

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



الديوان الوطني للتطهير
Office National de l'Assainissement

Département d'Hydraulique

Mémoire du Master

En vue de l'obtention du diplôme de master en Hydraulique

Thème :

**Optimisation du débit de boue à recirculée
pour la STEP de Boumerdes**

Réalisé par :

Mr. DJAOUI Toufik

Sous la direction de Mr A.LEFKIR Enseignant à l'école nationale de travaux publics,
d'Alger

Présenté et soutenu publiquement le (03/07/2016)

Composition du jury :

Président : Mr A.BERMAD

Professeur (ENP)

Promoteur : Mr A.LEFKIR

Docteur (ENTP)

Promotion 2016

ملخص

أن تصفية المياه المستعملة تعتبر وسيلة ضرورية للحد من ارتفاع تركيز المواد الملوثة. المشاكل البيئية التي يسبب فيها صرف المياه من محطات التنقية وكذا ارادة التحسين والحفاظ على جودة الوسط المستقبل تستلزم رفع أداء المحطات من ناحية الجودة والفاعلية.

في هذا السياق، سوف نركز عملنا على تطوير النموذج الأمثل التدفق المسترجع، 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:

The **purge of waste water** is today essential to face the increase of the concentrations in polluting substances. The awareness of the environmental problems caused by the rejections of water-treatment plants and the will to improve and to protect the quality of the receiving circles has entrained the obligation to increase the performances of water-treatment plants, both regarding quality of treatment and regarding reliability.

In this context, our work will be interested to develop a **model of optimization** of the flow of mud to re-circulate, the latter is going to help the administrators in the **WWTP to run it optimally** by participating in the optimization of the electrical energy to consume by the **WWTP**.

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

RESUME :

L'épuration des eaux usées et aujourd'hui indispensable pour faire face à l'augmentation des concentrations en **substances polluantes**. 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'obligation d'augmenter **les**

performances des stations d'épuration, tant en terme de qualité de traitement qu'en terme de fiabilité.

Dans ce contexte, notre travail s'intéressera à élaborer **un modèle d'optimisation** du débit de boue à recirculée, ce dernier va aider les gestionnaires de la STEP de la faire **fonctionner d'une façon optimale** en participant à l'optimisation de l'énergie électrique consommée par la STEP.

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 A.LEFKIR, Enseignant à l'ENTP, d'abord, pour avoir accepté à superviser mon mémoire du master, 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.BERMAD, Professeur à ENP, 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.

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

Introduction générale.....12

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

I. INTRODUCTION..... 15

I.1 Origine de la pollution15

I.1.1 Les eaux usées domestiques 15

I.1.2 Les eaux usées industrielles 16

I.1.3 Les eaux de ruissellement 16

I.1.4 Les eaux agricoles 16

I.2 Les paramètres de pollution des eaux usées.....16

I.2.1 Les paramètres physico-chimiques 16

I.2.2 Les paramètres de la pollution organique globale 18

I.2.3 Paramètres de la pollution dissoute..... 19

I.2.4 Paramètres toxiques 20

I.2.5 Paramètres microbiologiques 20

I.3 Collecte des eaux usées21

I.4 Fonctionnement d'une station d'épuration22

I.4.1 Qu'est-ce qu'une station d'épuration ?..... 22

I.4.2 Différentes étapes de traitement..... 22

Chapitre II : Théories de la régression multiple

II. INTRODUCTION..... 30

II.1 Historique30

II.2 Forme générale du modèle30

II.3 Objectifs de la régression multiple30

II.4	Moindres carrés ordinaires	31
II.4.1	Historique	31
II.4.2	Principe.....	31
II.5	Démarche de la régression multiple	31
II.5.1	Calcul des coefficients de régression.....	32
II.5.2	Calculs préliminaires	32
II.5.3	Ordonnée à l'origine	33
II.6	Notation matricielle	33
II.7	Qualité de la régression	34
II.7.1	Coefficient de détermination multiple R^2	34
II.7.2	R^2 ajusté.....	35
II.7.3	Test de signification du modèle de régression multiple	36
II.7.4	Validation du modèle de régression, étude des résidus	37
II.7.5	Multicolinéarité	38
II.7.6	Types de régression multiple	39
II.7.7	La régression hiérarchique	39
II.7.8	La régression avec entrée forcée	39
II.7.9	La régression avec entrée progressive	39

Chapitre III : Présentation de la station d'épuration de Boumerdes

III. INTRODUCTION	42
III.1 Localisation de la STEP	42
III.2 Caractéristiques Techniques	43
III.2.1 Paramètres de pollution de conception	43
III.2.2 Les étapes du procédé d'épuration.....	43
III.3 Traitement au fil de l'eau	45
III.3.1 Arrivée des eaux et bassin d'orage.....	46
III.3.2 Prétraitement	46
III.3.3 Procédé biologique	47
III.3.4 Traitement final	48
III.4 Traitement au fil de boues	48
III.4.1 Epaissement des boues.....	49

III.4.2	Déshydratation mécanique des boues sur bandes presseuses.....	49
III.5	CRITIQUE DES DONNEES	49
III.5.1	Statistique des données.....	50

Chapitre IV : Optimisation du débit recirculé

IV.	INTRODUCTION.....	52
IV.1	Evolution de débit recirculé	52
IV.1.1	Bassin d'aération N°1.....	52
IV.1.2	Bassin d'aération N°2.....	53
IV.1.3	Bassin d'aération N°3.....	53
IV.2	Formulation de la problématique.....	54
IV.2.1	L'indice de pollution.....	55
IV.2.2	Indice de boue	59
IV.3	La sélection des données :	59
IV.3.1	1^{ère} Sélection :	59
IV.3.2	2^{ème} Sélection	60
IV.4	Elaboration du modèle de régression multiple :	61
IV.4.1	Modèles de la forme $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon$	62
IV.4.2	Modèle de la forme $Y = b_0 * X_1^{b_1} * X_2^{b_2} * \dots * X_p^{b_p} + \varepsilon$	63
IV.4.3	Modèles de la forme $Y = b_0 + b_1X_1 + b_1'X_{12} + \dots + b_pX_p + b_p'X_p^2 + \varepsilon$	65
IV.4.4	Conclusion de la régression.....	66
IV.5	Exploitation du modèle d'optimisation :	66
IV.6	Utilisation du modèle de débit recirculée dans l'optimisation d'énergie électrique	67
	Conclusion générale.....	69
	Bibliographie.....	71

Liste des tableaux

Chapitre II : Théories de la régression multiple

Tableau II. 1 Récapitulatif somme des carrés	34
--	----

Chapitre III : Présentation de la station d'épuration de Boumerdes

Tableau III. 1 Présentation de la STEP de Boumerdes.....	42
Tableau III. 2 Paramètres de pollution de conception de la station de Boumerdes	43
Tableau III. 3 Statistiques descriptives des paramètres de pollution de la STEP Boumerdes	50

Chapitre IV : Optimisation du débit recirculé

Tableau IV 1 Matrice de corrélation des paramètres sélectionnés	57
Tableau IV 2 Matrice de corrélation entre les CP' et les variables sélectionnées	57
Tableau IV 3 Classement et poids attribuer à chaque paramètre sélectionné..	57
Tableau IV 4 Résultat de la sélection des expériences jugée bonnes.....	61

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les eaux usées

Figure I. 1 Schéma qui illustre l'étape du traitement biologique secondaire	24
Figure I. 2 Schéma de traitements des boues	28

Chapitre III : Présentation de la station d'épuration de Boumerdes

Figure III. 1 STEP de Boumerdes [Google Earth]	42
Figure III. 2 Vue d'ensemble des ouvrages de la STEP de Boumerdes.....	43
Figure III. 3 Organigramme d'exploitation de la STEP de Boumerdes	44
Figure III. 4 schéma des différents postes de traitement à la STEP de Boumerdes	45
Figure III. 5 Bassin d'orage de la STEP de BOUMERDES.....	46
Figure III. 6 Dégrilleur du type à champ courbe.	46
Figure III. 7 Dessableur-Déshuileur	47
Figure III. 8 Bassin d'aération.....	47
Figure III. 9 Décanteur-Clarificateur	48
Figure III. 10 Bassin de chloration	48
Figure III. 11 Presse à bande	49

Chapitre IV : Optimisation du débit recirculé

Figure IV 1 Evolution de la quantité de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°1	52
Figure IV 2 Evolution de la quantité de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°2.....	53
Figure IV 3 Evolution de la quantité de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°3.....	53
Figure IV 4 Principaux paramètres de l'optimisation du débit de boue à recirculée.....	54
Figure IV 5 Représentation de l'intervalle de la première sélection.	60
Figure IV 6 Etapes de la deuxième sélection	60
Figure IV 7 Histogramme des résidus modèle A	62
Figure IV 8 Résultat de simulation modèle A.....	63
Figure IV 9 Résultat de simulation modèle B	65
Figure IV 10 Comparaison entre DR simulée et DR observée	66
Figure IV 11 Gain en matière du débit recirculé	67
Figure IV 12 Comparaison entre les deux valeurs d'énergie électrique déterminées.	68

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: Temperature

WWTP: Waste Water Treatment Plant

Introduction générale

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, l'objectif de notre travail est mettre en place un modèle d'optimisation de débit de boue recirculée vers bassin biologique, ce dernier va participer à l'optimisation du fonctionnement de la STEP.

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 « généralité sur les eaux usées » 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 et une décortication des différentes étapes du procédé de l'épuration des eaux usées ainsi que les formes que peut prendre une boue suite à son traitement.

La théorie de la régression multiple est faite l'objet du deuxième chapitre.

Le troisième chapitre a été consacré à la présentation de la STEP de Boumerdes, statistique des données.

L'élaboration et l'application de notre modèle a été expliquée dans le quatrième 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 : Généralités sur les eaux usées

I. Introduction

Le traitement des eaux usées est devenu un impératif pour nos sociétés modernes. En effet, le développement des activités humaines, qu'elles soient domestiques, industrielles, artisanales ou bien agricoles s'accompagne inévitablement d'une production croissante de rejets polluants. Les ressources en eau ne sont pas inépuisables. Leur dégradation, sous l'effet des rejets d'eaux polluées, peut non seulement détériorer gravement l'environnement, mais aussi entraîner des risques de pénurie.

La plupart des pays en voie de développement y compris l'Algérie s'intéressent de plus en plus au problème de la protection de l'environnement en général et à la pollution de l'eau en particulier.

Toute station d'épuration des eaux usées quel que soit son mode de fonctionnement regroupe plusieurs types d'ouvrages qui sont interconnectés entre eux et chaque ouvrage a un rôle bien précis dans le procédé mais visant tous le même objectif : la transformation de l'eau usée en amont de la station en eau épurée en aval.

I.1 Origine de la pollution

Suivant l'origine des substances polluantes on distingue entre quatre catégories d'eaux usées :

I.1.1 Les eaux usées domestiques

Elles constituent généralement l'essentiel de la pollution et se composent ;

- Des eaux de cuisine qui contiennent des matières minérales en suspension provenant du lavage des légumes, des substances alimentaires à base de matières organiques (glucides, lipides, protides), et des produits détergents utilisés pour le lavage de la vaisselle et ayant pour effet la solubilisation des graisses
- Des eaux de buanderie contenant principalement des détergents.
- Des eaux de salle de bains chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle. Généralement des matières grasses hydrocarbonées.
- Des eaux de vannes qui proviennent des sanitaires (WC). Très chargés en matières organiques hydrocarbonées et composés azotés, phosphorés et en microorganismes. [1]

I.1.2 Les eaux usées industrielles

Les déchets et les effluents industriels définissent largement la qualité et le taux dépollution 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.

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 de ruissellement

Regroupent toutes les précipitations naturelles, voire : pluie, neige, grêle et brouillard. Elles sont soit canalisées et transportées par les collecteurs d'assainissement vers la station d'épuration ou bien acheminées vers les rivières et cours d'eau.

Elles représentent un danger lorsqu'elles contiennent une grande concentration en substance chimique engendrée généralement par les industries polluantes. [3]

I.1.4 Les eaux agricoles

Ce sont les eaux d'origine agricole généralement polluées par les substances chimiques contenues dans les pesticides et fertilisants utilisés pour augmenter la quantité et améliorer la qualité des produits agricoles. Elles se caractérisent par de fortes concentrations en composés azotés et phosphorés. Les eaux agricoles

Ce sont les eaux d'origine agricole généralement polluées par les substances chimiques contenues dans les pesticides et fertilisants utilisés pour augmenter la quantité et améliorer la qualité des produits agricoles. Elles se caractérisent par de fortes concentrations en composés azotés et phosphorés. [3]

I.2 Les paramètres de pollution des eaux usées

I.2.1 Les paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques sont des paramètres simples à mesurer. On les mesure généralement sur le terrain.

I.2.1.1 La température

La température est un facteur écologique important des milieux aqueux, son élévation peut perturber fortement la vie aquatique (pollution thermique) et elle joue un rôle important dans la nitrification et la dénitrification biologique. La dénitrification 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 est arrêtée pour des températures inférieures à 5°C. [4]

I.2.1.2 Potentiel Hydrogène

Le pH (potentiel Hydrogène) L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H^+ (notée H^+ pour simplifier). De manière à faciliter cette expression ; on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ : c'est le pH. [5]

I.2.1.3 Turbidité

La turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux par la présence de matière en suspension (MES) fines, comme les argiles, les grains de silice et les microorganismes. De plus la turbidité va perturber le fonctionnement des unités de désinfection, réduire l'efficacité du chlorure, c'est toute fois un indicateur facile à mesurer. [4]

I.2.1.4 Les matières en suspension (MES)

Selon Rejsek (2002), La pollution particulaire est due à la présence de particules de grande taille, supérieure à 10 μ m, en suspension dans l'eau, et que l'on peut assimiler aux matières en suspension (MES).

En fait, les matières en suspension ne sont des particules solides véritablement en suspension que dans des conditions moyennes d'écoulement des effluents correspondant à une vitesse minimale de 0,5 m/s. En fonction de la taille des particules, on distingue les matières grossières ou décantables (diamètre supérieur à 100 μ m) et les matières en suspension. On peut également prendre en compte une partie des matières colloïdales, de dimension inférieure, qui constitue la limite entre la phase solide et la phase dissoute (entre 1 et 10⁻² μ m).

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 en oxygène peut être représentée biologiquement suivant divers paramètres 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 capables d'assimiler les matières organiques de l'échantillon. [6]

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 oxydables 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.

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. [6]

I.2.2.3 La conductivité électrique (CE)

La conductivité est la propriété que possède une eau à favoriser le passage d'un courant électrique. Elle fournit une indication précise sur la teneur en sels dissous (salinité de l'eau). La conductivité s'exprime en micro Siemens par centimètre. La mesure de la conductivité permet d'évaluer la minéralisation globale de l'eau. Sa mesure est utile car au-delà de la valeur limite

de la salinité correspondant à une conductivité de 2500 $\mu\text{Sm/cm}$, la prolifération de microorganisme peut être réduite d'où une baisse du rendement épuratoire. [1]

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. [7]

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.

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. [7]

I.2.4 Paramètres toxiques

I.2.4.1 Métaux lourds

On appelle métaux lourds les éléments métalliques naturels dont la masse volumique dépasse 5g/cm³. Ceux-ci sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces : mercure, plomb, cadmium, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse. Les plus toxiques d'entre eux sont le plomb, le cadmium et le mercure. [8]

I.2.4.2 Tensioactif

Les substances tensioactives sont constituées de molécules possédant une partie hydrophobe et une partie hydrophile. Ces tensioactifs sont qualifiés d'anioniques, cationiques, amphotères (substances pouvant à la fois se comporter comme un acide et comme une base) ou non ioniques selon la charge de leur groupe hydrophile. La configuration chimique des tensioactifs leur confère des propriétés de nettoyage importantes (dégraissage). Ces substances interviennent donc dans la composition des détergents, savons, etc.

Si les tensioactifs sont en eux-mêmes relativement peu toxiques, leur impact environnemental est lié au fait qu'ils peuvent rendre les membranes des cellules perméables à certaines substances qui habituellement les traversent peu ou ne les traversent pas. [9]

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). [9]

I.2.5 Paramètres microbiologiques

I.2.5.1 Bactéries :

Les bactéries sont les microorganismes les plus communément rencontrés dans les eaux usées. La concentration en bactéries pathogènes est très variable et peut atteindre 10⁴ germes par litre. Parmi les pathogènes les plus détectées, les salmonelles, dont celles responsables de la typhoïde, des paratyphoïdes et des troubles intestinaux. Les coliformes thermo-tolérants sont

des germes témoins de contamination fécale communément utilisés pour contrôler la qualité relative d'une eau.

En plus de ces germes les eaux usées d'une station d'épuration contiennent des espèces autochtones considérées comme acteurs majeurs des biodégradations telles que : Pseudomonas, Alcaligenes, Flavobacterium et d'autres. [10]

I.2.5.2 □ Virus :

Les virus 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 10³ et 10⁴ 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'enlèvement des virus demeure la désinfection. [10]

I.3 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 (visse 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 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 non collectif (individuel).

I.4 Fonctionnement d'une station d'épuration

I.4.1 Qu'est-ce qu'une station d'épuration ?

C'est une installation destinée à épurer les eaux usées domestiques ou industrielles et les eaux pluviales avant le rejet dans le milieu naturel. Le but du traitement est de séparer l'eau des substances indésirables pour le milieu récepteur.

Une station d'épuration est généralement installée à l'extrémité d'un réseau de collecte. Elle peut utiliser plusieurs principes, physiques et biologiques. Le plus souvent, le processus est biologique car il fait intervenir des bactéries capables de dégrader les matières organiques. La taille et le type des dispositifs dépendent du degré de pollution des eaux à traiter.

Une station d'épuration est constituée d'une succession de dispositifs, conçus pour extraire en différentes étapes les différents polluants contenus dans les eaux. La pollution retenue dans la station d'épuration est transformée sous forme de boues. La succession des dispositifs est calculée en fonction de la nature des eaux usées recueillies sur le réseau et des types de pollutions à traiter.

I.4.2 Différentes étapes de traitement

Cinq grandes étapes à retenir au niveau du fonctionnement d'une station d'épuration :

- Prétraitements
- Traitements primaires
- Traitements secondaires
- Traitements tertiaires
- Traitements des boues

I.4.2.1 Prétraitements

Le prétraitement a pour objectif l'extraction des matières les plus grossières (brindilles, feuilles, tissus, ...) et des éléments susceptibles de gêner les étapes ultérieures du traitement. Il comprend :

- **Le dégrillage** : pour retenir les déchets volumineux à l'aide d'une succession de grilles (2 à 4) de plus en plus fines. Les résidus recueillis sont déposés en décharge;
- **Le dessablage** : pour prévenir les dépôts dans les canalisations, protéger les organes mécaniques (pompes) contre l'abrasion et éviter de perturber les autres étapes de traitement. Les sables, recueillis généralement par raclage en fond de bassin, sont recyclés ;

- **Le dégraissage-déshuilage** : pour éviter l'encrassement de la station par des corps gras. Effectuée dans le même bassin que l'étape de dessablage, la récupération des graisses et huiles se fait en surface. Les composés collectés seront alors incinérés (cas du traitement d'un effluent urbain) ou recyclés pour la fabrication de savons ou détergents (cas de certains effluents industriels) en fonction de leur qualité. [11]

I.4.2.2 Le traitement primaire

Le traitement s'effectue par voie physico-chimique et a pour but d'extraire le maximum de matières en suspension et de matières organiques facilement décantables.

Trois voies de traitement sont possibles :

- **La décantation (processus physique)** : le principe de séparation solide-liquide est la pesanteur, les matières en suspension ou colloïdales tendent à se séparer du liquide par sédimentation ;
- **La flottation (processus physique)** : par opposition à la décantation, la flottation est un procédé de séparation solide-liquide ou liquide-liquide qui s'applique à des particules dont la masse volumique réelle ou apparente (flottation assistée) est inférieure à celle du liquide qui les contient ;
- **La décantation associée à l'utilisation d'un coagulant- floculant (voie physico-chimique)** : le principe est ici de favoriser l'agrégation des molécules en suspension grâce aux techniques de coagulation et de floculation de façon à augmenter la sédimentation grâce à l'obtention de floccs plus gros.

Durant la phase de traitement primaire, une quantité importante de la pollution totale est éliminée (abattement des matières en suspension pouvant atteindre 90 % et de la demande biochimique en oxygène de l'ordre de 35 %). La DCO et la concentration en azote peuvent également être réduits durant cette phase de traitement. Les matières solides extraites représentent ce que l'on appelle les boues primaires. [11]

I.4.2.3 Le traitement secondaire

Le traitement secondaire a pour objectif principal l'élimination des composés solubles d'origine organique. Parallèlement, la floculation de la biomasse permet de piéger les matières en suspension restant à l'issue du traitement primaire.

Le principe de ce traitement est de mettre en contact la matière organique contenue dans les eaux usées avec une population bactérienne. Celle-ci assimile alors la matière organique pour son propre développement. Ces dispositifs permettent d'intensifier et de localiser sur des surfaces réduites les phénomènes de transformation et de dégradation des matières organiques tels qu'ils se produisent en milieu naturel. Ils sont la reconstitution d'un écosystème simplifié et sélectionné faisant intervenir une microflore bactérienne et une microfaune de protozoaires et de métazoaires.

Les procédés de traitement secondaires sont fondés sur la digestion microbienne à la fois en présence ou en absence d'oxygène pour réduire la concentration en matières organiques. Plusieurs techniques peuvent être distinguées, le choix de l'une ou l'autre est fonction de

l'emplacement disponible pour le procédé de traitement, de la charge de l'effluent et de la quantité de pollution à traiter. [11]

A. Les traitements physico-chimiques

Consistent à transformer chimiquement, à l'aide de réactifs, les éléments polluants non touchés par les traitements biologiques (matières non biodégradables).

B. Les traitements biologiques

Ils sont appliqués aux matières organiques en utilisant des cultures de microorganismes (notamment bactéries) reproduisent le processus de l'autoépuration naturelle dans des bassins adaptés à ce propos (les bioréacteurs). Plus récemment, le traitement biologique de l'azote a été intégré à cette étape, et de la même manière, le traitement des phosphates commence aussi à y être intégré.

Les impuretés sont alors digérées par des êtres vivants microscopiques et transformées en boues. La culture des bactéries se fait soit en milieu aéré (aérobie), soit en absence d'oxygène (anoxie). On distingue aussi les cultures fixées (lits bactériens, disques biologiques), et les cultures libres (lagunage aéré, boues activées).

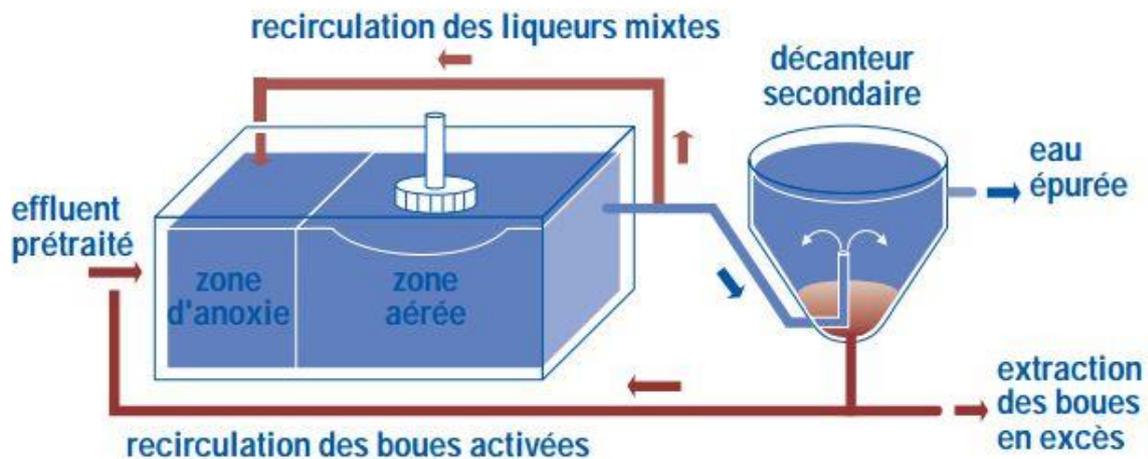


Figure I. 1 Schéma qui illustre l'étape du traitement biologique secondaire

I.4.2.4 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. [12]

A. Elimination de l'azote

Dans la plupart des eaux usées, l'azote est sous forme organique ou ammoniacale (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 (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. [12]

B. 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 aérobie et anoxie favorise un mécanisme de relargage /sur accumulation de phosphore dans la biomasse épuratrice. [12]

I.4.2.5 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.

A. La chloration

Cette technique est actuellement la plus employée pour la désinfection des eaux usées.

Elle s'opère par injection (gazeux Cl₂ ou hypochlorite de sodium NaOCl) ou de bioxyde de chlore ClO₂ sur une eau préalablement épurée et clarifiée.

Le chlore ; dont les effets bactéricides, germicide et algicides sont connus ; permet une élimination à 99,9 % des germes pathogènes. Cependant il est inefficace sur les virus et protozoaires ou pour des PH supérieurs à 7,5 et difficile à stocker lorsqu'il se trouve à l'état gazeux. De plus son utilisation engendre la formation de chlore résiduel et de chloramine, en présence d'ammoniac, Le bioxyde de chlore beaucoup moins réactif permet d'éviter la formation de chloramines et haloformes tout en présentant une efficacité désinfectante supérieure (notamment sur les virus) en un temps de contact beaucoup plus court. Cependant l'instabilité de ce composé impose sa production sur le lieu d'utilisation rendant sa mise en œuvre délicate et onéreuse. [13]

B. L'ozonation

L'ozone O₃, oxydant puissant, est un désinfectant particulièrement efficace qui permet d'éliminer les bactéries, certains virus, protozoaires et les traces de médicaments dans les eaux usées. Il est généré in situ par décharge électrique sur de l'oxygène pur ou contenu dans l'air.

Ce procédé est généralement utilisé après une épuration biologique des effluents par boues activées permettant de réduire la matière organique sur laquelle l'ozone réagit fortement pour former des aldéhydes et cétones toxiques pour le milieu marin, le rendement moins efficace.

Malgré son efficacité remarquable, l'ozonation est un procédé peu utilisé puisqu'il nécessite des apports importants de réactif chers à l'achat et les concentrations élevées en découlant peuvent engendrer des problèmes de toxicité même si ce traitement offre peut de rémanence. [13]

C. Le rayonnement ultraviolet

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 débits 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. [13]

I.4.2.6 Le traitement des boues

Une station d'épuration produit en moyenne deux litres de boues résiduaires par habitant et par jour. Les boues récupérées lors de la décantation, le traitement biologique et la clarification doivent être traitées.

- Les boues sont présentes dans la station d'épuration sous plusieurs formes, on cite :
- Les boues physico-chimiques (qui sont produites dans les stations physico-chimiques).
- Les boues dites primaires, qui est le résultat de la décantation des matières en suspension contenues dans les eaux usées brutes (celles récupérées après le traitement primaire).
- Les boues secondaires sont formées à partir de la charge polluante dissoute durant la période de dessablage et de déshuilage (celles récupérées après le traitement secondaire).
- Les boues "mixtes" formées par les boues primaires et secondaires. Elles vont subir un traitement de stabilisation biologique.

Le traitement comprend une ou plusieurs étapes :

- A. L'épaississement**, grâce auquel la siccité atteint 3 à 5% ; il est obtenu soit dans un silo (appelé épaisseur) soit par passage sur une grille d'égouttage.
- B. La stabilisation**, nécessaire surtout pour les boues issues d'une décantation primaire. Elle est obtenue soit par une fermentation produisant du méthane (appelée digestion anaérobie), soit par mélange avec des matières carbonées (sciure, écorces, paille), c'est le compostage.
- C. La déshydratation** permettant d'atteindre une siccité de 20 à 30%. On recourt à un procédé mécanique généralement combiné à l'injection de réactif (chaux lorsque les boues sont destinées à l'agriculture, réactifs "polymères"). Les procédés mécaniques habituels sont la centrifugation (provoquant un essorage) et le passage dans un filtre à bande ou un filtre-pressé.
- D. Le séchage** (siccité de 60 à 90%) nécessitant un apport énergétique onéreux.

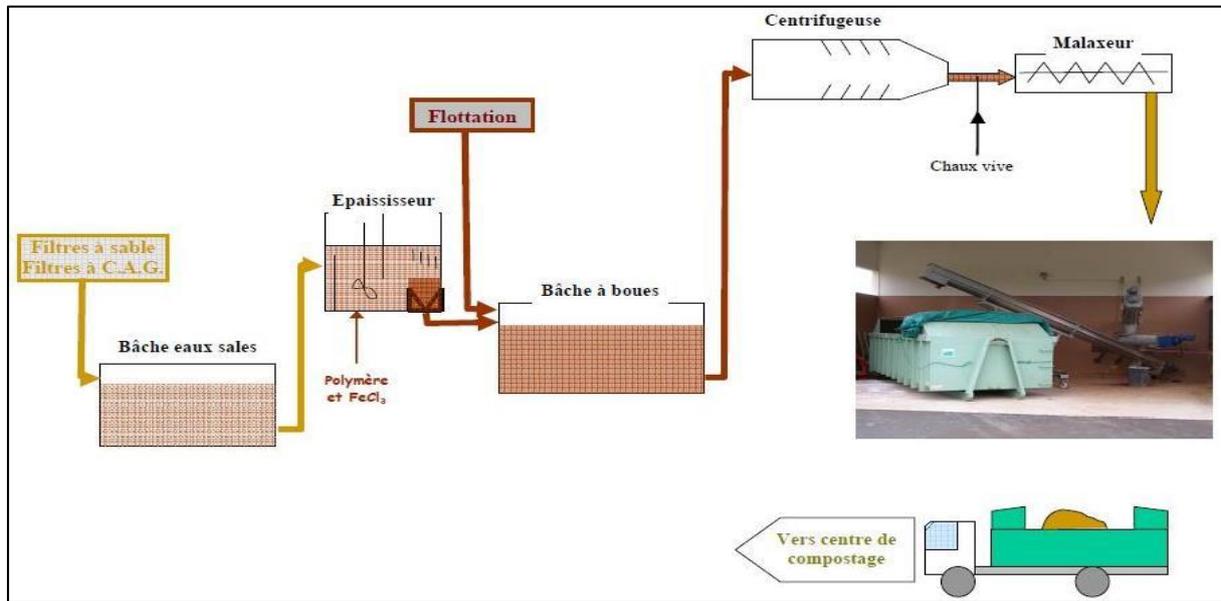


Figure I. 2 Schéma de traitements des boues

Les techniques utilisées sont également liées à la taille des stations : ainsi, en milieu rural offrant des facilités d'épandage, on pourra se contenter d'un simple épaissement, alors que les unités de grande taille doivent souvent recourir à une déshydratation, voire un séchage, en vue de l'incinération.

- L'usage de cette boue diffère d'une région à une autre selon les besoins, on distingue :
- L'épandage agricole, qui représente une valorisation de ce sous-produit fertilisant.
- L'élaboration de compost, par incorporation de paille ou de sciure.
- L'incinération, pour quelques grosses unités ou lorsqu'une installation locale existe déjà pour les ordures ménagères.
- la mise en décharge, solution qui devrait être progressivement abandonnée dans les années à venir.

Chapitre II : Théories de la régression multiple

II. 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.

II.1 Historique

Le terme régression a été introduit par Francis Galton (1822-1911), chercheur britannique du 19^{ème} 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.

II.2 Forme générale du modèle

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

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

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

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

L'équation de régression multiple est celle d'un hyperplan à P dimensions qui ne peut pas être représenté concrètement (au-delà de 2 dimensions), les paramètres b_i sont les pentes de cet hyperplan dans les dimensions considérées et sont appelés « coefficients de régression ».
[14]

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

II.3 Objectifs de la régression multiple

La régression multiple peut être utilisée à plusieurs fins:

- ✓ Trouver la meilleure équation linéaire de prévision (modèle) et en évaluer la précision et la signification.

- ✓ Estimer la contribution relative de deux ou plusieurs variables explicatives sur la variation d'une variable à expliquer; déceler l'effet complémentaire ou, au contraire, antagoniste entre diverses variables explicatives.
- ✓ Juger de l'importance relative de plusieurs variables explicatives sur une variable dépendante en lien avec une théorie causale sous-jacente à la recherche. [14]

II.4 Moindres carrés ordinaires

II.4.1 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. [15]

II.4.2 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. Si ϵ 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 :

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

II.5 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). [15]

II.5.1 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.

II.5.2 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.

I.1.1.1.1 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 :

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

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

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

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

II.7 Qualité de la régression

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

Tableau II. 1 Récapitulatif somme des carrés

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

Y : Valeurs observées de la variable dépendante

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

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

n : Taille de l'échantillon.

p : Nombre de variables indépendantes.

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

II.7.1 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

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

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 .

II.7.2 R^2 ajusté

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

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

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

Il est donné par la relation suivante :

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

Comme pour le R^2 , 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. [15]

II.7.3 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_0). 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.

II.7.3.1 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 α 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.

II.7.3.2 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 .

II.7.4 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 χ^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.

II.7.5 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).

II.7.5.1 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.

II.7.5.2 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. [16]

II.7.5.3 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.

II.7.5.4 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.

II.7.6 Types de régression multiple

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

II.7.7 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.

II.7.8 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.

II.7.9 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.

II.7.9.1 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.

II.7.9.2 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 α 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 α présélectionné **ou** le \bar{R}^2 global est atteint.

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

II.7.9.3 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.

Chapitre III : Présentation de la station d'épuration de Boumerdes

III. 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 m³/j.

Le tableau suivant donne une présentation de celle-ci :

Tableau III. 1 Présentation de la STEP de Boumerdes

STEP BOUMERDES	
Nom	
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 ³ /j

III.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 III. 1 STEP de Boumerdes [Google Earth]

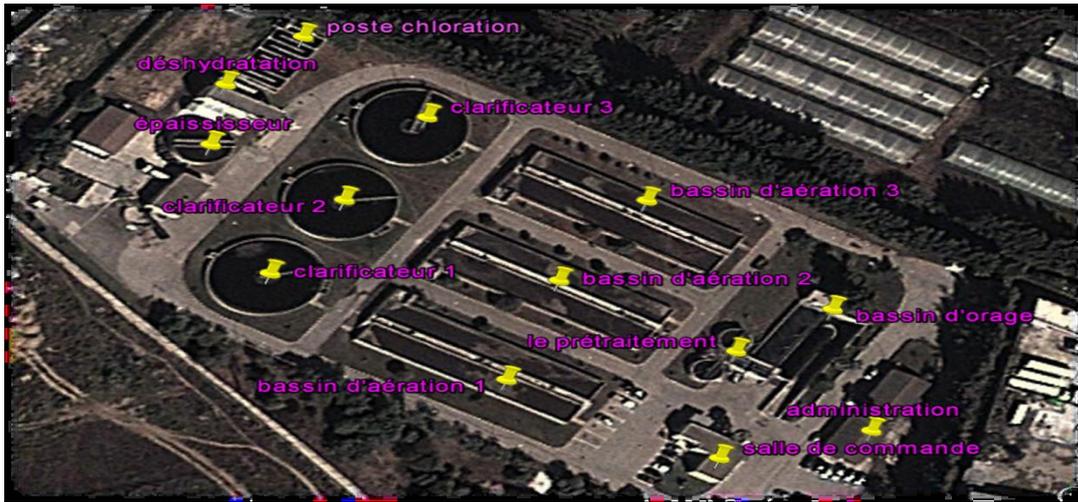


Figure III. 2 Vue d'ensemble des ouvrages de la STEP de Boumerdes

III.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 m³ /j
- Débit moyen 24 h 625 m³ /h
- Débit de pointe temps sec 1063 m³ /h
- Débit de pointe temps de pluie..... 1944 m³ /h

III.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 III. 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

III.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 :

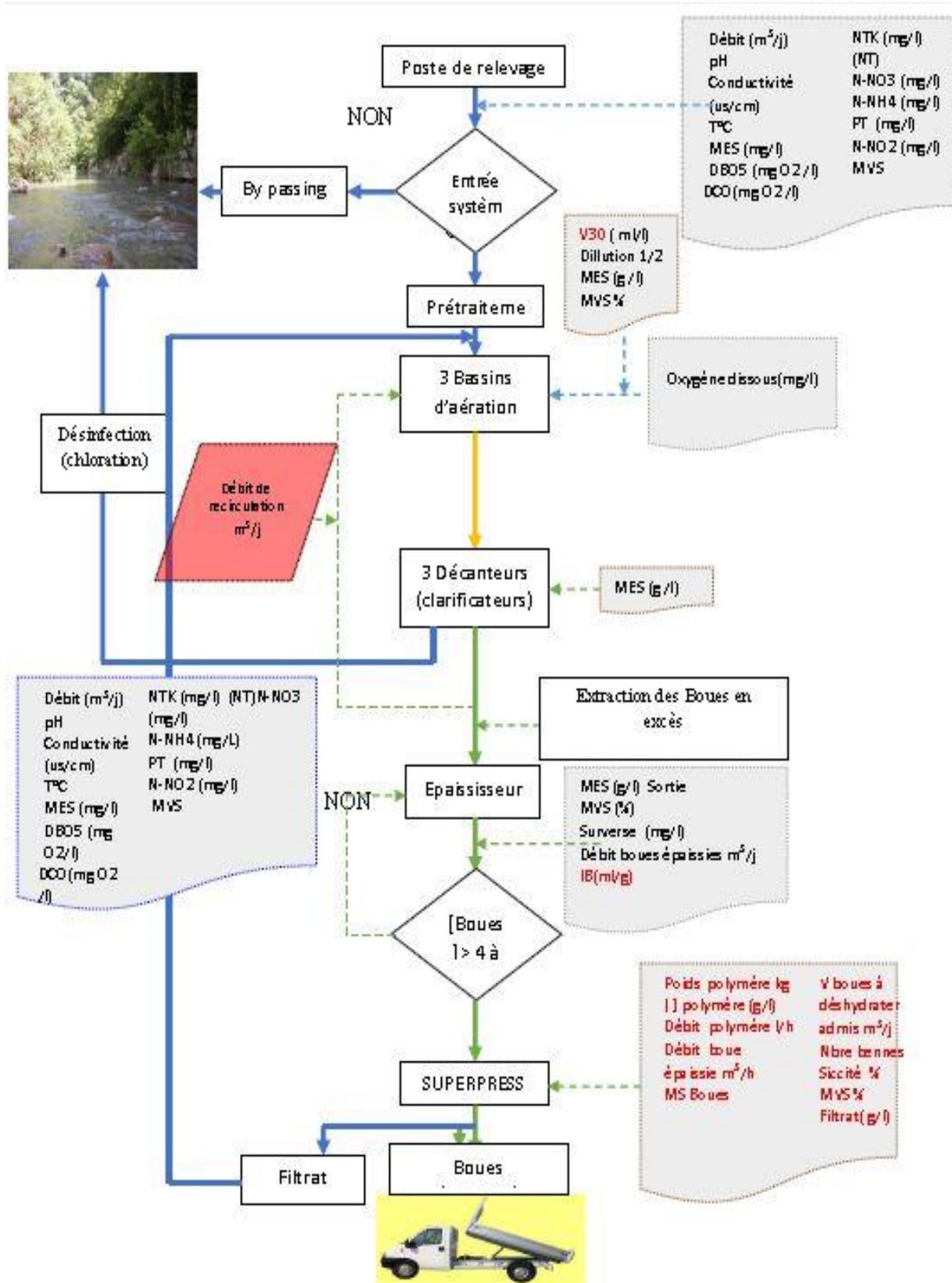


Figure III. 3 Organigramme d'exploitation de la STEP de Boumerdes

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.

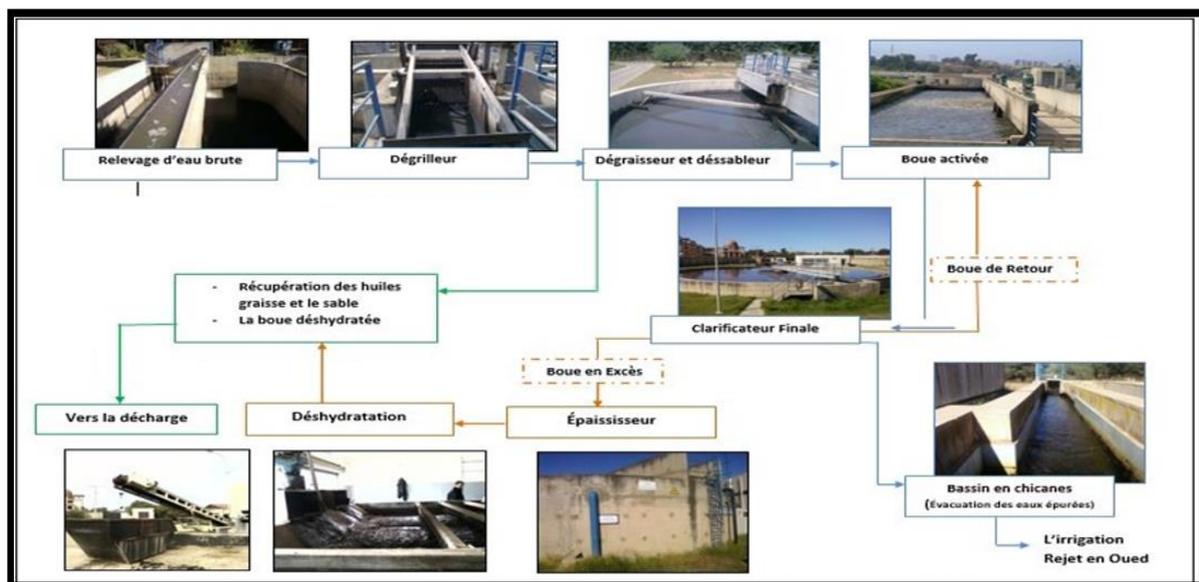


Figure III. 4 schéma des différents postes de traitement à la STEP de Boumerdes

III.3 Traitement au fil de l'eau

III.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 bêche 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 III. 5 Bassin d'orage de la STEP de BOUMERDES

III.3.2 Prétraitement

III.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 III. 6 Dégrilleur du type à champ courbe.

III.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 III. 7 Dessableur-Déshuileur

III.3.3 Procédé biologique

III.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 m³, profondeur : 4.5 m, nombre d'aérateurs : 9.



Figure III. 8 Bassin d'aération

III.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 III. 9 Décanteur-Clarificateur

III.3.4 Traitement final

III.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 III. 10 Bassin de chloration

III.4 Traitement au fil de boues

III.4.1 Épaississement 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/m²/j, concentration de sortie moyenne est de 20 g/l minimum avec un volume à transférer en déshydratation de 792 m³.

III.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 III. 11 Presse à bande

III.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.

III.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 III. 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
PH	7,32	0,14	6,71	8,08	7,27	0,16	6,39	8,03
T (°C)	20,36	3,82	7,55	35,93	28,23	4,3	9,4	29,9
MES (mg/l)	240,18	24	137,31	2400	13,53	8,21	1	160
DBO5 (mg/l)	248,64	20	156,38	2500	10,69	8,28	1	55
DCO (mg/l)	472,98	110	251,27	3264	42,14	24,83	1	173
NH4 + (mg/l)	30,98	18,49	0,8	126,54	5,4	8,25	0,001	60,1
NO2 - (mg/l)	0,2	0,28	0,001	2,7	0,44	0,96	0,0013	9,4
NO3 - (mg/l)	4,62	9,5	0,004	145	35,05	156,9	0,001	1529,15
NTK (mg/l)	48,99	21,97	1,5	218,96	14,48	32,33	0,05	644
PO 4 -3 (mg/l)	6,88	5,4	0,35	64,44	3,18	2,58	0,1	22,4
Débit (m³/j)	11994,68	42	4182,24	22491	/	/	/	/
Energie (Kwh)	3933,02	1083,08	11	8355	/	/	/	/
Energie aérateurs (Kwh)	3463,38	1098,48	0	7305,1	/	/	/	/
BR (m³/j)	16496,98	4885,04	0	27170	/	/	/	/
Bex (m³/j)	306,03	238,67	0	3913,31	/	/	/	/

Chapitre IV : Optimisation du débit recirculé

IV. Introduction

Dans ce chapitre nous allons élaborer un modèle d'optimisation qui nous permettra d'optimiser le débit recirculé, celui-ci sera basé sur l'historique de gestion de la STEP de Boumerdes durant les années « 2008-2016 » en utilisant la méthode de la régression multiple.

Ce modèle va aider les gestionnaires de la STEP de prendre des décisions optimales en matière de quantité de boue à recirculée chaque jour, afin de garantir une gestion optimale de la STEP.

IV.1 Evolution de débit recirculé

IV.1.1 Bassin d'aération N°1

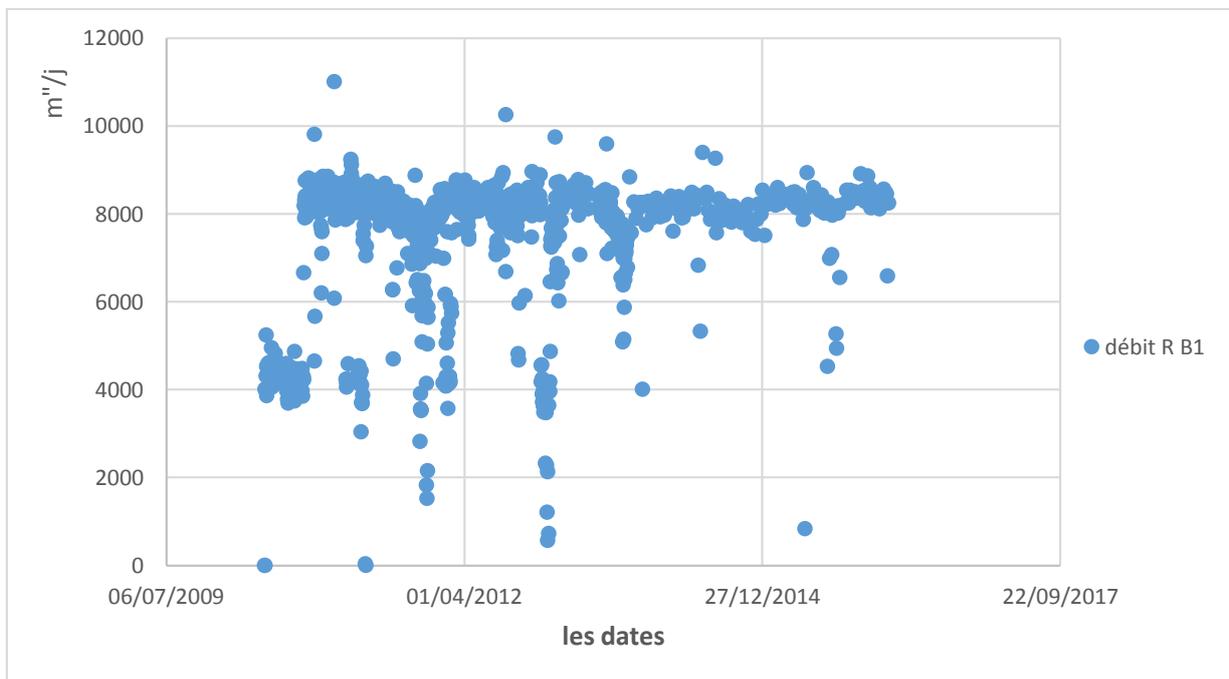


Figure IV 1 Evolution de la quantité de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°1

La figure ci-dessus représente l'évolution du débit de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°1.

En remarque que le débit de boue a recirculée varie entre 7200 à 9600 m³/j avec des exceptions où on a des valeurs inférieures à 7200.

IV.1.2 Bassin d'aération N°2

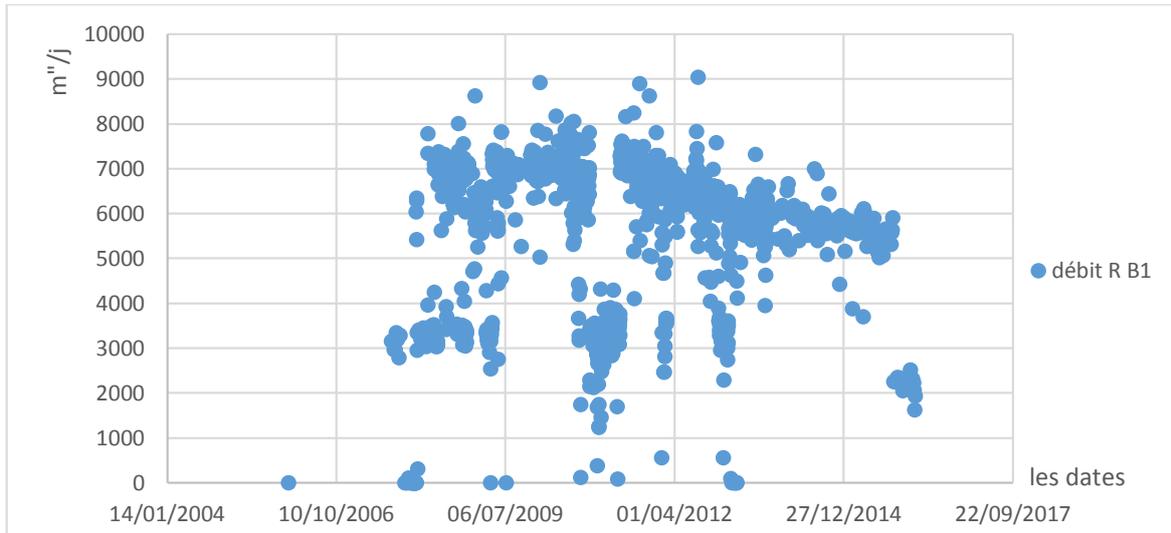


Figure IV 2 Evolution de la quantité de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°2

La figure ci-dessus représente l'évolution du débit de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°2.

En remarque que le débit de boue à recirculée varie entre 5000 à 8000 m³/j avec quelque exception où on a des valeurs inferieur a 5000.

IV.1.3 Bassin d'aération N°3

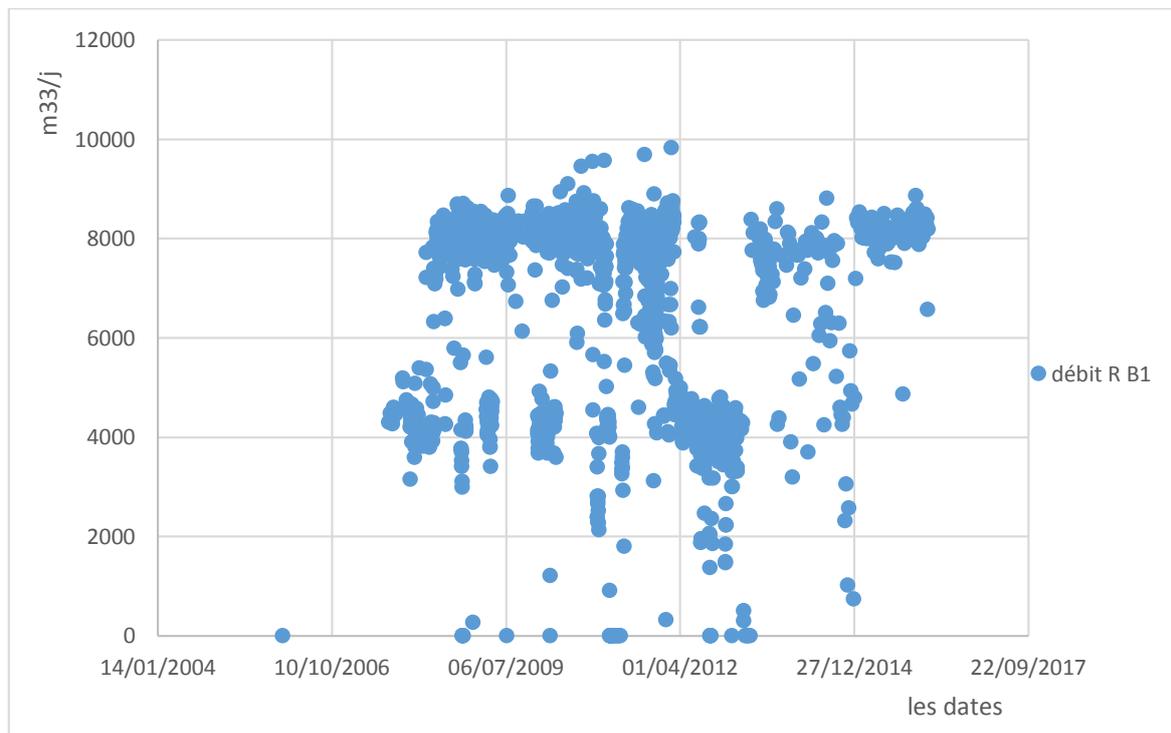


Figure IV 3 Evolution de la quantité de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°3

La figure ci-dessus représente l'évolution du débit de boue à recirculée dans le bassin d'aération N°3.

En remarque que le débit de boue à recirculée varie entre 4000 à 8500 m³/j.

IV.2 Formulation de la problématique

Avant d'optimisé le débit recirculé, il faut connaitre les différents paramètres qui influent sur la prise de décision de la quantité de boue à recirculée. Le schéma ci-dessous indique les différents paramètres ou contraintes liés à la problématique étudiée :

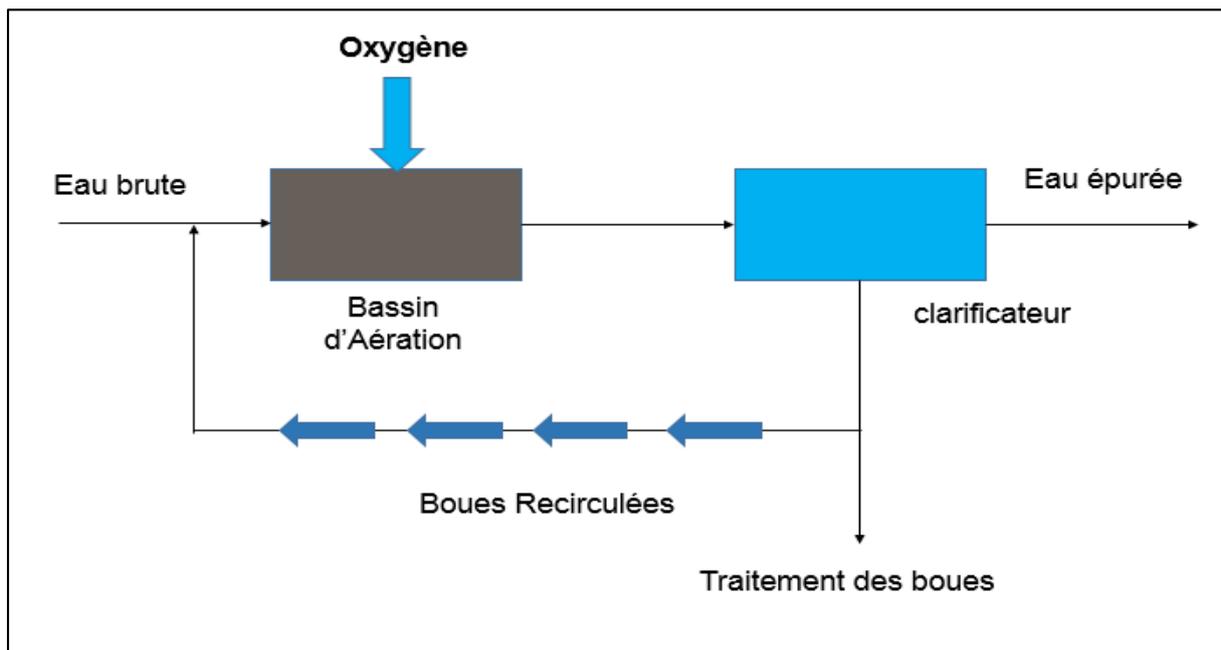


Figure IV 4 Principaux paramètres de l'optimisation du débit de boue à recirculée

Eau brute est caractérisé par :

- Le débit de l'effluent ;
- Les paramètres de pollution (T, PH, DBO5, DCO).

Boues recirculées est caractérisées par :

- Le débit recirculé ;
- La concentration des matières en suspensions (MES) dans la conduite de recirculation.

On plus :

- La concentration de la biomasse (MES) à l'intérieur du bassin d'aération.

Afin de résoudre cette problématique, on va élaborer un modèle qui nous permettra de simulé le débit de boue à recirculée (variable à expliqué) en fonction des paramètres jugée pertinentes dans la prise de décision du quantité de boue a recirculée (variables explicatives).

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

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

$$DR = f(X1, X2, X3, X4)$$

Tel que :

- **X1** : la concentration des MES dans bassin d'aération ;
- **X2** : Indice de pollution à l'entrée de la STEP ;
- **X3** : Indice de boue ;
- **X4** : la concentration des MES dans la conduite de recirculation.

IV.2.1 L'indice de pollution

Exprimer la quantité d'une eau est évident (donner son volume en m³) exprimer sa qualité est plus complexe et subjectif. En effet, si la structure de l'eau pure est simplement liée aux molécules de H₂O 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.

IV.2.1.1 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 lequel 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 ».

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

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).
- NH₄⁺ (ammonium).

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 apport 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 IV 1 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 IV 2 Matrice de corrélation entre les CP' et les variables sélectionnées

	F1	F2	F3	F4
MES_b	0,198	0,759	0,040	0,003
$DBO5_b$	0,760	0,003	0,148	0,119
DCO_b	0,755	0,033	0,034	0,178
$NH4 +_b$	0,580	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 IV 3 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

$NH_4 +_b$	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 :

$$WQI=\prod_{i=1}^n (Ii)^{Wi}$$

$$\sum_i^n Wi=1$$

Wi : Le poids associé à chaque paramètre sélectionné.

Ii : 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 :

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

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

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

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

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

Ii=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 :

$$WQI=\prod_{i=1}^n (Ii)^{Wi}$$

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

Les poids Wi 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 :

$$IP = 1 - WQI$$

Ip=1 : l'eau est très polluée.

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

IV.2.2 Indice de boue

L'indice de boues (abréviation IB) permet d'apprécier l'aptitude de la boue à la décantation. L'IB indique le volume occupé par 1 g de boue (matière sèche) après 30 min de décantation dans une éprouvette d'un litre. Pour calculer l'IB, le volume de la boue en ml/l est divisé par la concentration matières sèche de la boue (g/l). L'unité de l'IB est donc ml/g. Les valeurs typiques pour des stations d'épuration municipales se situent entre 80 et 120 ml/g. Les valeurs sont largement supérieures pour les boues de mauvaise décantabilité. On parle de boues filamenteuses si l'IB est supérieur à 150 ml/g. Lorsque l'IB est élevé, les concentrations de MES, phosphore et DCO en sortie de la STEP sont souvent élevées.

IV.3 La sélection des données :

Après avoir classée toutes les expériences de la station de Boumerdes, on a abouti à une matrice de 202 lignes, à partir de laquelle nous avons fait une sélection d'expériences jugées bonnes, en passant par deux étapes :

IV.3.1 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.

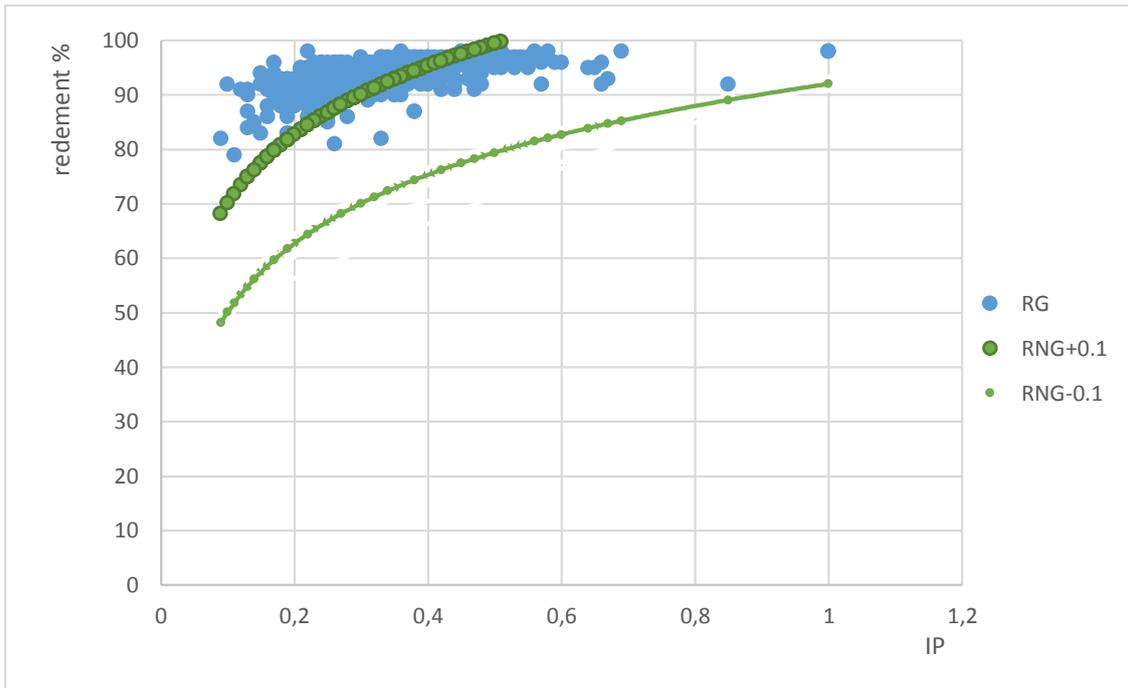


Figure IV 5 Représentation de l'intervalle de la première sélection.

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.

IV.3.2 2^{ème} Sélection

Cette 2^{ème} 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:

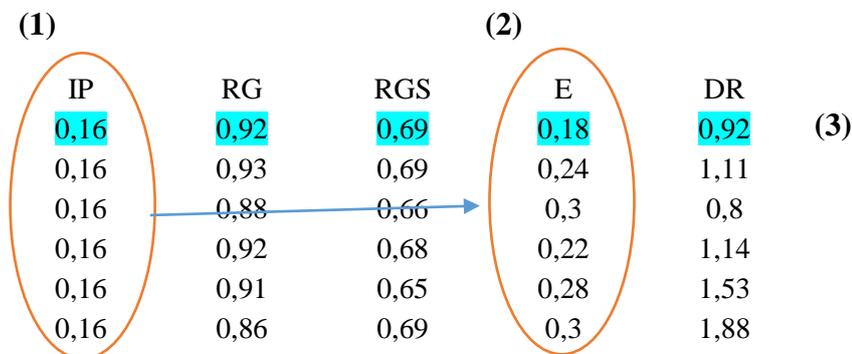


Figure IV 6 Etapes de la deuxième sélection

(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 ».

Les résultats de la sélection sont illustrés dans tableau suivant :

Tableau IV 4 Résultat de la sélection des expériences jugée bonnes: ± 0.1 du rendement optimal

	IP	RG	RGN	E	IB	MESBA	MESDR	DR
13/11/2011	0,12	0,86	0,78	0,3	0,22	6,62	6,25	1,39
13/08/2012	0,17	0,9	0,8	0,23	0,24	3,23	4,16	1,52
01/02/2012	0,18	0,91	0,83	0,27	0,23	1,99	1,94	1,69
10/09/2012	0,19	0,91	0,81	0,2	0,27	3,69	3,97	1,12
01/08/2012	0,2	0,9	0,82	0,18	0,26	2,78	3,57	1,32
12/11/2012	0,21	0,93	0,85	0,18	0,23	3,31	3,35	1,12
26/09/2012	0,22	0,91	0,82	0,2	0,25	3,47	3,19	1,28
01/07/2012	0,23	0,91	0,85	0,19	0,19	3,92	3,60	1,44
08/07/2012	0,24	0,9	0,86	0,2	0,20	3,75	3,74	1,29
22/07/2012	0,25	0,95	0,88	0,21	0,26	3,53	3,18	1,53
15/07/2012	0,26	0,9	0,85	0,19	0,23	3,11	3,29	1,52
26/11/2012	0,27	0,96	0,86	0,26	0,18	2,43	2,45	1,47
06/05/2015	0,28	0,94	0,85	0,22	0,84	2,26	2,07	1,37
28/08/2011	0,29	0,93	0,87	0,21	0,21	5,40	5,14	1,58
24/06/2014	0,3	0,95	0,88	0,27	2,89	2,98	3,58	1,43
06/08/2012	0,31	0,93	0,86	0,24	0,27	3,19	3,24	1,51
12/05/2014	0,32	0,96	0,89	0,25	2,37	3,58	3,75	1,36
03/06/2014	0,33	0,98	0,89	0,26	2,52	3,37	3,95	1,16
18/08/2014	0,34	0,96	0,89	0,25	1,21	3,52	3,66	1,12
02/09/2014	0,35	0,98	0,91	0,28	2,43	3,72	3,07	1,18
25/08/2014	0,36	0,96	0,91	0,29	2,37	3,59	3,67	1,21
09/08/2011	0,37	0,92	0,86	0,23	0,19	4,54	4,14	1,67
19/05/2014	0,38	0,97	0,9	0,26	2,40	3,54	3,80	1,42
15/09/2014	0,39	0,97	0,91	0,3	1,69	5,04	5,96	1,10

IV.4 Elaboration du modèle de régression multiple :

Dans cette partie nous allons exploiter la matrice des données sélectionnées afin d'établir un modèle de régression permettant de simuler la quantité de boue recirculée.

La variable à expliquer est le débit recirculé, les variables explicatives sont l'indice de pollution qu'on a déjà établi « IP », l'indice de boue « IB », la concentration des MES dans bassin d'aération «MES ba», a concentration des MES dans la conduite de recirculation « MES dr ».

IV.4.1 Modèles de la forme $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + \varepsilon$

Le modèle de régression établi est le suivant :

Modèle A :

$$DR = 2,62 + 0,04 * IB + 0,12 * MES_{BA} - 0,12 * MES_{DR} + 0,80 * IP - 0,23 * D$$

Qualité de la régression

Les paramètres permettant d'évaluer le modèle sont présentés dans le tableau suivant :

RMSE	R ²	$\overline{R^2}$	F	DW
0,101	0,748	0,624	10.69	1.818

Les valeurs de R², $\overline{R^2}$ sont satisfaisantes, la valeur de F est satisfaisante (inferieur a F déterminé par la table de Fisher). L'analyse des résidus montre qu'ils sont indépendants (DW = 1.818) et suivent une loi normal comme on peut le constater sur l'histogramme suivant :

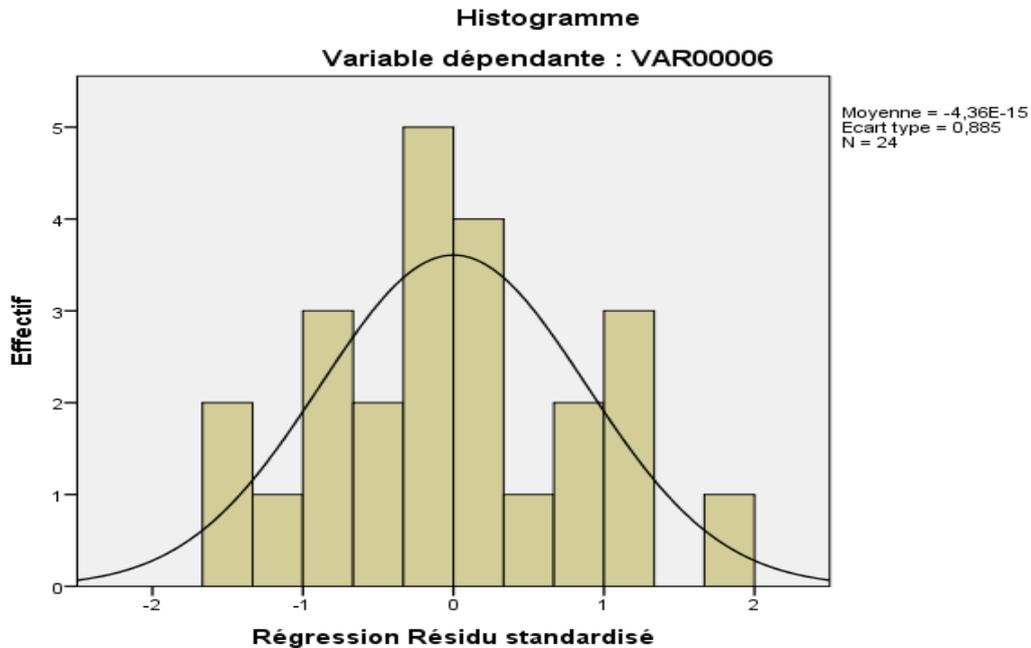


Figure IV 7 Histogramme des résidus modèle A

Le graphe ci-dessus représente histogramme des résidus du modèle A. 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.

Validation graphique :

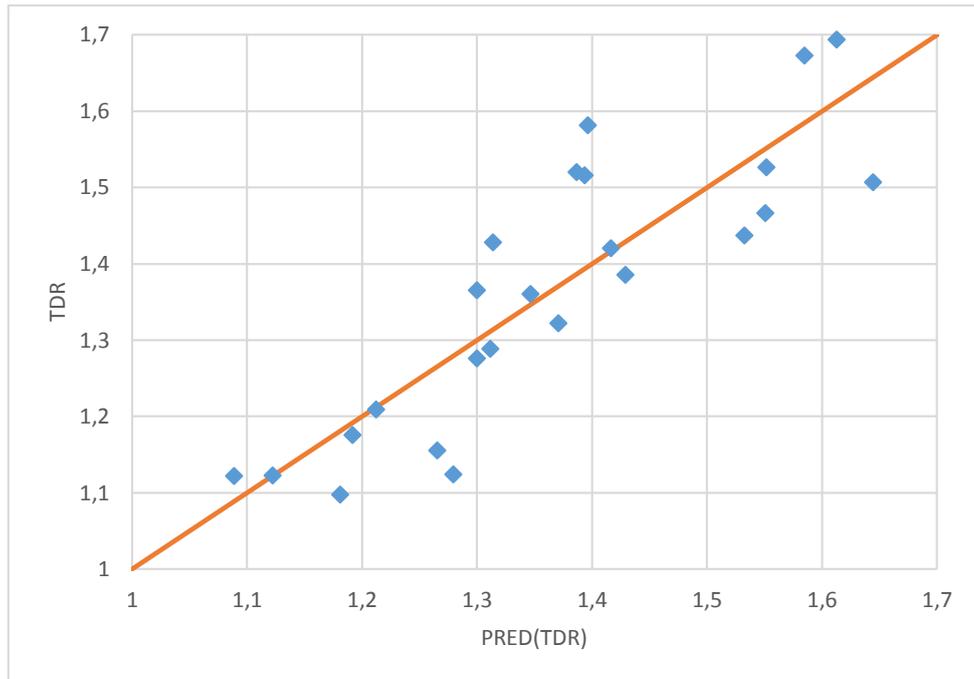


Figure IV 8 Résultat de simulation modèle A

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

IV.4.2 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 :

$$Y' = \text{Ln}(Y)$$

$$X_1' = \text{Ln}(X_1)$$

$$X_2' = \text{Ln}(X_2)$$

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

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

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

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

$$Y' = b_0' + b_1 X_1' + b_2 X_2' + \dots + b_p X_p' + \varepsilon$$

Avec : $Y' = \text{Ln}(Y)$, $X_i' = \text{Ln}(X_i)$ $i = 1, \dots, p$.

Les résultats de la régression multiple sont les suivants :

Modèle B

$$DR = 11,43 * (IB^{0,02}) * (MESBA^{0,29}) * (MESDR^{0,26}) * (IP^{0,13}) * (D^{0,05})$$

Qualité de la régression

Les paramètres permettant d'évaluer le modèle sont présentés dans le tableau suivant :

RMSE	R ²	$\overline{R^2}$	F	DW
0,11	0,705	0,65	15.23	2.35

Les valeurs de R^2 , $\overline{R^2}$ sont satisfaisantes, la valeur de F est satisfaisante (inferieur a F déterminé par la table de Fisher). L'analyse des résidus montre qu'ils sont indépendants (DW = 2.35).

Validation graphique :

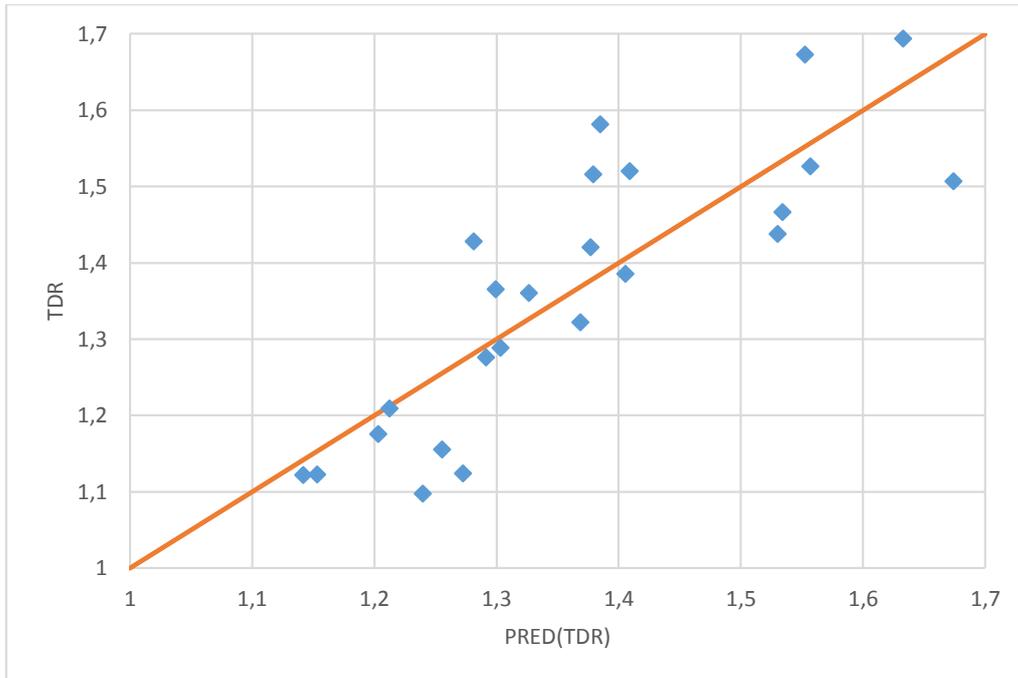


Figure IV 9 Résultat de simulation modèle B

Le graphe ci-dessus représente le taux de recirculation de boue observée en fonction de taux de recirculation de boue simulée à partir de modèle A, le nuage de point est proche de la bissectrice, ce qui confirme les résultats des critères d'évaluations numériques déjà calculé.

IV.4.3 Modèles de la forme $Y = b_0 + b_1X_1 + b_1'X_1^2 + \dots + b_pX_p + b_p'X_p^2 + \varepsilon$

Le modèle de régression établi est le suivant :

$$DR = 2,54 - 0,11 * IB - 0,26 * MES_{BA} + 0,11 * MES_{DR} + 1,86 * IP - 0,20 * D + 0,04 * IB^2 + 0,04 * MES_{BA}^2 - 0,03 * MES_{DR}^2 - 1,15 * IP^2 + 0,001 * D^2$$

Qualité de la régression

Les paramètres permettant d'évaluer le modèle sont présentés dans le tableau suivant :

RMSE	R ²	R ²	F	DW
0,112	0,776	0,692	3.505	2.016

Les valeurs de R^2 , $\overline{R^2}$ sont moyennes, mais la valeur de F n'est pas satisfaisante (supérieur à F déterminé par la table de Fisher).

Donc le modèle est rejeté sans faire analyse plus approfondie.

IV.4.4 Conclusion de la régression

1. Deux modèles (A, B) ont été établis. Ces modèles donnent de très bons résultats en respectant tous les critères de validation.
2. Le modèle C a été rejeté car il ne respecte pas à tous les critères de validation numérique.
3. Le modèle A, est le modèle le plus avantageux car le modèles linéaire est le plus simple à exploitation, ce dernier est le modèle qui sera retenus pour l'optimisation de la consommation en énergie électrique des aérateurs pour la STEP de Boumerdes.

IV.5 Exploitation du modèle d'optimisation :

Dans cette partie nous allons exploités le modèles d'optimisation déjà retenue précédemment, afin de déterminer la différence entre le débit recirculé observé et le débit recirculé déterminé par notre modèle d'optimisation.

Les résultats de la simulation de l'ensemble des journées non sélectionnées sont illustrés dans l'histogramme suivant :

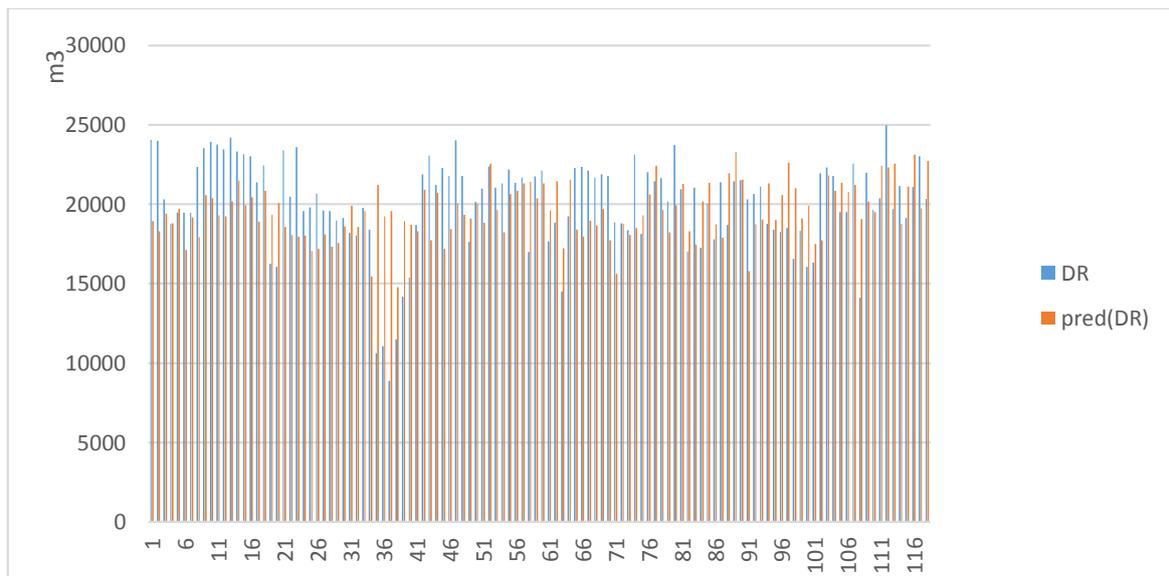


Figure IV 10 Comparaison entre DR simulée et DR observée

L'histogramme ci-dessus représente débit de boue recirculée observé, et le débit de boue recirculée simulée par notre modèle d'optimisation.

L'écart entre débit recirculé réelle et débit recirculé simulée représente le gain en matière débit recirculé, ce gain est représenté dans l'histogramme suivant :

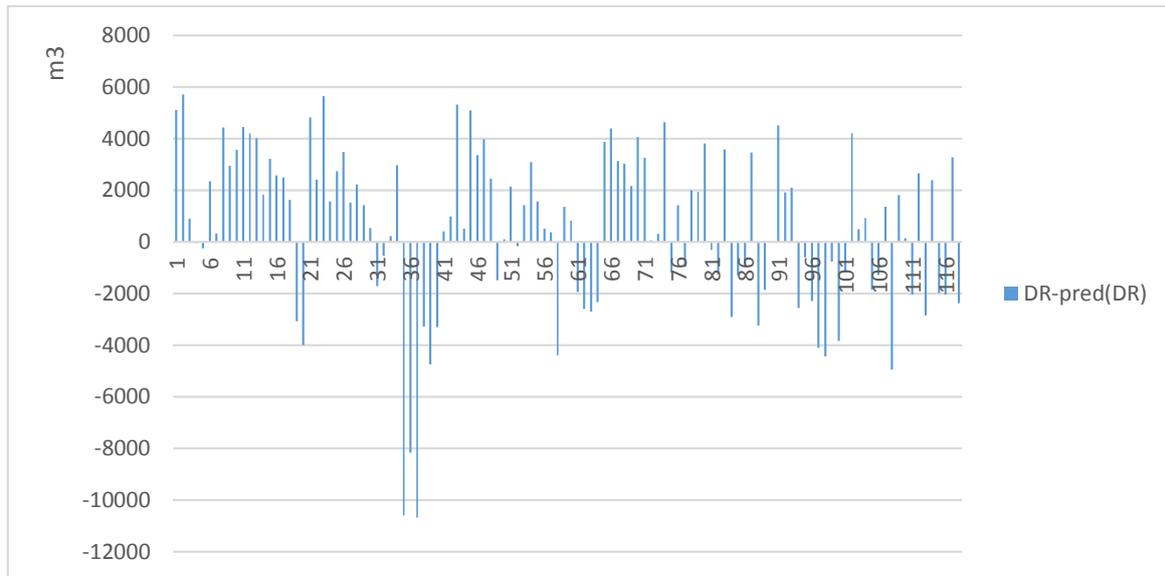


Figure IV 11 Gain en matière du débit recirculé

La figure ci-dessus représente le gain en matière du débit recirculé, on remarque une fluctuation de ce dernier (il y'a des journées où on un gain positive et d'autre un gain négatif).

IV.6 Utilisation du modèle de débit recirculée dans l'optimisation d'énergie électrique

Dans cette nous allons utiliser le modèle d'optimisation d'énergie électrique établi lors de mon PFE « optimisation d'énergie électrique de la STEP de Boumerdes ». [16]

Modèle d'optimisation d'énergie électrique est suivant :

$$E = 0,23 - 0,03 * DR + 0,17 * T - 0,09 * D + 0,003 * AB - 0,93 * IP + 0,008 * DR^2 - 0,02 * T^2 + 0,007 * D^2 + 0,00004 * AB^2 + 1,29 * IP^2 \quad [16]$$

Le but de cette étude est de faire une comparaison entre l'énergie électrique déterminée par modèle d'optimisation en utilisant la valeur de débit recirculé observé, et l'énergie électrique déterminée par modèle d'optimisation en utilisant le débit recirculé calculer par le modèle d'optimisation du débit recirculé « modèle A ».

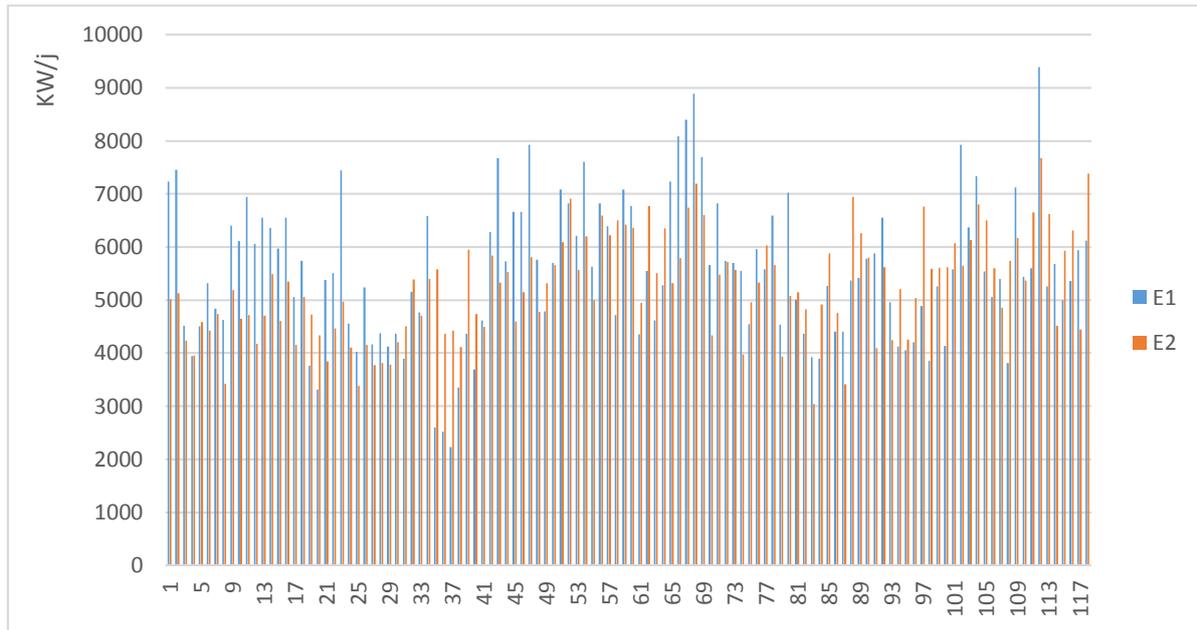


Figure IV 12 Comparaison entre les deux valeurs d'énergie électrique déterminées.

La figure ci-dessus présente une comparaison entre l'énergie électrique déterminée par modèle d'optimisation d'énergie électrique en gardant la valeur de débit recirculé observé et l'énergie déterminée par modèle d'optimisation en introduisant les valeurs de débit recirculé optimales.

On remarque à partir de cette figure que dans la majorité des cas l'énergie déterminée par modèle d'optimisation en introduisant les valeurs de débit recirculé optimales est inférieure de l'énergie électrique déterminée par modèle d'optimisation d'énergie électrique en gardant la valeur de débit recirculé observé.

On constate qu'une bonne maîtrise de la quantité de boue a recirculé chaque jour va nous conduire à une bonne optimisation de l'énergie électrique consommée par la STEP, et conséquence réduire le cout d'exploitation de cette dernière.

Conclusion générale

L'épuration des eaux usées est un ensemble de techniques qui visent à recycler les eaux usées dans le milieu naturel, c'est une reproduction du phénomène de l'autoépuration naturel, que ce soit par l'eau qui est reproduite dans les procédés à cultures libres tel que les boues activées et les lagunage naturels, ou par le sol qui est reproduite par les procédés à cultures fixées tel que les disques biologiques, le filtre planté de roseaux.

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).

Dans cette étude nous avons élaboré un modèle d'optimisation du débit de boue recirculée pour la STEP de Boumerdes, ce dernier va aider les gestionnaires de la STEP à prendre des décisions optimales et participer à l'optimisation d'énergie électrique de la STEP.

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 de la quantité de boue à recirculée dans le bassin biologique afin de les utiliser dans l'élaboration du modèle.

La deuxième étape contenait 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.

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 modèles et nous

avons jugées que le modèle A est le meilleur modèle pour l'optimisation de débit recirculé de la STEP de Boumerdes.

La cinquième étape et dernière a été l'exploitation du modèle d'optimisation (modèle A) sur l'ensemble des données des années d'étude, et l'utilisation de ce dernier dans l'optimisation d'énergie électrique de la STEP de Boumerdes.

Bibliographie

- [1] **Rejsek F**, (2002). Analyse des eaux, Aspects réglementaires et techniques.
- [2] **Rodier L. (2005)**. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Ed. Dunod, Paris.8eme edition,
- [3] **GROSCLAUDE G.,(1999)**. L'eau : usage et polluants. Edition INRA.
- [4] **Bollag JM.** (1973), Nitrate and nitrite volatilization by microorganisms in laboratory experiments. Editions: 4, United States.
- [5] **Paul Daniel Sindilariu, Alexander Brinker, Reinhard Reiter. (2009)**. Factors influencing the efficiency of constructed wetlands used for the treatment of intensive trout farm effluent.Ecologie modelling 520-532.
- [6] **GAID Abdelkader**, Epuration biologique des eaux usées urbaines Tome 1, mai 1984
- [7] **SALGHI R**, « Différents filières de traitement des eaux », ENSA d'Agadir, 116p, 2005.
- [8] Rapport d'information n° 261 (2000-2001) de **M. Gérard MIQUEL** et plusieurs de ses collègues, fait au nom de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scient. tech. , déposé le 5 avril 2001
- [9] **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.
- [10] **BELAHMADI Mohamed Seddik Oussama**, « étude de la biodégradation du 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.

[11] **ATTAB Sarah.** « Amélioration de la qualité microbiologique des eaux épurées par boues activées de la station d'épuration haoud berkaoui par l'utilisation d'un filtre à sable local » Ouargla, 201.

[12] **LIBES .Y,** « les eaux usées urbaines et leur épuration ».

[13] différents filières de traitement des eaux /**université IBN ZOHR**

[14] **Brocard. D. (2010).** Régression multiple. Université de Montréal. <http://www.cgu.edu/>

[15] **RAKOTOMALALA. R.** Régression linéaire multiple. Equipe de recherche en Ingénierie des connaissances.

[16] **DJAOUI. T (2016).** Projet de fin d'étude « optimisation de la consommation en énergie électrique de la STEP de Boumerdes ».