurs qui influencent la prise de décision du temps d'aération du bassin biologique afin de les utiliser dans l'élaboration du modèle.

La deuxième étape contait en l'élaboration d'un indice de pollution. Celui-ci a permis de donner une valeur à la qualité générale de l'eau et donc de comparer des eaux de qualités différentes. Dans un premier temps on a pensé prendre le point géométrique qui regroupe les variables sélectionnées, mais cette formule n'a pas donnée des bons résultats, alors on a changé cette formule en appliquant le Water Quality Indice élaboré déjà par l'étude de Tesnim Abassi sur les indices de qualité d'eau.

La troisième étape était la sélection des expériences jugées bonnes en matière de fonctionnement de la STEP, cette dernière passe par deux étapes (la première sélection par rapport au rapprochement du rendement épuratoire du rendement optimal et la deuxième par rapport à une consommation énergétique minimale).

Dans La quatrième étape nous avons élaboré un modèle de régression multiple basé sur les matrices sélectionnées dans l'étape précédente, nous avons essayé plusieurs cas et plusieurs modèles et à la fin on a abouti à un modèle C3 qui a été retenu pour l'optimisation de la consommation en énergie électrique des aérateurs de la STEP de Boumerdes.

La cinquième étape et dernière a été l'exploitation du modèle d'optimisation (modèle C3) sur l'ensemble des données des années d'étude, et nous avons obtenu un gain moyen journalier en matière de consommation en énergie électrique qui dépasse les 6 %, et un gain en énergie électrique totale entre les années « 2008-2015 » qui dépasse 750000 KW l'équivalent de l'alimentation de 188 foyers pendant une année en énergie électrique.

Enfin nous avons mis en place une application codée sur Matlab afin de faciliter l'exploitation du modèle d'optimisation élaboré permettent aux décideurs et aux gérants de cette STEP de la faire fonctionner d'une façon optimale et de réduire ses couts d'exploitation.

---

## Conclusion générale

L'épuration des eaux usées est aujourd'hui indispensable pour faire face à l'augmentation des concentrations en substances polluantes et des volumes d'effluents rejetés. La prise de conscience des problèmes environnementaux causés par les rejets des stations d'épuration et la volonté d'améliorer et de préserver la qualité des milieux récepteurs a entraîné l'adoption par les autorités de normes réglementaires plus strictes. Le respect de ces normes, d'une part, et la surconsommation d'énergie conséquente, d'autre part, constituent l'enjeu primordial des gestionnaires des stations d'épuration.

Dans cette étude nous avons élaboré un modèle d'optimisation de la consommation en énergie électrique pour la STEP de Boumerdes, ce dernier va aider les gestionnaires de la STEP à prendre des décisions optimales du temps d'aération de bassin biologique.

La station d'épuration des eaux usées de Boumerdes est une station à boues activées, son procédé d'épuration repose sur la dégradation aérobie de la pollution par mélange des micro-organismes épurateurs et de l'effluent à traiter, et est assuré par différents ouvrages dont le plus important est le bassin d'aération qui permet l'abattement de la pollution carbonée, la nitrification, lors des phases aérées, et la dénitrification lors des phases non aérées, Il élimine également une partie de la pollution phosphorée par voie biologique (synthèse bactérienne).

L'analyse statistique des données recueillies et la visualisation de l'évolution de chaque paramètre au pas de temps journalier à l'entrée et à la sortie de la STEP, sont un préalable à toute étude basée sur des échantillons de mesures.

Cette analyse nous a permis de constater que les paramètres de pollution organique (MES, DBO5 et DCO) de l'eau épurée restent en général satisfaisants et répondent aux objectifs de la station en termes de normes de rejets. Néanmoins, les paramètres de pollution dissoute (azotés et phosphatés), qui ne respectent pas les normes, constituent le majeur problème de l'ensemble des procédés par boues activées.

L'analyse en composantes principales et la régression multiple sont les deux méthodes utilisées dans ce travail.

Bien qu'elle n'ait pas été utilisée de façon directe dans l'établissement des modèles, l'analyse en composantes principales a été utilisée pour pouvoir classer les différents paramètres de pollution sélectionnés afin d'établir un indice de pollution, Celui-ci a permis de

---

donner une valeur à la qualité générale de l'eau et donc de comparer des eaux de qualités différentes.

Le modèle d'optimisation était établi à partir de la matrice des données sélectionnées, cette dernière est le fruit de deux étapes de sélection, une première sélection par rapport au rapprochement du rendement épuratoire du rendement optimal et une deuxième par rapport à une consommation énergétique minimale.

La régression multiple nous a permis d'établir plusieurs modèles mais à la fin on a abouti à un modèle C3 qui répond à tous les critères de validation numérique, ce dernier a été retenu pour l'optimisation de la consommation en énergie électrique des aérateurs de la STEP de Boumerdes.

Ce modèle peut nous garantir un gain moyen journalier de l'ordre de 6% en matière de consommation en énergie électrique, et un gain en énergie électrique totale entre les années « 2008-2015 » qui dépasse 750000 KW l'équivalent de l'alimentation de 188 foyers pendant une année en énergie électrique.

Dans un but de faciliter l'exploitation du modèle nous avons créé une application codée sur Matlab, celle-ci permettra aux décideurs et aux gérants de cette STEP de la faire fonctionner d'une façon optimale et de réduire ses couts d'exploitation.

Il est donc à dire que notre étude, nous a permis de franchir un pas très important dans la recherche des modèles d'optimisation de la consommation en énergie électrique des stations d'épuration des eaux usées, qui reste un domaine vierge qui n'a pas encore livré tous ses secrets.



---

## Bibliographie

- [1] W.W.ECKENFELDER, « Gestion des eaux usées urbaines et industrielles », Techniques et documentation (Lavoisier), Paris 1982.
- [2] EDLINE, F., (1979). « L'épuration biologique des eaux résiduaires », CEBEDOC édition Paris, 306 pages.
- [3] qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface, Les données de l'IBGE : "L'eau à Bruxelles" l'IBGE Novembre 2005.
- [4] THÈSE de DOCTORAT, Mr METAHRI Mohammed Saïd « Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées, par des procédés mixtes. Cas de la STEP de la ville de Tizi-Ouzou», juillet 2012.
- [5] OUANOUKI Benalia, « traitement des eaux usées », Gestion de l'environnement, Alger (2013).
- [6] GAID Abdelkader, Epuration biologique des eaux usées urbaines Tome 1, mai 1984
- [7] DUBY.C, ROBIN.S « Analyse en Composantes Principales » AgroParisTech.
- [8] HAMRICHE, « Contribution à l'étude et à la simulation des paramètres hydrométriques par l'analyse en composantes principales (ACP) », Mémoire de Projet de Fin d'Etude, ENP Alger, 1993.
- [9] RODIER L. (2005), L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Ed. Dunod, Paris, 8eme edition.
- [10] REJSEK F., (2002). Analyse des eaux, Aspects réglementaires et techniques.
- [11] SALGHI R, « Différents filières de traitement des eaux », ENSA d'Agadir, 116p, 2005.
- [12] FAO. (2003)., L'irrigation avec des eaux usées traitées : Manuel d'utilisation. FAO Irrigation and Drainage paper, 65p.
- [13] ASANO T. (1998). Wastewater reclamation and reuse. ED, water quality management library,
- [14] « Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface », Cadre général Fiche 2. Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement /observatoire des données de l'environnement
- [15] Philippe DUCHENE « Dysfonctionnement biologiques dans les stations d'épuration a boues activées », Actes du colloque Lyon-21 octobre 1994.
- [16] Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement/observatoire des données de l'environnement. « Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface », Cadre général Fiche 2.
- [17] BELAHMADI Mohamed Seddik Oussama, « étude de la biodégradation du 2,4-dichlorophénol par le micro-biote des effluents d'entrée et de sortie de la station d'épuration



---

des eaux usées d'Ibn Ziad », Mémoire de Magister en Microbiologie appliquée et biotechnologie microbienne, université Mentouri, 16 Juin 2004.

[18] FABY J.A., BRISSAUD F. (1997)., L'utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office International de l'Eau, 76 pages.

[19] BAUMONT S, CAMARAD J-P, LEFRANC A, FRANCONI A. (2004). Réutilisation des eaux usées: risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS, 220p.

[20] Office National de l'Eau; caractéristiques-formes-eaux usées; "Développer les compétences pour mieux gérer l'eau"; chapitre: caractérisation des eaux usées;2005

[21] GUIDE DE L'ENSEIGNEMENT MOYEN SUR L'EAU, L'HYGIENE ET L'ASSAINISSEMENT. République du Sénégal, Ministère de l'Education Nationale Juin 2012.

[22] GOMELLA, C. & GUERREE, H., (1982). '' Les eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales, Edition Eyrolles, 260 pages.

[23] GAID A., (1993) « Traitement des eaux usées urbaines », Technique de l'ingénieur. Mise à jour du texte de J. SIBONY et B. BIGOT.

[24] L ADJEL, Farid. Exploitation d'une station à boue activée, Centre de formation aux Métiers de l'assainissement CFMA, Office national de l'assainissement (ONA), Boumerdes, 2006.

[25] LIBES .Y, « les eaux usées urbaines et leur épuration ».

[26] DEGREMONT-SUEZ. Mémento technique de l'eau (tomes 1 et 2). 10e édition. Ed. Degrémont-Suez, 2006.

[27] water guide, procédés extensifs d'épuration des eaux usées Mise en œuvre de la directive du Conseil n° 91/271 du 21 mai 1991.

[28] Agence de l'Eau Seine-Normandie (1999), ''Guides des procédés épuratoires intensifs proposés aux petites collectivités, Nanterre''.

[29] FERCHACHI.M, GHARBI.A and GRASMICK.A : Epuration d'eau usée urbaine par biodisques et lit bactérien .Water research, volume 28, February 1994, pages 437-443.

[30] DESHAYES, M., (2007). ''Guide pour l'établissement des Plans d'Assurance de la qualité dans le cadre de la réalisation des stations d'épuration de type boues activées en lot séparés'', projet de fin d'étude, Spécialité Génie Civil à l'INSA de Strasbourg, 112 pages.

[31] Recommandations sanitaires relatives à la désinfection des eaux usées urbaines- Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France- Section des eaux (Octobre 1995).

[32] 14<sup>ème</sup> séminaire sur l'eau Les traitements tertiaires : Pour quoi faire ?, Brice BOURBON, Guillaume LAPALUS, Vincent LE DAHERON, Claire LOUVET, Julie MARAIS, Mélanie PAGES. 2015

[33] Série Technique DT 52 Gestion des boues de stations d'épuration Co traitement avec les déchets ménagers, Novembre 2012.

---

[34] BERMAD .A, « Elaboration d'une méthodologie de simulation et de prévision des variables climatologiques aléatoires et cycliques par l'analyse en composantes principales». Thèse de doctorat d'Etat, ENP 2004.

[35] Claire Durand, « L'analyse factorielle et l'analyse de fidélité», juillet 2005.

[36] Brocard. D. (2010). Régression multiple. Université de Montréal. <http://www.cgu.edu/>

[37] DODGE. Y, ROUSSON. V. (2004) Analyse de régression appliquée. Dunod.

[38] RAKOTOMALALA. R. Régression linéaire multiple. Equipe de recherche en Ingénierie des connaissances.

[39] GUJARATI. N. D. (1995) Basic econometrics, Third Ed. McGraw Hill.