

**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

**Mémoire présenté par :**

**Nesrine LAREDJ**

**DEPARTEMENT HYDRAULIQUE**

**Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique**

**Thème**

**Application de l'Analyse en Composantes  
Principales (ACP) pour le diagnostic du  
fonctionnement de la station d'épuration de  
Boumerdes**

**Président : Mr. A.KETTAB**

Professeur (ENP)

**Encadreur : Mr. A.BERMAD**

Professeur (ENP)

**Examineurs:**

Mr. A.LEFKIR

Docteur (ENTP)

Mr. M.NAKIB

Chercheur (ENP)

Mr. S.LAHLAH

Chef de département (ONA)

**Promotion : 2013**

## ***Remerciements***

En premier et en dernier, avant tout et après tout, dans le bonheur et dans le malheur, merci à Allah le tout puissant pour toutes ses grâces et ses faveurs, pour m'avoir accordé la chance d'étudier à l'Ecole Nationale Polytechnique et m'avoir donné le courage et la force d'accomplir ce modeste travail.

Je remercie Monsieur le professeur A.BERMAD, mon promoteur, pour sa précieuse aide et ses conseils au cours de l'année, sa patience et sa disponibilité, son encouragement et sa sympathie.

Je tiens à remercier Monsieur le docteur A.LEFKIR qui m'a éclairé et m'a mit dans la bonne voie tout au long de mon travail, ainsi que pour ses remarques et ses encouragements.

Un grand merci à madame A.HAMRICHE pour son soutien, je la remercie vivement pour l'intérêt qu'elle a porté pour ce travail.

Un grand remerciement à Monsieur M.NAKIB pour son aide, ses explications et sa patience.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur le professeur A.KETTAB qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie Monsieur S.LAHLAH d'avoir accepté assister à ma soutenance comme un membre de jury.

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

Sans oublier le symbole de Polyteck Ami salah, je le remercie pour sa présence, son soutien tous le long de notre parcours du combattant.



## *Dédicace*

*A celle qui m'a consacré tout son cœur, jusqu' à ses battements incessants, tout son espoir qui se compte en termes de soupirs infinis, Mon Ange qui, jamais ne se plaint, ne demande de contrepartie, à part que je sois comme elle a tant espéré. A celle qui n'a jamais cessé de prier Dieu pour que tous mes pas soient couronnés de succès et mes vœux soient exaucés : **Ma mère...***

*A celui qui s'est incliné pour ma droiture, qui s'est donné tant de mal pour ma dignité, qui m'a appris que mon aise ne se réalise qu'à travers tant d'efforts fournis de ma part, qui m'a fait connaître que le savoir n'est complet qu'en lui adjoignant la morale. A celui qui a été et restera mon soutien inépuisable me permettant de franchir tous les obstacles passés et futurs. A celui qui m'a illuminé mon chemin : **Mon cher PAPA...***

***A mes grands-parents :** Que Dieu les protège et la prête en bonne santé et longue vie.*

*A ceux qui étaient toujours en ma compagnie, cheminant ensemble les divers domaines et les sentiers de la vie. A ceux qui sans eux la vie n'est pas meilleure : **Mouna, Souhila, Fatima, Abdelmoumene.***

*A ma tante **Nacira** qui était toujours prêt de moi à tout moment.*

*A tous les membres de ma grande famille : **LAREDJ et ZEBILA.***

*A qui ont partagé avec moi les bons comme les mauvais moments de la vie, les douleurs comme l'espoir, celles qui m'ont côtoyé durant les meilleures périodes de la vie, mes deux chères amies: **Dyhia et Lyna***

*A celle qui était la source de ma confiance : **Nejla***

*A celle qui m'a accompagné toujours et m'a soutenu, l'adorable : **Sana***

*A ma famille de l'hydraulique et à toute ma promotion*

***A toute personne chère à mon cœur,** et à tous ceux et toutes celles qui me connaissent et qui m'aiment.*

*A tous ceux-là, je dédie ce fruit de mes efforts.*

*Nesrine*

## ملخص

إن تنقية المياه المستعملة تعتبر وسيلة ضرورية للحد من ارتفاع تركيز المواد الملوثة. المشاكل البيئية التي يسببها صرف المياه من محطات التنقية وكذا ارادة التحسين والحفاظ على جودة الوسط المستقبل تستلزم رفع أداء المحطات من ناحيتي الجودة والفعالية. وفي هذا الإطار تهدف هذه الدراسة إلى تشخيص أداء محطة تنقية المياه المستعملة لمدينة بومرداس و ذلك من اجل تحسين المردود بتطبيق مقاربة رياضية " التحليل بالمركبات الاساسية " بهدف الكشف عن الأعطاب على مستوى المحطة من ناحية الطاقة المستهلكة خلال عملية التنقية .

**الكلمات المفتاحية :** تنقية المياه المستعملة ، الطاقة ، التحليل بالمركبات الاساسية.

## Résumé

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 cadre, notre étude a pour objectif de diagnostiquer le fonctionnement de la STEP de Boumerdes dans le but de l'optimiser, une approche mathématique est envisagée, en l'occurrence, l' « Analyse en Composantes Principales » afin de déceler d'éventuels dysfonctionnements au niveau de la STEP de BOUMERDES du point de vue énergie consommée au cours du processus d'épuration.

**Mots clé :** Epuration des eaux usées, énergie, analyse en composantes principales (ACP)

## Abstract

Now days, water purification is essential to face the tough consequences of the existence of polluting substances in nature. Taking care of environmental problems caused by waste water treatment plant (WWTP) rejections and the will to preserve Receivers Lake and streams has lead us to look for a way to improve the efficiency of WWTP economically and environmentally. The goal of our study is to make a diagnostic of the WWTP of Boumerdes in order to make its rentability optimal. A mathematical approach is meant to reveal eventual dysfunctions about the energy consumption during the purification process

**Key words:** Water purification, Energy, Principal components analyze.

# *Sommaire*

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## **CHAPITRE I : Pollution de l'eau**

I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2. ORIGINES DES EAUX USEES.....	3
I.2.1. Eaux usées domestiques.....	3
I.2.2. Eaux usées industrielles.....	3
I.2.3. Eaux usées de ruissellement.....	3
I.2.4. Eaux usées agricoles.....	4
I.3. CLASSIFICATION DES PARAMETRES DE POLLUTION.....	4
I.3.1. Paramètres physico-chimiques.....	4
I.3.2. Paramètres de la pollution particulière.....	5
I.3.3. Les paramètres de la pollution organique globale.....	6
I.3.4. Paramètres de la pollution dissoute.....	7
I.3.5. Paramètres toxiques.....	8
I.3.6. Paramètres microbiologiques.....	9
I.5. CONCLUSION.....	10

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

II.1. INTRODUCTION.....	11
II.2. COLLECT DES EAUX USEES : LES DIFFERENTS MODES D'ASSAINISSEMENT.....	11
II.3. STATION D'EPURATION.....	13
II.4. FILIERES D'EPURATION DES EAUX USEES.....	13
II.4.1. Prétraitements.....	14
II.4.2. Traitement primaire.....	16

II.4.3. Traitement secondaire.....	17
II.4.4. Traitement tertiaire.....	23
II.4.5. Traitement complémentaire.....	27
II.5.EPURATION EN ALGERIE.....	31

## **Chapitre III : Analyse en Composantes Principales (ACP)**

III.1. INTRODUCTION.....	32
III.2. DESCRIPTION DE LA METHODE.....	32
III.3. DEFINITIONS.....	33
III.3.1. Notions d'individu et de caractère.....	33
III.3.2. Définition algébrique.....	33
III.3.3. Définition géométrique.....	35
III.4. FORMULATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME.....	36
III.4.1. Optimisation du problème.....	36
III.4.2. Formulation matricielle.....	39
III.4.3. Procédé de l'application de l'ACP.....	40
III.4.4. Principaux résultats.....	44
III.4.5. Représentation graphique.....	44
III.5. APPLICATION DE L'ACP.....	45
III.5.1. Influence de la transformation des variables.....	46
III.6. CONCLUSION.....	50

## **Chapitre IV : Présentation de la STEP de Boumerdes**

IV.1. INTRODUCTION.....	51
IV.2. LOCALISATION.....	51
IV.3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES.....	52

<b>IV.4. DEFINITION DE LA POLLUTION à TRAITER.....</b>	<b>52</b>
<b>IV.5. PARAMETRE DE POLLUTION DE CONCEPTION.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.6. PROCEDE D'EPURATION.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.6.1. Principe du traitement.....</b>	<b>55</b>
<b>IV.7. CRITIQUE DES DONNEES.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.7.1. Statistique des données.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.7.2. Graphes des variations journalières.....</b>	<b>62</b>
<b>IV.7.3. Détermination des valeurs singulières.....</b>	<b>73</b>

## **Chapitre V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes**

<b>V.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>76</b>
<b>V.2. PROCEDURE DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES .....</b>	<b>76</b>
<b>V.2.1. Données utilisées.....</b>	<b>76</b>
<b>V.2.2. Etapes de l'ACP.....</b>	<b>76</b>
<b>V.2.3. Résultats de l'ACP.....</b>	<b>77</b>
<b>V.3. APPLICATION.....</b>	<b>78</b>
<b>V.3.1. Application de l'ACP sur les paramètres de pollution d'entrée (Eau brute).....</b>	<b>78</b>
<b>V.3.2. Application de l'ACP sur les paramètres de l'eau (Entrée-Sortie).....</b>	<b>87</b>
<b>V.3.2. Relation entre l'énergie consommée au cours du processus de l'épuration et les paramètres de pollution.....</b>	<b>91</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>109</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>111</b>

## Liste des figures

### CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

Figure II.1 : Réseau unitaire.....	12
Figure II.2 : Réseau séparatif.....	13
Figure II.3 : Chaîne de prétraitement (Dégrillage-Dessablage-Déshuilage).....	14
Figure II.4 : Dégrilleur.....	15
Figure II.5 : Bassin de dessablage.....	15
Figure II.6 : Dessableur-Dégraisseur.....	16
Figure II.7 : Décanteur primaire.....	17
Figure II.8 : Schéma d'une station d'épuration classique à boues activées.....	20
Figure II.9 : Décanteur secondaire.....	20
Figure II.10 : Synoptique d'une station d'épuration comportant un lit bactérien.....	22
Figure II.11 : Schéma du principe d'un disque biologique.....	23
Figure II.12 : Epaissement des boues.....	30
Figure II.13 : Déshydratation des boues.....	30

### CHAPITRE IV : Présentation de la STEP de Boumerdes

Figure IV.1 : Vue de dessus de la STEP de Boumerdes par satellite [Google earth]...51	51
Figure IV.2 : Photo de la STEP de Boumerdes.....	51
Figure IV.3 : Vue d'ensemble des ouvrages de la STEP de Boumerdes.....	52
Figure IV.4 : Organigramme d'exploitation de la STEP de Boumerdes.....	54
Figure IV.5 : Bassin d'orage de la STEP de Boumerdes.....	56
Figure IV.6 : Dégrilleur du type champ courbe.....	56
Figure IV.7 : Dessableur-Déshuileur.....	57
Figure IV.8 : Bassin d'aération.....	57
Figure IV.9 : Décanteur-Clarificateur.....	58
Figure IV.10 : Bassin de chloration.....	59



<b>Figure IV.11 : Presse à bande.....</b>	<b>60</b>
<b>Figure IV.12 : Variation journalière du PH de l'eau brute.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.13 : Variation journalière du PH de l'eau épurée.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure IV.14 : Variation journalière de la température de l'eau brute.....</b>	<b>63</b>
<b>Figure IV.15 : Variation journalière de la température de l'eau épurée.....</b>	<b>63</b>
<b>Figure IV.16 : Evolution journalière de la concentration en MES à l'entrée de la STEP .....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV.17 : Evolution journalière de la concentration en MES à la sortie.....</b>	<b>64</b>
<b>Figure IV.18 : Evolution de la DBO5 à l'entrée de la STEP.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure IV.19 : Evolution de la DBO5 à la sortie de la STEP.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure IV.20 : Evolution de la DCO à l'entrée de la STEP.....</b>	<b>66</b>
<b>Figure IV.21 : Evolution de la DCO sortie de la STEP.....</b>	<b>66</b>
<b>Figure IV.22 : Evolution de l'ammonium (NH<sub>4</sub>) à l'entrée de la STEP.....</b>	<b>67</b>
<b>Figure IV.23 : Evolution de l'ammonium à la sortie de la STEP.....</b>	<b>67</b>
<b>Figure IV.24 : Evolution du nitrite à l'entrée de la STEP.....</b>	<b>68</b>
<b>Figure IV.25 : Evolution du nitrite à la sortie de la STEP.....</b>	<b>68</b>
<b>Figure IV.26 : Evolution du nitrate à l'entré de la STEP.....</b>	<b>68</b>
<b>Figure IV.27 : Evolution du nitrate à la sortie de la STEP.....</b>	<b>69</b>
<b>Figure IV.28 : Evolution de NTK à l'entrée de la STEP.....</b>	<b>69</b>
<b>Figure IV.29 : Evolution de NTK à la sortie de la STEP.....</b>	<b>69</b>
<b>Figure IV.30 : Evolution de PO<sub>4</sub> à l'entrée de la STEP.....</b>	<b>70</b>
<b>Figure IV.31 : Evolution de PO<sub>4</sub> à la sortie de la STEP.....</b>	<b>70</b>
<b>Figure IV.32 : Evolution du débit journalier de l'effluent.....</b>	<b>71</b>
<b>Figure IV.33 : Evolution de l'énergie totale consommée à la STEP.....</b>	<b>71</b>
<b>Figure IV.34 : Représentation des paramètres de pollution (Entrée-Sortie) par rapport à la norme.....</b>	<b>72</b>

## **CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Bouverdes**

<b>Figure V.1 : Paramètres de l'eau brute à l'échelle mensuelle [1×2].....</b>	<b>81</b>
<b>Figure V.2 : Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle mensuelle [1×3].....</b>	<b>81</b>
<b>Figure V.3 : Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle mensuelle [2× 3].....</b>	<b>82</b>
<b>Figure V.4 : Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle journalière [1×2].....</b>	<b>85</b>
<b>Figure V.5 : Paramètre de pollution de l'eau brute à l'échelle journalière [1×3].....</b>	<b>86</b>
<b>Figure V.6 : Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle journalière [2×3].....</b>	<b>86</b>
<b>Figure V.7 : Paramètres de pollution (Entrée-Sortie) à l'échelle mensuelle [1×2].....</b>	<b>89</b>
<b>Figure V.8 : Paramètres de pollution (Entrée-Sortie) à l'échelle journalière [1×2].....</b>	<b>91</b>
<b>Figure V.9 : Paramètres de pollution (Entrée-Sortie)-Rendement énergétique à l'échelle mensuelle [1×2].....</b>	<b>95</b>
<b>Figure V.10 : Paramètres de pollution (Entrée-Sortie)-Rendement énergétique à l'échelle journalière [1×2].....</b>	<b>98</b>
<b>Figure V.11 : Rapport-Rendement énergétique à l'échelle mensuelle [1×2].....</b>	<b>102</b>
<b>Figure V.12 : Rapport –Rendement énergétique à l'échelle mensuelle [1×3].....</b>	<b>102</b>
<b>Figure V.13 : Rapport-Rendement énergétique à l'échelle mensuelle [2×3].....</b>	<b>103</b>
<b>Figure V.14 : Rapport-Rendement énergétique à l'échelle journalière [1×2].....</b>	<b>106</b>
<b>Figure V.15 : Rapport-Rendement énergétique à l'échelle journalière [1×3].....</b>	<b>107</b>
<b>Figure V.16 : Rapport-Rendement énergétique à l'échelle journalière [2×3].....</b>	<b>107</b>

## Liste des tableaux

### Chapitre IV : Présentation de la STEP de Boumerdes

Tableau IV.1 : Paramètres de pollution de conception de la station d'épuration de Boumerdes.....	53
Tableau IV.2 : Statistiques des données.....	61
Tableau IV.3 : Résultats du test de Grubbs et Beck.....	74

### Chapitre V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

Tableau V.1 : Codification des variables (Eau brute).....	78
Tableau V.2 : Matrice de corrélation des paramètres de l'eau brute.....	79
Tableau V.3 : Variance totale expliquée (Paramètres de l'eau brute/mensuel).....	79
Tableau V.4 : Matrice de corrélation entre les CP' et les variables (Paramètre de l'eau brute/mensuel).....	80
Tableau V.5 : Matrice de corrélation des paramètres de l'eau brute (journalier)...	83
Tableau V.6 : Variance totale expliquée (Paramètres de l'eau brute/journalier)....	84
Tableau V.7 : Corrélation entre les CP' et les variables (Paramètres de l'eau brute/journalier).....	84
Tableau V.8 : Codification des variables (Eau brute-Eau épurée).....	87
Tableau V.9 : Variance totale expliquée (Eau brute-Eau épurée) mensuel.....	88
Tableau V.10 : Matrice de corrélation entre les CP' et les variable (Eau brute-Eau épurée/mensuel).....	89
Tableau V.11 : Variance totale expliquée (Eau brute-Eau épurée/mensuel).....	93
Tableau V.12 : Corrélation entre les CP' et les variables (Eau brute –Eau épurée) .....	94
Tableau V.13 : Variance totale expliquée (Eau brute-Eau épurée /journalier).....	96

<b>Tableau V.14 : Matrice de corrélation entre les CP'</b> .....	<b>97</b>
<b>Tableau V.15 : Codification des variables (Rapport –Rendement énergétique)</b> .....	<b>100</b>
<b>Tableau V.16 : Matrice de corrélation (Rapport-Rendement énergétique/mensuel)</b> .....	<b>100</b>
<b>TableauV.17 : Variance totale expliquée (Rapport-Rendement énergétique/mensuel)</b> .....	<b>101</b>
<b>Tableau V.18 : Corrélation entre les CP' et les variables</b> .....	<b>101</b>
<b>Tableau V.19 : Matrice de corrélation (Rapport-Rendement énergétique)</b> .....	<b>104</b>
<b>Tableau V.20 : Variance totale expliquée (Rapport-Rendement énergétique/journalier)</b> .....	<b>105</b>
<b>Tableau V.21 : Matrice de corrélation entre les CP' et les variables (Rapport- Rendement énergétique /journalier)</b> .....	<b>105</b>

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

La dépollution des eaux usées est devenue un impératif pour nos sociétés modernes. En effet, le développement des activités humaines s'accompagne inévitablement d'une production croissante de rejets polluants. L'assainissement des eaux usées (ou dépollution) répond à deux préoccupations essentielles : préserver les ressources en eau, préserver le patrimoine naturel et la qualité de la vie.

L'eau et la pollution sont régulièrement citées parmi les crises les plus graves que l'humanité aura à affronter pendant les prochaines décennies. L'Algérie à l'instar des autres pays du monde est confrontée à la crise de l'eau qui est aggravée par la forte pression sur le potentiel en eau en raison de la progression démographique, parallèlement la détérioration de la qualité de cette ressource, augmente le risque de pénurie. Trop polluées, nos réserves d'eau pourraient ne plus être utilisables pour produire de l'eau potable, sinon à des coûts très élevés, du fait de la sophistication et de la complexité des techniques à mettre en œuvre pour en restaurer la qualité.

Devant cette situation pesante, on doit contribuer pour préserver notre environnement hydrique ainsi que nos ressources à "nettoyer" les eaux usées avant leur retour à la nature pour limiter le plus possible la pollution de nos réserves en eau : cours d'eau, lacs et nappes souterraines, c'est pourquoi nos stations d'épuration devront être bien plus performantes.

Presque tous les services publics d'eau cherchent à améliorer le fonctionnement de leurs stations pour contrôler leur cout et rencontrer les exigences réglementaires sévères de la qualité de l'eau.

L'objectif de notre projet est de diagnostiquer le fonctionnement de la STEP de Boumerdes en se basant sur une approche purement mathématique « Analyse en Composantes Principales (ACP) ». On s'est limité dans cette étude à l'impact de l'épuration des eaux usées sur la consommation d'énergie.

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

# *Introduction générale*

Après une brève introduction générale ou on a mis l'accent sur l'importance de la dépollution des eaux usées afin de préserver les ressources en eau, le patrimoine naturel et la qualité de la vie.

On s'est attelé dans le premier chapitre, à identifier les différents polluants de l'eau.

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

La théorie de l'analyse en composantes principales (ACP) a fait l'objet du troisième chapitre.

Dans la première partie du quatrième chapitre, on a présenté la STEP de Boumerdes alors que la seconde partie a été consacrée à la critique des données recueillies, afin d'appréhender leur fiabilité.

La partie pratique de ce mémoire de fin d'études a fait l'objet du chapitre cinq où l'essentiel des résultats obtenus avec leurs interprétations et conclusions sont présentés.

L'application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes nous a permis de déceler l'apport de chaque paramètre mesuré sur l'explication de l'énergie consommée au cours du processus d'épuration.

Enfin, une conclusion générale, dans laquelle on a mis l'accent sur l'importance de l'utilisation d'une technique mathématique, pour le diagnostic d'une STEP, qui nous a permis entre autres de bien visualiser le comportement de cette dernière et de relever ses dysfonctionnements. En outre, on a commenté les principaux résultats obtenus par rapport à l'objectif assigné au départ, et montré les limites de la démarche adoptée dans ce mémoire, et enfin nous avons préconisé quelques recommandations et perspectives pour la suite de ce travail de recherche.

# ***CHAPITRE I : Pollution de l'eau***

*« Jusqu'à ce que la douleur le lui enseigne,  
l'homme ne sait pas quel trésor est l'eau »*

## **I.1. INTRODUCTION**

Depuis toujours, l'homme s'est soucié du problème de pollution, ce dernier représente une modification défavorable du milieu naturel qui apparait en totalité ou en partie comme le sous-produit de l'action humaine à travers les effets directs ou indirects de la constitution physico-chimique du milieu et de l'abondance des êtres vivants, et afin de réduire ce problème, il faut d'abord l'identifier. Dans ce chapitre on va définir les différents agents polluants responsables de la diminution de la qualité des eaux, leurs classifications ainsi que leurs effets sur l'efficacité de l'épuration.

## **I.2. ORIGINES DES EAUX USEES**

Les eaux usées proviennent de trois sources principales :

### **I.2.1. Eaux usées domestiques**

Constituant généralement l'essentiel de la pollution, elles se composent :

- des eaux vannes d'évacuation des toilettes.
- des eaux ménagères d'évacuation des cuisines, salles de bain.

Les déchets présents dans ces eaux souillées sont constitués par des matières organiques dégradables et des matières minérales. Ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension. [1]

### **I.2.2. Eaux usées industrielles**

Presque toutes les eaux de rejets résultant d'une utilisation de l'eau autre que domestique qualifiées de rejets industriels. Cette définition concerne les rejets des usines ainsi que les rejets d'activités artisanales ou commerciales. Les eaux industrielles peuvent contenir des produits toxiques, des métaux lourds, des polluants organiques et des hydrocarbures. [1]

### **I.2.3. Eaux usées de ruissellement**

Ce sont les eaux pluviales ou de ruissellement urbain (lavage des chaussées, des marchés et des rues). Les eaux de service public contiennent des matières solides, graisses et huiles de lavages des chaussées. [1]



## I.2.4. Eaux usées agricoles

Ce sont des eaux qui proviennent de l'agriculture et contiennent des fertilisants, pesticides et autres produits chimiques. Elles se caractérisent par des fortes concentrations en composées azotés et phosphorés.

## I.3. CLASSIFICATION DES PARAMETRES DE POLLUTION

Les eaux usées sont des milieux extrêmement complexes, aussi se réfère-t-on à quelques paramètres pour les caractériser que nous classerons ainsi selon : [2]

- Les paramètres physico-chimiques.
- Les paramètres de la pollution particulaire.
- Les paramètres de la pollution organique globale.
- Les paramètres de la pollution dissoute.
- Les paramètres toxiques.
- Les paramètres microbiologiques.

### I.3.1. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques qui caractérisent une eau usée sont :

#### I.3.1.1 Température

La température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz, c'est un paramètre qui a une influence sur :

- l'activité de la biomasse nitrifiante. [3]
- les propriétés de décantation : quand la température augmente, l'indice de décantation augmente car la densité des floccs diminue. [3]
- La toxicité : l'effet toxique des substances chimiques est plus grand à température élevée. [4]

La demande biologique en oxygène : une augmentation de la température conduit à une augmentation de la consommation de l'O<sub>2</sub> dissous. [4]

# CHAPITRE I : Pollution de l'eau

## I.3.1.2. PH

Le PH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions  $H^+$  de l'eau, il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14.

Il influence la plupart des mécanismes chimiques et biologiques dans les eaux, son rôle est capital pour la croissance des micro-organismes qui ont généralement un pH optimum variant de 6,5 à 7,5. Lorsque le pH est inférieur à 5 ou supérieur à 8,5, la croissance des micro-organismes est directement affectée. [5]

## I.3.1.3. Conductivité

La conductivité électrique est probablement l'une des plus simples et des plus importantes pour le contrôle de la qualité des eaux usées. Elle nous renseigne sur le taux de salinité.

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium ( $Ca^{2+}$ ), de magnésium ( $Mg^{2+}$ ), de sodium ( $Na^+$ ), les chlorures ( $Cl^-$ ), les sulfates ( $SO_4^{2-}$ ) et les bicarbonates ( $HCO_3^-$ ). La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500  $\mu S/cm$ . [5]

## I.3.1.4. Oxygène dissous

Les concentrations en oxygène dissous constituent l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient essentiellement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. Cette concentration en oxygène dissous est également fonction de la vitesse d'appauvrissement du milieu en oxygène par l'activité des organismes aquatiques et les processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau.

## **I.3.2. Paramètres de la pollution particulaire**

Les différents paramètres de la pollution particulaire d'une eau usée sont :

### I.3.2.1. Matières en suspension

Les matières en suspension (MES) sont des matières non dissoutes qui comportent à la fois des éléments minéraux (MM) et organiques (MVS), elles donnent à l'eau une apparence trouble et souvent un mauvais goût et une mauvaise odeur.

# CHAPITRE I : Pollution de l'eau

Par leurs effet obscurcissant, les MES présentes dans les eaux diminuent l'efficacité de la photosynthèse qui contribue à l'aération de l'eau, les organismes vivants peuvent alors manquer d'oxygène ce qui baisse la productivité du milieu récepteur. [7]

## I.3.2.2. Turbidité

C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes (MES). Elle donne une première indication sur la teneur en matières colloïdales d'origine minérale ou organique. [5]

## **I.3.3. Les paramètres de la pollution organique globale**

Une pollution organique d'une eau usée peut être caractérisée par plusieurs paramètres, ces derniers sont définis ci-après :

### I.3.3.1. Demande Biochimique en Oxygène (DBO5)

Sa détermination consiste à mesurer la quantité totale de l'oxygène consommée par des processus biochimiques, au cours de l'oxydation des matières organiques dans un échantillon donné dans les conditions de l'essai (incubation à 20°C et à l'obscurité).

La DBO a été standardisée en DBO5, mesurée au bout de 5 jours, considérée comme une période significative du processus global de biodégradation qui prend des semaines. Ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en matières organiques biodégradables d'une eau, et il donne une indication indirecte de l'activité bactérienne.[7]

### I.3.3.2. Demande Chimique en Oxygène (DCO)

La DCO permet d'évaluer la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, à travers la quantité d'oxygène nécessaire à leur

oxydation chimique totale, cette dernière est réalisée par un réactif ayant un pouvoir d'oxydation puissant (le permanganate de potassium ou le bichromate de potassium à chaud en milieu acide), la quantité de réactif consommée pour l'oxydation des matières organiques présentes, rapportée en mg/l d'oxygène, correspond à la DCO. [9]

## I.3.4. Paramètres de la pollution dissoute

Il existe deux types de paramètres de la pollution dissoute :

- Les composés azotés.
- Les composés phosphorés.

### I.3.4.1. 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. [10]

### I.3.4.2. Composés phosphorés

Les composés phosphorés peuvent être d'origine naturelle mais leur présence dans les eaux sont plus souvent d'origine artificielle (engrais, détergents, lessives, produits chimiques, etc.).[2]

Les composés phosphorés existent dans les eaux naturelles et les eaux usées sous différentes formes à savoir :

- ❖ Les ortho-phosphates :  $PO_4^{3-}$
- ❖ Les poly-phosphates :  $(PO_4^{3-})_n$

La somme de ces diverses formes constitue le phosphore total (PT).

# CHAPITRE I : Pollution de l'eau

Les composés phosphorés favorisent la croissance des végétaux dans l'eau et la prolifération des algues, étouffant les autres organismes vivant dans l'eau, générant des odeurs et contribuant au phénomène d'eutrophisation. [11]

## I.3.5. Paramètres toxiques

Les paramètres toxiques d'une eau usée sont :

### I.3.5.1. Métaux lourds

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

Les concentrations en cuivre, nickel, chrome, plomb, cadmium, mercure, zinc caractérisent certains types de pollution : [5]

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

### I.3.5.2. Tensioactifs

Ils ont la propriété d'abaisser la tension superficielle de l'eau et sont employés à cause de leur pouvoir mouillant et moussant. La présence des tensioactifs dans les eaux usées affecte le transfert de l'oxygène dans les boues activées au niveau des bassins d'aération dans les stations d'épuration car ils réduisent la capacité d'oxygénation de 40 à 70% par rapport à l'eau claire. [13]

# CHAPITRE I : Pollution de l'eau

## I.3.5.3. 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). [5]

## **I.3.6. Paramètres microbiologiques**

Une eau usée est caractérisée aussi par :

### I.3.6.1. 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  $10^4$  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. [7]

### I.3.6.2. 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  $10^3$  et  $10^4$  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. [7]

## **I.4. CONCLUSION**

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

***CHAPITRE II :***  
***Épuration des eaux usées***

*« L'eau, un défi à relever »*



### II.1. INTRODUCTION

L'évolution des modes de vie a fait qu'aujourd'hui les réseaux d'assainissement recueillent une quantité de rejets importante provenant des domiciles, industries et les eaux pluviales ; par conséquent, la charge polluante que l'eau contient dépasse son pouvoir auto-épurateur et donc les eaux résiduaires doivent passer par des ouvrages développés pour leur traitement, c'est ce qu'on appelle aujourd'hui « une station d'épuration » (STEP).

Le but de ce traitement est de diminuer suffisamment la quantité de substances polluantes contenues dans les eaux usées pour que l'eau finalement rejetée dans le milieu naturel ne dégrade pas ce dernier. Le « nettoyage » des eaux usées obéit donc à une logique de préservation des ressources en eau et de protection de l'environnement.

Quelles sont les principaux objectifs de tels ouvrages, et leurs différentes opérations ?

Les réponses à ces questions font l'objet du présent chapitre.

### II.2. COLLECTE DES EAUX USEES : LES DIFFERENTS MODES D'ASSAINISSEMENT

L'assainissement des eaux usées est l'un des enjeux actuels pour garder un environnement sain et assurer un approvisionnement en eau potable pour les années à venir. A ce titre il existe deux types d'assainissement selon le type d'habitation et les choix par la collectivité : [14]

- L'assainissement collectif.
  - L'assainissement individuel.
- ❖ L'assainissement collectif : est assuré par un réseau de collecte (égouts) qui recueillent les eaux usées et les acheminent vers **les stations d'épurations**.
  - ❖ L'assainissement individuel : (dit « assainissement autonome ») pour des habitations ou de petits groupes d'habitations trop éloignés pour être relié aux réseaux collectifs. Une fosse septique récupère les eaux usées.

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

Le système d'assainissement peut présenter plusieurs variantes de conception, on distingue : [14]

- Le système unitaire.
  - Le système séparatif.
- **Le système unitaire** : dans ce système, un seul collecteur assure à la fois le transport des eaux usées et des eaux pluviales jusqu'à la station d'épuration. Il est de conception simple, mais il ne permet pas de maîtriser la nature de l'effluent arrivant à la station d'épuration, selon la pluviométrie le débit est très variable et l'effluent « eaux usées » est dilué par le débit pluvial.

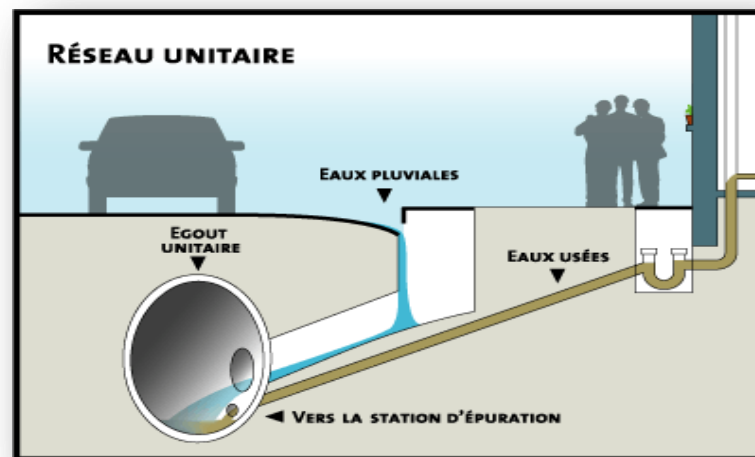


Figure II.1 : Réseau unitaire

- **Le système séparatif** : pour la collecte et le transport des eaux, deux réseaux distincts ont été mis en place :
- L'un pour évacuer les eaux de pluie.
  - L'autre pour recueillir les eaux usées.

Dans ce système, le réseau « Eaux usées » sera dirigé vers la station d'épuration, par contre, le réseau « Eaux pluviales » rejoint directement la rivière : les eaux de pluie ne seront pas épurées.

Ce système permet de mieux maîtriser la qualité et la quantité d'effluent arrivant à la station d'épuration.

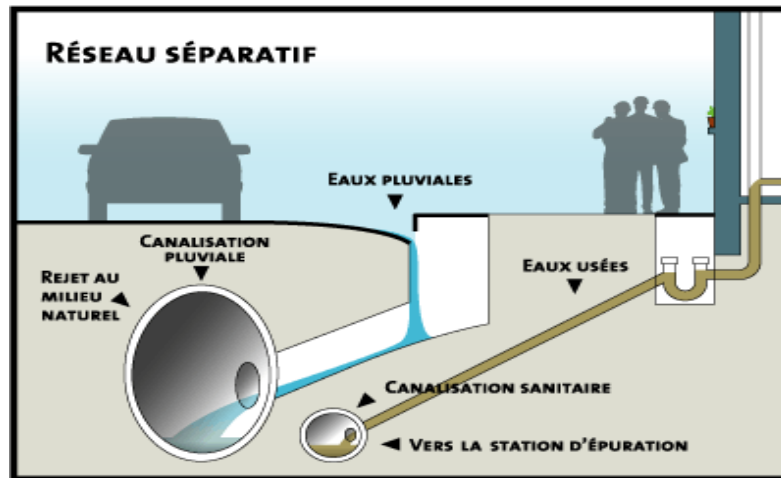


Figure II.2 : Réseau séparatif

### II.3. STATION D'ÉPURATION

Une station d'épuration est une usine de dépollution des eaux usées avant leur rejet au milieu naturel, en général dans une rivière ou cours d'eau.

Elle est installée généralement à l'extrémité d'un réseau de collecte, sur l'émissaire principal, juste en amont de la sortie des eaux vers le milieu naturel.

Elle ressemble une succession de dispositifs, empruntés tour à tour par les eaux usées. Chacun de ces dispositifs est conçu pour extraire un ou plusieurs polluants contenus dans ces eaux usées.

La capacité de la station étant limitée, des ouvrages de dérivation vers le milieu naturel « **déversoir d'orage** » sont répartis sur le réseau afin de réduire le débit arrivant à la station. En conséquence, en cas de fortes pluies, une partie de l'eau véhiculée par le réseau rejoint directement la rivière. [11]

### II.4. FILIERES D'ÉPURATION DES EAUX USEES

#### Comment fonctionne une station d'épuration des eaux usées ?

L'épuration des eaux usées passe par les étapes suivantes :

- Les prétraitements (dégrillage, dessablage, déshuilage-dégraissage).
- Le traitement primaire (procédés physico-chimique).
- Le traitement secondaire.
- Le traitement tertiaire.

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

### II.4.1. Prétraitements

Les eaux usées arrivant à la station d'épuration comportent, outre la pollution que l'on veut éliminer, des matières grossières et inertes qui n'ont pas besoin d'un traitement ultérieur (chiffons, morceaux de bois, plastiques, feuilles, sables, graisses, ...).

Le but de ces prétraitements est essentiellement de protéger les ouvrages se situant en aval : canalisations, bassins, pompes et aussi, d'éviter des dysfonctionnements biologiques et une mauvaise qualité du rejet. Dans une certaine mesure, ce sera aussi une réduction des matières en suspension.

On peut citer par ordre d'apparition des prétraitements :

- **le dégrillage** : arrêt des déchets volumineux.
- **le dessablage** : piégeage des sables lourds.
- **le dégraissage-déshuilage** : piégeage des graisses légères.

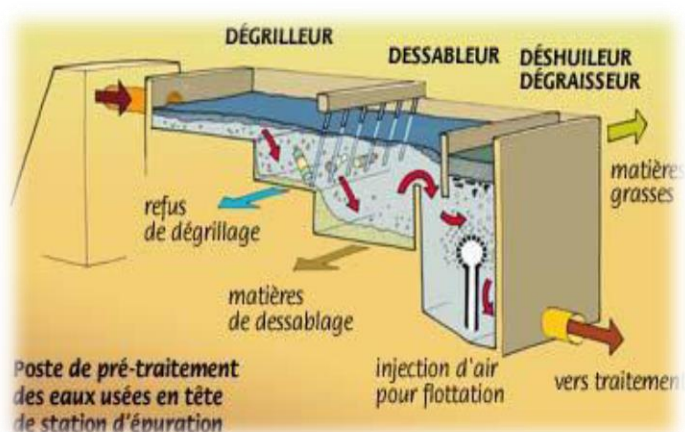


Figure II.3 : Chaîne de prétraitement (dégrillage-dessablage-déshuilage)

#### II.4.1.1. Dégrillage

Le dégrillage a pour objet d'éliminer des matières volumineuses des eaux, afin d'éviter le risque de colmatage. Il est donc indispensable en tête de station d'épuration.

Selon l'efficacité désirée, il est possible de distinguer entre : [15]

- le pré-dégrillage : espacement des barreaux de 30 à 100 mm
- Le dégrillage moyen : espacement des barreaux de 10 à 30 mm
- Le dégrillage fin : espacement des barreaux de 3 à 10 mm

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

Les grilles peuvent être verticales, mais elles sont le plus souvent inclinées de 60° à 80° sur l'horizontale. [15]

Les vitesses moyennes de passage admises sont de l'ordre de 0,6 m/s à 1,40 m/s au débit de pointe. [15]

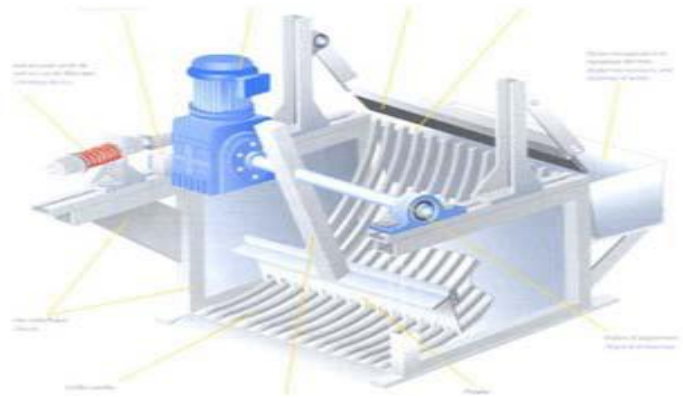


Figure II.4 : Dégrilleur

### II.4.1.2. Dessablage

L'objectif essentiel du dessablage est de retenir les particules sédimentables afin de protéger les installations de l'aval.

Le dessableur est un ouvrage dans lequel les particules denses, dont la vitesse est de 0.6 m/s, vont pouvoir se déposer. Il s'agit principalement des sables.

L'élimination des sables présents dans les effluents bruts est une opération indispensable pour :

- éviter les dépôts dans les canalisations conduisant à leur bouchage.
- protéger les pompes et autres organes mécaniques contre l'abrasion.
- éviter de perturber les autres stades du traitement (surtout au niveau du réacteur biologique) ;



Figure II.5 : Bassin de dessablage

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

### II.4.1.3. Dégraissage-Déshuilage

Les opérations de dégraissage et de déshuilage consistent en une séparation des huiles et graisses, produits de densité légèrement inférieure à celle de l'eau, de l'effluent brut afin d'éviter le dysfonctionnement des pompes. [11]

- Le dégraissage consiste à l'injection de fines bulles d'air dans le bassin de dégraissage, permettant de faire remonter rapidement les graisses en surface (les graisses sont hydrophobes). Leur élimination se fait ensuite par raclage de la surface. [11]
- Le déshuilage est une opération de séparation liquide-liquide bien souvent réservée à l'élimination des huiles présentes dans les eaux résiduaires industrielles (raffineries de pétrole). La séparation des huiles se fait par absorption ou filtration. [11]

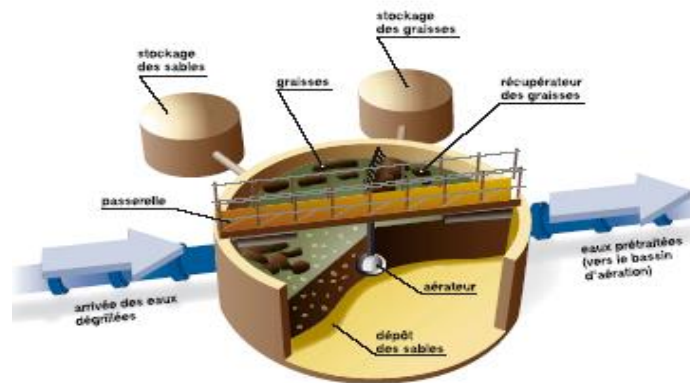


Figure II.6 : Dessableur-dégraisseur

### II.4.2. Traitement primaire

Le traitement primaire élimine plus de la moitié des matières en suspension (MES) et constitue une pré-épuration non négligeable quoique insuffisante pour garantir la qualité du rejet en milieu naturel. [16]

Le processus principal du traitement primaire est la décantation, il existe deux types de décantation : [11]

- Décantation physique.
- Décantation avec réactifs chimiques.



**Figure II.7 :** *Décanteur primaire*

### II.4.2.1. Procédé de décantation physique

La décantation est un phénomène provoqué par les forces de gravitation. Une particule solide charriée par l'eau d'égout, comme tout corps pesant, tomberait suivant un mouvement uniformément accéléré, si sa chute n'était contrariée par les forces de frottement créées par son déplacement au sein de l'eau, forces dont l'effet se traduit par une vitesse de chute uniforme. Cette vitesse est fonction de la dimension, de la forme extérieure et de la densité apparente de la particule. [16]

### II.4.2.2. Procédé de décantation chimique

Les procédés physico-chimiques de décantation consistent à alourdir les particules en suspension. Ils font appel aux techniques de coagulation ou de floculation-clarification. Les processus de coagulation et de floculation sont employés pour séparer les solides en suspension de l'eau lorsque la vitesse de décantation naturelle est trop lente pour obtenir une clarification efficace. [16]

### **II.4.3. Traitement secondaire**

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

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

## *CHAPITRE II : Epuration des eaux usées*

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

- Procédés physico-chimiques.
- Procédés biologiques.

### *II.4.3.1. Procédés physico-chimiques*

L'épuration chimique, coûteuse et difficile à réaliser, s'applique plutôt aux eaux résiduaires industrielles ou aux eaux usées contenant des résidus d'usine susceptibles d'entraver des processus biologiques.

Les rendements épuratoires sont excellents, car l'élimination des MES se situe entre 80% et 95%, celle des matières organiques entre 65% et 75%.

Néanmoins, ce type de procédé entraîne une surproduction de boues, de 15 à 25% en plus, ainsi qu'une mauvaise élimination des matières organiques, en particulier de la pollution soluble. [11]

### *II.4.3.2. Procédés biologiques*

Le traitement biologique a pour but d'éliminer les matières organiques contenues dans l'eau. Soit par voie aérobie (en présence d'oxygène), ou par voie anaérobie (en absence d'oxygène).

L'utilisation des procédés biologiques découle de l'observation et de l'intensification du processus d'autoépuration des sols et cours d'eau, et fait généralement appel aux procédés aérobies par lesquels les bactéries provoquent une oxydation directe des matières organiques des eaux usées à partir de l'oxygène dissous dans l'eau, la dégradation est un phénomène générateur de l'énergie nécessaire à la vie des micro-organismes, ces micro-organismes emploient le carbone organique comme source d'énergie ainsi que pour la synthèse cellulaire. [17]

Les installations de traitement secondaires biologiques se présentent donc comme de très vastes cultures bactériennes où l'on met en contact une population bactérienne et l'effluent à traiter en présence d'oxygène. Deux familles de procédés sont utilisées pour ce type de traitement : [17]

- les procédés biologiques à culture libre.
- les procédés biologiques à culture fixée.



### ***II.4.3.2.1. Procédés biologiques à culture libre***

Le processus d'épuration par "cultures libres" repose sur le développement d'une culture bactérienne, de type aérobie principalement. L'oxygène provient de diverses sources selon les filières. La culture bactérienne est ensuite séparée de l'eau traitée par mécanisme de sédimentation dans un ouvrage le plus souvent, spécifique (clarificateur, lagune de décantation...). On distingue :

#### ***✓ Lagunage naturel***

L'épuration est assurée grâce à un long temps de séjour, dans plusieurs bassins étanches disposés en série. Le nombre de bassin le plus communément rencontré est de 3. Le mécanisme de base sur lequel repose le lagunage naturel est la photosynthèse. La tranche d'eau supérieure des bassins est exposée à la lumière. Ceci permet l'existence d'algues qui produisent l'oxygène nécessaire au développement et maintien des bactéries aérobies. Ces bactéries sont responsables de la dégradation de la matière organique.

Le gaz carbonique formé par les bactéries, ainsi que les sels minéraux contenus dans les eaux usées, permettent aux algues de se multiplier.

En fond de bassin, où la lumière ne pénètre pas, ce sont des bactéries anaérobies qui dégradent les sédiments issus de la décantation de la matière organique. Un dégagement de gaz carbonique et de méthane se produit à ce niveau. [17]

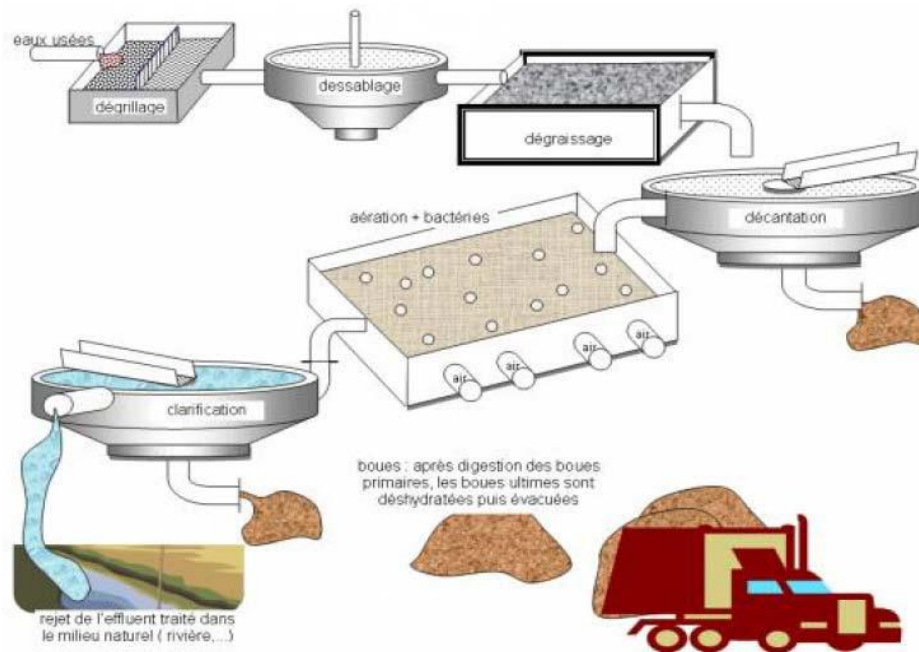
#### ***✓ Boues activées***

Le procédé à boues activées constitue de loin le mode de traitement le plus utilisé pour l'épuration des effluents urbains. Un bassin à boues activées est un réacteur biologique, alimenté en continu et aéré dans lequel une culture bactérienne est maintenue au contact de la pollution sous la forme de floes en suspension. Cette culture bactérienne, aussi appelée boue ou biomasse est ensuite séparée gravitaire-ment du liquide épuré dans un clarificateur. La majeure partie des boues épaissies est alors recyclée dans le bioréacteur pour y être mélangée avec l'eau usée incidente, et seule une faible partie est éliminée du système. [17]

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

Pour qu'une boue activée se forme et opère une épuration biologique, il faut réunir 3 conditions :

- Un apport suffisant en matière organique apportée par l'eau usée et en particulier certains éléments de base tels que : l'azote et le phosphore.
- Un apport en oxygène proportionnel à la charge de pollution.
- L'élimination des boues en excès.



**Figure II.8 :** Schéma d'une station d'épuration classique à boues activées.



**Figure II.9 :** Décanteur secondaire.

### ***II.4.3.2.2. Procédés biologiques à cultures fixées***

Les procédés à cultures fixées consistent à faire ruisseler l'eau à traiter sur plusieurs massifs indépendants.

Les deux principaux mécanismes sont : [17]

- Filtration superficielle : les matières en suspension (MES) sont arrêtés à la surface du massif filtrant.
- Oxydation : le milieu granulaire constitue un réacteur biologique, un support de grande surface spécifique, sur lequel se fixent et se développent des bactéries aérobies responsables de l'oxydation de la pollution dissoute (DCO dissoute, azote organique et ammoniacal).

L'aération est assurée par : [17]

- Une convection à partir du déplacement des lames d'eau.
- Une diffusion de l'oxygène depuis la surface des filtres et les cheminées d'aération vers l'espace poreux.

Parmi les procédés biologiques à cultures fixées, on distingue : [17]

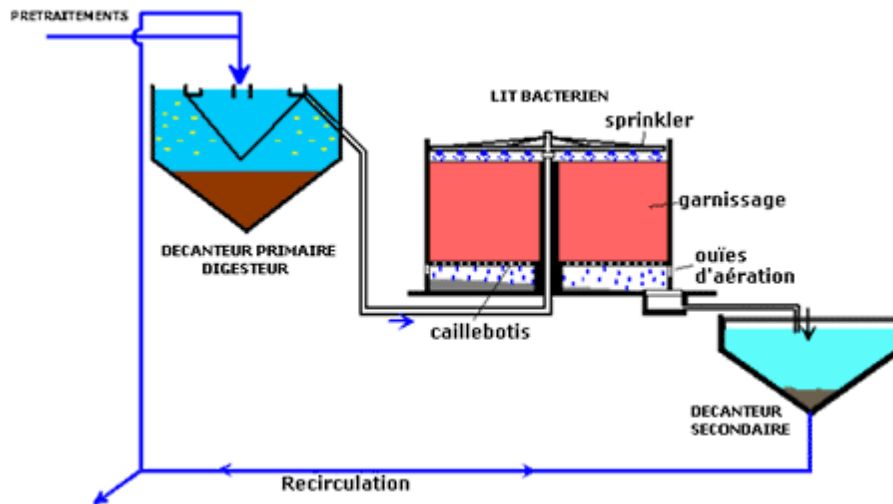
- Les lits bactériens.
- Les disques biologiques.
- Les biofiltres.

#### ***✓ Lits bactériens***

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

Une aération est pratiquée soit par tirage naturel soit par ventilation forcée. Il s'agit d'apporter l'oxygène nécessaire au maintien des bactéries aérobies en bon état de fonctionnement. Les matières polluantes contenues dans l'eau et l'oxygène de l'air diffusent, à contre-courant, à travers le film biologique jusqu'aux micro-organismes assimilateurs. Le film biologique comporte des bactéries aérobies à la surface et des bactéries anaérobies près du fond. Les sous-produits et le gaz carbonique produits par l'épuration s'évacuent dans les fluides liquides et gazeux. [17]

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées



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

Une autre technique faisant appel aux cultures fixées est constituée par les disques biologiques tournants.

Les micro-organismes se développent et forment un film biologique épurateur à la surface des disques. Les disques étant semi-immergés, leur rotation permet l'oxygénation de la biomasse fixée.

Il convient, sur ce type d'installation, de s'assurer :

- de la fiabilité mécanique de l'armature (entraînement à démarrage progressif, bonne fixation du support sur l'axe),
- du dimensionnement de la surface des disques (celui-ci doit être réalisé avec des marges de sécurité importantes)

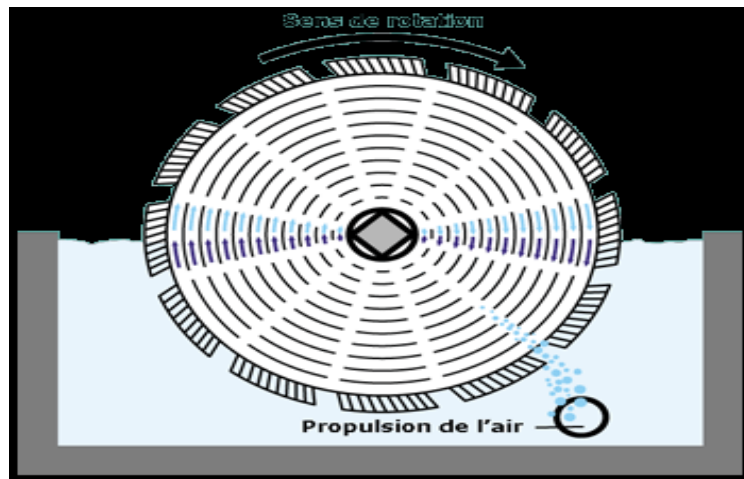


Figure II.11 : Schéma du principe d'un disque biologique

### ✓ Bio-filtres

Les biofiltres sont une innovation pour le traitement des eaux usées domestiques destinées à répondre à des exigences croissantes en matière de qualité. Ces procédés biologiques modernes ont été inspirés des lits bactériens. Ils reposent sur l'action de micro-organismes aérobies fixés sur un support granulaire immergé dans un bassin. C'est une technique qui consiste à réaliser simultanément, dans le même ouvrage, la réaction biologique aérobie de dégradation de la pollution par la biomasse épuratrice et la clarification par filtration de l'effluent traité. L'avantage des biofiltres est de pouvoir traiter les matières polluantes carbonées et éventuellement azotées, dans un volume beaucoup plus faible que dans le cas de procédés à cultures libres, avec des rendements similaires. Mais les biofiltres sont plus coûteux en investissement et plus délicats en fonctionnement. [17]

#### II.4.4. Traitements tertiaires

Les traitements tertiaires sont également appelés avancés, de finissage, d'affinage. On y fait appel lorsqu'il est nécessaire d'assurer une protection complémentaire du milieu récepteur ou en raison d'un réemploi de l'eau épurée soit direct (par exemple comme eau industrielle ou agricole) soit indirect (rejet en amont et à proximité d'une prise d'eau potable, réalimentation de nappe etc.)

Les traitements tertiaires peuvent viser à l'amélioration de la qualité générale de l'eau par rapport à celle qui peut être obtenue à partir des procédés décrits plus haut ou

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

simplement l'élimination spéciale de produits déterminés (par exemple ammoniacque, germes pathogènes, phosphates etc.). Ce dernier aspect peut prendre une importance particulière dans le cas de traitements d'effluents urbains contenant une certaine proportion de rejets industriels. [18]

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

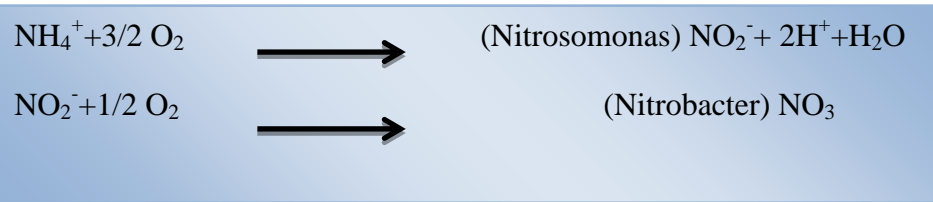
Selon la littérature, chaque personne produit 13.3 g d'azote par jour qui est rejeté dans les égouts. La majeure partie de cet azote provient de l'urine (80%), des matières fécales (13%) et des eaux issues des usages domestiques (7%). Cet azote est hydrolysé, au cours du séjour dans le réseau d'égouts, en ammoniacque ( $\text{NH}_4$ ) et en azote organique. [19] Le traitement de l'azote comporte deux processus : la nitrification et la dénitrification

#### ❖ *La nitrification*

La nitrification est un processus biologique normal qui s'effectue en deux stades :

- Transformation de l'ammoniacque en nitrites par *Nitrosomonas*.
- Transformation des nitrites en nitrates par *Nitrobacter*

**Nitrosomonas et Nitrobacter** : sont des bactéries autotrophes aérobies strictes : elles tirent leur énergie de l'oxydation du carbone présent dans le dioxyde de carbone, par contre, elles ont besoin d'oxygène pour leur respiration



La nitrification dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont : [19]

- **la charge massique** : le développement des bactéries autotrophes est plus lent que celui des bactéries hétérotrophes. Ainsi, pour assurer une nitrification importante, il faut favoriser l'accroissement de la biomasse nitrifiante. Cela se traduit par une faible charge massique, ou un âge de boues important (sous nos latitudes, l'âge des boues doit être supérieur à 18 jours), les deux paramètres étant inversement proportionnels.

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

- **la concentration en oxygène dissous (influence forte)** : le rendement augmente avec le taux d'oxygène dissous dans l'eau, et l'on considère généralement qu'une concentration d'au moins 2 mg O<sub>2</sub>/l est souhaitable.
- **la température** : le développement optimal des bactéries se situe autour de 30°C, et une baisse de la température implique un temps de résidence plus long pour obtenir un même taux de nitrification. Nitrobacter serait plus sensible que Nitrosomonas à des fluctuations de température.
- **le pH** : en dehors de la gamme 6,0 à 9,6, le procédé de nitrification est totalement inhibé, mais il semble délicat de définir la gamme optimale de pH : certains donnent 8,0 à 9,0, d'autres 7,5 à 8,5, ou encore 7,2 à 9,0. En outre, le procédé consommant de l'alcalinité, le pH a tendance à diminuer. La solution consiste alors à stripper le CO<sub>2</sub> afin de limiter l'acidification du milieu.
- **le phosphore** : les concentrations nécessaires varient beaucoup selon les auteurs, mais une concentration minimum de 0,5 mg/l ne serait pas limitant.

### ❖ *La dénitrification* [18]

La dénitrification biologique permet d'abattre la teneur globale en azote préalablement nitrifié au cours du traitement de nitrification, en le transformant en gaz azoté.

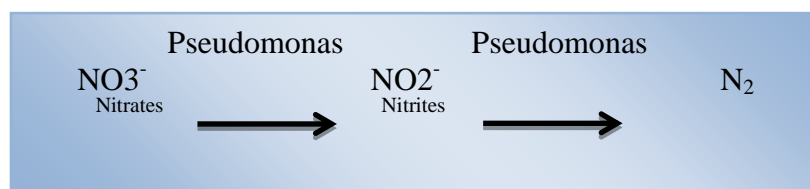
Ce traitement est nécessaire quand la teneur en ions nitrates du milieu récepteur risque de dépasser les limites supérieures admises par les normes.

La dénitrification peut être obtenus dans un réacteur biologique anoxique, ces réacteurs sont obligatoirement couverts, les microorganismes continuent à dégrader les matières biodégradables présentes ou poursuivent le processus d'auto-oxydation en prenant comme source d'oxygène les ions NO<sub>3</sub> qui se trouvent réduit en gaz N<sub>2</sub>.

Ces microorganismes étant hétérotrophes, il est nécessaire de leur fournir une source de carbone organique. Comme les effluents nitrifiés n'ont, d'une façon générale, qu'une très faible teneur en matières organiques biodégradables (DBO<sub>5</sub> faible), on utilise comme source de carbone soit une fraction de l'effluent du décanteur primaire by-passant le bassin de nitrification, soit des produits organiques tels que le méthane ou le glucose. Dans le cas où l'élimination totale de l'azote n'est pas recherchée, la nitrification n'est pas poussée jusqu'au bout et l'effluent nitrifié possède encore une charge carbonée suffisantes pour entretenir un processus de dénitrification partiel.

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées

Dans tous les cas, il est nécessaire de faire suivre le bassin de dénitrification d'une aération vigoureuse pour éliminer l'azote en excès et il est même recommandé de prévoir un bassin d'aération de stabilisation qui terminera l'élimination de la source de carbone artificiellement introduite en tête du bassin de dénitrification.



Les principaux facteurs influençant la dénitrification sont : [19]

- **Oxygène dissous** : De façon générale, l'oxygène inhibe la synthèse des enzymes nécessaires à la dénitrification. Il faut donc une absence totale d'oxygène.
- **Charge** : La dénitrification est d'autant plus rapide que la quantité de carbone disponible est importante et que ce carbone est rapidement biodégradable.
- **Température** : la température influe peu sur la vitesse de dénitrification, l'optimum se situe dans la gamme 25 à 30°C, mais le processus peut avoir lieu entre 5 et 50 °C. Si une baisse de température ne constitue pas un frein à la cinétique de la réaction, une augmentation de température active la dénitrification de façon très nette.
- **pH** : l'efficacité de la dénitrification diminue fortement en dehors de la gamme 6,0 à 8,0, les pH optimaux se situent entre 6,5 et 7,5 et ne constituent donc pas un facteur particulièrement limitant dans la plupart des cas de stations d'épuration.

### II.4.4.2. Traitement du phosphore

Le phosphore est présent dans les eaux sous forme de phosphates ( $\text{PO}_4^{-3}$ ), polyphosphate ou de phosphore organique.

Le phosphore contenu dans les eaux usées provient principalement du métabolisme humain, les lessives et différentes charges minérales peuvent également apporter mais dans une moindre mesure. Alors, pour éliminer la teneur en phosphates contenue dans les eaux usées, on fait appel au processus de **déphosphatation**. [18]



## ***CHAPITRE II : Epuration des eaux usées***

### ***❖ La déphosphatation***

Elle est envisagée dans le cas où il s'agit de protéger le milieu récepteur contre l'eutrophisation.

Le principe consiste à appliquer à l'eau des doses de réactifs formant des sels insolubles avec les composés du phosphore (chaux, sels de fer ou d'aluminium). On obtient toujours un abattement des composés de phosphore dans les traitements à PH élevé en particulier lorsque le réactif est la chaux. [18]

### **II.4.4.3. Désinfection**

Les eaux usées domestiques sont très chargées en germes pathogènes, en virus et en parasites ou œufs de parasites. Les traitements usuels abattent partiellement les teneurs mais pas à un degré suffisant pour que les eaux traitées ne soient plus des vecteurs de maladies d'origine hydrique.

Dans le cas où il est désirable de protéger l'environnement ou lorsque l'on craint particulièrement l'émission de microorganismes particulièrement dangereux il faut procéder à une désinfection (désinfection par les produits chlorés, désinfection par l'ozone). [18]

### **II.4.4.4. Filtration**

La filtration est un procédé de séparation solide-liquide par adhésion sur la surface d'un matériau granuleux traversé par le liquide à épurer. Dans l'épuration des eaux usées les filtres d'une façon générale sont utilisés pour séparer les flocons très fins qui restent en suspension après le décanteur secondaire conduisant à des précipitations. [18]

## **II.4.5. Traitements complémentaires**

Il s'agit de :

### **II.4.5.1. Traitement des odeurs**

Les odeurs provenant des STEP sont dues aux gaz, aérosols ou vapeurs émises par certains produits contenus dans les eaux usées ou dans les composés se formant au cours des différentes phases de traitement.

Pour éviter ces nuisances, les ouvrages sensibles seront couverts et munis d'un système de ventilation ainsi que d'une unité de traitement biologique des odeurs. [11]

## CHAPITRE II : *Épuration des eaux usées*

On distingue généralement deux types de traitement biologique des odeurs : les bio-filtres et les biolaveurs. Dans les premiers, la biomasse est supportée par un plancher spécifique et l'air traverse le massif (souvent de la tourbe). Les seconds réalisent un deuxième filtre grâce à une suspension. La biomasse est libre, et l'épuration se produit dans un réacteur.

L'unique condition de fonctionnement de ces procédés de désodorisation réside dans les composés présents qui doivent être biodégradables. [11]

### II.4.5.2. Traitement des boues

Tout traitement d'épuration conduit à la production de déchets. Ceux-ci sont collectés :

- Au niveau du prétraitement : refus de dégrillage, déchets du dégraissage et du des-sablage.
- Au niveau des décanteurs primaires, secondaires, voire tertiaire

Il s'agit des **boues**. [20]

Selon le type de traitement des eaux usées, une station d'épuration peut produire, à l'origine, trois grandes catégories de boues :

- **Les boues primaires** : produites lors de la décantation primaire.
- **Les boues physico-chimique** : produites par toutes les réactions physico-chimiques de coagulation floculation avec les MES de l'effluent.
- **Les boues de traitement biologique** : issues des clarificateurs (décantation secondaire).

Ces boues constituent ce qu'on appelle « les boues fraîches ». Si une partie de la matière organique est éliminée on parle alors de « boues stabilisées ou digérées » suivant le mode de traitement. [2]

Les boues peuvent ensuite subir un traitement, qui sera déterminé en grande partie en fonction des exigences imposées par la destination finale choisie (la valorisation agromique, le stockage, l'incinération). A l'issue de ce traitement, les boues sont liquides, pâteuses, solides, séchées, chaulées ou compostées.

Le traitement a pour but de les conditionner en fonction des filières d'élimination :

- Réduction de leur volume par épaissement, déshydratation, séchage thermique ou incinération.
- Diminution de leur pouvoir de fermentation par stabilisation biologique, chimique ou thermique

## CHAPITRE II : *Epuration des eaux usées*

- Destruction des micro-organismes pathogènes

### ❖ *La stabilisation*

La stabilisation consiste :

- Soit à accélérer le phénomène en le contrôlant (digestion anaérobie ou aérobie).
- Soit à empêcher, ou tout au moins à retarder considérablement le phénomène (conditionnement chimique ou thermique) [18]

### ❖ *La digestion anaérobie*

La digestion anaérobie, élimine environ 50% des matières organiques, ce qui présente les avantages suivants :

- Diminution du poids des matières sèches dans la proportion de tiers environ.
- Diminution importante des germes pathogène.
- Possibilité, pour les stations importantes de récupération de gaz utilisés pour leurs besoins énergétique. [18]

### ❖ *La digestion aérobie*

La digestion aérobie des boues correspond à la phase endogène du processus des boues activées lors de laquelle les boues s'auto-oxydent, et ainsi se minéralisent.

Le schéma de la station de traitement est modifié par rapport à celui des stations par boues activées classiques.

L'effluent brut est admis directement sur le bassin d'aération où la phase liquide est traitée, l'effluent est ensuite décanté et les boues arrêtées par décantation sont dirigées sur un bassin d'aération particulier. Le temps de séjour des boues est de l'ordre d'une semaine, elles sortent du bassin stabilisées et peuvent être séchées. [18]

### ❖ *L'épaississement*

Visé à augmenter la siccité (teneur en matière sèche) des boues sans pour autant modifier le caractère liquide de la boue. Cet épaississement peut se faire simplement par voie gravitaire ou par des moyens mécaniques (égouttage, flottation ou centrifugation). La siccité des boues épaissies ne dépasse pas usuellement 7 % en moyenne. [18]

## CHAPITRE II : Epuration des eaux usées



Figure II.12 : Epaissement des boues

### ❖ La déshydratation

Qui correspond en fait à une augmentation forte de siccité, modifie l'état physique des boues, celles-ci passant de l'état liquide à l'état pâteux ou solide.

Les filtres à bandes et les centrifugeuses donnent des boues plutôt pâteuses en raison de performances de déshydratation qui plafonnent à 18-20 % de siccité pour la première famille de matériels, et 20-25 % de siccité pour la seconde, Les filtres presses produisent par contre des boues de structure solide (30 à 35 % de siccité). [18]



Figure II.13 : Déshydratation des boues

### ❖ Le séchage

Élimine en grande partie ou en totalité l'eau par évaporation, soit par voie naturelle (lits de séchage), soit par voie thermique. [18]

- **Le Séchage par lits** : cette technique de séchage se pratique à l'air libre sur des boues liquides et combine évaporation naturelle et drainage de l'eau libre à travers

## *CHAPITRE II : Epuration des eaux usées*

une couche filtrante de sable et de graviers. Ce système extensif donne des boues solides à 35 - 40 % de siccité mais reste fort dépendant des conditions météorologiques.

- **Le séchage thermique** : permet une élimination quasi-totale de l'eau (siccité d'environ 95 %).

### **II.5. EPURATION EN ALGERIE**

La situation actuelle de l'eau en Algérie, se caractérise par un déséquilibre entre les besoins et les ressources disponibles. La croissance démographique et le développement économique et social du pays ont induit durant les deux dernières décennies écoulées, un accroissement considérable des besoins en eau potable, industrielle et agricole.

L'Algérie a beaucoup investi pour trouver des solutions et remédier au problème. Et parmi ces investissements dans le domaine d'assainissement « les stations d'épuration ».

- L'Algérie dispose 61 stations d'épuration en exploitation avec un volume de 365 millions de m<sup>3</sup>/an et une capacité de 6168592 EH.
- il y a 34 stations à boues activées et à lagunage naturel en travaux avec un volume de 400 millions de m<sup>3</sup>/an.

Les procédés les plus répandus sont à boues activées et à lagunage naturel. Et parmi les stations à boues activées les plus importantes, on rappelle celle de Boumerdes qui sera présentée dans le chapitre (IV).

# ***CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)***

*« Ne t'inquiète pas si tu as des difficultés en maths,  
je peux t'assurer que les miennes sont bien en plus  
importantes »*

**Albert EINSTEIN**

# ***CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)***

## **III.1. INTRODUCTION**

Les méthodes d'analyse de données ont largement démontré leur efficacité dans l'étude de grandes masses d'informations. Ce sont des méthodes multidimensionnelles, en opposition aux méthodes de statistiques descriptives simples ; qui ne traitent qu'une ou deux variables à la fois. Elles permettent la confrontation d'un ensemble d'informations, ce qui est infiniment plus riche que leur examen séparé. Les représentations simplifiées de grands tableaux de données que ces méthodes permettent d'obtenir, s'avèrent un outil de synthèse remarquable.

Dans ce chapitre, on va présenter l'une des méthodes de l'analyse de données, c'est l'Analyse en Composantes Principales, ses notions de base ainsi que son intérêt.

## **III.2. DESCRIPTION DE LA METHODE**

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

Elle propose à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de  $m$  variables quantitatives pour  $p$  unités (appelées aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables. Ces données peuvent être issues d'une procédure d'échantillonnage ou bien de l'observation d'une population entière. Les représentations des unités permettent de voir s'il existe une structure non connue a priori, sur cet ensemble d'unités de façon analogue, les représentations des variables permettent d'étudier les structures de liaisons linéaires sur l'ensemble des variables considérées. Ainsi on cherchera si l'on peut distinguer des groupes dans l'ensemble des unités en regardant quelles sont les unités qui se ressemblent, celles qui se distinguent des autres. Pour les variables, on cherchera quelles sont celles qui sont très corrélées entre elles, celles qui au contraire ne sont pas corrélées aux autres. [21]

# CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

## III.3. DEFINITIONS

### III.3.1. Notions d'individu et de caractère

#### ❖ Individu

L'individu peut désigner selon les cas : une année d'observations ou une autre unité de temps. L'ensemble des individus peut provenir d'un échantillonnage dans une population ou, il peut être de la population toute entière.

L'individu "i" est décrit par le vecteur appartenant à  $\mathbb{R}^P$  :

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

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

Si l'ensemble des individus doit être homogène, l'ensemble des variables peut être hétérogène. [22]

#### ❖ Caractère

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

Le caractère (ou variable) "j" est décrit par le vecteur de  $\mathbb{R}^N$  :

$$X_j = \{X_{ij} / i = 1 \text{ à } N\}$$

Ainsi si l'ensemble des individus doit être homogène, l'ensemble des variables peut être hétérogène. [22]

### III.3.2. Définition algébrique

L'ACP considère P variables pour lesquelles on dispose de N individus, donc la matrice [X] résultant du croisement «N x P» est la matrice de données [X] tel que :



# CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

$$[X] = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & \dots & X_{1j} & \dots & \dots & X_{1P} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & \dots & X_{2j} & \dots & \dots & X_{2P} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & \dots & X_{ij} & \dots & \dots & X_{iP} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{N1} & X_{N2} & \dots & \dots & X_{Nj} & \dots & \dots & X_{NP} \end{pmatrix}$$

Définissons les paramètres statistiques des variables :

- **Moyenne**

$$\overline{X_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ij} \quad (\text{III.1})$$

$\overline{X_j}$  : moyenne de la j<sup>ieme</sup> variable

- **Variance**

$$\sigma_{X_j}^2 = \text{Var}_j = \sum_{i=1}^N P_i (X_{ij} - \overline{X_j})^2 \quad (\text{III.2})$$

Var j : variance de la j<sup>ieme</sup> variable

$\sigma_{X_j}$  : Écart type de la j<sup>ieme</sup> variable

- **Covariance**

Le coefficient de covariance entre les variables  $X_j$  et  $X_k$  est donné par :

$$\text{Cov}(X_j, X_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \overline{X_j}) * (X_{ik} - \overline{X_k}) \quad (\text{III.3})$$

- **Corrélation**

Le coefficient de corrélation entre les variables  $X_j$  et  $X_k$  est donné par :

$$\text{Cor}(X_j, X_k) = \frac{\text{Cov}(X_j, X_k)}{S_j * S_k} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \overline{X_j}) * (X_{ik} - \overline{X_k})}{\left[ \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \overline{X_j})^2 * \sum_{i=1}^N (X_{ik} - \overline{X_k})^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{III.4})$$

# CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

- Le tableau [X] de départ est remplacé par un tableau [Y] (individus x nouvelles variables) en réduisant le nombre de variables nécessaires pour décrire les individus, avec une perte minimale d'informations. Ces nouvelles variables sont appelées **Composantes Principales** ou (CP).
- Calculer les composantes principales notées  $C_j$  revient à déterminer P relations linéaires entre les variables  $X_j$  :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = a_{10} + a_{11}X_1 + \dots + a_{1j}X_j + \dots + a_{1N}X_N \\ C_2 = a_{20} + a_{21}X_1 + \dots + a_{2j}X_j + \dots + a_{2N}X_N \\ \dots \dots \dots \\ C_j = a_{j0} + a_{j1}X_1 + \dots + a_{jj}X_j + \dots + a_{jN}X_N \\ \dots \dots \dots \\ C_N = a_{N0} + a_{N1}X_1 + \dots + a_{Nj}X_j + \dots + a_{NN}X_N \end{array} \right.$$

$C_j$  :  $j^{\text{ème}}$  Composante Principale

$X_j$  : Vecteur variable initiale

$a_{jk}$  : Coefficient du système

Notons au passage que les termes  $a_{j0}$  désignent le vecteur permettant la translation de l'origine de l'ancien repère vers le centre de gravité du nuage de points. Un centrage des données initiales annule les coefficients  $a_{j0}$  [22]

### III.3.3. Définition géométrique

L'Analyse en Composantes Principales est puissante par son support géométrique : la méthode consiste à rechercher un premier axe qui soit le plus près possible de tous les points au sens des moindres carrés : tel que la somme des moindres carrés des distances des N points à cet axe soit minimale, ou encore la projection de ces derniers sur cet axe ait une dispersion maximale. Cet axe est appelé « axe factoriel ».

## **CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)**

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

On obtient ainsi un nouveau système d'axes défini par les nouvelles variables dites composantes principales. [22]

### **III.4. FORMULATION MATHEMATIQUE DU PROBLEME**

La recherche des composantes principales est faite sous deux contraintes : [22]

- ❖ Elles doivent être indépendantes, c'est-à-dire, prise deux à deux, elles présentent obligatoirement des corrélations nulles.
- ❖ Les axes factoriels doivent être déterminés par ordre d'importance décroissante. Le premier axe expliquera le maximum de la variance totale tandis que le second expliquera le maximum de la variance résiduelle non expliquée par le premier, jusqu'au dernier axe. Mais l'expérience a montré qu'un nombre Q d'axes nettement inférieur à P suffit pour donner le maximum d'informations.

#### **III.4.1. Optimisation du problème**

Déterminer un sous espace W, revient à choisir canoniquement dans  $\mathbb{R}^P$  un référentiel défini par un vecteur constant  $\vec{A}$  de  $\mathbb{R}^P$  et un système orthonormé de vecteurs  $\vec{V}_1, \dots, \vec{V}_Q$  formant une base du sous espace vectoriel W.

Le nouveau référentiel est obtenu à la suite d'une translation plus une rotation. On définit donc W par :

$$W = \vec{A} + [\vec{V}_1, \dots, \vec{V}_Q]$$

Tel que  $\vec{A}$  définit le vecteur de translation de l'origine du repère initial vers celui du nouveau repère, et la séquence  $\{\vec{V}_1, \dots, \vec{V}_Q\}$  les vecteurs permettant la rotation autour de l'origine translaté.

W sera choisi de telle sorte que la déformation en projection soit minimum, et les Q nouvelles variables seront alors les composantes des projections des points du nuage dans ce référentiel. [23]

## **CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)**

On écrira alors pour tout individu  $i$  :

$$\vec{C}_i = \vec{A} + \sum_{k=1}^Q C_{ik} \cdot \vec{V}_k \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$\vec{C}_i$  : Projection orthogonale de  $X_i$  sur  $W$

$\vec{V}_k$  : Vecteur propre de rang  $k$

$C_{ik}$  : Coefficients des composantes principales

La déformation globale en projection sur  $W$  est mesurée par l'inertie autour de  $W$ , notée  $I_w$  et définie par :

$$I_w = \sum_{i=1}^N P_i d^2(\vec{X}_i, \vec{C}_i) \quad (\text{III.6})$$

$d(\vec{X}_i, \vec{C}_i)$  : Distance entre le point défini par le vecteur  $X_i$  et celui défini par sa projection sur  $W$ .

La recherche du référentiel  $W$  se fait sous l'hypothèse de minimisation de la déformation globale, ce qui revient à minimiser l'inertie  $I_w$ .

Toute solution  $W$  du problème contient l'extrémité du vecteur  $G$  définissant le centre de gravité du nuage des individus.

Soit  $A$  le point défini par l'extrémité du vecteur  $A$  appartenant à  $\mathbb{R}^p$  on notera  $W_A$  le sous espace passant par  $A$ .

Utilisons le théorème de HUYGENS pour montrer que :

$$\text{Pour tout vecteur } \vec{A} \text{ de } \mathbb{R}^p : \quad I_{WA} \geq I_{WG}$$

Ce théorème s'énonce ainsi :

**Soit  $W_A$  un sous espace passant par  $A$ ,  $W_G$  le sous espace parallèle à  $W_A$  et contenant le centre de gravité  $G$  du nuage des individus**

$$I_{WA} = I_{WG} + d^2(G, W_A)$$

## *CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)*

Le théorème ci-dessus montre donc que :

L'inertie du nuage des individus par rapport à l'ensemble des sous espaces parallèles à  $W_0$  est minimum pour le sous espace  $W_G$  contenant le centre de gravité du nuage.

Le sous espace optimal  $W$  cherché contient donc le centre de gravité du nuage :  
 $W=W_G$

On peut supposer les données centrées. En effet le point individu du tableau centré s'écrit :

$$\overrightarrow{OX'_i} - \overrightarrow{OG} = \overrightarrow{OX'_i} + \overrightarrow{GO} = \overrightarrow{GO} + \overrightarrow{OX'_i} = \overrightarrow{GX'_i} = \overrightarrow{Y'_i}$$

Si  $C_i$  est la projection de  $X_i$  sur  $W_G$  et  $C'_i$  la projection de  $Y_i$  sur  $W_0$  alors :

$$C'_i = C_i - G$$

$$\overrightarrow{C'_i} = \overrightarrow{C_i} - \overrightarrow{OG}$$

Et il est équivalent de minimiser la quantité

$$\sum_{i=1}^N P_i d^2(X_i, C_i)$$

Ou la quantité

$$\sum_{i=1}^N P_i d^2(Y_i, C'_i)$$

Car tout simplement :

$$X_i - C_i = Y_i - C'_i$$

Dans la suite nous supposerons toujours que les données sont centrées c'est-à-dire que :

$$\text{Pour tout } i, Y_i = X_i, G=0 \text{ et } W=W_G= W_0$$

# CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

## III.4.2. Formulation matricielle

L'objectif de l'ACP étant de maximiser la variance, la formulation matricielle du problème est la suivante : [22], [23]

Soit les matrices colonnes  $V_1, V_2, \dots, V_Q$  de dimension  $(N \times 1)$  représentant l'hyperplan formé par les axes principaux vérifiant les conditions de normalité et d'orthogonalité :

$$\begin{cases} \vec{V}_i \cdot \vec{V}_i = 1 \\ \vec{V}_i \cdot \vec{V}_j = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} i = 1 \rightarrow Q \\ j = 1 \rightarrow Q \end{cases}$$

On veut maximiser la quantité : 
$$\sum_{j=1}^Q \text{Var}(C_j)$$

$$\text{Sachant que : } \sum_{j=1}^Q \text{Var}(C_j) = V_j^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_j \quad (\text{III.7})$$

$C_j$  : Composante principale d'ordre  $j$  ;

$[R]$  : Matrice des covariances des variables  $(X_1, X_2, \dots, X_p)$  ;

$[M]$  : Métrique définissant le produit scalaire sur l'espace  $\mathbb{R}^p$ .

### ❖ Choix de la métrique

La métrique  $[M]$  possède deux options classiques :

$[M] = 1$  : Matrice identité.

La covariance sera utilisée afin de quantifier les relations inter variables, on parlera alors d'une *ACP canonique*.

$$[M] = D_{\frac{1}{\sigma}}$$

## CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

$$D_{1/\sigma^2} = \begin{vmatrix} 1/\sigma_1^2 & 0 & & & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2^2 & 0 & & \\ & 0 & \cdot & & \\ & & 0 & 1/\sigma_i^2 & 0 \\ & & & \cdot & \\ & & & \cdot & 0 \\ 0 & & & 0 & 1/\sigma_p^2 \end{vmatrix}$$

On utilise généralement cette métrique pour pallier au problème de l'hétérogénéité des caractères (variables), et éviter l'influence du choix d'unité des variables. Dans ce cas on parlera d'ACP normée, elle est équivalente à une ACP canonique effectuée sur des variables centrées réduites.

Les données ainsi transformées se présentent sous forme d'une matrice dont toutes les variables sont de moyenne nulle et d'écart type unité.

### III.4.3. Procédé d'application de l'ACP

#### III.4.3.1. Calcul de la matrice des covariances

La matrice des covariances, notée  $[R]$  est la base de l'ACP, elle est obtenue en appliquant la relation suivante :

$$R = (1/n) X^t \cdot M \cdot X$$

$[R]$  : Matrice de covariance de dimension (p\*p) ;

$[X]$  : Matrice de données ;

$[X]^t$  : Matrice transposée de  $[X]$  ;

$[M]$  : Métrique.

#### III.4.3.2. Recherche des axes principaux

Le but est de construire un nouveau système d'axes avec un minimum de variables assurant un maximum de variance. [23]

## CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

### ❖ Recherche du premier axe

Telle que mentionnée précédemment, la contribution maximale est donnée par le premier axe principal, nous devons donc maximiser la variance relative à celui-ci. La recherche du premier axe principal consiste à résoudre le problème.

$$\begin{cases} \text{MaxVar}(C_1) \\ V_1^t \cdot [M] \cdot V_1 = 1 \end{cases}$$

Nous pouvons exprimer la variance de  $C_1$  à l'aide de la matrice des covariances  $[R]$  du vecteur aléatoire  $X = (X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_p)$  :

$$\text{Var}(C_1) = V_1^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_1 \quad (\text{III.8})$$

En utilisant la méthode du multiplicateur de LAGRANGE nous pouvons écrire :

$$L = V_1^t [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_1 - \lambda_1 (V_1^t \cdot [M] \cdot V_1 - 1) \quad (\text{III.9})$$

La dérivée par rapport à  $V$  est nécessairement nulle :

$$\partial L / \partial V_1 = 2 \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_1 - 2 \lambda_1 \cdot [M] \cdot V_1 = 0 \quad (\text{III.10})$$

Puisque la matrice  $[M]$  est inversible :

$$[R] \cdot [M] \cdot V_1 = \lambda_1 \cdot V_1$$

Donc  $V_1$  est le vecteur propre de la matrice  $[R] \cdot [M]$ . Il suffit de choisir comme vecteur  $V_1$  le vecteur propre associé à la plus grande valeur propre  $\lambda_1$  de la matrice  $[R] \cdot [M]$  pour maximiser la variance de  $C_1$ .

### ❖ Recherche du second axe

Nous cherchons à déterminer le vecteur unitaire  $V_2$  tel que la composante  $C_2$  soit de variance maximale et non corrélée à  $C_1$ .

Sachant que :

$$\text{Var}(C_2) = V_2^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_2$$



## **CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)**

$$V_2^t \cdot [M] \cdot V_2 = 1$$

$$COV(C_1, C_2) = 0$$

L'expression de  $COV(C_1, C_2)$  est donnée par :

$$COV(C_1, C_2) = V_1^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_2$$

Comme la covariance ne tient pas compte de l'ordre nous pouvons écrire :

$$COV(C_1, C_2) = COV(C_2, C_1) = V_2^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_1 = 0$$

Or nous savons que  $V_1$  est un vecteur propre de  $[R] \cdot [M]$  associé à la valeur propre  $\lambda_1$ .

Nous en déduisons que :

$$COV(C_1, C_2) = \lambda_1 V_2^t \cdot V_1 = 0$$

Une covariance nulle entre  $C_1$  et  $C_2$  est équivalente à l'orthogonalité des vecteurs  $V_1$  et  $V_2$  :

$$COV(C_1, C_2) = 0 \Leftrightarrow V_1 \cdot V_2 = 0$$

En appliquant la même méthode pour la recherche du deuxième axe, nous aurons :

$$L = V_2^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_2 - \lambda_2 (V_2^t \cdot [M] \cdot V_2 - 1) - \mu_2 (V_2^t \cdot [M] \cdot V_1)$$

$$\partial L / \partial V_2 = 2 \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_2 - 2\lambda_2 \cdot [M] \cdot V_2 - \mu_2 \cdot [M] \cdot V_1 = 0$$

En simplifiant par  $[M]$  nous obtenons :

$$2 \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_2 - 2\lambda_2 \cdot V_2 - \mu_2 \cdot V_1 = 0$$

Nous multiplions à gauche par  $V_1^t \cdot [M]$  l'équation précédente s'écrit alors :

$$2 \cdot V_1^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_2 - 2\lambda_2 \cdot V_1^t \cdot [M] \cdot V_2 - \mu_2 \cdot V_1^t \cdot [M] \cdot V_1 = 0$$

Or (par hypothèse)  $V_1^t \cdot [M] \cdot V_2 = 0$

## CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

Donc :

$$V_1^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot V_2 = V_2^t \cdot [M] \cdot [R] \cdot [M] \cdot V_1 = \lambda_1 \cdot V_2^t \cdot [M] \cdot V_1 = 0$$

Puisque le vecteur  $V_1$  est unitaire:

$$V_1^t \cdot [M] \cdot V_1 = 1$$

Le multiplicateur de Lagrange  $\mu_2$  est donc nul, et nous sommes ramenés au problème précédent. Nous pouvons donc énoncer la définition suivante : le second axe est défini par le vecteur  $V_2$ , vecteur propre unitaire de la matrice  $[R] \cdot [M]$  orthogonal à  $V_1$  et associé à la plus grande valeur propre  $\lambda_2$  inférieure ou égale à  $\lambda_1$ .

### ❖ Recherche des autres axes

En itérant le procédé, nous déterminons donc les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice  $[R] \cdot [M]$  pour obtenir la  $l^{\text{ième}}$  composante principale  $C_l$ .

Le vecteur propre unitaire de la matrice  $[R] \cdot [M]$  définit le  $l^{\text{ième}}$  axe orthogonal à  $(V_1, V_2, \dots, V_{l-1})$  et associé à la  $l^{\text{ième}}$  plus grande valeur propre  $\lambda_l$ . Nous constatons que la mise en équation de ces règles aboutit aux résultats suivants :

- ✓ Nous appelons  $l^{\text{ième}}$  vecteur principal : le vecteur propre unitaire  $V_l$  de la matrice  $[R] \cdot [M]$  associée, qui fournit les coefficients qui pondèrent les variables initiales pour le calcul des composantes principales.
- ✓ Nous appelons  $l^{\text{ième}}$  axe principal, la droite engendrée par le  $l^{\text{ième}}$  vecteur principal.
- ✓ Chaque composante  $C_k$  est portée par le  $k^{\text{ième}}$  axe principal.
- ✓ La dispersion des projections des variables sur la composante  $C_k$  est mesurée par la valeur propre  $\lambda_k$ .
- ✓ Les valeurs sont rangées par ordre décroissant :  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_Q$ .
- ✓ Les CP sont rangés de 1 à Q dans l'ordre des valeurs propres.
- ✓ La moyenne de chaque CP est nulle.

## CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

Si nous voulons normer les CP, c'est à dire, imposer à chacune d'entre elles d'avoir un écart type unité il suffit de diviser chacune d'elles par la racine de la variance expliquée  $(\lambda_k)^{1/2}$  correspondante.

### III.4.3.3. Calcul des composantes principales

On désigne par CP, la projection du nuage de points initiale sur le nouveau système d'axes fournit par les vecteurs propres. Notons [C] la matrice des CP. [22]

$$[C] = [A]^t [X]$$

[X]: Matrice des données initiales.

[A]<sup>t</sup>: Matrice transposée de la matrice composée par les vecteurs propres.

### III.4.4. Principaux résultats

En général une analyse en composantes principales fournit trois sources de renseignements, toutes nécessaires à l'interprétation : [23]

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

### III.4.5. Représentation graphique

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

- Nous pouvons représenter chaque variable par un point dont les coordonnées sont les covariances avec les CP réduites.

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

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

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

$C_1$ : Composante principale normée ;

## ***CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)***

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

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

Nous pouvons aussi observer la répartition des individus selon les principaux axes choisis. Ainsi deux individus seront proches dans l'espace  $R^P$ , s'ils sont proches dans le plan factoriel. Dans le graphique des individus on s'intéresse aux distances inter-individus qu'on peut interpréter comme étant des ressemblances. [21]

### **III.5. APPLICATION DE L'ACP**

En général, le domaine d'utilisation de L'ACP est très large, sans inconvénients, sans dangers et ne nécessite pas au préalable d'hypothèses restrictives.

Si les conditions de normalité ne sont ni impératives ni nécessaires pour pratiquer l'ACP, le type de variables utilisé influe par contre sur les résultats obtenus. [23]

Nous distinguons deux aspects principaux de l'ACP :

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

# CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

## III.5.1. Influence de la transformation des variables

La matrice de corrélation (variable centrée réduite) ou de covariance (variable brute) constitue le point de départ de toute analyse en composantes principales, c'est l'une ou l'autre en effet qui permet après diagonalisation de calculer les valeurs et les vecteurs propres, et par conséquent les composantes principales (CP).

Or la valeur du coefficient de corrélation (ou de covariance) entre les variables  $X_j$  et  $X_k$  dépend essentiellement des couples d'observations  $X_{ij}$  et  $X_{ik}$  et par conséquent toute transformation appliquée aux  $p$  variables  $X_j$  modifiera les coefficients de corrélation (ou de covariance), et de ce fait la structure même des composantes principales. [22]

Il existe des transformations usuelles pour l'analyse des données à savoir :

### III.5.1.1. Variable centrée

$$Y_j = X_j - \overline{X_j}$$

Avec  $X_j$  : Variable initiale.

$\overline{X_j}$  : Moyenne de la variable initiale.

$Y_j$  : Variable transformée (centrée).

### III.5.1.2. Variable réduite

$$Y_j = \frac{X_j}{\sigma_{X_j}}$$

Avec  $X_j$  : Variable initiale ;

$\sigma_{X_j}$  : Ecart type de la variable initiale ;

$Y_j$  : Variable transformée (réduite).

# CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)

## III.5.1.3. Variable centrée réduite

$$Y_j = \frac{X_j - \overline{X_j}}{\sigma_{X_j}}$$

Avec  $X_j$  : Variable initiale ;

$\overline{X_j}$  : Moyenne de la variable initiale ;

$\sigma_{X_j}$  : Ecart type de la variable initiale ;

$Y_j$  : Variable transformée (centrée réduite).

L'analyse en composantes principales peut donc être effectuée sur quatre types de variables :

- ACP sur variables brutes (sans transformation) ;
- ACP sur variables centrées ;
- ACP sur variables réduites ;
- ACP sur variables centrées réduites.

Le traitement des variables brutes et des variables centrées donne lieu à la même matrice de covariance, et par conséquent, les résultats de la diagonalisation sont identiques.

En effet, considérons la variable brute  $X$  et la variable centrée  $Y$ , et montrons que la covariance des deux variables brutes ( $X_j, X_k$ ) est équivalente à celle des deux variables centrées respectives ( $Y_j, Y_k$ ).

$$Y_j = X_j - \overline{X_j} \quad \Rightarrow \quad \overline{Y_j} = 0$$

$$Y_k = X_k - \overline{X_k} \quad \Rightarrow \quad \overline{Y_k} = 0$$

Or :

$$Cov(Y_j, Y_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{ij} - \overline{Y_j}) * (Y_{ik} - \overline{Y_k}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{ij} * Y_{ik}$$

En remplaçant chaque variable par son expression nous obtenons :

## **CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)**

$$\begin{aligned} \text{Cov}(Y_j, Y_k) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_{ij} * Y_{ik} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k) \\ &= \text{Cov}(X_j, X_k) \end{aligned}$$

D'où : 
$$\text{Cov}(Y_j, Y_k) = \text{Cov}(X_j, X_k)$$

Le traitement des variables réduites et centrées réduites se fait de la manière suivante :

Soient  $Y_j$  et  $Z_j$  les variables obtenues par les transformations (III-31) et (III-32), montrons que la covariance des deux variables réduites  $(Y_j, Y_k)$  est égale à celle des deux variables centrées réduites  $(Z_j, Z_k)$ , qui n'est autre que la corrélation entre les deux variables brutes correspondantes.

$$Y_j = \frac{X_j}{\sigma_{X_j}} \quad \Rightarrow \quad \bar{Y}_j = \frac{\bar{X}_j}{\sigma_{X_j}}$$

$$Y_k = \frac{X_k}{\sigma_{X_k}} \quad \Rightarrow \quad \bar{Y}_k = \frac{\bar{X}_k}{\sigma_{X_k}}$$

$$Z_j = \frac{X_j - \bar{X}_j}{\sigma_{X_j}} \quad \Rightarrow \quad \bar{Z}_j = 0$$

$$Z_k = \frac{X_k - \bar{X}_k}{\sigma_{X_k}} \quad \Rightarrow \quad \bar{Z}_k = 0$$

Evaluons maintenant les covariances des variables  $(Y_j, Y_k)$  et  $(Z_j, Z_k)$  :

$$\begin{aligned} \text{Cov}(Y_j, Y_k) &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y}_j) * (Y_{ik} - \bar{Y}_k) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_{ij}}{\sigma_{X_j}} - \frac{\bar{X}_j}{\sigma_{X_j}} \right) * \left( \frac{X_{ik}}{\sigma_{X_k}} - \frac{\bar{X}_k}{\sigma_{X_k}} \right) \\ &= \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sigma_{X_j} * \sigma_{X_k}} \end{aligned}$$

## *CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)*

$$= \frac{\text{Cov}(X_j, X_k)}{\sigma_{X_j} * \sigma_{X_k}}$$

$$= \text{Cor}(X_j, X_k)$$

Donc : 
$$\text{Cov}(Y_j, Y_k) = \text{Cor}(X_j, X_k)$$

$$\text{Cov}(Z_j, Z_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{ij} - \bar{Z}_j) * (Z_{ik} - \bar{Z}_k)$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{ij} * Z_{ik}$$

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\sigma_{X_j}} \right) * \left( \frac{X_{ik} - \bar{X}_k}{\sigma_{X_k}} \right)$$

$$= \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j) * (X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sigma_{X_j} * \sigma_{X_k}}$$

$$= \frac{\text{Cov}(X_j, X_k)}{\sigma_{X_j} * \sigma_{X_k}}$$

$$= \text{Cor}(X_j, X_k)$$

Donc :

$$\text{Cov}(Z_j, Z_k) = \text{Cor}(X_j, X_k)$$

D'où : 
$$\text{Cov}(Y_j, Y_k) = \text{Cov}(Z_j, Z_k) = \text{Cor}(X_j, X_k)$$

En conclusion nous aurons deux types de variantes à appliquer :

➤ **ACP brute = ACP centrée.**

➤ **ACP centrée réduite (ou normée) = ACP réduite.**

L'ACP brute peut être utilisée pour tous les types de variables homogènes c'est à dire possédant les mêmes unités de mesure alors que l'ACP normée peut être utilisée pour



## ***CHAPITRE III : Analyse en Composantes Principales (ACP)***

des variables homogènes et hétérogènes. En effet en centrant et en réduisant la variable, on élimine le problème de l'hétérogénéité de celle-ci. [23]

### **III.6. CONCLUSION**

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

En utilisant l'analyse en composantes principales, on doit répondre à deux questions :

- Est-ce que les différentes variables sont équivalentes et véhiculent toutes la même information ? est ce que l'information contenue dans un nombre de variables réduites peut expliquer le phénomène étudié ?
- Dans le cas où l'information véhiculée serait trop différente d'un indicateur à l'autre, est-il nécessaire d'utiliser toutes les variables originales ?

***CHAPITRE IV :***  
***Présentation de la STEP***  
***de Boumerdes***

*« Le principe de toutes choses, c'est l'eau,  
tout vient de l'eau et tout retourne à l'eau »*

**GOETHE**

## IV.1. INTRODUCTION

Pour préserver les ressources en eau et préserver le patrimoine naturel et la qualité de la vie, l'Office Nationale d'Assainissement (ONA) organisme responsable de la dépollution des eaux usées produites par les différentes activités urbaines en Algérie, a décidé d'ériger une station d'épuration (STEP) en 2001 dans la wilaya de Boumerdes, afin de réaliser ces objectifs et se mettre en conformité avec le développement durable.

## IV.2. LOCALISATION

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

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

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



**Figure IV.1 :** *Vue de dessus de la STEP de Boumerdes Par Satellite [Google Earth]*



**Figure IV.2 :** *Photo de la STEP de Boumerdes*

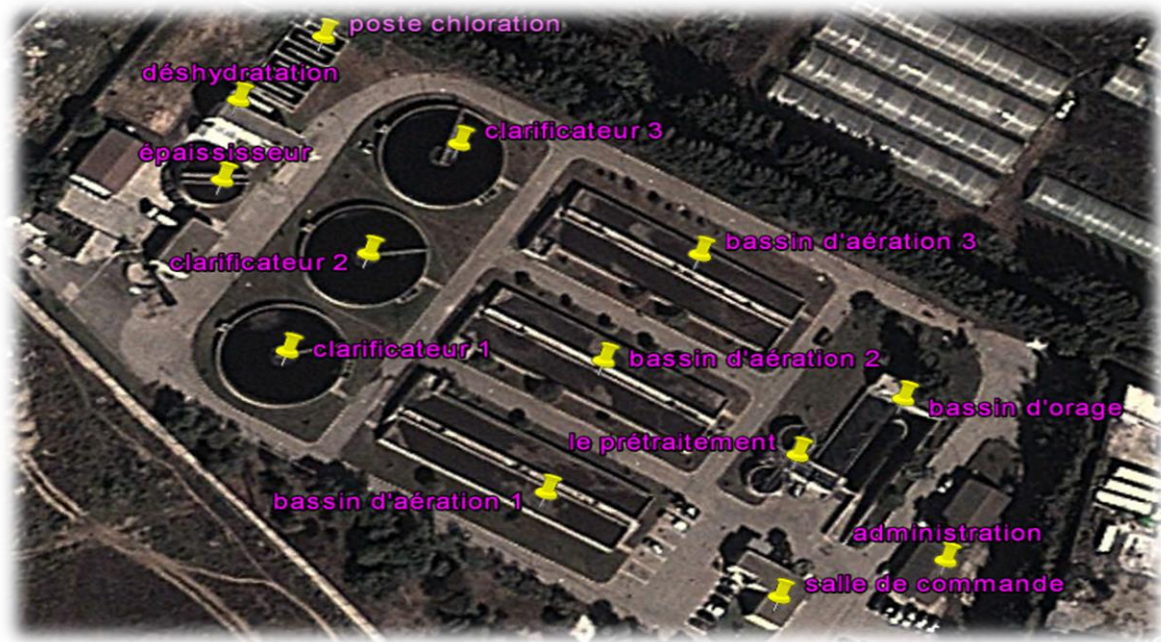


Figure IV.3 : Vue d'ensemble des ouvrages de la STEP de Boumerdes.

### IV.3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

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

### IV.4. DEFINITION DE LA POLLUTION A TRAITER

L'eau à traiter possède les caractéristiques suivantes :

- Volume journalier.....  $15000 \text{ m}^3/\text{j}$
- Débit moyen 24 h.....  $625 \text{ m}^3/\text{h}$
- Débit de pointe temps sec.....  $1063 \text{ m}^3/\text{h}$
- Débit de pointe temps de pluie.....  $1944 \text{ m}^3/\text{h}$

### IV.5. PARAMETRES DE POLLUTION DE CONCEPTION

Le tableau suivant donne les concentrations admissibles des paramètres de pollution.

**Tableau IV.1 :** Paramètres de pollution de conception de la station de Boumerdes

	Entrée	Sortie	Abattement (%)
<b>DBO5 (mg/l)</b>	270	30	88.89
<b>DCO (mg/l)</b>	750	90	88.00
<b>MES (mg/l)</b>	350	30	91.43

### IV.6. PROCEDE D'EPURATION

Les eaux usées arrivent à la station par gravité ou par pompage, les étapes par lesquelles ces eaux usées passent dans la station de Boumerdes sont schématisées dans la figure suivante :

# CHAPITRE IV : Présentation de la STEP de Boumerdes

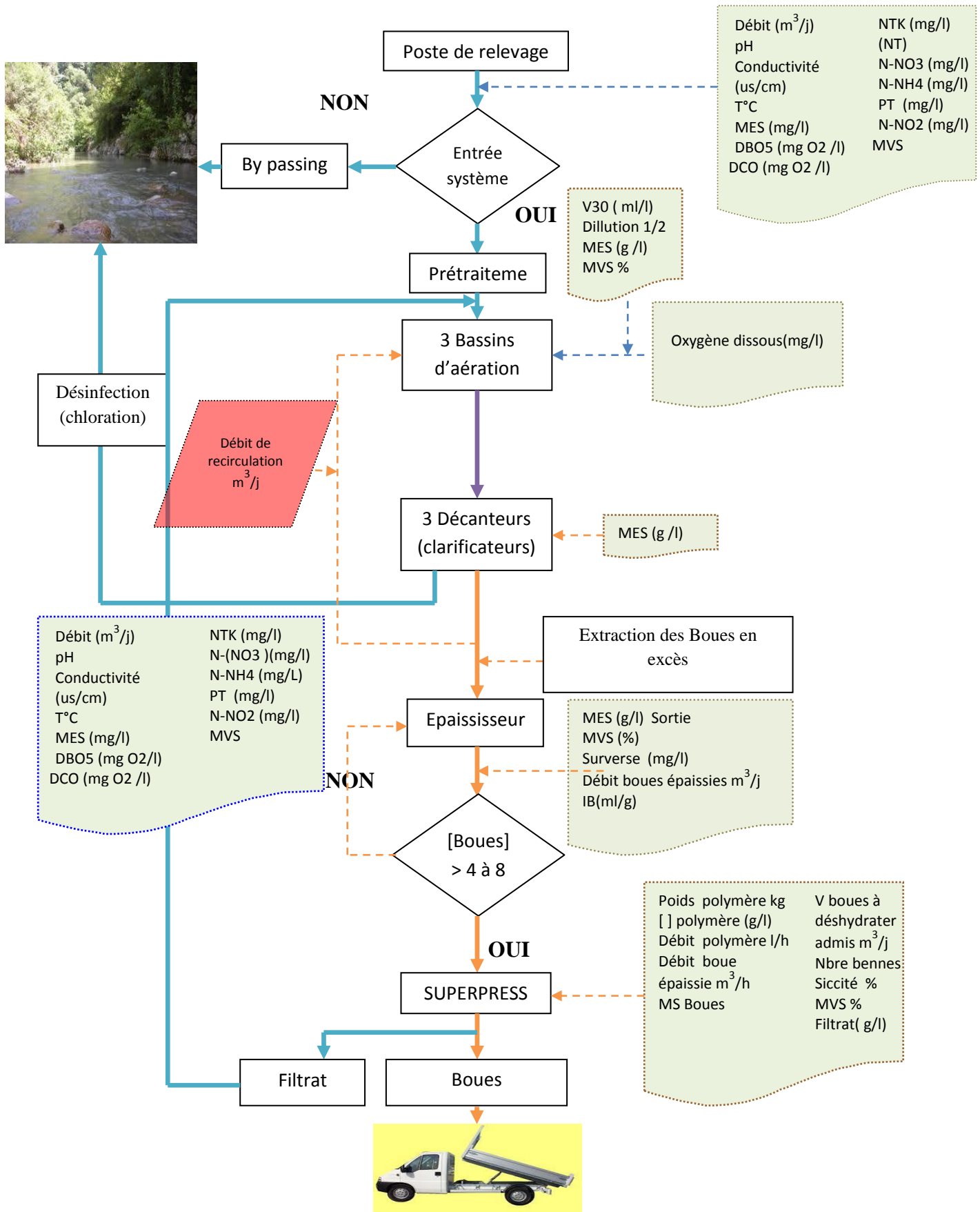


Figure IV.4 : Organigramme d'exploitation de la STEP de Boumerdes.

### IV.6.1. Principe du traitement

#### ❖ Traitement au fil de l'eau

Le traitement au fil de l'eau comporte les étapes suivantes :

- Arrivée des eaux, By Pass et bassin d'orage
- Dégrillage
- Dessablage et dégraissage
- Aération biologique
- Décantation clarification
- Désinfection de l'eau traitée

#### ❖ Traitement au fil de boue

Le traitement au fil de boues comporte deux étapes :

- Un épaissement statique.
- Une déshydratation mécanique.

#### IV.6.1.1. Traitement au fil de l'eau

##### ❖ Arrivée des eaux et bassin d'orage

Une partie des effluents est pompée directement dans le canal d'alimentation du prétraitement d'une part et par gravité dans la bache de relèvement d'autre part, et ce par deux conduites de diamètre 60 mm. Ce poste de relèvement permet :

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



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

### ❖ *Prétraitement*

#### ★ **Dégrillage :**

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



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

#### ★ **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 150-200 mm et l'élimination d'une grande partie des matières flottantes (graisses, écumes, etc.) dans la partie supérieure de l'ouvrage.





**Figure IV.7 :** *Dessableur-Déshuileur.*

### ❖ *Procédé biologique*

#### ★ Bassins d'aération

Les eaux prétraitées sont dirigés 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 :  $3600 \text{ m}^3$ , profondeur : 4.5 m, nombre d'aérateurs : 9



**Figure IV.8 :** *Bassin d'aération.*

### ★ 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 bache de recirculation attenante aux bassins d'aération sous le nom de la liqueur mixte et une partie est extraite pour être envoyée vers l'épaississeur. Les eaux décantées sont recueillies par surverse dans une rigole périphérique pour être dirigée vers la désinfection et le canal de comptage.



**Figure IV.9 :** *Décanteur-Clarificateur.*

### ❖ *Traitement final*

#### ★ 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.



**Figure IV.10** : Bassin de chloration.

### IV.6.1.2. Traitement au fil de boue

#### ❖ **Epaississement des boues**

Avant d'être transférées en déshydratation, il est nécessaire d'épaissir au maximum les boues dans le but essentiellement de traiter de plus faibles volumes et donc d'avoir des ouvrages et des équipements plus compacts.

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

Son but est de :

- Soulager le traitement de l'eau en captant au maximum les boues produites par cette chaîne de traitement en lui restituant une surverse peu chargée dite « claire » afin d'éviter tous les stockages préjudiciables de boues dans les ouvrages de traitement d'eau.
- Fournir à la chaîne de traitement des boues un « produit » rassemblant le maximum de qualité tant en concentration qu'en « fraîcheur » afin d'assurer les conditions optimales de déshydratation.

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

### ❖ Déshydratation mécanique des boues sur bandes presseuses

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

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



**Figure IV.11 :** Presse à bande

## IV.7. 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 2012(2282 observations).

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

### IV.7.1. Statistique des données

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

**Tableau IV.2 : Statistiques des paramètres des données.**

	Eau brute				Eau épurée			
	Moyenne	Ecart type	Min	Max	Moyenne	Ecart type	Min	Max
<b>PH</b>	7.32	0.20	3.30	8.0	7.30	0.16	6.40	7.9
<b>T (°C)</b>	20.50	4.10	7.50	35.9	20.40	4.30	9.40	29.9
<b>MES (mg/l)</b>	248.00	158.60	40.00	2400.0	14.37	7.80	10.00	100.0
<b>DBO5 (mg/l)</b>	265.70	182.80	20.00	2500.0	11.44	8.70	1.00	55.0
<b>DCO (mg/l)</b>	519.37	299.10	115.00	3264.0	49.00	24.40	1.00	164.0
<b>NH4<sup>+</sup> (mg/l)</b>	35.50	21.90	0.80	126.5	7.30	9.60	0.001	60.1
<b>NO2<sup>-</sup>(mg/l)</b>	0.26	0.30	0.002	2.5	0.60	1.10	0.003	9.4
<b>NO3<sup>-</sup>(mg/l)</b>	4.30	11.30	0.004	145.0	51.40	196.20	0.001	1529.1
<b>NTK (mg/l)</b>	52.98	24.30	8.12	218.9	19.70	39.40	0.05	62.0
<b>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>(mg/l)</b>	7.77	5.90	0.35	64.4	3.50	2.70	0.13	22.4
<b>Débit (m<sup>3</sup>/j)</b>	9532.2	4015.4	0	19360	-	-	-	-
<b>Energie (Kwh)</b>	3357.1	756.8	0	7173	-	-	-	-

## IV.7.2. Graphes des variations journalières

Les évolutions des variations journalières des différents paramètres étudiés sont représentées par les figures ci-après :

### ❖ Evolution du PH

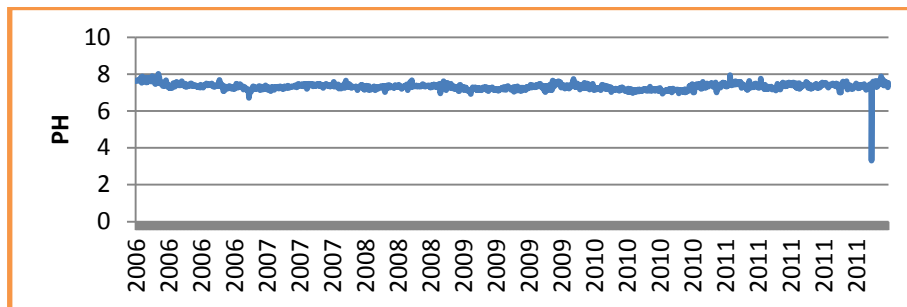


Figure IV.12 : Evolution journalière du PH de l'eau brute.

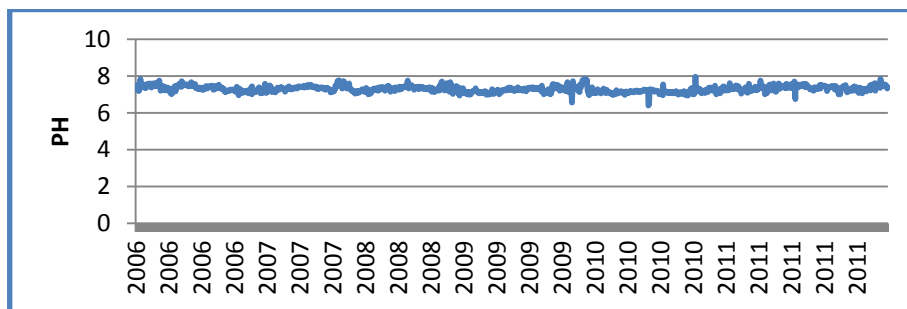
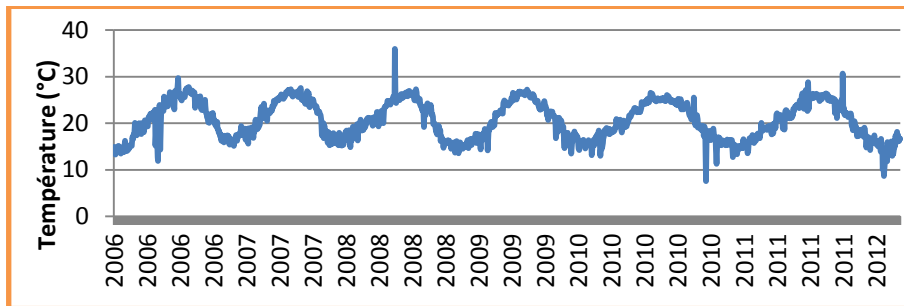


Figure IV.13 : Evolution journalière du PH de l'eau épurée.

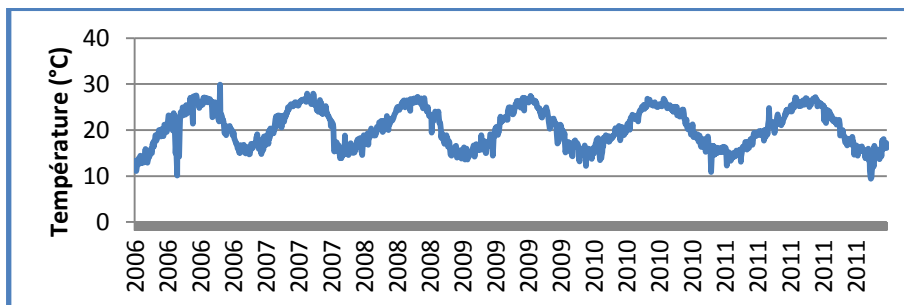
Comme il est illustré sur les deux figures ci-dessus, le PH de l'eau brute varie légèrement et oscille entre 6,4 et 8, néanmoins une diminution brusque en l'an 2012 est détectée, où une valeur minimale de 3,3 a été atteinte. Celle-ci étant douteuse, un test statistique (**Grubbs et Beck**) a été mené pour vérifier la qualité de cette donnée.

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

### ❖ Evolution de la température



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

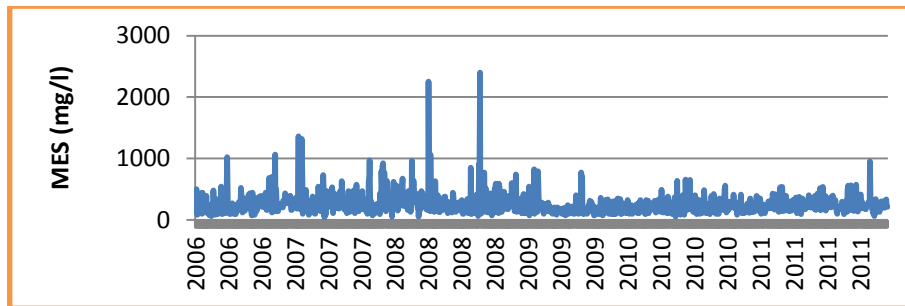


**Figure IV.15 :** Evolution journalière de la température de l'eau épurée.

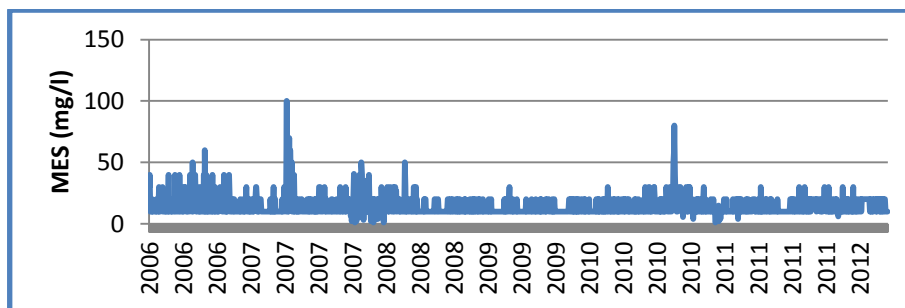
Les valeurs de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de la STEP sont comprises entre 7,5 et 35,9 et tourne autour d'une moyenne de 20 °C.

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

### ❖ Evolution des Matières En Suspension (MES)



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



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

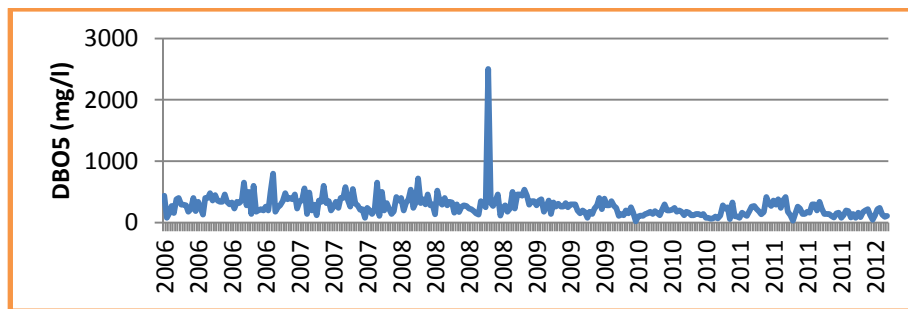
Les eaux brutes à l'entrée de la STEP de Boumerdes sont caractérisées par une concentration moyenne de 248 mg/l en matières en suspension, les valeurs enregistrées dépassent dans certains cas la capacité nominale, ceci peut être expliqué par des phénomènes exceptionnels, comme le lessivage du bassin versant dans les périodes de crues et la remise en suspension des dépôts accumulés dans le collecteur.

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

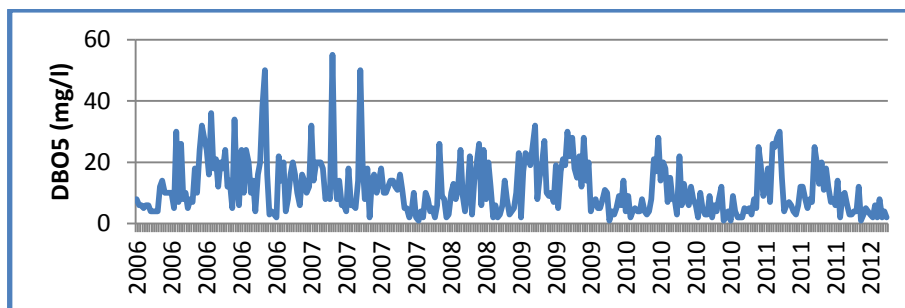
### ❖ Evolution de la DBO5

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





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

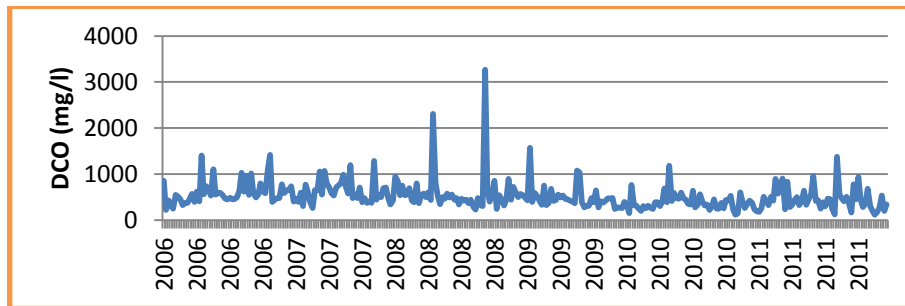


**Figure IV.19 :** Evolution de la Demande Biologique en Oxygène à la sortie de la STEP.

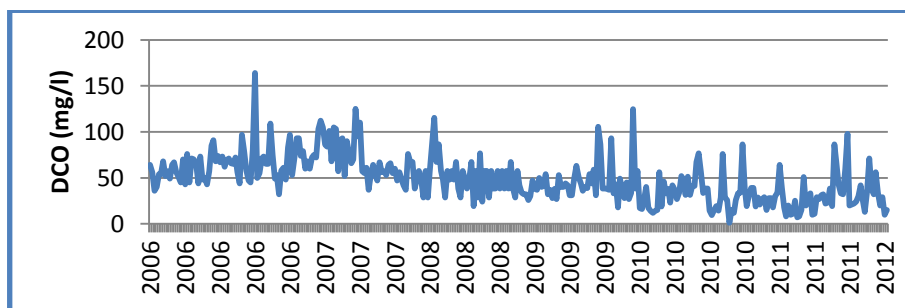
A l'entrée de la STEP de Boumerdes, les valeurs de la DBO5 enregistrées varient fortement et oscillent entre 20 et 800 mg/l, avec une augmentation brusque enregistrée à l'an 2008, où une valeur maximale de 2500 mg/l est atteinte, celle-ci étant exceptionnelle, un test statistique sera appliquée pour vérifier la fiabilité de la chronique.

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

### ❖ Evolution de la DCO



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

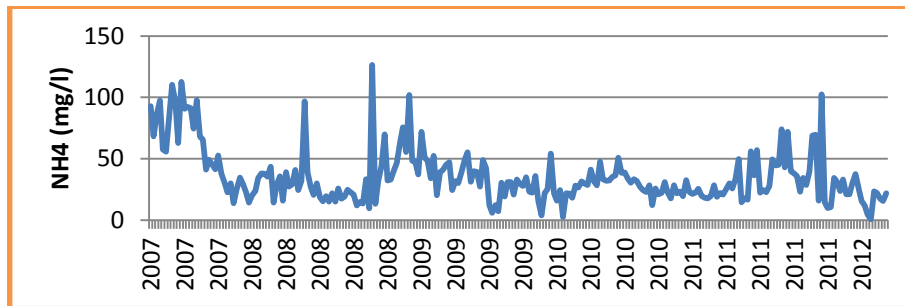


**Figure IV.21 :** Evolution de la Demande Chimique en Oxygène à la sortie de la STEP.

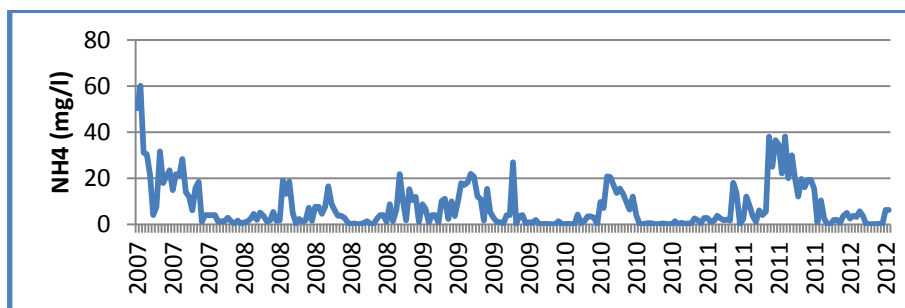
Les valeurs de la DCO enregistrées à l'entrée de la STEP de Boumerdes varient entre 115 mg/l et 1500 mg/l, avec une moyenne de 519,37 mg/l, et une pointe de 3264 mg/l pour l'an 2008 quatre fois supérieure à la capacité nominale qui est de 750 mg/l, ceci s'explique par les fortes précipitations qui ont eu lieu durant cette période.

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

### ❖ Evolution de l'ammonium ( $NH_4^+$ )



**Figure IV.22 :** Evolution de l'ammonium ( $NH_4^+$ ) à l'entrée de la STEP.



**Figure IV.23 :** Evolution de l'ammonium ( $NH_4^+$ ) à la sortie de la STEP.

A l'entrée de la station les concentrations d'ammonium varient entre 0,8 mg/l et 126,5 mg/l avec une moyenne de 35,5 mg/l, ces variations sont fonction de la température et du temps de séjour dans le réseau de collecte.

A la sortie de la STEP, les concentrations d'ammonium sont variables, allant de 0,001 mg/l à 60,1 mg/l avec une moyenne de 7,3 mg/l, celle-ci étant même supérieure à la norme de rejet qui est de 5 mg/l fixée par l'OMS. Ceci est dû à des fortes charges organiques qui entraînent nécessairement un degré de nitrification plus faible.

### ❖ Evolution du Nitrite ( $\text{NO}_2^-$ )

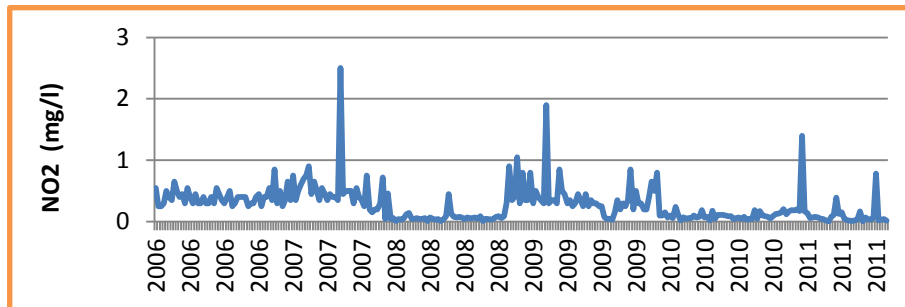


Figure IV.24 : Evolution du Nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) à l'entrée de la STEP.

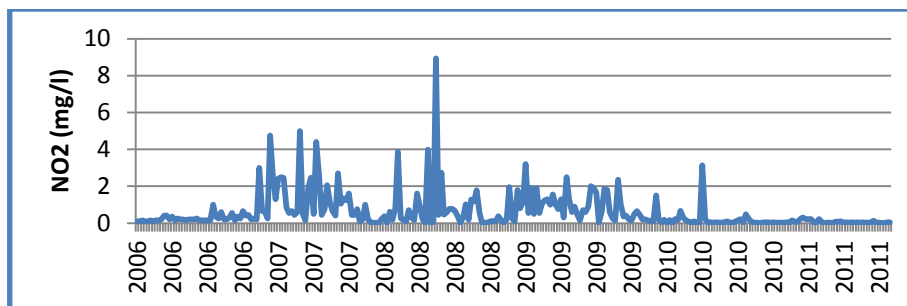


Figure IV.25 : Evolution du Nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) à la sortie de la STEP.

A l'entrée de la STEP on remarque que les concentrations en nitrites varient entre 0,002 et 1 mg/l, avec des augmentations brusques pendant les années 2007, 2009 et 2011.

A la sortie de la STEP, les concentrations en nitrites varient de 0,003 à 9,4mg/l, celles-ci sont en excès par rapport à la concentration de l'entrée mais elles sont toujours inférieures à la norme qui est de 10 mg/l, cela peut être dû à une oxydation incomplète de l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ).

### ❖ Evolution du Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )

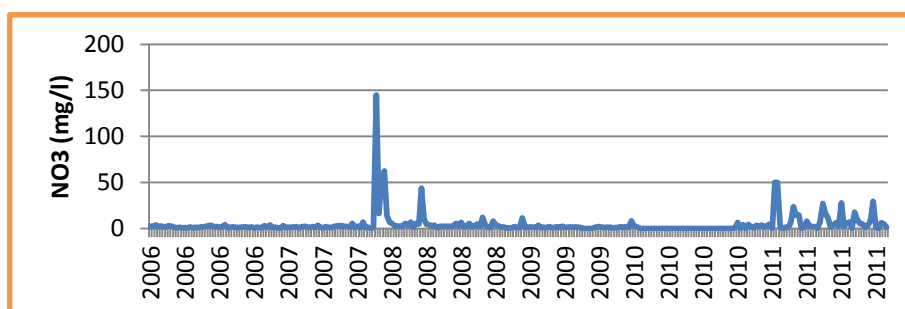
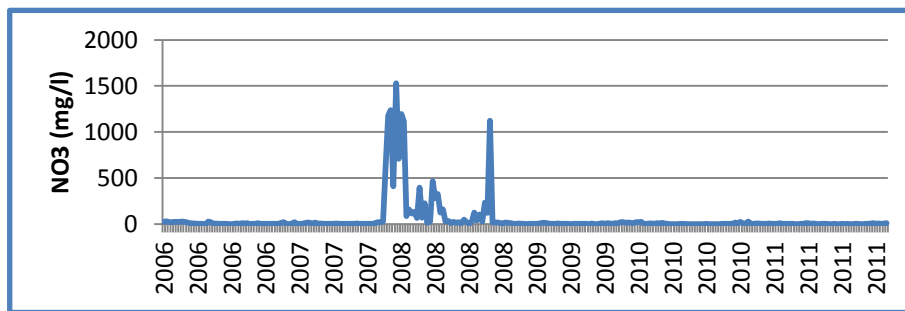


Figure IV.26 : Evolution du Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) à l'entrée de la STEP.

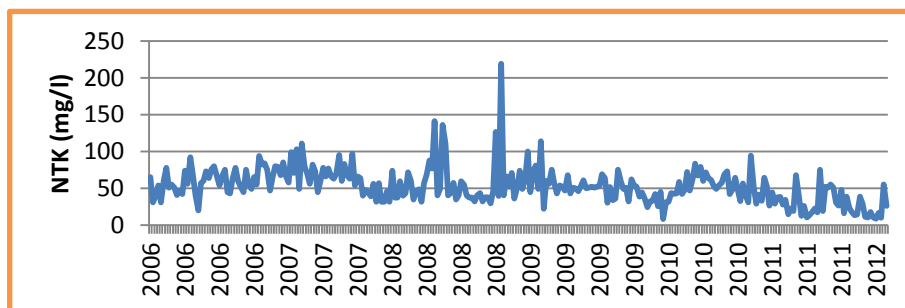


**Figure IV.27 :** Evolution du Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) à la sortie de la STEP.

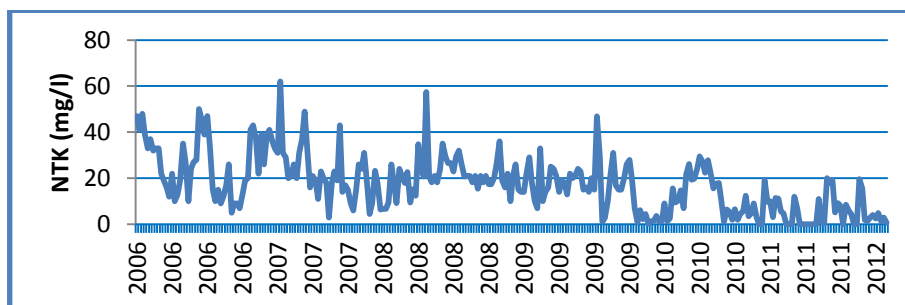
A l'entrée de la STEP les concentrations des nitrates varient de 0,004 à 145 mg/l avec une moyenne de 4,3 mg/l.

Les valeurs de nitrates enregistrées à la sortie de la STEP présentent des variations considérables allant de 0,001 à 1529,1mg/l. Ce pic a été enregistré en 2008 et dépasse la valeur de rejet direct fixée par l'OMS qui est de 10 mg/l. Ce dépassement laisse supposer qu'il y a un problème de manque de maîtrise du temps d'aération.

### ❖ Evolution du NTK



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



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

A l'entrée de la STEP, les concentrations en azote Kjeldahl varient entre 8,12 et 218,9 mg/l, avec une moyenne de 52,98 mg/l.

A la sortie de la STEP, les valeurs de l'azote Kjeldahl sont inférieures à la limite qui est de 40 mg/l, avec quelques exceptions enregistrées pendant les années 2006, 2007, 2008 et 2009, ceci peut s'expliquer par une part de l'azote organique qui ne peut pas être traité biologiquement.

### ❖ Evolution du phosphate ( $PO_4^{3-}$ )

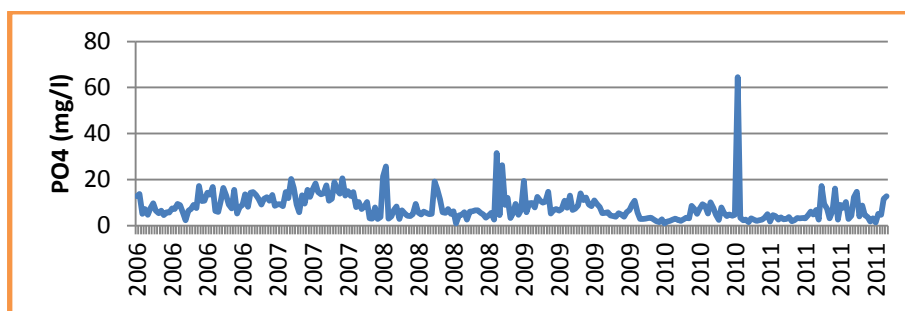


Figure IV.30 : Evolution de  $PO_4^{3-}$  à l'entrée de la STEP.

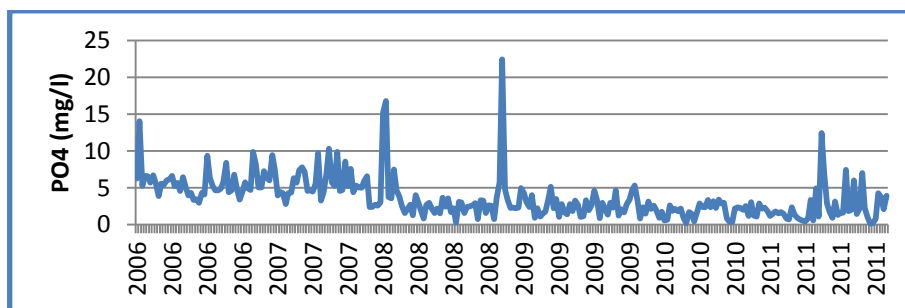
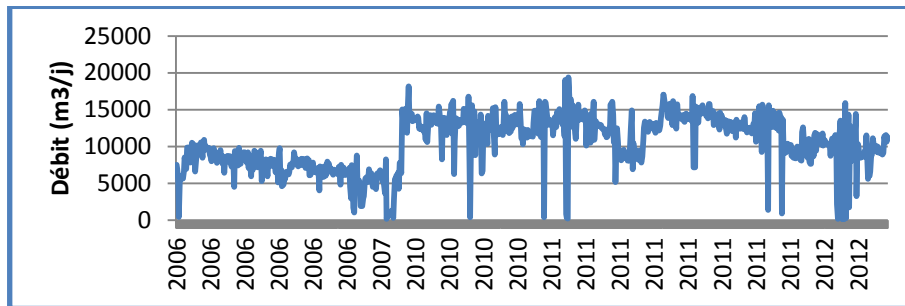


Figure IV.31 : Evolution de  $PO_4^{3-}$  à la sortie de la STEP.

A l'entrée de la STEP, les valeurs de  $PO_4^{3-}$  oscillent autour d'une moyenne de 7,77 mg/l, avec une valeur maximale de 64,4 mg/l atteinte en 2010.

A la sortie, les valeurs de  $PO_4^{3-}$  enregistrées varient généralement entre 0,13 et 10 mg/l, avec une pointe de 22,4 mg/l, enregistrée en 2008. Ces valeurs sont inférieures à la norme qui est de 10 mg/l, avec certains dépassements qui peuvent être dû à un faible % de déphosphatation.

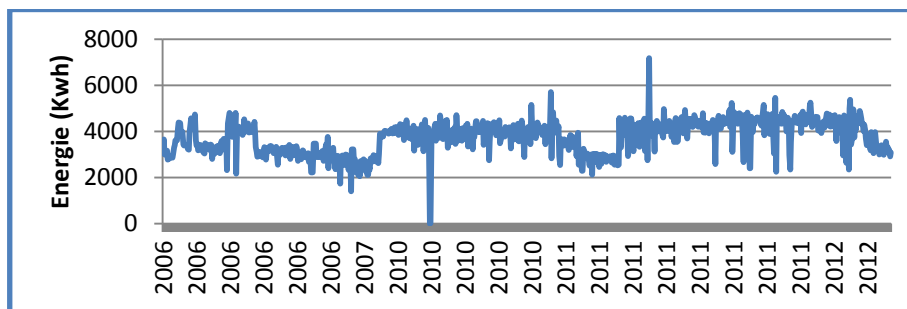
### ❖ Evolution du débit journalier



**Figure IV.32 :** Evolution du débit journalier de l'effluent.

Le débit de l'effluent varie entre 0 et 15000 m<sup>3</sup>, avec certains dépassements de la capacité nominale, cela est dû à de intenses précipitations.

### ❖ Evolution de l'énergie

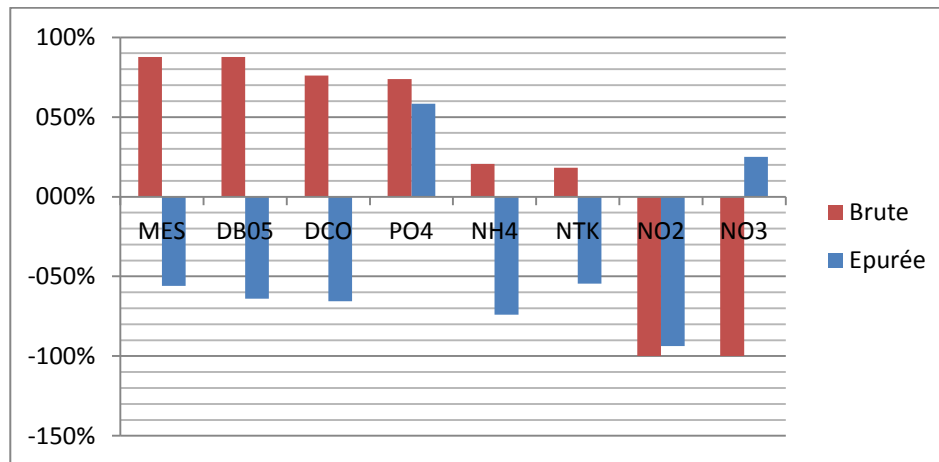


**Figure IV.33 :** Evolution de l'énergie totale consommée à la STEP de Boumerdes

L'énergie totale consommée durant le processus d'épuration des eaux de la STEP de Boumerdes oscille autour d'une moyenne de 3357,1 KWh, (équivalent à l'énergie consommée dans 560 logements), et atteint une valeur maximale de 7173 KWh.

On remarque qu'il y a une valeur nulle d'énergie, ceci s'explique par une coupure d'électricité.

### ❖ Histogramme : Paramètres de pollution (Entrée-Sortie) par rapport à la norme de rejet



**Figure IV.34** : Représentation des paramètres de pollution (Entrée-Sortie) par rapport à la norme.

Remarque : La norme est représentée par l'axe horizontal à 0,00%.

A partir de l'histogramme, on déduit que :

- ★ Il y a un rabatement de la pollution organique (MES, DBO5 et DCO) selon la vocation de la STEP ;
- ★ L'ortho-phosphore est en diminution certes, mais celle-ci est insuffisante car le PO4 est toujours supérieur à la norme de rejet ;
- ★ Il y a un rabatement de l'azote Kjeldahl (NTK) et l'ammonium (NH4) ;
- ★ Le nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) est toujours en dessous de la norme à la sortie de la STEP ;
- ★ Le nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) est en excès, il dépasse la norme à la sortie de la STEP.



### IV.7.3. Détermination des valeurs singulières

Il arrive fréquemment que des erreurs se glissent dans les données de base et en dénaturent complètement le contenu. Cela peut se produire au cours de la mesure, ou de la saisie.

Il est important donc avant tout traitement de détecter les erreurs grossières de ce genre, afin que l'on puisse effectuer une analyse plus fine pour décider si cette donnée douteuse est aberrante et doit donc être éliminée, ou si c'est une donnée exceptionnelle, qui par conséquent doit être au contraire précieusement conservée. Dans notre étude on a opté pour le test de « **Grubbs et Beck** »

#### ❖ Test des horsains de Grubbs et Beck

Ce test est très utilisé pour sa simplicité, il peut signaler la présence de valeurs singulières appelées horsains, en calculant les statistiques suivants :

$$X_h = \exp(\bar{x} + K_n * s_x)$$

$$X_l = \exp(\bar{x} - K_n * s_x)$$

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

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

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

$$K_n = 3.62201 + 6.28446 * n^{1/4} - 2.49835 * n^{1/2} + 0.491436 * n^{3/4} - 0.037911 * n$$

$n$  : Taille de l'échantillon.

Les valeurs de la chronique étudiée doivent appartenir à l'intervalle  $[X_l, X_h]$ .

## CHAPITRE IV : Présentation de la STEP de Boumerdes

Dans le cas où l'une des valeurs n'appartient pas à cet intervalle, on conclura que celles-ci sont des valeurs horsains. Le tableau suivant récapitule les résultats du test :

**Tableau IV.3 : Résultats du test de Grubbs et Beck**

Eau brute						
	n	$K_n$	$\bar{x}$	$s_x$	$x_l$	$x_h$
<b>PH</b>	1495	7.57	1.99	3.00	9.1	5.88
<b>T</b>	1495	7.57	0.03	0.20	4.3	94.4
<b>MES</b>	1458	7.74	5.38	0.48	4.9	9638.3
<b>DBO5</b>	300	10.5	5.42	0.56	0.61	84708
<b>DCO</b>	307	10.5	6.14	0.46	3.6	59597.9
<b>NH4<sup>+</sup></b>	240	10.5	3.39	0.63	0.04	22136.8
<b>NO2<sup>-</sup></b>	302	10.5	-1.89	1.16	$7 \times 10^{-7}$	29436.7
<b>NO3<sup>-</sup></b>	292	10.5	0.17	2.02	$7.2 \times 10^{-10}$	$1.9 \times 10^9$
<b>NTK</b>	281	10.5	3.8	0.5	0.23	8518.5
<b>PO4<sup>-3</sup></b>	299	10.5	1.8	0.7	$3 \times 10^{-3}$	9414.4
<b>Débit</b>	2093	4.5	8.9	0.88	139.77	384615.7
<b>Energie</b>	2151	4.5	8.08	0.34	14913.17	699.24
Eau épurée						
	n	$K_n$	$\bar{x}$	$s_x$	$x_l$	$x_h$
<b>PH</b>	1492	7.59	1.9	0.02	6.15	8.6
<b>T</b>	1492	7.59	2.99	0.21	1.3	102.2
<b>MES</b>	1463	7.74	2.56	0.42	0.5	350.5
<b>DBO5</b>	318	10.5	2.17	0.76	$2.76 \times 10^{-3}$	27775.2
<b>DCO</b>	338	10.5	3.75	0.58	0.09	18769.7
<b>NH4<sup>+</sup></b>	233	10.5	0.77	2.06	$8.7 \times 10^{-10}$	$5.3 \times 10^9$
<b>NO2<sup>-</sup></b>	300	10.5	-1.6	1.57	$1.39 \times 10^{-8}$	$2.9 \times 10^6$
<b>NO3<sup>-</sup></b>	292	10.5	1.48	2.00	$3.3 \times 10^{-9}$	$5.7 \times 10^9$
<b>NTK</b>	280	10.5	2.32	1.58	$6.3 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^8$
<b>PO4<sup>-3</sup></b>	299	10.5	0.98	0.79	$6.6 \times 10^{-4}$	10667.95

## CHAPITRE IV : Présentation de la STEP de Boumerdes

### *Les valeurs singulières :*

L'application du test de Grubbs et Beck au pas du temps journalier a détecté une valeur singulière du paramètre PH de l'eau brute qui est de 3,31, cette dernière s'écarte de la normale, on ne pourra dans aucun cas avoir un effluent assez acide car un PH inférieur à 5 affecte directement la croissance des micro-organismes.

Le test a détecté aussi des valeurs douteuses pour l'énergie qui sont : 0, 11 KWh, 359 KWh et 476 KWh.

Après enquête on a trouvé que :

Les valeurs 0 et 11 sont des valeurs douteuses, c'est soit des coupures de courant soit des arrêts de fonctionnement de la station. Ces valeurs seront rejetées de notre analyse.

Par contre les valeurs 359 KWh et 476 KWh correspondent aux jours des inondations au niveau de la STEP de Boumerdes.

Pour le débit, le test a détecté la valeur 0 comme étant une valeur singulière, celle-ci correspond au jour où le débitmètre était en panne.

Il y a d'autres valeurs de débit qui sont détectées comme étant des valeurs singulières : 10 m<sup>3</sup>, 30 m<sup>3</sup>, 50 m<sup>3</sup>, 70 m<sup>3</sup>, 80 m<sup>3</sup>, 90 m<sup>3</sup>, 110 m<sup>3</sup>, 130 m<sup>3</sup>, celles-ci correspondent aux jours du by-pass au niveau de la STEP d'après les archives consultées.

***CHAPITRE V :***  
***Application de l'ACP sur***  
***les données de la STEP de***  
***Boumerdes***

*« Si nous ne savons pas quel est le problème, comment peut-on savoir ce qui doit être fait pour le résoudre ?! »*

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## V.1. INTRODUCTION

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique permettant de traiter des variables caractérisant deux types de phénomènes : le premier est spatial qui n'a pas une relation avec le temps, le deuxième est temporel, il met en évidence des relations à deux époques distinctes.

Notre étude traite un phénomène temporel, où les variables varient en fonction du temps dans un même lieu de mesure, et sera effectuée sur deux échelles de temps : journalier et mensuel.

## V.2. PROCEDURE DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

### V.2.1. Données utilisées

Comme déjà cité dans le chapitre précédent, on dispose d'une série de données brutes (lues sur l'appareil, ou résultats d'analyse directe) des paramètres de pollution en (mg/l) : MES, DBO5, DCO, NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, NTK des eaux brute et épurée (Entrée-Sortie), du débit de l'effluent (m<sup>3</sup>/j) ainsi que de l'énergie totale (Kwh) consommée durant le processus d'épuration, de Janvier 2006 à Mars 2012.

### V.2.2. Etapes de l'ACP

L'application de l'analyse en composantes principales (ACP) passe par les étapes suivantes :

- ❖ Mise en forme des données brutes (Matrice m×n, m : variables, n : observations).
- ❖ Calcul des paramètres statistiques :
  - Moyenne
  - Ecart type
- ❖ Calcul des variables centrées réduites :

$$X_{CR} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

- ❖ Calcul des coefficients de corrélation (à partir des données centrées réduites).

## *CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes*

- ❖ Détermination des valeurs propres (m valeurs) et vecteurs propres (matrice m×n) : à partir de la matrice de corrélation.
- ❖ Calcul des composantes principales.

**CP= Matrice des variables centrées réduites ×Matrice des vecteurs propres**

- ❖ Calcul des composantes principales centrées réduites (CP') :

$$CP' = \frac{CP}{\sqrt{\lambda}}$$

- ❖ Calcul de la matrice des coefficients de corrélation entre CP' et variables centrées réduites COR (CP', X<sub>CR</sub>).
- ❖ Tracé des cercles de corrélation.

**Remarque :** on a opté dans cette étude pour une ACP normée (transformation des variables brutes en variables centrées réduites) pour homogénéiser les variables.

### **V.2.3. Résultats de l'ACP**

Après application de l'ACP, on obtient les tableaux suivants :

- Matrice de corrélation
- Variance totale expliquée par les valeurs propres
- Matrice de corrélation entre les composantes principales centrées réduites et les variables
- Cercles de corrélation

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## V.3. APPLICATION

### V.3.1. Application de l'ACP sur les paramètres de pollution d'entrée (Eau brute)

#### V.3.1.1. Pas de temps mensuel

##### a) Présentation des données

On dispose d'un tableau de données mensuelles des paramètres de pollution à l'entrée de la STEP (eau brute) : « 57 observations × 8 variables », après avoir éliminé toutes les données non concomitantes.

Pour faciliter la manipulation des variables, on affecte à chacune d'elle un code qui l'identifie, la liste des variables avec leurs codes correspondants est présentée dans le tableau suivant :

**Tableau V.1 : Codification des variables (Eau brute).**

<i>Variable</i>	<i>Code</i>
<b>MES (Eau brute)</b>	MESBr
<b>DBO5 (Eau brute)</b>	DBO5Br
<b>DCO (Eau brute)</b>	DCOBr
<b>NH<sup>4+</sup> (Eau brute)</b>	NH4Br
<b>NO<sub>2</sub> (Eau brute)</b>	NO2Br
<b>NO<sub>3</sub> (Eau brute)</b>	NO3Br
<b>NTK (Eau brute)</b>	NTKBr
<b>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> (Eau brute)</b>	PO4Br

##### b) Résultats de l'ACP

Les résultats de l'analyse sont présentés ci-dessous :

## *CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes*

### ❖ *Matrice de corrélation*

**Tableau V.2 :** *Matrice de corrélation des paramètres de l'eau brute (mensuel).*

Correlation	MESBr	DBO5Br	DCOBr	NH4Br	NO2Br	NO3Br	NTKBr	PO4Br
MESBr	<b>1.000</b>	-	-	-	-	-	-	-
DBO5Br	0.490	<b>1.000</b>	-	-	-	-	-	-
DCOBr	<b>0.625</b>	<b>0.772</b>	<b>1.000</b>	-	-	-	-	-
NH4Br	0.203	0.396	0.570	<b>1.000</b>	-	-	-	-
NO2Br	0.054	0.239	0.159	0.498	<b>1.000</b>	-	-	-
NO3Br	<b>0.671</b>	0.203	0.280	-0.079	0.056	<b>1.000</b>	-	-
NTKBr	0.280	<b>0.638</b>	<b>0.686</b>	0.540	0.221	-0.054	<b>1.000</b>	-
PO4Br	0.232	0.371	0.565	<b>0.606</b>	0.313	-0.140	0.509	<b>1.000</b>

La matrice de corrélation est une matrice symétrique et diagonale, elle permet après diagonalisation de calculer les valeurs propres (en tenant compte des 8 variables), ainsi que la contribution à la variance en terme de pourcentage. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

### ❖ *Variance totale expliquée par les valeurs propres*

**Tableau V.3 :** *Variance totale expliquée (paramètres de l'eau brute- mensuel).*

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	3.729	46.618	46.618	3.729	46.618	46.618
2	1.717	21.463	68.081	1.717	21.463	68.081
3	0.971	12.135	80.217	0.971	12.135	80.217
4	0.597	7.459	87.675			
5	0.361	4.517	92.192			
6	0.298	3.725	95.917			
7	0.206	2.581	98.499			
8	0.120	1.501	100.000			

En examinant l'apport de chaque composante, on remarque qu'avec trois (3) CP seulement, on peut expliquer 80% de la variance totale.



## CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

L'étape suivante consiste à déterminer la corrélation entre les composantes principales centrées réduites (CP') et les variables centrées réduites des données brutes.

### ❖ Matrice de corrélation entre les CP' et les variables

**Tableau V.4 :** Matrice de corrélation entre les CP' et les variables (Paramètres de l'eau brute-mensuel).

Corrélation	CP'		
	1	2	3
<b>DCOBr</b>	<b>0.912</b>	0.159	-0.209
<b>DBO5Br</b>	<b>0.807</b>	0.143	-0.196
<b>NTKBr</b>	<b>0.784</b>	-0.214	-0.309
<b>NH4Br</b>	<b>0.732</b>	-0.418	0.227
<b>PO4Br</b>	<b>0.695</b>	-0.394	-0.033
<b>NO3Br</b>	0.241	<b>0.852</b>	0.344
<b>MESBr</b>	<b>0.616</b>	<b>0.680</b>	0.061
<b>NO2Br</b>	0.418	-0.327	<b>0.787</b>

En analysant la matrice de corrélation entre les trois (3) CP' et les variables centrées réduites des variables brutes, on remarque que :

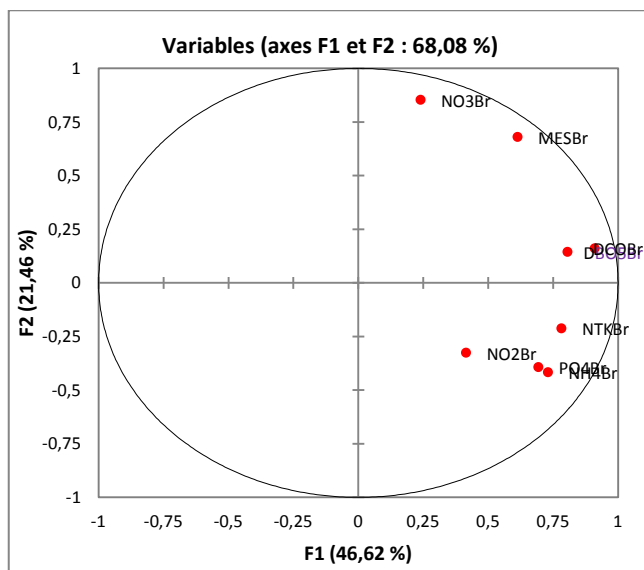
- ★ Les variables DCOBr, DBO5Br, NTKBr, NH4Br, MESBr et PO4Br sont bien corrélées avec la première composante.
- ★ Les variables NO3Br et MESBr sont par contre bien corrélées avec la deuxième composante.
- ★ La variable NO2Br n'est corrélée qu'avec la troisième composante.

Pour visualiser les résultats tirés à partir de la matrice de corrélation entre les CP' et les variables, on passe aux représentations graphiques en traçant les différents cercles de corrélation.

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## ❖ Cercles de corrélation

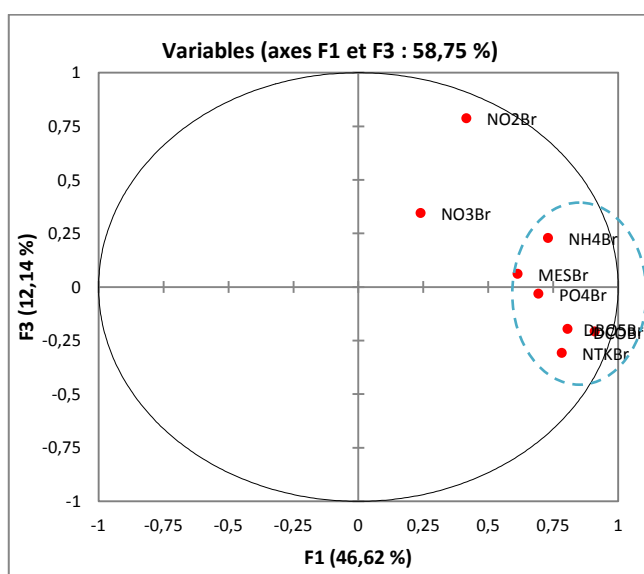
**Cercle (1) :** Projection des variables sur le plan factoriel (1×2)



**Figure V.1 :** Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle mensuelle [1×2].

En analysant le cercle de corrélation formé par les deux axes principaux (1 et 2), on remarque que les variables DCOBr et DBO5Br sont très proches formant même un groupe, celui-ci est opposé au groupe formé par les variables PO4Br et NH4Br.

**Cercle (2) :** Projection des variables sur le plan factoriel (1×3)

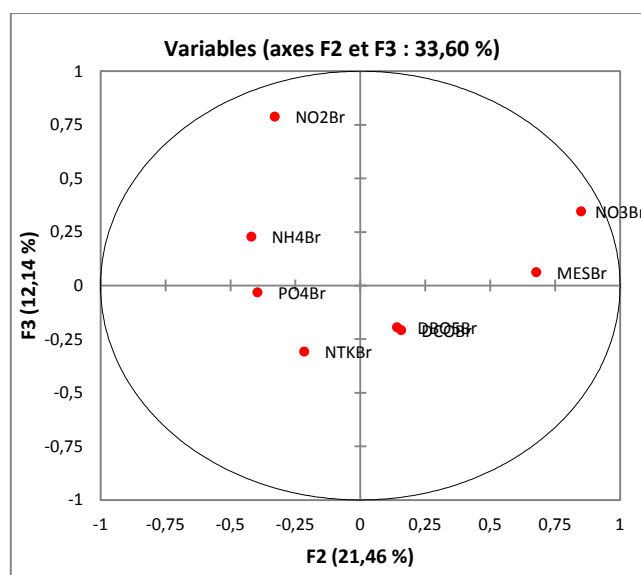


**Figure V.2 :** Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle mensuelle [1×3].

## CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

En examinant le cercle (2), on constate un regroupement de variables composé de : DBO5Br, DCOBr, NTKBr, MESBr, NH4Br et PO4Br autour de l'axe (1), celui-ci permet de former des ratios en combinant ces différents paramètres, par exemple, le ratio DCO/DBO5, permet d'évaluer la biodégradabilité de la matière organique d'un effluent donné, ce qui permettra éventuellement de synthétiser encore d'avantage les paramètres de pollution.

**Cercle (3) :** Projection des variables sur le plan factoriel (2×3)



**Figure V.3 :** Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle mensuelle [2×3].

Le cercle de corrélation formé par les axes principaux (2 et 3), ne donne pas d'informations pertinentes.

### c) Conclusion

*L'analyse des paramètres de l'eau brute au pas de temps mensuel, a permis d'obtenir de nouveaux indicateurs de pollution sous forme de ratios qui synthétisent d'avantage les différents paramètres, et permettent une meilleure appréciation de la pollution, et une accumulation d'informations issues de stations différentes.*

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## V.3.1.2. Pas de temps journalier

### a) Présentation des données

On dispose d'un tableau de données journalières des paramètres de pollution à l'entrée de la STEP (Eau brute) : « 194 observations × 8 variables », après élimination des données non concomitantes.

### b) Résultats de l'ACP

#### ❖ Matrice de corrélation

**Tableau V.5** : Matrice de corrélation des paramètres de l'eau brute (journalier).

Corrélation	MESBr	DB05Br	DCOBr	NH4Br	NO2Br	NO3Br	NTKBr	PO4Br
MESBr	1.000	-	-	-	-	-	-	-
DB05Br	0.686	1.000	-	-	-	-	-	-
DCOBr	0.681	0.696	1.000	-	-	-	-	-
NH4Br	0.320	0.439	0.531	1.000	-	-	-	-
NO2Br	0.010	0.097	0.069	0.297	1.000	-	-	-
NO3Br	0.136	0.030	0.026	-0.032	0.015	1.000	-	-
NTKBr	0.494	0.593	0.609	0.514	0.113	0.003	1.000	-
PO4Br	0.422	0.373	0.448	0.424	0.220	-0.022	0.470	1.000

L'étape suivante consiste à diagonaliser la matrice de corrélation, pour pouvoir calculer les valeurs propres.

## *CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes*

### ❖ Variance totale expliquée par les valeurs propres

**Tableau V.6:** Variance totale expliquée (paramètres de l'eau brute-journalier).

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% Cumulé	Total	% de la variance	% Cumulé
1	3.635	45.437	45.437	3.635	45.437	45.437
2	1.167	14.590	60.027	1.167	14.590	60.027
3	1.006	12.579	72.605	1.006	12.579	72.605
4	.630	7.870	80.475			
5	.591	7.384	87.860			
6	.431	5.390	93.250			
7	.283	3.536	96.785			
8	.257	3.215	100.000			

L'analyse de la variance montre qu'à partir de (8) variables réelles constituant la matrice des données, on aboutit à trois (3) variables fictives, dites composantes principales restituant près de 73% de l'information globale, les autres composantes contribuent très faiblement à l'explication de la variance totale, alors leur rejet n'entraîne qu'une perte d'informations minime.

### ❖ Matrice de corrélation entre CP' et les variables

**Tableau V.7 :** Corrélation entre les CP' et les variables (Paramètres de l'eau brute-journalier).

Corrélation	CP'		
	1	2	3
<b>DCOBr</b>	<b>0.862</b>	-0.160	-0.081
<b>DB05Br</b>	<b>0.827</b>	-0.202	-0.061
<b>NTKBr</b>	<b>0.794</b>	0.010	-0.084
<b>MESBr</b>	<b>0.780</b>	-0.368	0.032
<b>NH4Br</b>	<b>0.692</b>	0.380	0.025
<b>PO4Br</b>	<b>0.660</b>	0.253	0.011
<b>NO2Br</b>	0.223	<b>0.774</b>	0.428
<b>NO3Br</b>	0.046	-0.397	<b>0.897</b>

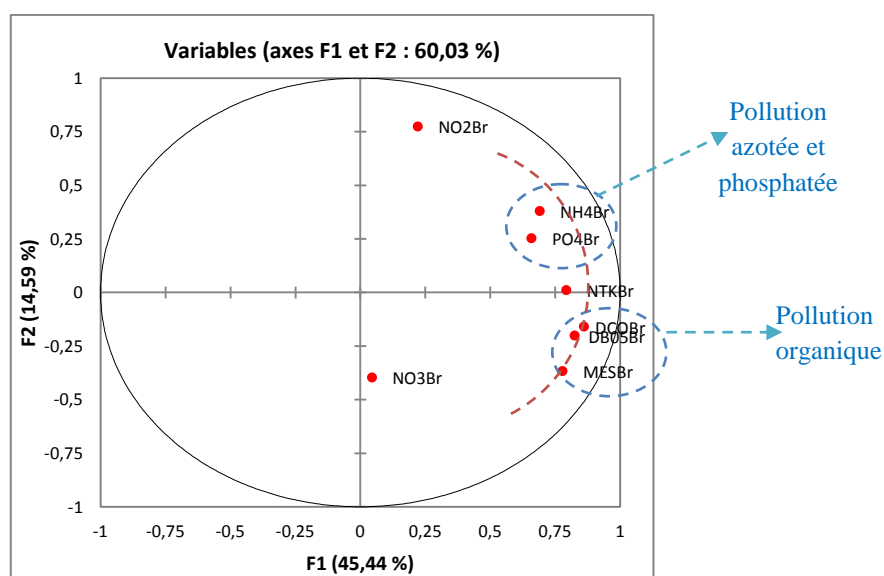
## CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

A partir de ce tableau, on remarque qu'il y a une bonne corrélation entre les variables (DCOBr, DBO5Br, NTKBr, MESBr, NH4Br, PO4Br) et la première composante d'une part et les variables NO2Br et NO3Br avec la deuxième et la troisième composante respectivement d'autre part.

Pour mettre en relief ces constats, on passe aux représentations graphiques en traçant les cercles de corrélations dans les trois plans factoriels (1×2), (1×3) et (2×3).

### ❖ Cercles de corrélations

**Cercle (1) : Projection des variables sur le plan factoriel (1×2)**



**Figure V.4 : Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle journalière [1×2].**

La projection des variables sur le plan factoriel (1×2) montre une formation de deux groupes opposés par rapport au premier axe. Le premier formé par les variables NH4 et PO4, caractérisent une pollution dissoute (azotée et phosphatée), le second formé par les variables DCOBr, DBO5Br et MESBr caractérisant la pollution organique. On déduit alors que le plan factoriel formé par les axes (1 et 2) donne une information sur l'origine de la pollution.

En outre, on remarque que l'axe (1) définit un gradient de pollution décroissant de droite à gauche, et que les paramètres de la pollution organique sont disposés sur un arc fictif ayant un gradient de pollution élevé par rapport aux autres paramètres, ceci s'explique par le caractère domestique ou urbain de l'effluent arrivant à la STEP.

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

Cercle (2) : Projection des variables sur le plan factoriel (1×3)

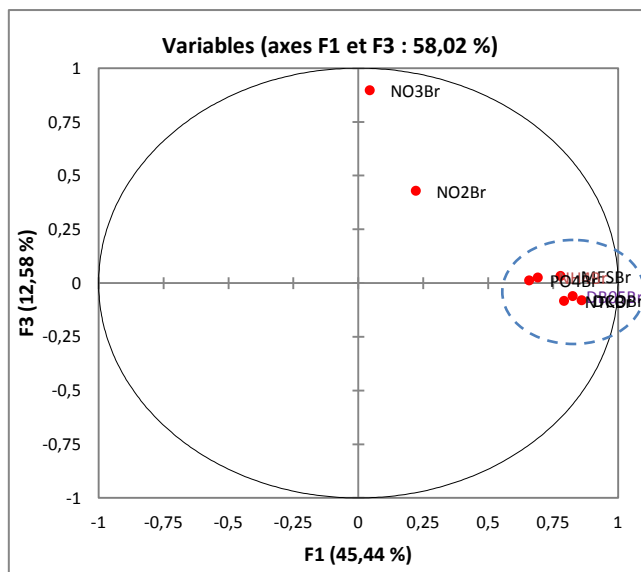


Figure V.5 : Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle journalière [1×3].

En examinant le cercle (2), on remarque une condensation des variables autour de l'axe (1), avec des exceptions de NO3Br et NO2Br qui sont éloignés, ces derniers représentent des formes oxydées de l'azote difficiles à maîtriser.

Cercle (3) : Projection des variables sur le plan factoriel (2×3)

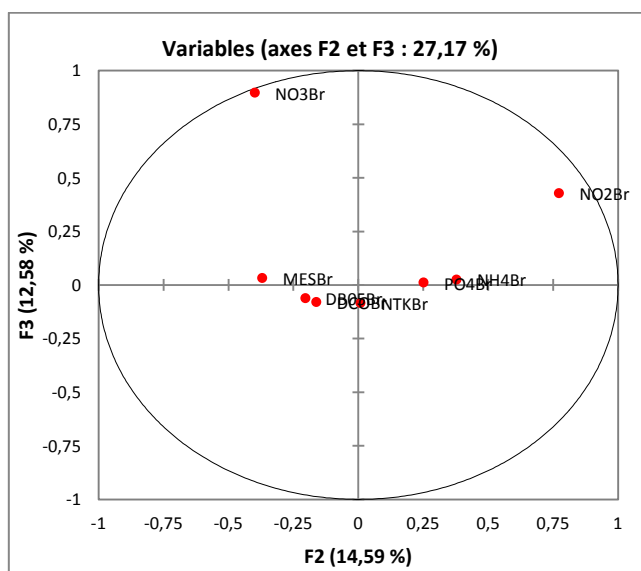


Figure V.6 : Paramètres de pollution de l'eau brute à l'échelle journalière [2×3].

## CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

Le cercle de corrélation formé par les axes principaux (2 et 3), ne donne pas une information pertinente car la plupart des variables se rapprochent du centre.

### c) Conclusion

*On peut dire qu'à partir de l'analyse des paramètres de l'eau brute, au pas de temps journalier, que la pollution de l'eau qui arrive à la STEP est organique caractérisant un effluent domestique.*

*Le regroupement des variables autour d'un axe permet de former de nouveaux indicateurs de pollution sous forme de ratios, ces derniers vont synthétiser encore d'avantage les différents paramètres de pollution avec une meilleure appréciation de cette dernière.*

### V.3.2. Application de l'ACP sur les paramètres de l'eau (Entré/Sortie)

#### V.3.2.1. Pas de temps mensuel

##### a) Présentation des données

On dispose d'un tableau de données journalières « 57 observations × 16 variables », on affecte à chacune de ces variables un code qui l'identifie.

**Tableau V.8 :** Codification des variables (Eau brute-Eau épurée).

<i>Variable</i>	<i>Code</i>
<b>Paramètre eau brute (exemple : MES eau brute)</b>	Paramètre Br (MESBr)
<b>Paramètre eau épurée (exemple : DBO5 eau épurée)</b>	Paramètre Ep (DBO5Ep)



## ***CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes***

### *b) Résultats de l'ACP*

#### *❖ Variance expliquée par les valeurs propres*

**Tableau V.9 :** Variance totale expliquée (Eau brute-Eau épurée/mensuel).

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	5.174	32.338	32.338	5.174	32.338	32.338
2	2.775	17.344	49.682	2.775	17.344	49.682
3	1.443	9.019	58.701			
4	1.235	7.717	66.418			
5	1.020	6.372	72.790			
6	.958	5.989	78.779			
7	.792	4.950	83.728			
8	.553	3.455	87.183			
9	.545	3.408	90.591			
10	.439	2.746	93.338			
11	.299	1.869	95.206			
12	.270	1.687	96.893			
13	.179	1.121	98.014			
14	.147	.916	98.930			
15	.087	.547	99.477			
16	.084	.523	100.000			

En examinant l'apport de chaque composante, on remarque qu'en ne considérant que deux CP, on arrive à expliquer presque 50% de la variance totale.

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## ❖ Corrélation entre les CP' et les variables centrées réduites

Tableau V.10 : Matrice de corrélation entre les CP' et les variables (Eau brute-Eau épurée/mensuel).

Corrélation	CP'	
	1	2
DCOBr	<b>0.849</b>	0.194
NH4Br	<b>0.772</b>	-0.420
NTKBr	<b>0.723</b>	-0.090
PO4Br	<b>0.708</b>	-0.255
DBO5Br	<b>0.700</b>	0.166
DCOEp	<b>0.624</b>	0.134
NO2Ep	<b>0.593</b>	-0.309
NH4Ep	0.533	-0.450
NO3Ep	0.304	<b>0.799</b>
NO3Br	0.187	<b>0.692</b>
MESBr	0.582	<b>0.685</b>
MESEp	0.334	0.191
PO4Ep	0.581	-0.025
DBO5Ep	0.357	-0.482
NO2Br	0.416	-0.357
NTKEp	0.320	0.400

## ❖ Cercle de corrélation

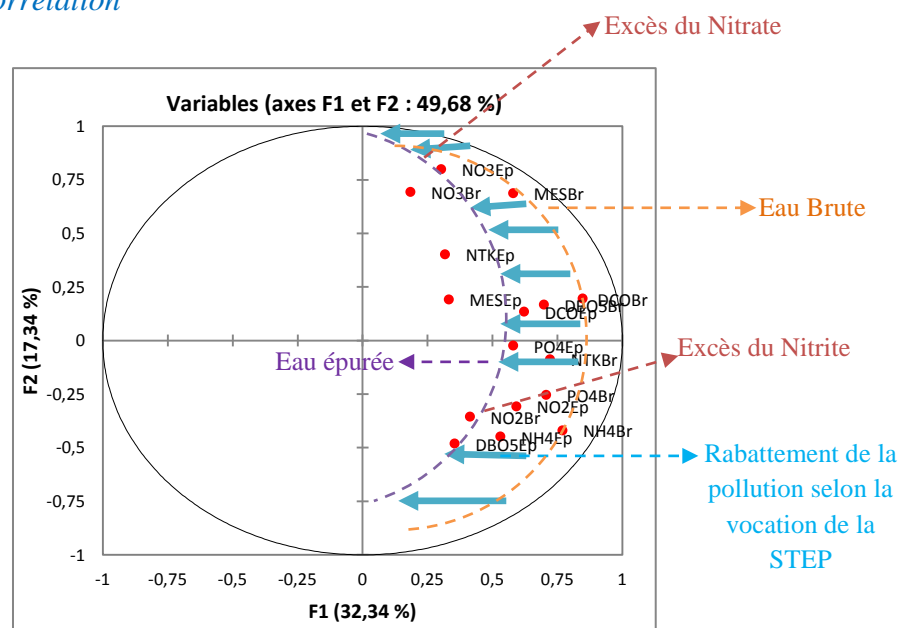


Figure V.7 : Paramètres de pollution (Entrée-Sortie) à l'échelle mensuelle [1×2].

## ***CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes***

On constate une disposition des paramètres de pollution sur deux arcs fictifs l'un regroupant les paramètres de l'eau brute et l'autre les paramètres de l'eau épurée.

Les équidistances entre ces deux arcs fictifs définissent le rabattement de la pollution selon la vocation de la STEP, contrairement aux paramètres NO<sub>3</sub>, et NO<sub>2</sub> dont le processus n'est pas bien maîtrisé vu qu'ils se présentent en excès, alors que le paramètre PO<sub>4</sub> est en diminution certes mais reste insuffisant car il est toujours supérieur à la norme de rejet.

On en déduit alors que le plan formé par les axes (1 et 2) définit le gradient de la pollution qui est décroissant de droite vers gauche.

### *c) Conclusion*

*On conclut donc qu'il y a un manque de maîtrise au niveau des bassins biologiques, ce qui conduit à un dépassement des normes de rejets des paramètres NO<sub>3</sub>, et PO<sub>4</sub> à la sortie de la STEP, ceci est dû à une absence de la zone anaérobie.*

### *V.3.2.1. Pas de temps journalier*

#### *a) Présentation des données*

On dispose d'un tableau de données journalières « 164 observations×17 variables ».

Après application de l'ACP, on obtient les mêmes résultats qu'à l'échelle mensuelle avec de légères différences. On se limite à montrer le cercle de corrélation dans le plan factoriel formé par les axes principaux (1 et 2).

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

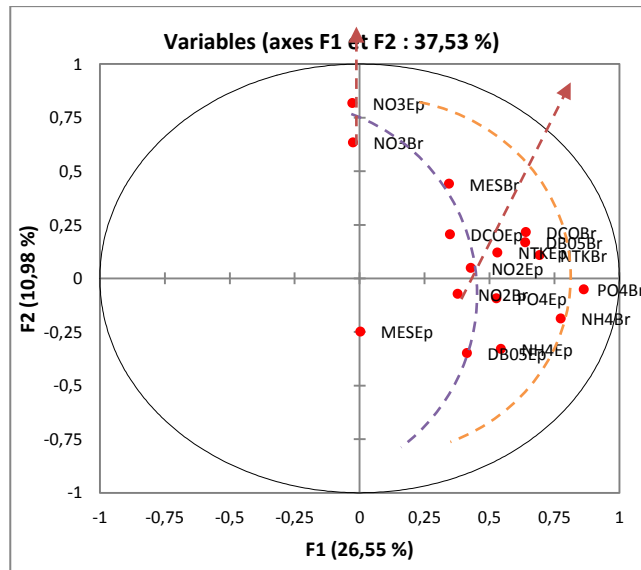


Figure V.8 : Paramètres de pollution (Entrée-Sortie) à l'échelle journalière [1x2].

On remarque une disposition des paramètres de l'eau brute et épurée sur deux arcs fictifs respectivement, avec des exceptions pour  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{NO}_2^-$  qui sont en excès.

## V.3.2. Relation entre l'énergie consommée au cours du processus de l'épuration et les paramètres de pollution

Pour le diagnostic de la STEP, on peut s'intéresser aux paramètres suivants qui constituent des variables expliquées permettant d'apprécier le bon fonctionnement ou non de la STEP:

- ★ La quantité de boues à recycler vers les bassins d'aération.
- ★ La dose d'oxygènes à injecter au niveau des bassins d'aération.
- ★ L'énergie nécessaire à fournir pour atteindre les objectifs de traitement.

Dans ce travail on s'est limité à l'étude du paramètre énergie consommée durant le processus d'épuration, en effectuant une analyse en composantes principales, pour déceler d'éventuels dysfonctionnements de la STEP.

Il y a lieu donc d'appliquer une ACP sur les variables (Paramètres de pollution Entrée-Sortie- et Energie consommée).

# ***CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes***

## ***V.3.2.1. Application de l'ACP sur les paramètres de pollution Entrée - Sortie –Energie***

### ***V.3.2.1.1. Pas de temps mensuel***

#### ***a) Présentation des données***

On dispose d'un tableau de données « 57 × 17 variables ».

- ★ Variable à expliquer : Rendement énergétique [KWh/m<sup>3</sup>] :

Rendement énergétique [KWh/m<sup>3</sup>] = Débit [m<sup>3</sup>/j] / énergie consommée [KWh/j]

- ★ Variables explicatives : paramètres de pollution de l'eau brute [mg/l], paramètres de pollution de l'eau épurée [mg/l].

On affecte à la variable Rendement énergétique un code : Rn énergie, et on garde la codification précédente des variables explicatives (ACP paramètres de pollution Entrée/Sortie).

En appliquant une analyse en composantes principales sur le fichier de données, on obtient les résultats présentés ci-dessous.

#### ***b) Résultats de l'ACP***

##### ***❖ Matrice de corrélation***

Après diagonalisation de la matrice de corrélation, on calcule les valeurs propres ainsi que la contribution à la variance en termes de pourcentage, les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

## **CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes**

### ❖ *Variance expliquée par les valeurs propres*

**Tableau V.11 : Variance totale expliquée (Eau brute-Eau épurée-Rendement énergétique/mensuel).**

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	5,236	30,801	30,801	5,236	30,801	30,801
2	3,125	18,381	49,183	3,125	18,381	49,183
3	1,451	8,534	57,717			
4	1,270	7,469	65,186			
5	1,121	6,593	71,779			
6	0,998	5,868	77,648			
7	0,801	4,712	82,359			
8	0,610	3,587	85,946			
9	0,548	3,223	89,169			
10	0,466	2,743	91,912			
11	0,388	2,285	94,197			
12	0,277	1,630	95,827			
13	0,247	1,451	97,278			
14	0,169	0,997	98,274			
15	0,123	0,724	98,998			
16	0,087	0,511	99,509			
17	0,083	0,491	100,000			

En examinant l'apport de chaque composante, on remarque que pour avoir la moitié de la variance totale, il suffit de ne considérer que les deux premières CP.

L'étape suivante consiste à déterminer la corrélation entre les CP' et les variables centrées réduites des données brutes, les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## ❖ Matrice de corrélation entre les composantes et les variables

**Tableau V.12 :** Corrélation entre les CP' et les variables (Eau brute-Eau épurée/mensuel).

Corrélation	CP'	
	1	2
DCOBr	<b>0,852</b>	0,104
NH4Br	<b>0,743</b>	-0,465
NTKBr	<b>0,707</b>	-0,179
DBO5Br	<b>0,703</b>	0,089
PO4Br	<b>0,695</b>	-0,277
MESBr	<b>0,624</b>	<b>0,639</b>
DCOEp	<b>0,628</b>	0,079
NO2Ep	0,569	-0,361
NH4Ep	0,503	-0,481
NO3Ep	0,350	<b>0,752</b>
NO3Br	0,237	<b>0,701</b>
DBO5Ep	0,328	-0,495
MESEp	0,338	0,139
PO4Ep	0,595	0,010
NO2Br	0,404	-0,322
NTKEp	0,347	0,387
<b>Rn énergie</b>	0,287	<b>0,655</b>

Après analyse des résultats obtenus on remarque que :

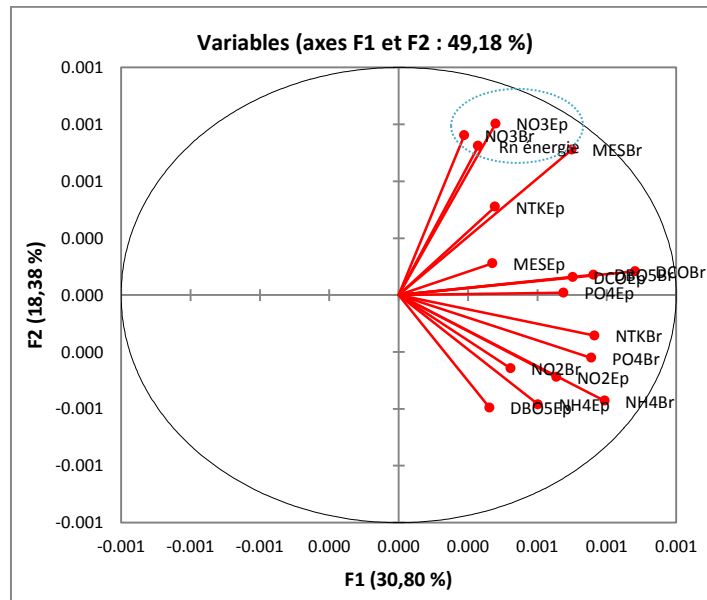
- ★ Hormis le NO2Br et le NO3Br, tous les paramètres de l'eau brute avec DCOEp sont bien corrélés avec la première composante principale.
- ★ Alors que les variables NO3Ep, NO3Br, MESBr et Rn énergie sont bien corrélées avec la deuxième composante.

Pour mieux visualiser ce constat, on trace le cercle de corrélation formé par les axes principaux (1 et 2).

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## ❖ Cercles de corrélation

**Cercle (1) :** Projection des variables sur le plan factoriel (1×2)



**Figure V.9 :** Paramètres de pollution (Entrée-Sortie)-Rendement énergétique à l'échelle mensuelle [1×2].

On remarque bien que la variable Rn énergie est regroupée avec les deux variables NO3Br et NO3Ep. Partant de là, on peut déduire que le rendement énergétique est lié au rabattement du Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ).

Pour affiner l'étude, on passe au pas de temps journalier ce qui va nous permettre d'expliquer les fluctuations de chaque paramètre.

### V.3.2.1.2. Pas de temps journalier

#### a) Présentation des données

On dispose d'un tableau des données journalières « 172 observations × 17 variables ».

En appliquant une ACP normée sur le fichier des données, on obtient les résultats présentés ci-après.



## **CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes**

### **b) Résultats de l'ACP**

#### **❖ Variance totale expliquée par les valeurs propres**

**Tableau V.13 : Variance totale expliquée (Eau brute-Eau épurée/journalier).**

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	4,271	25,124	25,124	4,271	25,124	25,124
2	2,086	12,271	37,395	2,086	12,271	37,395
3	1,496	8,801	46,195			
4	1,259	7,407	53,602			
5	1,125	6,619	60,221			
6	1,089	6,406	66,627			
7	0,940	5,529	72,156			
8	0,733	4,310	76,466			
9	0,674	3,962	80,428			
10	0,616	3,626	84,054			
11	0,528	3,104	87,158			
12	0,508	2,987	90,145			
13	0,482	2,833	92,977			
14	0,398	2,340	95,317			
15	0,366	2,151	97,468			
16	0,239	1,409	98,877			
17	0,191	1,123	100,000			

En examinant l'apport de chaque composante, on remarque que pour avoir près de 40% de la variance totale, il suffit de ne considérer que les deux premières CP.

## ***CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes***

### *❖ Matrice de corrélation entre les CP' et les variables*

**Tableau V.14 :** *Matrice de corrélation entre les CP' et les variables (Eau brute-Eau épurée/journalier).*

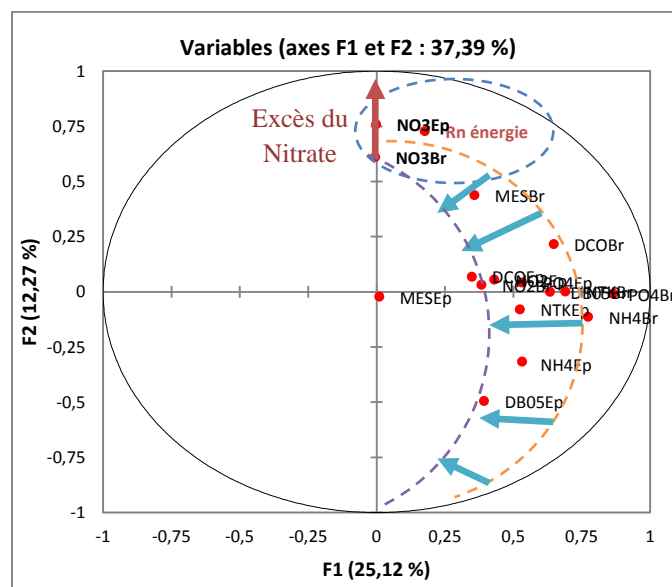
<b>Corrélation</b>	<b>CP'</b>	
	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>PO4Br</b>	<b>0,866</b>	-0,009
<b>NH4Br</b>	<b>0,775</b>	-0,114
<b>NTKBr</b>	<b>0,692</b>	0,001
<b>DCOBr</b>	<b>0,649</b>	0,215
<b>DB05Br</b>	<b>0,635</b>	-0,001
<b>PO4Ep</b>	0,534	0,042
<b>NO3Ep</b>	0,000	<b>0,758</b>
<b>Rn énergie</b>	0,178	<b>0,726</b>
<b>NO3Br</b>	-0,003	<b>0,609</b>
<b>DB05Ep</b>	0,394	-0,495
<b>NTKEp</b>	0,525	-0,080
<b>DCOEp</b>	0,349	0,068
<b>MESEp</b>	0,011	-0,023
<b>MESBr</b>	0,359	0,436
<b>NO2Ep</b>	0,432	0,054
<b>NH4Ep</b>	0,534	-0,318
<b>NO2Br</b>	0,385	0,031

A partir des résultats de ce tableau, on peut dire que les cinq premières variables sont bien corrélées avec la première composante, et que les variables NO3Br, NO3Ep et Rn énergie sont bien corrélées avec la deuxième composante. Pour bien visualiser cette information on trace le cercle de corrélation, formée par les axes principaux (1 et 2).

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## ❖ Cercles de corrélation

**Cercle (1) :** Projection des variables sur le plan factoriel (1×2)



**Figure V.10 :** Paramètres de pollution (Entrée-Sortie)-Rendement énergétique à l'échelle journalière [1×2].

En examinant le cercle formé par les axes principaux (1 et 2), on remarque que les variables Rn énergie, NO3Ep et NO3Br forme un groupe qui se rapproche du deuxième axe, ayant un coefficient de corrélation assez important avec ce dernier, ce qui confirme l'observation tirée de la matrice de corrélation entre les CP' et les variables. En outre, on remarque que l'excès du nitrate est corrélé avec le rendement énergétique, une augmentation de NO3<sup>-</sup> entraîne une augmentation de la facture énergétique.

On a constaté précédemment des équidistances entre deux arcs fictifs (Eau brute-Eau épurée), définissant le rabattement de la pollution, autrement dit, le rapport d'élimination de la pollution. Partant de là, on déduit que l'ACP montre que les rapports d'élimination peuvent être de nouvelles variables qui contribuent mieux à l'explication de l'énergie. Pour affiner encore d'avantage cette analyse on a opté pour ces nouvelles variables explicatives « les rapports d'élimination de la pollution ».

## **CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes**

### *c) conclusion*

*À partir des remarques et des résultats obtenus, on peut déduire que le degré de nitrification dépasse les normes au niveau de la STEP de Boumerdes ce qui génère une pollution : nitrate (NO<sub>3</sub>) en excès, ceci est dû à une sur-aération, qui a pour conséquence d'une part une réduction des zones d'anaérobie et d'autre part une surconsommation d'énergie.*

*Les nouvelles variables explicatives qui sont « les rapports d'élimination de la pollution » avec lesquelles on va travailler par la suite sont définies par :*

*Rapport d'élimination d'un paramètre [%] = 1- (concentration du paramètre dans l'eau épurée [mg/l] / concentration du paramètre dans l'eau brute [mg/l]).*

### *V.3.2.2. Application de l'ACP sur les rapports d'élimination de pollution et Rendement énergétique*

#### *V.3.2.2.1. Pas du temps mensuel*

##### *a) Présentation des données*

Après avoir formé tous les rapports d'élimination pour chaque paramètre de pollution, on dispose d'un tableau de données « 57 observations × 9 variables ».

Rapport d'élimination d'un paramètre [%] = 1- (concentration du paramètre dans l'eau épurée [mg/l] / concentration du paramètre dans l'eau brute [mg/l]).

On aura donc :

- Variable à expliquer : Rendement énergétique [KWh/m<sup>3</sup>]
- Variables explicatives : Rapports d'élimination de la pollution

On associe à chaque variable, un code qui l'identifie. La liste des variables avec leurs codes sont présentés dans le tableau ci-dessous :

## ***CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes***

**Tableau V.15 :** *Codification des variables (Rapport-Rendement énergétique).*

<i>Variables</i>	<i>Codes associés</i>
<b>Rendement énergétique</b>	Rn énergie
<b>Rapport (MES)</b>	R(MES)
<b>Rapport (DBO5)</b>	R(DBO5)
<b>Rapport (DCO)</b>	R(DCO)
<b>Rapport (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)</b>	R (NH <sub>4</sub> )
<b>Rapport (NTK)</b>	R (NTK)
<b>Rapport (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)</b>	R (NO <sub>2</sub> )
<b>Rapport (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)</b>	R (NO <sub>3</sub> )
<b>Rapport (PO<sub>4</sub><sup>-</sup>)</b>	R (PO <sub>4</sub> )

En appliquant une ACP sur le fichier de données, on aboutit aux résultats présentés ci-dessous.

### ❖ *Matrice de corrélation*

**Tableau V.16 :** *Matrice de corrélation (Rapport-Rendement énergétique/mensuel).*

<b>Corrélation</b>	<b>Rn énergie</b>	<b>R(MES)</b>	<b>R(DBO5)</b>	<b>R(DCO)</b>	<b>R(NH<sub>4</sub>)</b>	<b>R(NO<sub>2</sub>)</b>	<b>R(NO<sub>3</sub>)</b>	<b>R(NTK)</b>	<b>R(PO<sub>4</sub>)</b>
<b>Rn énergie</b>	<b>1,000</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>R(MES)</b>	0,280	<b>1,000</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>R(DBO5)</b>	0,255	0,201	<b>1,000</b>	-	-	-	-	-	-
<b>R(DCO)</b>	0,022	0,410	0,163	<b>1,000</b>	-	-	-	-	-
<b>R(NH<sub>4</sub>)</b>	0,139	0,108	0,292	-0,022	<b>1,000</b>	-	-	-	-
<b>R(NO<sub>2</sub>)</b>	-0,166	-0,158	-0,119	-0,029	-0,003	<b>1,000</b>	-	-	-
<b>R(NO<sub>3</sub>)</b>	0,092	0,135	-0,009	-0,081	-0,313	-0,023	<b>1,000</b>	-	-
<b>R(NTK)</b>	-0,394	-0,153	-0,292	0,104	0,067	0,048	-0,150	<b>1,000</b>	-
<b>R(PO<sub>4</sub>)</b>	-0,300	0,066	-0,166	0,230	-0,311	0,006	0,305	0,027	<b>1,000</b>

En diagonalisant la matrice de corrélation, on calcule les valeurs propres ainsi que la variance expliquée en termes de pourcentage de chaque valeur.

# *CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes*

## ❖ Variance expliquée par les valeurs propres

**Tableau V.17:** Variance totale expliquée (Rapport-Rendement énergétique/mensuel).

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
1	2,042	22,691	22,691	2,042	22,691	22,691
2	1,696	18,843	41,534	1,696	18,843	41,534
3	1,382	15,352	56,886	1,382	15,352	56,886
4	0,959	10,661	67,546	0,959	10,661	67,546
5	0,796	8,848	76,395			
6	0,729	8,100	84,495			
7	0,591	6,569	91,064			
8	0,479	5,322	96,386			
9	0,325	3,614	100,000			

L'analyse de la variance totale expliquée, montre que quatre (4) composantes principales contiennent plus de 67% d'informations.

## ❖ Matrice de corrélation entre les CP' et les variables

**Tableau V.18:** Corrélation entre les CP' et les variables (Rapport-Rendement énergétique/mensuel).

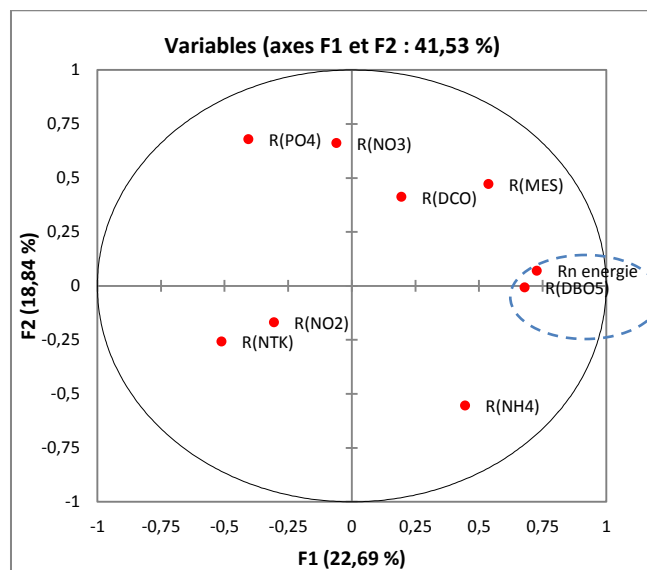
Corrélation	CP'			
	1	2	3	4
<b>Rn énergie</b>	<b>0,727</b>	0,069	-0,304	-0,036
<b>R(DBO5)</b>	<b>0,680</b>	-0,008	0,076	0,202
<b>R(MES)</b>	0,538	0,470	0,378	0,013
<b>R(PO4)</b>	-0,406	<b>0,679</b>	0,176	0,067
<b>R(NO3)</b>	-0,060	<b>0,661</b>	-0,418	0,049
<b>R(NH4)</b>	0,446	-0,555	0,304	0,079
<b>R(DCO)</b>	0,196	0,410	<b>0,745</b>	0,133
<b>R(NTK)</b>	-0,512	-0,259	0,535	-0,250
<b>R(NO2)</b>	-0,305	-0,171	-0,013	<b>0,908</b>

En projetant les variables sur les plans factoriels formés par les axes principaux, on obtient les cercles de corrélation.

# CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

## ❖ Cercles de corrélation

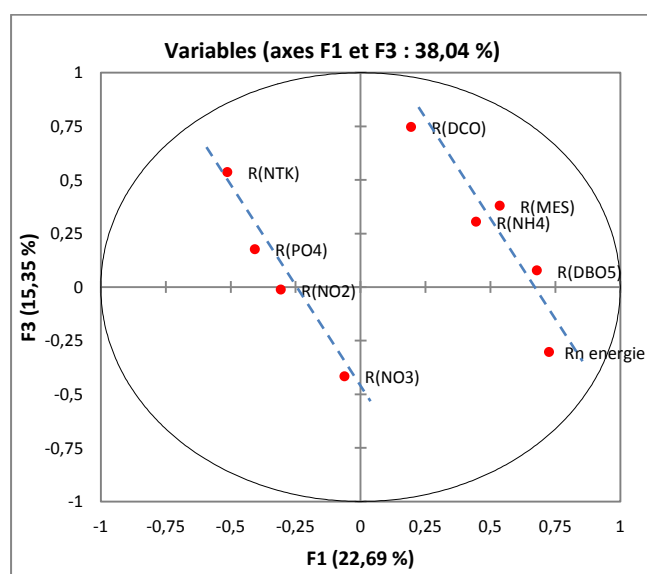
**Cercle (1) :** Projection des variables sur le plan factoriel (1×2)



**Figure V.11 :** Rapport-Rendement énergétique à l'échelle mensuelle [1×2].

On constate sur cette figure, un regroupement des variables Rn énergie et R(DBO5) autour de l'axe (1). En effet, le rendement énergétique est lié au rapport d'élimination de la matière organique.

**Cercle (2) :** Projection des variables sur le plan factoriel (1×3)

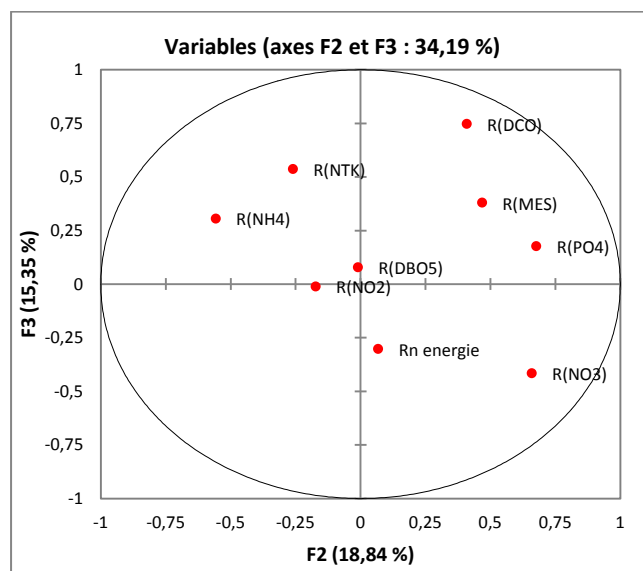


**Figure V.12 :** Rapport-Rendement énergétique à l'échelle mensuelle [1×3].

## CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

A partir du cercle (2), formé par les axes principaux (1 et 3), on constate une disposition linéaire de deux groupes distincts, le premier formé par les variables Rn énergie, R(DBO5), R(NH4), R(MES) et R(DCO), le deuxième formé par les variables R(NO3), R(NO2), R(PO4) et R(NTK).

**Cercle (3) :** Projection des variables sur le plan factoriel (2×3)



**Figure V.13 :** Rapport-Rendement énergétique à l'échelle mensuelle [2×3].

L'examen du cercle (3) formé par les axes principaux (2 et 3), montre qu'il ne donne pas des tendances claires, d'autant plus qu'il y a des variables qui se rapprochent du centre du cercle.

### c) Conclusion

*Les deux regroupements linéaires rappellent les deux procédés Aérobie / Anaérobie. L'énergie appartient au groupe aérobie vu que l'objectif principal est le rabatement de la pollution organique (DBO5).*

*Ces deux groupes évoluent distinctement alors qu'un optimum pourrait rapprocher les deux allures.*



# *CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes*

## V.3.2.2.1. Pas du temps journalier

### a) Présentation des données

Après avoir calculé tous les rapports d'élimination par jour pour chaque paramètre de pollution, on obtient un tableau de données de « 96 observations × 9 variables ».

### b) Résultats de l'ACP

L'application de l'ACP sur le fichier de données conduit aux résultats indiqués ci-après.

#### ❖ *Matrice de corrélation*

La matrice de corrélation des variables, est la suivante :

**Tableau V.19 : Matrice de corrélation (Rapport-Rendement énergétique/journalier).**

Corrélation	R(MES)	R(DBO5)	R(DCO)	R(NH4)	R(NO2)	R(NO3)	R(NTK)	R(PO4)	Rn énergie
<b>R(MES)</b>	<b>1,000</b>	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>R(DBO5)</b>	0,246	<b>1,000</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>R(DCO)</b>	0,237	0,218	<b>1,000</b>	-	-	-	-	-	-
<b>R(NH4)</b>	-0,110	0,262	-0,118	<b>1,000</b>	-	-	-	-	-
<b>R(NO2)</b>	0,231	0,076	-0,002	-0,169	<b>1,000</b>	-	-	-	-
<b>R(NO3)</b>	0,051	-0,201	0,027	-0,107	0,051	<b>1,000</b>	-	-	-
<b>R(NTK)</b>	0,159	0,147	0,187	0,130	0,155	0,262	<b>1,000</b>	-	-
<b>R(PO4)</b>	0,195	0,105	0,284	-0,028	-0,108	0,105	0,096	<b>1,000</b>	-
<b>Rn énergie</b>	0,028	0,320	0,000	0,116	0,164	-0,114	0,038	-0,137	<b>1,000</b>

A partir de la matrice de corrélation des variables, on remarque de faibles corrélations entre les variables.

## ***CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes***

### *❖ Variance expliquée par les valeurs propres*

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau V.20 :** *Variance totale expliquée (Rapport-Rendement énergétique/journalier).*

Composante	Valeurs propres initiales			Extraction Sommes des carrés des facteurs retenus		
	Total	% de la variance	% cumulés	Total	% de la variance	% cumulés
<b>1</b>	1,836	20,401	20,401	1,836	20,401	20,401
<b>2</b>	1,566	17,401	37,802	1,566	17,401	37,802
<b>3</b>	1,287	14,302	52,103	1,287	14,302	52,103
<b>4</b>	1,153	12,806	64,909	1,153	12,806	64,909
<b>5</b>	0,791	8,788	73,698			
<b>6</b>	0,720	8,000	81,697			
<b>7</b>	0,633	7,037	88,734			
<b>8</b>	0,528	5,872	94,606			
<b>9</b>	0,485	5,394	100,000			

En examinant l'apport de chaque composante, on remarque que pour avoir près de 65% de la variance totale, il suffit de prendre en considération les (4) premières CP.

### *❖ Matrice de corrélation entre les CP' et les variables*

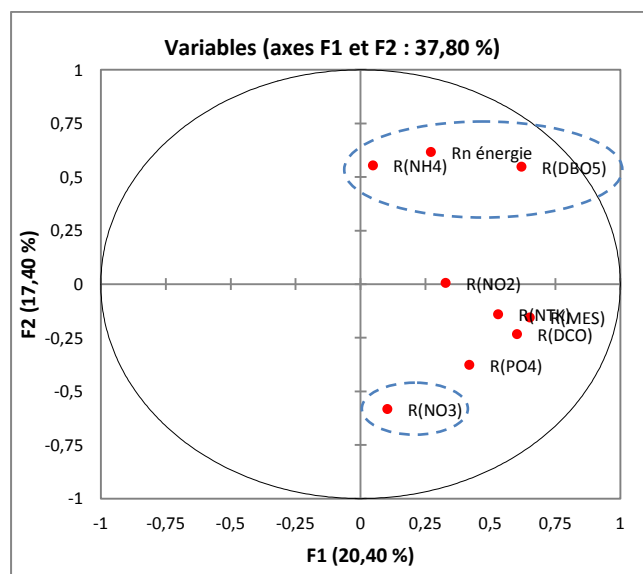
**Tableau V.21 :** *Matrice de corrélation entre les CP' et les variables (Rapport-Rendement énergétique/journalier).*

Corrélation	CP'			
	1	2	3	4
<b>R(MES)</b>	<b>0,654</b>	-0,156	0,163	-0,258
<b>R(DBO5)</b>	<b>0,622</b>	0,548	-0,163	-0,062
<b>R(DCO)</b>	<b>0,605</b>	-0,233	-0,272	-0,250
<b>Rn énergie</b>	0,273	<b>0,616</b>	0,302	0,020
<b>R(NO3)</b>	0,105	<b>-0,583</b>	0,171	0,558
<b>R(NH4)</b>	0,049	0,553	-0,406	0,528
<b>R(NO2)</b>	0,330	0,006	<b>0,771</b>	-0,056
<b>R(PO4)</b>	0,421	-0,377	-0,522	-0,127
<b>R(NTK)</b>	0,532	-0,141	0,084	<b>0,640</b>

## CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

En analysant la matrice de corrélation entre les CP' et les variables, on remarque que les variables R(MES), R(DBO5), R(DCO) sont corrélées positivement avec la première composante. Ce qui de la deuxième composante, elle est corrélée positivement avec les variables R(DBO5), Rn énergie, R(NH4) et négativement avec R(NO3), les variable R(NO2) et R(NTK) sont corrélées avec la troisième et la quatrième composante respectivement. Pour bien visualiser ces constats, on passe aux représentations graphiques en traçant les cercles de corrélation.

**Cercle (1) :** Projection des variables sur le plan factoriel (1×2)



**Figure V.14 :** Rapport-Rendement énergétique à l'échelle journalière [1×2].

A partir de cette figure, on remarque un regroupement des variables Rn énergie, R(DBO5) et R(NH4) dans le même plan formé par les axes (1 et 2), ceci confirme une première information qui stipule que le rendement énergétique est lié au rapport d'élimination de la matière organique exprimé par R(DBO5) ainsi que le rapport d'élimination de l'ammonium exprimé par R(NH4) ou degré de nitrification.

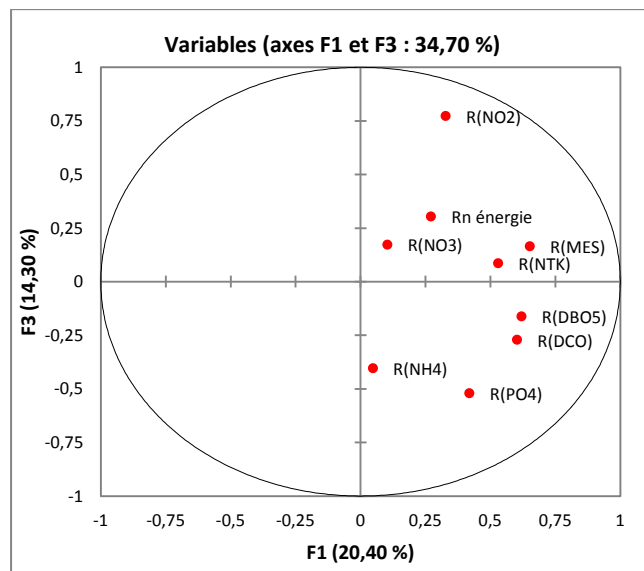
D'autre part, on constate que la variable R(NO3) est symétrique au regroupement cité précédemment par rapport au premier axe, et se rapproche du deuxième axe ayant même un coefficient de corrélation important, de signe négatif, avec ce dernier.

La question qui se pose est : qu'est ce qui fait augmenter le rendement énergétique, avec le rapport d'élimination de la matière organique exprimé par R(DBO5) ainsi que le degré de nitrification exprimé par R(NH4) au même temps qu'un rabattement du degré de

## CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes

dénitrification exprimé par  $R(\text{NO}_3)$ ? La réponse à cette question nous conduit à déterminer la signification de la deuxième composante.

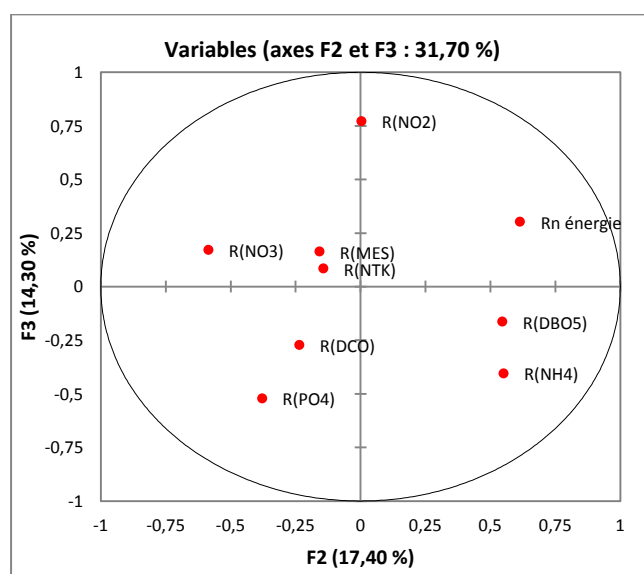
**Cercle (2) :** Projection des variables sur le plan factoriel (1×3)



**Figure V.15 :** Rapport-Rendement énergétique à l'échelle journalière [1×3]

Le cercle corrélation formé par les axes (1 et 3) ne donne pas une information claire sur la variable Rn énergie car cette dernière se rapproche du centre du cercle.

**Cercle (3) :** Projection des variables sur le plan factoriel (2×3)



**Figure V.16 :** Rapport-Rendement énergétique à l'échelle journalière [2×3].

## ***CHAPITRE V : Application de l'ACP sur les données de la STEP de Boumerdes***

En examinant le cercle de corrélation formé par les axes (2 et 3), les mêmes constatations sont faites que pour le cercle (1) concernant les variables Rn énergie, R(DBO5), R(NH4) et R(NO3) avec de légères différences, où la symétrie est par rapport au troisième axe, ceci est dû à des pertes d'informations à cause du changement de repère.

### ***c) Conclusion***

*A travers les résultats obtenus en analysant les différents cercles de corrélation, et la matrice de corrélation entre CP' et les variables, on peut dire qu'une augmentation importante du rapport d'élimination de la matière organique exprimé par R(DBO5), et un degré de nitrification important exprimé par le taux d'élimination de l'ammonium R(NH4) conduisent forcément à une augmentation du rendement énergétique. On sait que la dégradation de la matière organique, et la réaction de nitrification se produisent au niveau du bassin d'aération, alors l'analyse des rapports montre que le poste d'aération est le poste le plus énergivore au niveau de la STEP. L'énergie consommée pour l'aération constitue environ 65% de l'énergie totale consommée.*

*Pour que R(DBO5) et R(NH4) soient importants, on doit assurer une quantité assez importante d'oxygène. Donc, le rendement énergétique est lié essentiellement à la quantité d'oxygène fournie au niveau des bassins d'aération, ainsi qu'au séquençage des périodes d'aération, ce dernier s'explique par la variable R(NO3) qui représente le degré de dénitrification qui peut se produire aux temps d'arrêts des aérateurs.*

*Donc la deuxième composante principale représente l'oxygène fournie, avec le séquençage des périodes d'aération.*

## **Conclusion générale**

L'épuration des eaux usées est aujourd'hui indispensable pour faire face à l'augmentation des concentrations en substances polluantes et des volumes d'effluents rejetés. La prise de conscience des problèmes environnementaux causés par les rejets des stations d'épuration et la volonté d'améliorer et de préserver la qualité des milieux récepteurs a entraîné l'adoption par les autorités de normes réglementaires plus strictes. Le respect de ces normes, d'une part, et la surconsommation d'énergie conséquente, d'autre part, constituent l'enjeu primordial des gestionnaires des stations d'épuration.

Dans ce cadre, on s'est intéressé au diagnostic du fonctionnement de la station d'épuration de Boumerdes afin de déceler d'éventuels dysfonctionnements et améliorer son rendement. On s'est limité dans cette étude au paramètre énergie consommée durant le processus d'épuration, en effectuant une analyse en composantes principales (ACP) sur l'ensemble des paramètres mesurés au niveau de cette STEP.

L'analyse statistique des données recueillies et la visualisation de l'évolution de chaque paramètre au pas de temps journalier à l'entrée et à la sortie de la STEP, sont un préalable à toute étude basée sur des échantillons de mesures.

Cette analyse nous a permis de constater que les paramètres de pollution organique (MES, DBO5 et DCO) de l'eau épurée restent en général satisfaisants et répondent aux objectifs de la station en termes de normes de rejets. Néanmoins, les paramètres de pollution dissoute (azotés et phosphatés), qui ne respectent pas les normes, constituent le majeur problème de l'ensemble des procédés par boues activées.

L'application de l'Analyse en composantes principales aux différents paramètres de la station et à différents pas de temps a permis, entre autres, la génération des nouveaux indicateurs de pollution, à travers une analyse des paramètres de pollution de l'eau brute. On a constaté aussi une sur-aération provoquant, d'une part, une surconsommation d'énergie, et d'autre part, une réduction des zones anaérobies et l'augmentation, par conséquent, de la pollution azotée. Ceci traduit le manque de maîtrise des paramètres de fonctionnement au niveau des bassins biologiques.

## *Conclusion générale*

Le regroupement, constaté, de la variable rendement énergétique avec le rapport d'élimination de la matière organique, d'une part, et avec l'excès en nitrate, d'autre part, permet de conclure que la performance du procédé d'épuration relative à la consommation énergétique est liée en premier lieu au rabattement de la pollution organique, ce qui constitue un premier indicateur de performance. On conclut, aussi, que la surconsommation d'énergie peut être contrôlée par l'excès de nitrate, ce dernier, peut constituer une "*lampe témoin*" de la sur-aération. Dans cette perspective, et pour mieux gérer la station, il est nécessaire d'installer des capteurs instantanés de pollutions organique et azotée au niveau des bassins biologiques. Un système asservi associé à cette installation peut constituer une boucle fermée permettant l'optimisation du fonctionnement de la station en temps réel.

L'aspect aléatoire des paramètres étudiés et leur complexité ne peuvent être expliqués par un modèle linéaire tel que proposé par l'ACP, ceci explique les faibles indices de factorisation obtenus. Néanmoins, la projection des variables dans l'espace factoriel a permis de segmenter les variables en groupes autour des composantes principales retenues. Une ACP sur les variables projetées à une échelle logarithmique est suggérée afin de linéariser les valeurs des paramètres et rendre ainsi la factorisation plausible.

Le souci permanent du gestionnaire d'une station d'épuration est de connaître l'énergie nécessaire et suffisante à fournir pour atteindre les objectifs du processus de traitement. Une modélisation, associée à l'ACP, en utilisant des méthodes plus performantes pour la description de phénomènes complexes et évolutifs est recommandée. En effet, et à titre d'exemple, un modèle basé sur l'apprentissage neuronal permettra d'exploiter certaines informations, issues de la base de connaissances, afin de reconnaître des situations spécifiques et agir sur le procédé.

## *Références bibliographiques*

- [1] W.W.ECKENFELDER, « Gestion des eaux usées urbaines et industrielles », Techniques et documentation (Lavoisier), Paris 1982.
- [2] Abdelkader GAID, « Traitement des eaux usées urbaines », Technique de l'ingénieur. Mise à jour du texte de J. SIBONY et B. BIGOT paru en 1993.
- [3] Gaëlle Deronzier, Sylvie Schétrite, Yvan Racault, Jean-Pierre Canler, Alain Liénard, Alain Héduit, Philippe Duchène, « Traitement de l'azote dans les stations d'épuration biologique des petites collectivités », FNDAE n° 25, Document technique.
- [4] René Moletta : l'eau, sa pollution, et son traitement.
- [5] « Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface », Cadre général Fiche 2. Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement/observatoire des données de l'environnement.
- [6] Ministère de l'environnement du Maroc, « Normes marocaines, Bulletin officiel du Maroc » N°5062 du 30 ramadan 1423. Rabat, 2002.
- [7] BELAHMADI Mohamed Seddik Oussama, « étude de la biodégradation du 2,4-dichlorophénol par le micro-biote des effluents d'entrée et de sortie de la station d'épuration des eaux usées d'Ibn Ziad », Mémoire de Magister en Microbiologie appliquée et biotechnologie microbienne, université Mentouri, 16 Juin 2004.
- [8] Jean Pierre Canler, « Dysfonctionnement biologiques des stations d'épuration : origines et solutions », Paris 2004.
- [9] GHADBANE Nadir, « Les eaux usées urbaines », Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de magister, Université Mohamed Boudiaf Faculté des sciences et des sciences de l'ingénieur, Département de Gestion et Techniques Urbaines.
- [10] SALGHI R, « Différents filières de traitement des eaux », ENSA d'Agadir, 116p, 2005.
- [11] DESHAYES Matthieu, « Guide pour l'établissement des Plans d'Assurance de la Qualité dans le cadre de la réalisation des stations d'épuration de type boues activées en lots séparés », Mémoire de Projet de Fin d'Etudes, Année universitaire 2007/2008 .INSA Strasbourg.
- [12] « Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface », Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement, Novembre 2005.
- [13] Philippe Duchène « Dysfonctionnement biologiques dans les stations d'épuration a boues activées », Actes du colloque Lyon-21 octobre 1994.
- [14] A.BLANDIN et J.MERESSE, pôle environnement Laurent Burget-Mountain Riders. 41 cours du Dr long 69003 Lyon, Juin 2007.



## *Références bibliographiques*

- [15] R.THOMAZEAU, « Stations d'épuration/eaux potables-eaux usées, technique et documentation, 1981.
- [16] Y.libes, « les eaux usées urbaines et leur épuration ».
- [17] Commission Européenne, « Procédés intensifs d'épuration des eaux usées adaptées aux petites et moyennes collectivités », office nationale des publications officielles des communautés européennes, Office international de l'eau ,2001.
- [18] C.GOMELLA et H. GUERREE, « les eaux usées dans les agglomérations urbaines ou rurales : 2. Le traitement », 1978 Paris.
- [19] « L'élimination de la pollution azotée des eaux résiduaires urbaines », Memotec n° 24 révision à date : 01/01/2006.
- [20] « Les différents types de boues d'épuration et leurs traitements, fiche technique, assainissement, ADEME.
- [21] Y.THARRAULT, Thèse de Doctorat « Diagnostic de fonctionnement par analyse en composantes principales : Application à une station de traitement des eaux usées », Institut National Polytechnique de Lorraine, 11 Décembre 2008.
- [22] A. HAMRICHE, « Contribution à l'étude et à la simulation des paramètres hydrométriques par l'analyse en composantes principales (ACP) », Mémoire de Projet de Fin d'Etude, ENP Alger, 1993.
- [23] A. BERMAD, « Elaboration d'une méthodologie de simulation et de prévision des variables climatologiques aléatoires et cycliques par l'analyse en composantes principales ». Thèse de doctorat d'Etat, ENP 2004.
- [24] S. HEDDAM, « Contribution à la modélisation de la qualité des eaux par les réseaux de neurones », Mémoire de Magister, Génie Rural, Institut National Agronomique, 2006.