Régie Autonome de la Distribution
de l'Eau et de l'Electricité
de Marrakech

Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Département des Sciences de la Terre

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

LICENCE EN SCIENCES ET TECHNIQUES

« Eau et Environnement »

Intitulé :

L'impact des dysfonctionnements rencontrés au niveau des bassins d'aération de "la Station d'Epuration et de Réutilisation des Eaux Usées de Marrakech" sur la qualité des eaux traitées

Réalisé par :

- **Latifa KAHIM**
- **Hanane IDABDELLAH**

Encadrées par :

ESSARRAJ S. : Faculté des Sciences et Techniques - MARRAKECH

ALMANSOURE T. : Station d'Epuration et de Réutilisation des Eaux Usées - MARRAKECH

BENKADDOUR A. : Faculté des Sciences et Techniques - MARRAKECH

Soutenu : Le 24 /06/2013

Devant le jury composé de :

ESSARRAJ S. : Faculté des Sciences et Techniques – MARRAKECH

IBOUH H. : Faculté des Sciences et Techniques – MARRAKECH

BENKADDOUR A. : Faculté des Sciences et Techniques – MARRAKECH

2012-2013

Dédicace

Nous dédions ce mémoire à …

A nos parents. *Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous nous avez cessé de nous donner depuis notre naissance, durant notre enfance et même à l'âge adulte.*
Veuillez trouver dans ce modeste travail notre reconnaissance pour tous vos efforts.

Nos frères et nos sœurs *pour leur soutien moral.*
Nous vous exprimons à travers ce modeste travail nos sentiments de fraternité et d'amour.
Sans vos aides, vos conseils et vos encouragements ce travail n'aurait vu le jour.

A tous les membres de nos familles et nos proches, petits et grands

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que nous avons toujours eu pour vous tous.

A nos chères amies

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, nous vous dédions ce travail et nous vous souhaitons une vie pleine de santé et de bonheur.

A Mlle TAHIRI MERIEM
Notre aimable chercheur doctorante biologiste.
Pour ses orientations et son soutien.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadrant Mr. **ABDELFATTAH BENKADDOUR** pour son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail. Nous avons eu le privilège de travailler parmi vos encadrés et d'apprécier vos qualités et vos valeurs. Votre sérieux, votre compétence et votre sens du devoir nous ont énormément marqués.

Nos vifs remerciements vont également à notre encadrante Mme. **SAMIRA ESSARRAJ** pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'elle trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nos remerciements s'adressent pareillement à notre encadrant de stage Mr. **TARIK ALMANSOURE**, ingénieur à la station d'épuration et de réutilisation des eaux usées de Marrakech, pour nous avoir permis d'intégrer la station et de découvrir le fonctionnement de cette innovante technique de traitement, pour sa générosité et la grande patience dont il a pu faire preuve malgré ses charges professionnelles.

Nous exprimons nos gratitudes à tous les responsables et aux personnels de la station d'épuration et de réutilisation des eaux usées de Marrakech, rencontrés lors de notre stage effectué et qui ont accepté de répondre à nos questions avec gentillesse.

Ces remerciements vont également au corps professoral et administratif de la **Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech** pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Nous tenant à remercier sincèrement Mr. **Lionel Jarlan** qui nous a fournis les données de précipitations de la ville de Marrakech durant le mois d'avril 2013 enregistrées au niveau de la station d'Agdal. Ces précieuses données, on les avait pas sans l'aide de notre encadrant Mr BENKADDOUR.

Nos remerciements s'étendent encore à l'organisation **RADEEMA** de nous avoir accordé notre stage au sein de la station.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

Finalement, nous tenons à remercier toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

Résumé

La station d'épuration et de réutilisation des eaux usées de la ville de Marrakech (STEP) procède à un traitement biologique des eaux résiduaires urbaines de la ville. Le procédé d'épuration à boues activées est le procédé adopté au niveau de la STEP de Marrakech. Ce traitement s'effectue au niveau de quatre bassins d'aération. Bien que les performances épuratoires de la STEP et la fiabilité de ce procédé soient prouvés, plusieurs types de dysfonctionnements biologiques des bassins d'aération peuvent apparaître.

Le but de cette étude est l'évaluation des différents paramètres de performance des bassins d'aération par le suivi du degré de pollution industrielle des rejets de la ville de Marrakech entrants à la STEP, ainsi que le taux d'abattement de la charge polluante dans le traitement secondaire (bassins d'aérations et clarificateurs).

L'étude est basée sur les données du mois d'avril 2013 de la STEP de Marrakech. Les analyses ont montré que les teneurs en éléments toxiques des eaux usées brutes sont relativement élevés et dépassent les normes de rejet exigées par la loi marocaine 10-95 sur l'eau. Cependant l'analyse des variations d'oxygène dissous introduit au niveau des bassins d'aération, a permis de constater l'existence de fuites d'air au niveau du bassin 3. En revanche les trois autres bassins montrent une carence en oxygène dissous dans certains jours du mois. Ce manque d'oxygène entraîne le plus souvent un développement de bactéries filamenteuses et de mousses qui sont nuisibles pour les bactéries jouant le rôle de ménage au niveau du bassin d'aération, et inhibent la décantation au niveau des clarificateurs (MES élevée).

Les eaux à la sortie du traitement secondaire montrent des abattements du DBO5, du DCO, de la NTK et de la MES peu satisfaisants durant presque tous le mois d'avril 2013. Cela est dû à l'entrée des éléments toxiques notamment le Cr VI, le Ni, le Cu et les sulfures. Ces éléments ont perturbé l'activité de la biomasse épuratrice des bassins d'aération ce qui produit un affluent mal traité à la sortie du traitement secondaire.

A fin de remédier aux nuisances liés à l'entrée d'éléments toxiques, il est indispensable d'appliquer les textes de la loi 10-95 sur l'eau et exiger les unités industrielles une autoépuration avant de déverser leurs rejets dans le réseau d'assainissement de la ville.

Table des matières

Résumé……...…4

Table des matières…….5

Liste des figures…….8

Liste des tableaux……10

Liste des photos……...11

Liste des abréviations……12

Introduction…….14

Partie I : Cadre général et description de la station d'épuration et de réutilisation des eaux usées de la ville Marrakech (STEP)……..16

1. Présentation de la zone d'étude : ville de Marrakech……...17
2. Présentation de l'organisme d'accueil : RADEEMA……...……18
3. Présentation et description de la STEP de Marrakech…….21
   - 3.1. Filière eau……..24
     - 3.1.1. Prétraitement……24
     - 3.1.2. Traitement primaire…….27
     - 3.1.3. Traitement secondaire…….28
     - 3.1.4. Traitement tertiaire……..30
     - 3.1.5. Réutilisation des eaux traitées……..……32
   - 3.2. Filière boue……...…33
     - 3.2.1. Traitement de la boue primaire……..……..33
     - 3.2.2. Traitement de la boue secondaire……..……..33
     - 3.2.3. Traitement de la boue mixte…….……...34
   - 3.3. Filière biogaz……35
     - 3.3.1. Production du biogaz……...……36
     - 3.3.2. Traitement du biogaz……...……36
     - 3.3.3. Stockage : gazomètre……...36
     - 3.3.4. Torchère et soupape…….37
     - 3.3.5. Valorisation du biogaz…….37
   - 3.4. Désodorisation……..…38

Partie II : Traitement biologique des eaux usées par boues activées au niveau des bassins d'aération…….39

1. Généralités sur les boues activées……..…..…40
2. Microorganismes et Microfaune des boues activées……...…….40
   - 2.1. Flocons de boues activées……..……41
   - 2.2. Microfaune……41
     - 2.2.1. Protozoaires……42
     - 2.2.2. Métazoaires……..42
   - 2.3. Bactéries filamenteuses……42
3. Bassin d'aération à boues activées…….……43
   - 3.1. Différents types de bassins d'aération……...43
     - 3.1.1. Bassin à flux piston…….…….43
     - 3.1.2. Bassin à mélange intégral……44
     - 3.1.3. Bassin à boucle fermée……...…….……44
     - 3.1.4. Bassin à cascade…….……..45
     - 3.1.5. Bassin à alimentation étagée……45
     - 3.1.6. Bassin d'aération type carrousel…….…….46
   - 3.2. Types d'aération des bassins biologiques……...…..47
   - 3.3. Brassage……48
4. Réactions permettant l'épuration des eaux usées par boues activées…….……48
   - 4.1. Assimilation, dissimilation…….…...49
   - 4.2. Déphosphatation……49
   - 4.3. Ammonification…...……49
   - 4.4. Nitrification……...……50
   - 4.5. Dénitrification ……..50
5. Paramètres influençant le fonctionnement des bassins d'aération…..…….…51
   - 5.1. Inhibition par les paramètres caractéristiques des eaux brutes à traiter……....51
     - 5.1.1. Débit d'alimentation……...…….52
     - 5.1.2. pH…….52
     - 5.1.3. Température…….53
     - 5.1.4. Nutriments……...…54
     - 5.1.5. Composés toxiques…….…….55
   - 5.2. Problèmes biologiques…….…..56
     - 5.2.1. Inhibition par les bactéries filamenteuses……...….56

5.2.2. Inhibition par les mousses……...56
5.3. Problèmes mécaniques…….57
5.3.1. Problèmes d'aération…….57
5.3.2. Dysfonctionnement lié aux agitateurs……..59
5.4. Gestion de la concentration des boues……..59

Partie III : Suivi de la performance des bassins d'aération de la STEP de Marrakech……..60

1. Méthodes d'analyse……..61
1.1. Paramètres à mesurer……62
1.1.1. Matière en suspension (MES) et matière sèche (MS)……..62
1.1.2. Demande en oxygène…….……..63
1.1.3. Dosage de l'azote et du phosphore…….…….64
1.2. Paramètres à calculer……66
1.2.1. Charge massique…….……..66
1.2.2. Indice de MOLHMAN……66
1.2.3. Age de boues……67
2. Résultats et interprétation……68
2.1. Paramètres caractéristiques des eaux brutes à l'entrée de la STEP……...……68
2.1.1. Débit à traiter……...68
2.1.2. pH……..…….……..70
2.1.3. Température……70
2.1.4. Conductivité……71
2.1.5. Métaux lourds……..72
2.2. L'oxygène dissous (OD) mesuré dans les bassins d'aération……...76
2.3. Les paramètres analysés à l'entrée et la sortie du traitement secondaire……..78
2.3.1. Demande en oxygène…….……..78
2.3.2. Matière en suspension MES…..…….……81
2.3.3. Les produits azotés…….……..83
2.3.4. Les produits phosphorés……..……86
2.3.5. Rapport débit des boues recirculées sur débits d'eaux sortant du traitement secondaire……88

Conclusions et recommandations…….……89

Annexes……94

Bibliographie……101

Liste des figures

Fig. 1 : Situation géographique de Marrakech dans la région Tensift AL Haouz…..……17
Fig. 2 : Organigramme de la RADEEMA……...……19
Fig. 3 : Plan de réseau d'assainissement à Marrakech de l'année 2010……...……20
Fig. 4 : Situation géographique de la STEP de Marrakech……..……22
Fig. 5 : Plan général de la STEP de Marrakech……...…….24
Fig. 6 : Schéma d'un décanteur primaire……..27
Fig. 7 : Schéma montrant la recirculation des boues secondaires vers le bassin d'aération……30
Fig. 8 : Schéma d'un épaississeur gravitaire……33
Fig. 9 : principe du bassin d'aération à flux piston……..44
Fig. 10 : Principe du mélange intégral d'un bassin d'aération…….44
Fig. 11 : Bassins à boucles fermées…….…….45
Fig. 12 : Bassin à cascades……...……45
Fig. 13 : Bassin à alimentation étagée …….45
Fig. 14 : Evolution du NH_3 et NH_4 en fonction du pH et la température.……...……...…..53
Fig. 15 : Corrélation température misophilique-activité……...…...54
Fig. 16 : Schéma montrant les différents sites de prélèvement au niveau de la STEP de Marrakech…….62
Fig. 17 : Variations des débits moyens journaliers de l'effluent à l'entrée primaire et sortie secondaire (avril 2013)……..…….68
Fig. 18 : précipitations journalières de Marrakech enregistrées dans la station Agdal durant le mois d'avril 2013……..…69
Fig. 19 : Evolution du pH journalier des eaux usées à l'entrée de la STEP (avril 2013)……...……..70
Fig. 20 : Evolution de la température moyenne journalière des eaux usées à l'entrée primaire en fonction de la température atmosphérique (avril 2013)……...……71
Fig. 21 : Evolution de la conductivité moyenne journalière des eaux usées à l'entrée primaire (avril 2013)……..……...……72
Fig. 22 : Evolution de la concentration moyenne journalière des eaux usées en Cr VI à l'entrée primaire (avril 2013……..……...……73
Fig. 23 : Evolution de la concentration moyenne journalière des eaux usées des sulfures à l'entrée primaire (avril 2013)…….…….……..73
Fig. 24 : Evolution de la concentration moyenne journalière des eaux en Ni à l'entrée primaire (avril 2013)……..……...……74

Fig. 25 : Evolution de la concentration moyenne journalière des eaux en Cu à l'entrée primaire (avril 2013)……..……..……..…….75

Fig. 26 : Evolution de la concentration moyenne journalière de l'oxygène dissous introduit dans les eaux usées au niveau des bassins d'aération (avril 2013). …….……76

Fig. 27 : Evolution de la DCO à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire (avril 2013)…….…79

Fig. 28 : Evolution de la DBO5 à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire (avril 2013)……...80

Fig. 29 : Evolution du rapport DCO/DBO5 à l'entrée du traitement primaire (avril 2013)…….…81

Fig. 30 : Evolution de la MES à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire (avril 2013)…….…82

Fig. 31 : Evolution de la concentration journalière des eaux en NTK à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013)…….……..83

Fig. 32 : Evolution de la concentration moyenne journalière des eaux en NH_4^+ à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013)…….……84

Fig. 33 : Evolution journalière de la concentration de la NO_2 à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013)……..……..…….85

Fig. 34 : Evolution de la concentration moyenne journalière des eaux en NO_3 à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013)…….……85

Fig. 35 : Evolution de la concentration moyenne journalière des eaux en PT à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013)……...……..……86

Fig. 36 : Evolution de la concentration moyenne journalière des eaux en PO_4-P à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013)…….……87

Fig. 37 : Evolution du rapport des débits des boues recirculées / débit des boues sortants du traitement secondaire en fonction des débits d'eaux à la sortie secondaire (Avril 2013)……....88

Liste des tableaux

Tab. 1 : Évolution de la population, sa consommation en eau potable, du taux de raccordement au réseau d'assainissement ainsi que le débit moyen des eaux usées de la ville de Marrakech jusqu'à l'horizon 2030……20

Tab. 2 : Caractéristiques du débit entrant à la STEP de Marrakech……23

Tab. 3 : Charges polluantes estimées en entrée de la STEP de Marrakech……23

Tab. 4 : Les différents types de grilles et leurs caractéristiques……25

Tab. 5 : Caractéristiques de l'ouvrage du dessablage/déshuilage……26

Tab. 6 : Caractéristiques des ouvrages intervenant dans le traitement secondaire……30

Tab. 7 : Niveaux de traitement exigé par la RADEEMA après achèvement des travaux de la deuxième phase……32

Tab. 8 : Caractéristiques du gazomètre……36

Tab. 9 : Système enzymatique intervenant dans la dénitrification……51

Tab. 10 : Matrice de corrélation entre les éléments toxiques entrants à la STEP……76

Tab. 11 : Eléments toxiques entrants à la STEP dans les jours à fortes teneurs des eaux en MES à la sortie du traitement secondaire……82

Liste des photos

Photo 1 : Vue général de la STEP de Marrakech……..……..21
Photo 2 : Les dégrilleurs du prétraitement : (a) prégrille, (b) dégrilleur grossier, (c) dégrilleur fin…25
Photo 3 : Le vise déversant les déchets dans la benne……...……..26
Photo 4 : L'ouvrage du dessablage/déshuilage et le pont racleur……27
Photo 5 : Clarificateur de la STEP……..…….29
Photo 6 : Débordement des eaux clarifiées au niveau des gollotes…….29
Photo 7 : les filtres à sables utilisés dans le traitement tertiaire…….……..31
Photo 8 : Digesteurs de la STEP…….…….31
Photo 9 : Strainpress permettant la déshydratation des boues mixtes……..……35
Photo 10 : Les ouvrages utilisés dans le traitement et le stockage du biogaz : (a) désulfure ; (b) gazomètre…….……..37
Photo 11 : Torchère de la STEP……...……37
Photo 12 : La cogénération utilisée dans la production de l'électricité à partir du biogaz…….38
Photo 13 : structure microscopique des flocons des boues activées (500X) ……..41
Photo 14 : Structure microscopique des bactéries filamenteuses des boues activées (500X)……..…43
Photo 15 : Les bassins d'aération de la STEP de Marrakech……..….46
Photo 16 : Différents types d'aérateurs……48
Photo 17 : Apparition d'une couche de mousse à la surface du clarificateur de la STEP de Marrakech……..57
Photo 18 : Les préleveurs automatiques dans la STEP de Marrakech…….……61
Photo 19 : Les appareils utilisés dans le laboratoire de la RADEEMA pour la mesure de la MES : (a) balance, (b) étuve, (c) fibre en verre, (d) dessiccateurs……63
Photo 20 : Le déroulement de la mesure de la DBO5 dans le laboratoire de la RADEEMA…….….64
Photo 21 : Vidange du bassin 3 : (a) bassin rempli, (b) pompage de l'eau vers le bassin avoisinant et (c) bassin presque vide……...……77
Photo 22 : (a) les diffuseurs introduisant l'air (b) fuite au niveau d'une rampe d'aération liée à une conduite flexible……78
Photo 23 : Réparation des fuites au niveau de la rampe d'aération et changement de certains diffuseurs……...……7

Liste des abréviations

ADN : Acide désoxyribonucléique

ARN : Acide ribonucléique

ATP : Adénosine triphosphate

Ca^{2+} : Calcium

CH_4 : Méthane

Cm : Charge massique

Co : Cobalt

CO_2 : Dioxyde de carbone

Cr : Chrome

Cr VI : Chrome hexavalent

Cu : Cuivre

DBO_5 : Demande biologique en oxygène dans cinq jours

DCO : Demande chimique en oxygène

DO : Dissolved oxygène

EH : Equivalent habitant

$FeCl_3$: Chlorure ferrique

Fe : Fer

FI : Index en filament

H_2O : Molécule d'eau

HS^- : Ion hydrosulfure

H_2S : Hydrogène sulfuré

Im : Indice de Molhman

MCRT: Mean Cell Retention Time

MES : Matière en suspension

Mg^{2+} : Magnésium

Mn^{2+} : Manganèse

Mo : Molybdénite

MS : Matière sèche

MVS : Matière volatile sèche

N : Azote

N_2 : Diazote

NaOH : Hydroxyde de sodium

NED : Diamino-1,2 éthane

NH_3 : Ammoniac

NH_4^+: Ammonium

NO : Monoxyde d'azote

Norg : Azote organique

NO_2^- : Nitrite

NO_3^- : Nitrate

NTK : Azote total kjeldahl

O_2 : Oxygène

OMS : Organisation mondiale de la santé

ONEP : Office National de l'Eau Potable de l'Electricité

P : Phosphore

Pb : Plomb

pH : Potentiel hydrogène

PO_4^{3-} : Orthophosphate

PT : Phosphore total

Q : Débit

Qrecirc/Qsortie : Débit recerculé sur le débit sortant

RADEEMA : Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité de la ville de Marrakech

SO_2 : Dioxyde de soufre

SBR : Sequencing Batch Reactor

STEP : Station d'épuration des eaux usées

SVI : Sludge Volume Index

TºC : Température

TRH : Temps de rétention hydraulique

UV : Ultra Violet

Zn : Zinc

Introduction

L'assainissement est une démarche visant à améliorer la situation sanitaire globale de l'environnement dans ses différentes composantes. Il comprend la collecte, le traitement et l'évacuation des déchets liquides, des déchets solides et des excréments.

Il existe plusieurs types d'assainissement tels que l'assainissement solide qui s'occupe des déchets solides urbains ou industriels, leur collecte et leur élimination contribuent également à maintenir un environnement salubre, il existe aussi l'assainissement pluvial ainsi que l'assainissement liquide.

L'assainissement liquide constitue une partie fondamentale du cycle de l'eau. Il désigne l'ensemble des moyens de collecte, de transport et de traitement des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel.

Les effluents urbains sont considérés comme source principale de pollution du Maroc, ayant des répercussions sur la santé de la population et sur la stabilité environnementale. Il est estimé que le volume d'effluents générés dans les zones urbaines s'élève à quelques 500 millions de m^3 chaque année, déversés dans la plupart des cas sans aucun traitement sur des étendues naturelles. Environ 43% des effluents urbains sont directement déversés dans la mer, 30% dans des cours d'eau et 27% en terre ferme (LDK ECO SA, 2006).

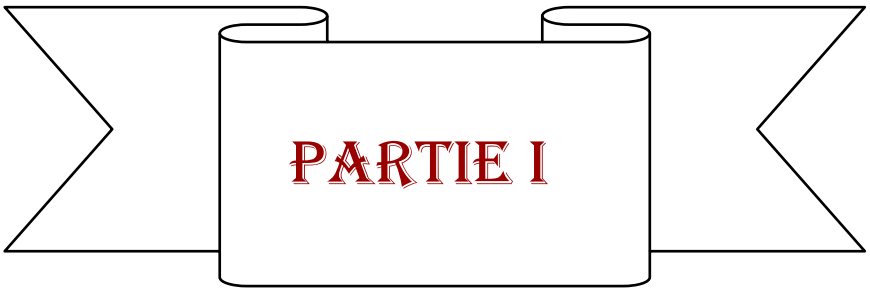
La ville de Marrakech qui fait partie de la région de Marrakech Tensift Al Haouz, connaissent pendant des décennies des déversements des eaux usées brutes dans son milieu naturel, particulièrement dans les champs d'épandages, la palmeraie et les oueds. Cette situation présentait de véritables menaces pour l'environnement de la ville et à ses habitants qui étaient de plus en plus exposés directement ou indirectement aux risques de maladies hydriques (RADEEMA, 2008).

Les ressources hydriques de cette région, vu la présence de l'Atlas, sont relativement importantes. Mais malgré cela, ces ressources connaissent une raréfaction de plus en plus accrue en raison d'une surexploitation et d'une gestion peu rationnelle du potentiel hydraulique.

Pour y faire face, la RADEEMA ou Régie Autonome de la Distribution de l'Eau et de l'Electricité de la ville de Marrakech a réalisé la station d'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech. Cette station consiste à épurer les eaux usées aux moyens de traitements primaire, secondaire et tertiaire, afin de récupérer une ressource en eau de 33 millions de m^3/an (RADEEMA,

2011) qui sera destinée à l'irrigation des golfs et de la palmeraie de la ville. En effet, ce projet de réutilisation de l'eau épurée soulagera le stress hydrique que connait le bassin hydraulique.

Notre sujet aborde l'importance des bassins d'aération au sein desquels s'effectue le traitement biologique des eaux par procédé de boues activées, les facteurs induisant leur dysfonctionnement, l'impact de ce dernier sur la qualité de l'affluent traité à la sortie du traitement secondaire ainsi que d'éventuelles solutions pouvant remédier à ces problèmes.



Cadre général et description de la station d'épuration et de réutilisation des eaux usées de la ville Marrakech (STEP)

1. Présentation de la zone d'étude : ville de Marrakech

La ville de Marrakech fait partie de la région de Marrakech Tensift El Haouz. Elle est située dans la plaine du Haouz centrale enserrée par le massif du Haut Atlas au Sud et celui des Jbiletes au Nord et qui s'étend sur une superficie de 60 km^2. Le site de Marrakech est une plaine uniforme s'inclinant doucement selon une pente d'environ 8 % orientée du sud-est vers le Nord-Ouest depuis la côte 460 NGM (Est de l'aéroport) jusqu'à la côte 380 NGM (oued Tensift). Les seuls reliefs sont constitués par les jbels (collines) Guéliz et Koudiat al Abid (Fathi, 2010).

Le climat de la plaine du Haouz est de caractère chaud et continental avec de forts contrastes de température. La pluviométrie y est faible, et de plus irrégulière dans le temps et l'espace (Cochet, 1965).

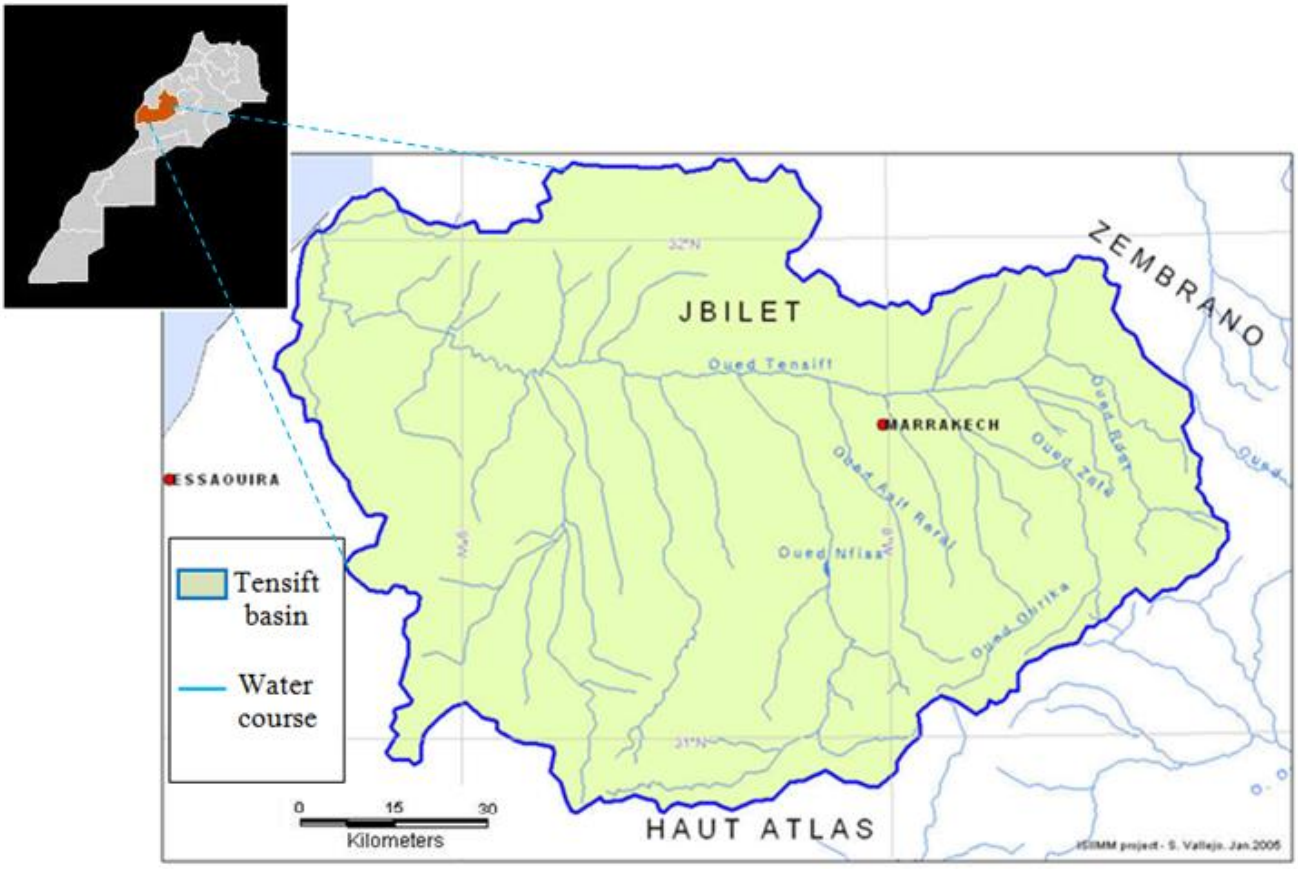


Fig. 1 : Situation géographique de Marrakech dans la région Tensift AL Haouz (http://www.isiimm.agropolis.org).

2. Présentation de l'organisme d'accueil : RADEEMA

- **Historique :**

La Régie Autonome de la Distribution de l'Eau et de l'Électricité de Marrakech est un établissement public nommée la RADEEMA décidé d'être créer suite aux délibérations du conseil municipal de la ville le premier janvier 1970.

A partir du1er janvier 1977 et avec la nationalisation des entreprises étrangères existantes au Maroc après son indépendance, la régie autonome de distribution d'eau et électricité de Marrakech (RADEEMA) a remplacé la société marocaine de distribution (SMD).

Le premier janvier 1998, la RADEEMA a pris en charge la gestion du service de l'assainissement liquide sans avoir délaissé sa mission de la satisfaction des besoins en eau potable et en électricité de la ville de Marrakech.

Le fournisseur actuel de la RADEEMA est l'ONEP (Office National de l'Eau Potable de l'Electricité).

- **Les missions et les objectifs de la RADEEMA**

La mission de la RADEEMA et sa préoccupation majeure est d'accompagner le développement important que connaît la ville de Marrakech, assurer la sécurité de l'approvisionnement en eau et la gestion des services rendus à la clientèle.

Le volet environnemental et écologique reste le centre des actions engagées par la RADEEMA notamment le traitement et la réutilisation des eaux usées.

- **Effectif et organigramme de la RADEEMA**

La RADEEMA compte un effectif total de 922 agents tous mobilisés pour satisfaire les besoins croissants des citoyens de la ville ocre en eau, en électricité et du service d'assainissement liquide.

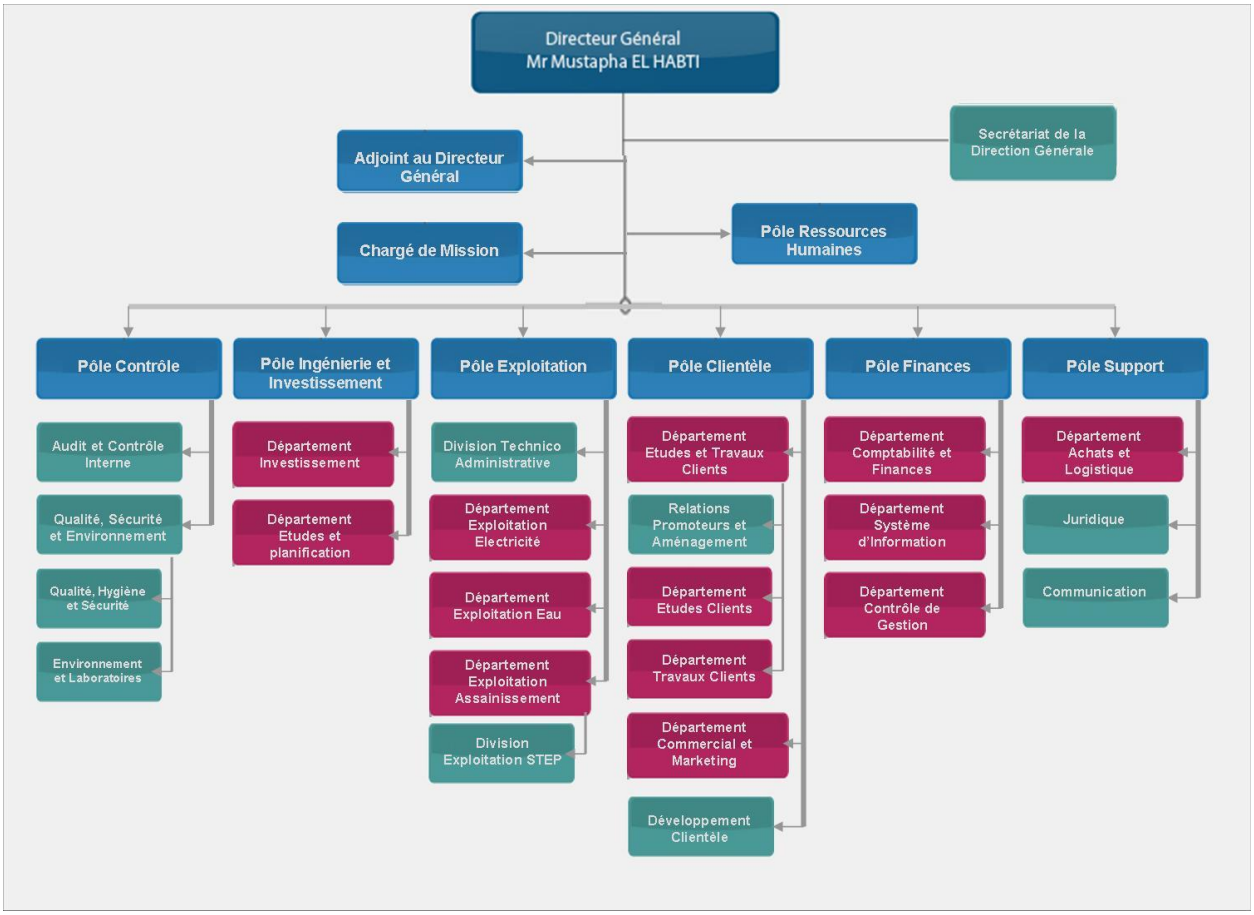


Fig. 2 : Organigramme de la RADEEMA.

- **Le réseau d'assainissement de la ville de Marrakech :**

Le réseau d'assainissement c'est l'ensemble de conduites collectant les différents types d'eaux usées. Il peut être du type unitaire s'il collecte indifféremment toutes les eaux, pluviales et usées, ou séparatif si des canalisations distinctes reçoivent, d'une part des eaux pluviales pour les diriger vers la rivière, et d'autre part, les eaux usées polluées, dirigées vers la station d'épuration.

Le réseau d'assainissement collectif de la ville de Marrakech est de type unitaire et pseudo-séparatif. Le mode pseudo-séparatif est adopté dans la zone industrielle Sidi Ghanem, la zone M'Hamid et les zones équipées après 1998.

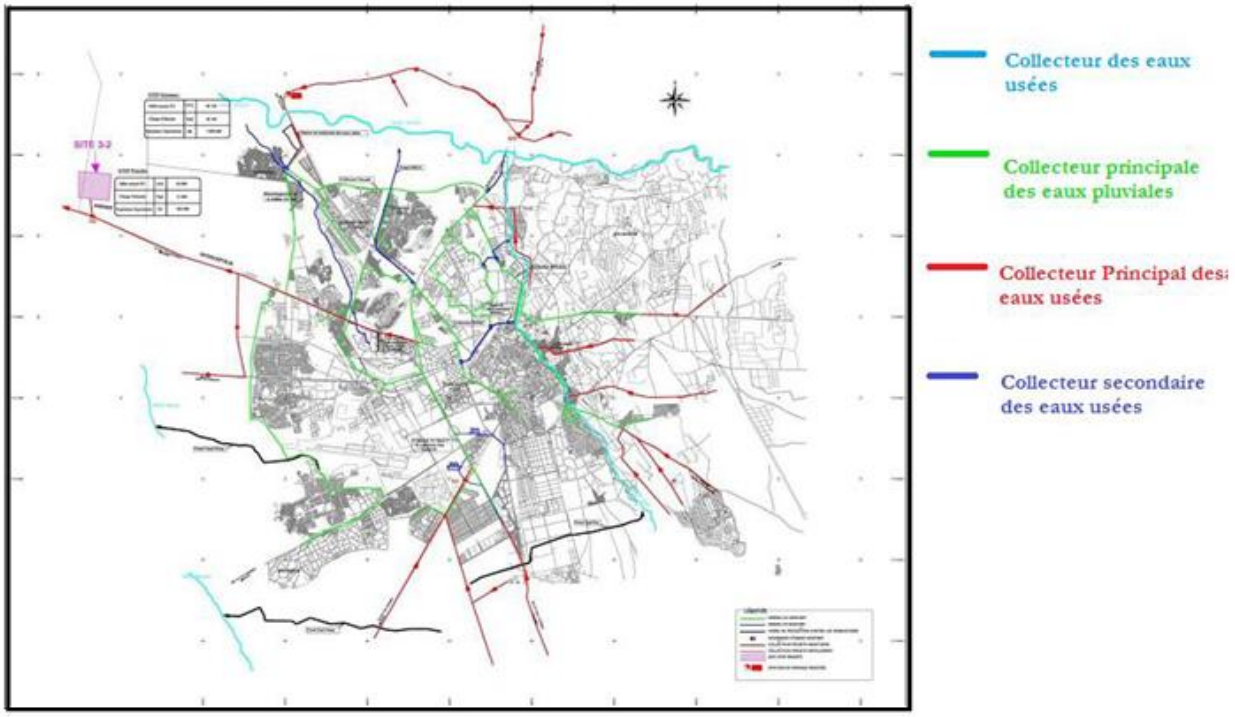


Fig. 3 : Plan du réseau d'assainissement à Marrakech (RADEEMA, 2010 *In* : Fathi, 2010).

La ville de Marrakech connait donc des déversements d'eaux usées brutes dans son milieu naturel, particulièrement dans les champs d'épandages, la palmeraie et les oueds. Cette situation présente de véritables menaces pour l'environnement de la ville et pour ses habitants qui sont de plus en plus exposés directement ou indirectement aux risques de maladies hydriques.

Tab. 1 : Évolution de la population, sa consommation en eau potable, du taux de raccordement au réseau d'assainissement ainsi que le débit moyen des eaux usées de la ville de Marrakech jusqu'à l'horizon 2030 (RADEEMA, 2011).

	2006	**2010**	**2015**	**2020**	**2030**
Population(HAB)	872.290	916.780	1.044.129	1.135.949	1.318.315
Consommations (m^3/an)	35.287.470	37.451.058	49.353.356	56.056.810	66.480.524
Taux de raccordement au réseau d'assainissement (%)	89	95	95	98	98
Débit moyen total des eaux usées (m3/j)	73.142	82.815	109.186	127.932	151.721

En effet, en l'absence d'un processus d'épuration des eaux usées de la ville de Marrakech, les effluents dont le débit moyen est d'environ 118 000 m^3/j, sont collectés et déversés en majorité à l'état brut. Cette situation se traduit par la pollution du milieu naturel notamment la nappe souterraine avec toutes les retombées néfastes sur le plan sanitaire et environnemental.

C'est ainsi que la RADEEMA, pour trouver une solution à ce problème, a pensé au projet de la station d'épuration des eaux usées(STEP) visant à traiter la totalité des eaux usées de Marrakech et qui, outre de la préservation du milieu écologique, aura d'autres avantages à savoir garantir un volume d'eau épurée de 30 Mm^3/an pouvant servir dans l'irrigation des cultures non maraichère (les 13 golfs de la ville en l'occurrence).

3. Présentation et description de la station d'épuration et de réutilisation des eaux usées (STEP) de Marrakech

La station de traitement des eaux usées de Marrakech a été réalisée en octobre 2008 (RADEEMA, 2011) en collaboration avec le ministère d'eau et d'environnement. Elle est appuyée sur une technologie innovante, ce qui représente une deuxième mondiale. Elle a pour but de collecter les eaux usées, puis de les épurer par traitement, avant de pouvoir les rejeter dans le milieu naturel sans risquer de polluer l'environnement.

Photo 1 : Vue générale de la STEP de Marrakech (RADEEMA, 2011).

Cette station fait partie des composantes de la première tranche des travaux d'assainissement liquide. Cette première phase dont la mise en exploitation a démarré fin 2008, consiste en un traitement primaire des eaux usées de la ville de Marrakech, soit 100 milles m^3/jour.

Ensuite la réalisation de la deuxième phase de la station d'épuration des eaux usées constitue la pièce maîtresse du projet de réutilisation des eaux usées. Elle consiste en l'extension de la filière de traitement selon le procédé dit des Boues activées pour atteindre le niveau d'épuration des eaux usées requis par les normes internationales d'irrigation des espaces verts.

- **Objectifs de la mise en place de la STEP de Marrakech**
    - Protection de l'Environnement et préservation des ressources en eau.
    - Mobilisation d'une ressource renouvelable de 33 Millions m^3.
    - Accompagnement du développement urbain et touristique.
    - Valorisation de biogaz et réduction de 60000 $TeqCO_2$/an.

- **Situation de la STEP**

La station d'épuration est située au nord de la ville de Marrakech entre Tamansourt et Marrakech, sur la route d'El Jadida et de Safi.

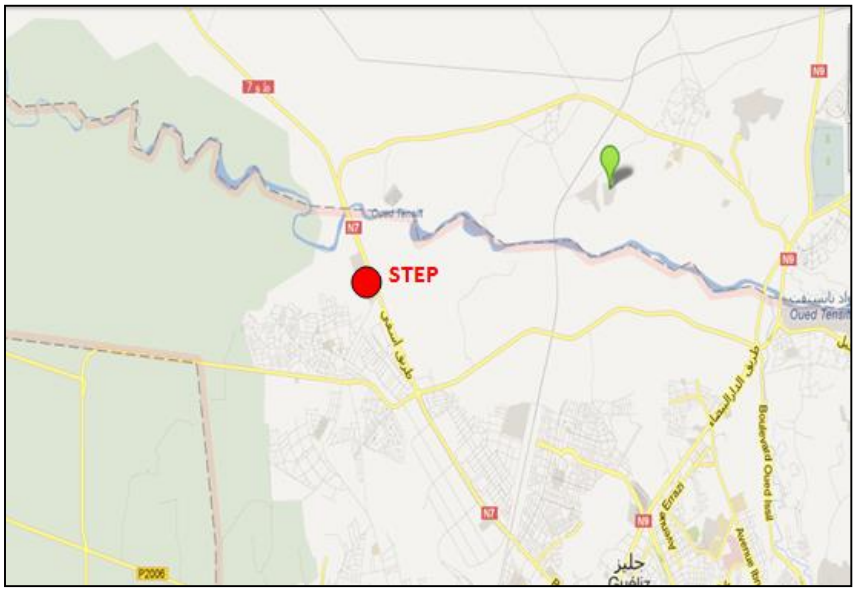


Fig. 4 : Situation géographique de la STEP de Marrakech (Google Maps)

Les limites de cette station sont :

- La rive gauche de l'oued Tensift au Nord
- La digue formée par la route de Safi à la traversée de l'oued Tensift à l'Est
- La route des ferrailleurs et le douar Azib layadi au Sud

La station présente une superficie totale d'environ 17 ha. Le choix du site est motivé par, d'une part, sa côte la plus basse qui permet la collecte et le transport gravitaire des eaux usées, et d'autre part, par sa situation très proche de la décharge contrôlée et aménagée pour l'évacuation

des sous produits du traitement, à savoir, les boues déshydratées, le sable et les refus des grilles (ces deux derniers sont comparables aux ordures ménagères).

- **Nature des eaux usées entrant à la STEP de Marrakech**

La STEP de Marrakech reçoit différents types d'effluents cités comme suit :

- Eaux usées domestiques
- Eaux usées industrielles
- Eaux pluviales

L'ensemble des effluents est collecté par un réseau unitaire. Toutefois, l'absence d'une maitrise parfaite des rejets industriels et le manque d'un traitement spécifique de ces rejets avant leur entrée dans le réseau d'assainissement risque de perturber le fonctionnement de la station, en particulier dans sa 2ème phase comportant le traitement biologique.

- **Caractéristiques du débit et des charges à traiter**

Lors de la conception de la STEP de Marrakech, les débits ainsi que les charges polluantes ont été estimés comme le montrent les tableaux suivants.

Tab. 2 : Caractéristiques du débit à traiter entrant à la STEP de Marrakech (RADEEMA, 2011).

Débit maximal	1050 l/s soit 90720 m^3/j
Débit maximal en temps sec	118000 m^3/j
Débit de pointe horaire	7704 m^3/j
Débit accepté en temps de pluies	9828 m^3/h

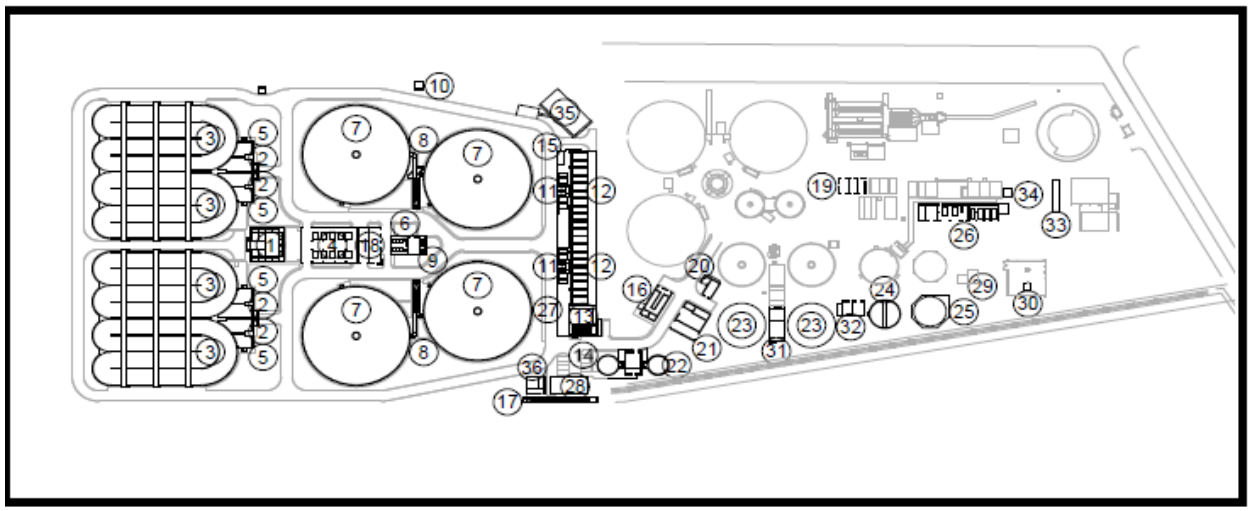
Tab. 3 : Charges polluantes estimées en entrée de la STEP de Marrakech (RADDEMA, 2011).

équivalent/habitant	1. 300 000
MES (t/j)	58
DBO_5 (t/j)	53
DCO (t/j)	144
NTK (t/j)	11
PT (t/j)	7

Dans la station, on distingue trois principales files à savoir :

- Filière eau : se déroule en quatre étapes : prétraitement, traitement primaire, secondaire et tertiaire.
- Filière boue : constituée de trois types de boues : primaire, secondaire et mixte (mélange entre boue primaire et boue secondaire).

- Filière biogaz : consiste généralement à produire des gazes comme le CH_4 et le CO_2 par la fermentation anaérobique de la boue mixte.



N° DE ZONE

1. Répartiteur
2. Sélecteur – Zone de contact
3. Bassin boues activées
4. Local surpresseurs
5. Dégazage
6. Reciculation & extraction des boues
7. Clarificateur
8. Venturi – Canal de comptage
9. Relevage des eaux clarifiée
10. Surverse des eaux clarifiées vers l'oued
11. Bassin de coagulation & floculation
12. Filtration sur sable
13. Canal désinfection UV
14. Canal désinfection chlore
15. Stokage FeCl3 & polymère
16. Local chloration
17. Sortie des eaux filtrées vers pompage
18. Sous station électrique SS2
19. Sous station électrique SS1
20. Désodorisation biologique
21. Désodorisation physico-chimique
22. Flottateurs
23. Digesteur
24. Stockage des boues digérées
25. Gazomètre
26. Déshydratation des boues
27. Poste eau industrielle
28. Atelier magasin
29. Extension désulfurisation
30. Torchère
31. Bâtiment digesteurs
32. Chaudière + pompes boues
33. Pont peseur
34. Fosse eaux de retour (boues)
35. Locaux sociaux
36. Stockage eau incendie & eau potable

Fig. 5 : Plan général de la STEP de Marrakech (WATERLEAU, 2011).

3.1. Filière eau

La filière eau représente les différentes étapes de traitement des eaux usées depuis leur entrée à STEP jusqu'à leur sortie. On distingue : le prétraitement, le traitement primaire, le traitement secondaire et la traitement tertiaire.

3.1.1. Prétraitement

Afin de protéger les équipements mécaniques, la plupart des stations d'épuration sont équipés avec des prétraitements physiques. On distingue trois phases : le dégrillage, le dessablage et le déshuilage.

- **Dégrillage**

Le dégrillage constitue la première étape de traitement des eaux usées, qui permet d'éliminer toutes sortes de composés secondaires de grande taille susceptible de provoquer des bouchages dans les différentes unités de l'installation. Ces gros objets, charriées par l'eau brute, sont piégés au niveau d'une grille dont l'inter grille varie en ordre décroissant en commençant par 20 cm, puis 8cm et une dernière de 1cm.

On distingue l'existence de trois grilles utilisées au niveau de cette étape du traitement.

Tab. 4 : Les différents types de grille et leurs caractéristiques (RADEEMA, 2011).

Grille	Intergrille	Fonctionnement	Procédure	Caractéristiques
Première grille	20 cm	Pré-grille	Manuel	-Largeur du canal : 3m -L'angle d'inclinaison : 30° par rapport à la verticale.
Deuxième grille	8cm	Dégrilleur grossier	Automatique	-4 unités dont 1 manuelle -Largeur du canal : 1,5m
Troisième grille	1cm	Dégrilleur fin	Automatique	-4 unités dont 1 manuelle.

(a) (b) (c)

Photo 2 : les dégrilleurs du prétraitement : (a) prégrille, (b) dégrilleur grossier, (c) dégrilleur fin.

Les déchets collectés par le racleur au niveau du dégrilleur fin et grossier sont acheminés vers un vise qui en bougeant, déverse ces déchets dans une benne pour être ensuite transférés vers la décharge.

Photo 3 : le vise déversant les déchets dans la benne.

- **Le dessablage**

C'est la phase qui permet d'extraire des eaux usées tout ce qui est sable ou gravier, qui sont des composés à base de silice pouvant provoquer l'érosion des pompes, des tuyaux et des vannes, et aussi de perturber les stades de traitement en aval, d'où la nécessite d'une sédimentation gravitaire de ces grains.

Tab. 5 : Caractéristiques de l'ouvrage de dessablage/déshuilage (RADEEMA, 2011).

Nombre d'unités	2 unités doubles
Nombre de ponts	1 pont par unité double
Surface utile	200 m^2
Volume unitaire	600m^3

Le brassage énergétique de l'eau permet d'éliminer les particules fines tels que les sables qui vont être ensuite requis par 2 ponts racleurs de surface et suceurs de fond, puis ils seront essorés et séchés avant leur évacuation à la décharge.

L'eau brassée est absorbée pendant 15 secondes puis emmenée vers le laveur.

- **Le déshuilage**

Le déshuilage s'effectue au même temps que le dessablage, ces deux opérations se combinent dans un dessaleur aéré. Il permet l'extraction des huiles et des graisses qui sont difficilement biodégradables. A cause de leur densité inférieure à celle de l'eau, ces huiles et graisses seront flottés à la surface des eaux.

Le principe consiste à aérer les eaux usées afin que les bulles d'air coagulent avec les particules de l'huile et de la graisse pour les faire flotter à la surface, d'où vient le rôle du racleur qui permet de pousser la graisse vers les trémies où elle sera aspirée par une pompe qui la déverse à son tour dans la bâche à graisse.

Photo 4 : l'ouvrage du dessablage/déshuilage et le pont racleur.

Il est important de limiter au maximum la quantité de graisse dans les ouvrages en aval pour éviter par exemple un encrassement des ouvrages, notamment des canalisations. Leur élimination est essentielle également pour limiter les problèmes de rejets de particules graisseuses, les difficultés de décantation ou les perturbations des échanges gazeux.

Une fois le prétraitement est achevé, les eaux prennent chemin vers le traitement primaire.

3.1.2. Traitement primaire

Dans l'épuration des eaux usées, le traitement primaire est une simple décantation permettant d'éliminer la partie majeure des matières en suspension provoquant la trouble des eaux usées. Le principe consiste à décanter les grandes particules par effet de gravité au fond du décanteur, ce dernier dispose d'une forme conique favorisant la sédimentation. La masse cumulée forme au fond un lit de boue appelé boue primaire.

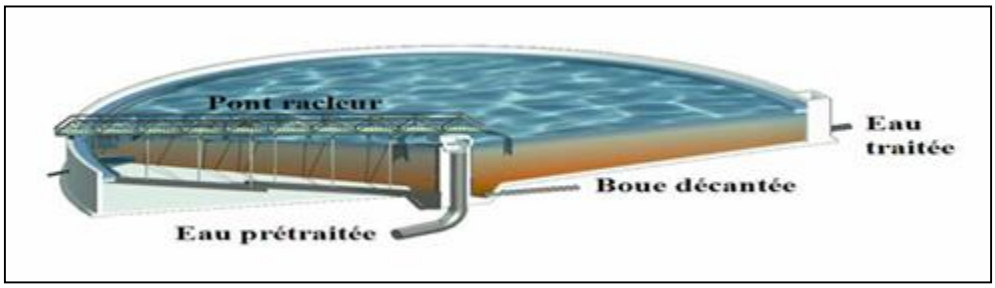


Fig. 6 : Schéma d'un décanteur primaire (El horre, 2009).

L'opération s'effectue au niveau de trois décanteurs de même dimension et donc accueillant chacun la même quantité d'eau à l'aide d'un répartiteur. Ce dernier reçoit les eaux entrées au niveau de sa partie aval. Chaque décanteur est équipé d'un pont racleur animé d'un

mouvement de va et vient, disposé transversalement, et comportant les dispositifs de raclage des boues et des écumes de surface ainsi que la graisse utile pour l'alimentation du digesteur.

La boue primaire est ensuite récupérée par pompage pour être destinée vers l'épaississeur, puisqu'elle dispose d'une forte concentration.

Les eaux récupérées sont ensuite acheminées vers le traitement secondaire pour accomplir leur épuration.

3.1.3. Traitement secondaire

Le traitement secondaire se fait par voie biologique, son intérêt est d'éliminer les composés organiques tels que les sucres, protéines par la nitrification et la dénitrification (détaillées dans la partie II). Il fait appel à une grande variété de micro-organismes, principalement des bactéries. Ces micro-organismes convertissent la matière organique biodégradable contenue dans l'eau usée en produits simples et en biomasse additionnelle.

Ce traitement biologique s'effectue au niveau du bassin d'aération et s'accomplit au niveau du clarificateur.

- **Bassin d'aération (bassin de traitement biologique)**

A cette étape s'effectue la dégradation de la matière organique par moyen de microorganismes dans des conditions aérobies provoquant ainsi une homogénéité de façon à assurer un contact entre le milieu vivant, les éléments polluants, l'eau et l'oxygène.

La station dispose de quatre bassins d'aération dont la géométrie est serpentaire et qui est la plus appropriée à la nature essentiellement domestique des eaux de Marrakech.

L'eau est répartie d'une façon égale sur les quatre bassins grâce à un répartiteur secondaire. Ce dernier est divisé en deux chambres une d'entrée et l'autre de sortie. Celle de l'entrée est divisée à son tour en quatre parties chacune alimente un bassin. Le Principe de fonctionnement du bassin d'aération se base sur le pompage de l'air grâce à un réseau d'aération fixé au fond du bassin permettant ainsi le maintien de l'équilibre de la biomasse et favorisant aussi la rencontre entre les organismes et les particules.

Au fur et à mesure de la dégradation de la matière organique, il y aura une stabilisation de la boue active afin que le gaz piégé (CO_2, O_2, N_2) entre les particules puisse s'échapper. Cette étape permet d'éliminer une grande partie du carbone et d'azote constituant la partie majeure de la matière organique amenée à la STEP.

- **Clarificateur**

Le clarificateur constitue aussi une phase de décantation secondaire où s'effectue la séparation des eaux épurées de la boue active via la deuxième chambre du répartiteur. Avant que les eaux épurées provenant du bassin d'aération soient emmenées vers les clarificateurs par gravité, elles sont bien mélangées au niveau d'un sélecteur par agitation. Ce décanteur est composé de quatre clarificateurs recevant chacun la même quantité d'eau.

Photo 5 : Clarificateur de la STEP de Marrakech.

L'eau clarifiée se déborde au niveau des gollotes (photo 6), et passe dans le canal venturi pour en mesurer le débit par un débitmètre, ce dernier va ensuite l'enregistrer et faire la totalisation de débit des pompes de recirculation.

Photo 6 : débordement des eaux clarifiées au niveau des gollotes.

Les boues décantées sont siphonnées par une pompe à vide dans les canaux au dessous d'un pont comportant un racleur de surface pour la récupération des flottants, qui sont évacués vers la fosse à flottants recevant également ceux du dégazage.

Tab. 6 : Caractéristiques des ouvrages intervenant dans le traitement secondaire.

Nom de l'ouvrage	Nombre d'ouvrage	Caractéristique:
bassin d'aération	4	Volume unitaire: 16250 m Volume air surpressé: 70000Nm/h
Clarificateur	4	Volume total:10000 m Surface unitaire:2500m Diamétre: 57m

Enfin de cette étape, une grande partie de cette boue environ 80% va être recirculée vers les bassins d'aération tandis que l'autre partie va être reçue par le flottateur.

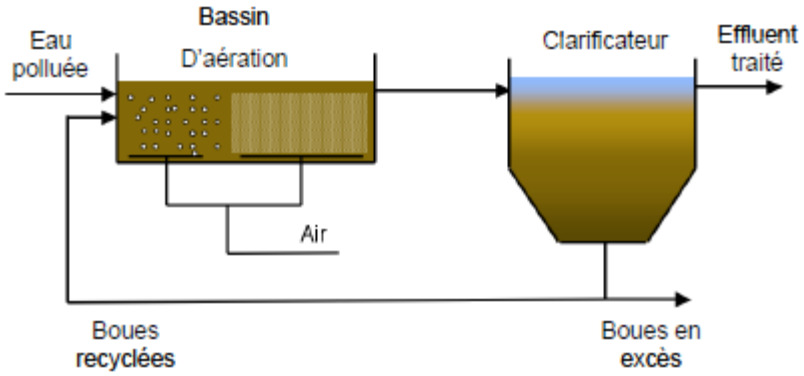


Fig.7 : Schéma montrant la recirculation des boues secondaire vers le bassin d'aération (Fragkoulis, 2008).

Cette eau épurée va soit être déversée dans l'Oued Tensift, soit acheminée vers le traitement tertiaire afin d'être réutilisée en fonction de la demande.

3.1.4. Traitement tertiaire

L'objectif du traitement tertiaire est d'obtenir un effluent avec un taux de MES < 5 mg/l (si possible < 1mg/l), de diminuer la turbidité de l'eau traitée par coagulation, floculation et filtration à sable avant l'étape de désinfection et d'abattre les microorganismes pour que l'eau soit à la fin prête à être réutilisée comme eau d'irrigation pour les terrains de golf de Marrakech.

- **Traitement par coagulation**

Les eaux provenant des clarificateurs sont mélangées avec le chlorure ferrique ($FeCl_3$) au niveau de deux bassins de coagulation, ce brassage est assuré par des agitateurs qui fonctionnent sans arrêt. La coagulation tend à donner un volume supplémentaire aux particules à faible taux

de sédimentation, et particulièrement l'augmentation de la masse moléculaire de la matière colloïdale.

Chaque bassin de coagulation est équipé de deux vannes automatiques pour l'alimentation des bassins de floculation.

- **Traitement par floculation**

S'effectue par l'ajout de polymère au niveau des bassins de coagulation afin de favoriser le grossissement des flocons et améliorer l'abattement des MES pour faciliter la filtration des eaux via le sable. Le dosage du polymère s'effectue par des pompes doseuses.

- **Filtration à sable**

L'ouvrage est formé par quatre lignes comportant chacune cinq filtres en somme 20 filtres à la fin.

Le filtre à sable permet d'éliminer les particules en suspension dans l'eau. Ces particules peuvent être de différents types: flocons chimiques d'hydroxydes de métal, flocons de traitements biologiques, fibres, particules minérales.

Après un certain temps (quelques heures à quelques jours en fonction du taux de pollution des eaux), les sables sont colmatés par une couche de matière cumulée d'où la nécessitée de l'étape de lavage des circuits à sable qui se déroule en deux phases :

- Injection d'air et d'eau simultanément qui permet une vidange jusqu'au niveau du matériau filtrant et décolmatage. Cela permet de ne pas mettre en expansion le matériau filtrant et ainsi de ne pas aboutir à un classement granulométrique, concentrant les fines du milieu granulaire en surface.
- Rinçage à l'eau seule avec une vitesse de 20 à 30 m/h pendant 5 à 10 minutes.

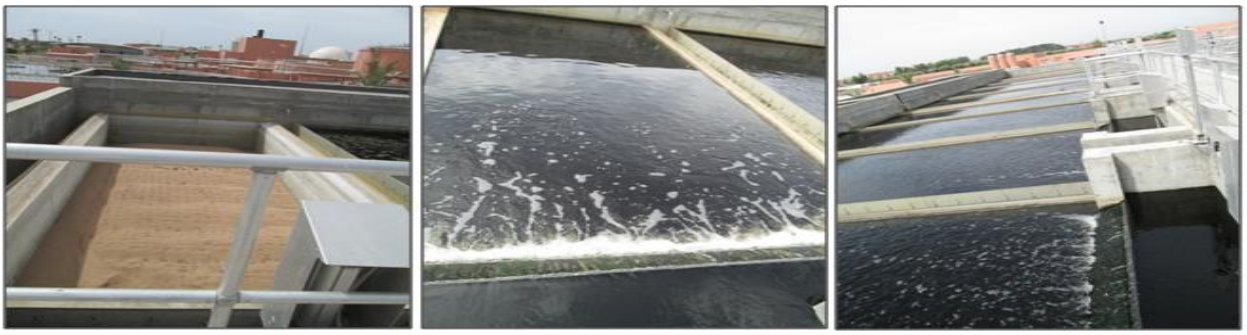


Photo 7 : Les filtres à sables utilisés dans le traitement tertiaire.

- **Désinfection UV**

Après la filtration sur sable, l'effluent clair s'écoule à travers deux voies de désinfection UV parallèles. Après la désinfection, l'eau tombe dans un bassin intermédiaire, d'où l'eau de service est extraite pour être utilisée dans la station d'épuration des eaux usées.

- **Chloration**

La chloration vient après la désinfection UV. Le bâtiment de stockage de chlore contient dix réservoirs fixes de chlore et six citernes de réserve. Grace à un système de dosage, le chlore est ajouté à l'eau, afin d'effectuer une désinfection résiduelle. Trois chlorateurs de 25 kg/h sont prévus, qui injecte l'eau de javel dans le même chenal. Deux files de traitement indépendantes donnent également plus de flexibilité, lorsque qu'il faut travailler à petit débit. Un système de neutralisation des fuites de chlore est placé à l'extérieur du local de stockage.

Tab. 7 : Niveaux de traitement exigés par la RADEEMA après achèvement des travaux de la deuxième phase (RADEEMA, 2008).

Paramètres	A l'entrée de la station (mg/l)	A la sortie du traitement primaire (mg/l)	A la sortie du traitement biologique (mg/l)	A la sortie du traitement tertiaire (mg/l)
MES	584	200	30	5
DBO_5	640	430	30	10
NTK (mg/l)	120	120	5	5
PT (mg/l)	22	22	20	10
Germes fécaux	10^7 U/l	10^7 U/l	10^6 U/l	$2 .10^3$ U/l

Après le traitement tertiaire, l'eau est prête pour être destinée à l'irrigation. L'eau traitée passe par un canal Venturi et s'écoule vers la lagune où elle est stockée pour être ensuite pompée vers les golfs lors de la demande.

3.1.5. Réutilisation des eaux traitées

La STEP, par son projet de réutilisation des eaux traitées, permet d'assurer une nouvelle ressource renouvelable en eau évaluée à 33 millions m^3 an pour l'irrigation des espaces verts notamment les golfs qui sont actuellement de nombre de six et le nombre est susceptible

d'augmenter jusqu'à 25 ultérieurement, ainsi que l'irrigation de la palmeraie qui est un patrimoine important de la ville ocre, en plus de certains projets touristiques ce qui permet la recharge éventuelle de la nappe phréatique (RADEEMA, 2008).

3.2. Filière boue

La STEP de Marrakech produit trois types de boues : boue primaire, boue secondaire et boue mixte dont chacune possède une méthode de traitement distincte en fonction de leurs caractéristiques.

3.2.1. Traitement de la boue primaire

Ce sont les dépôts récupérés par la décantation des eaux usées dans les décanteurs. Elles présentent des concentrations élevées en matières minérales en tant que terre, mais aussi en matière organique pouvant évoluer. Donc cette boue est envoyée vers l'épaississeur, ce dernier a un rôle d'épaissir les boues dont l'évacuation se fait par le fond au moyen de pompage en passant par un tamis type strainpress, tandis que le liquide surnageant est renvoyé vers le poste toute eaux.

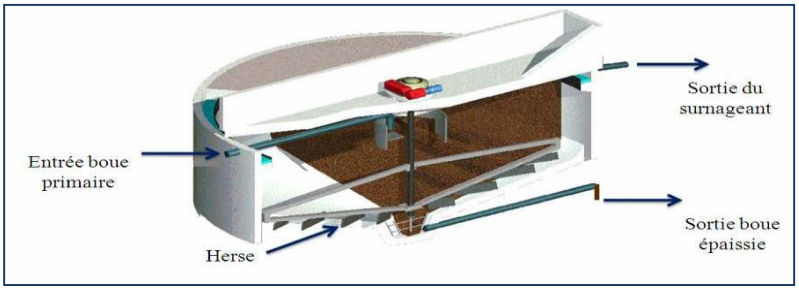


Fig. 8 : schéma d'un épaississeur gravitaire (El horre, 2009).

L'ouvrage se présente sous la forme d'un cylindre vertical à fond tronconique au radier légèrement conique. Les épaississeurs sont alimentées par le haut et les boues sont reprises à l'herse et envoyées par pompage vers les digesteurs.

3.2.2. Traitement de la boue secondaire

La boue secondaire provient des clarificateurs. 70 à 80% de cette boue est acheminée vers les bassins d'aération tandis que le reste est envoyé vers les deux flottateurs. Cet ouvrage favorise la flottation des boues, vue la densité relativement faible de ces dernières, par ajout d'eau pressurisée et de polymères.

3.2.3. Traitement de la boue mixte

La boue mixte résulte du mélange entre la boue primaire et la boue secondaire. Cette boue va subir un traitement de stabilisation biologique au niveau des digesteurs.

- **Digestion anaérobique**

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé naturel de transformation de la matière organique en énergie par des bactéries en l'absence d'oxygène. À l'intérieur des méthaniseurs, les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, elles produisent du biogaz composé majoritairement de méthane(CH_4) et dioxyde de carbone (CO_2), tout en réduisant le taux de matières organiques de nombreux déchets ou sous-produits biodégradables. Le résidu de la digestion est stable, désodorisé, débarrassé en majeure partie des germes pathogènes.

Photo 8 : Digesteurs de la STEP de Marrakech.

Les 2/3 du digesteur sont remplis par la boue alors que le reste est attribué au biogaz.
Il y a ainsi production de biogaz selon les réactions :

$$CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$$
$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$$

Afin de maintenir la température de 37°C pour avoir un milieu favorable aux microorganismes, les boues à l'intérieur de digesteurs doivent être chauffées, le biogaz peut être utilisé à cette fin. Une chaufferie avec chaudière et dispositif de chauffage du digesteur complètent la digestion.

- **Stockage**

La boue digérée au niveau du digesteur est transférée vers le stockeur pour être stockée. La boue est agitée pour préserver l'homogénéité du stockeur qui est placé en amont de la déshydratation. Le volume de la bâche est de 1800 m^3, correspondant à 2 jours de stockage et permettant de gérer le fonctionnement de la déshydratation.

- **Déshydratation des boues**

La déshydratation a pour but la production de pates de boues non liquides. Cela signifie qu'une partie de l'eau doit être retirée de la boue. La procédure adaptée dans la STEP est la déshydratation par filtration sous pression guidée. La déshydratation des boues est indispensable afin de diminuer le volume de la boue à rejeter et qui est de l'ordre 160 tonnes par jour. Donc en diminuant la siccité des boues, on minimise les frais de transport vers la décharge. Un projet prêt à être réalisé consiste à déposer la boue dans une fosse à coté de la station et la brûler afin d'avoir un résidu sec avec un volume largement réduit.

Cette méthode est basée sur le principe de la filtration sur gâteau sous pression guidée grâce à un équipement composé par des bandes filtre-presse et la chambre du filtre presse.

Photo 9 : Strainpress permettant la déshydratation des boues mixtes.

3.3. Filière biogaz

Cette filière s'intéresse à la formation du biogaz, à son traitement, à son stockage ainsi que sa valorisation en l'utilisant dans la production de l'électricité.

3.3.1. Production du biogaz

Le biogaz de la station d'épuration est récupéré au niveau des digesteurs. Il est composé principalement de méthane CH_4 et de dioxyde de carbone CO_2. Ce gaz contient également de l'hydrogène sulfuré H_2S, nuisible en général pour les moteurs à gaz, et il est saturé en eau. Il est produit par un processus de fermentation anaérobie des matières organiques.

3.3.2. Traitement du biogaz

Après la production du biogaz au niveau des digesteurs, il subit un traitement afin d'éliminer les sulfures, cette étape est appelée désulfurisation du biogaz.

- **Désulfurisation du biogaz**

Le sulfure d'hydrogène est typiquement le contaminant qui pose le plus de problèmes du fait de sa toxicité et de son caractère corrosif pour la plupart des équipements. De plus, la combustion du H_2S émet du dioxyde de soufre SO_2, nocif pour l'environnement car il constitue un puissant gaz à effet de serre. La séparation de l'H_2S le plus rapidement possible est donc recommandée pour protéger les équipements et améliorer la sécurité. Plusieurs procédés sont envisageables pour réduire cette concentration : désulfuration biologique par des bactéries du genre Thiobacillius et par biogaz clean, adsorption sur charbon actif.

3.3.3. Stockage : gazomètre

Les deux gazomètres ont pour rôle le stockage du biogaz afin d'être valorisé en produisant de l'énergie.

Tab. 8 : Caractéristiques du gazomètre

Nombre de gazomètre	**2**
Volume unitaire	**2000 m^3**
Production du biogaz	**20000 Nm/h**
Autonomie	**5h**

(a)

(b)

Photo 10 : Les ouvrages utilisés dans le traitement et le stockage du biogaz : (a) désulfure ; (b) gazomètre.

3.3.4. Torchère et soupape

- La soupape: consiste en une étape de sécurité importante qui permet au biogaz de se dégager hors du système s'il y a un excès de gaz peu important dans les gazomètres.
- La torchère : sert à brûler le biogaz en cas d'excès pour en limiter l'impact sur l'effet de serre en ne rejetant en théorie plus que du CO_2 et de la vapeur qui sont moins impactants sur l'effet de serre.

Photo 11 : Torchère de la STEP de Marrakech.

3.3.5. Valorisation du biogaz

Le biogaz est une source d'énergie renouvelable, toujours disponible. Elle constitue donc une alternative à la consommation des énergies fossiles. L'ensemble des matières organiques produit naturellement, lors de sa décomposition, d'énormes quantités de méthane et de gaz carbonique selon la réaction :

$$CH_4 + 3/2\ O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + \text{énergie}$$

Brûler le biogaz issu de la méthanisation réduit de 20 fois la pollution des gaz issus de la fermentation. De plus, la méthanisation des boues d'épuration, permet d'éliminer les odeurs liées à leur traitement habituel.

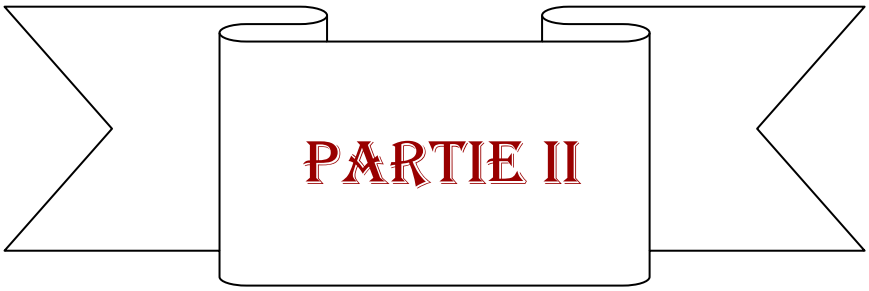
Au niveau local, la méthanisation est synonyme d'une plus grande autonomie énergétique pour la STEP puisqu'elle couvre presque 50% de ses besoins en électricité ainsi qu'en chaleur grâce à une cogénération équipée par quatre moteurs dont la puissance unitaire est de l'ordre de 831 KVA. L'électricité produite sera donc directement utilisée sur le site et la chaleur récupérée servira, soit pour le réchauffage de digesteurs, soit pour les besoins du bâtiment d'exploitation.

Photo 12 : La cogénération utilisée dans la production de l'électricité à partir du biogaz.

3.4. Désodorisation

Les nuisances dues aux odeurs sont multiples. L'impact le plus cité est la gêne olfactive. La principale source d'odeur émise dans les réseaux d'assainissement et dans les stations d'épuration est le sulfure d'hydrogène H_2S, dont l'odeur caractéristique d'œuf pourri est perceptible même à faible concentration. Ces odeurs conduisent à la dégradation des conditions de travail, de la sécurité du personnel et au mécontentement des riverains (Derbrieu, 2004).

Pour faire face à ce phénomène, la STEP possède une désodorisation biologique ainsi que physicochimique permettant d'éliminer les fortes concentrations de H_2S.



Traitement biologique des eaux usées par boues activées au niveau du bassin d'aération

1. Généralités sur les boues activées

Le procédé à boues activées a été découvert en 1914 à Manchester et repose sur la constatation suivante: une eau d'égout aérée permet le développement rapide d'une flore bactérienne capable de dégrader des matières organiques polluantes. Dans les conditions idéales d'aération, les micro-organismes d'une eau usée se développent et s'agglomèrent en flocs. Au repos, ces derniers se séparent très bien de la phase liquide par décantation.

Le principe du procédé à boues activées consiste donc à provoquer le développement d'un floc bactérien dans un bassin alimenté en eau usée à traiter (bassin d'aération). Afin d'éviter la décantation des flocs dans ce bassin, un brassage vigoureux est nécessaire. La prolifération des micro-organismes nécessite aussi une oxygénation suffisante (Dhaouadi, 2008).

2. Microorganismes et microfaune des boues activées

Les boues sont essentiellement composées de bactéries vivantes et mortes, aérobies facultatives de petite taille allant du micromètre au millimètre. Les boues activées forment donc un écosystème très complexe où cohabitent différentes souches bactériennes et une microfaune.

Les bactéries trouvées dans les boues peuvent être :

-de type unicellulaire de forme sphérique ou cylindrique (0.5 et 5 μm).

-de type pluricellulaire dont la taille est souvent comprise entre 10 et 500 μm.

Un classement en fonction de la source carbonée est possible :

- Les bactéries utilisant à la fois la matière organique comme source de carbone et comme source énergétique pour le métabolisme appelées hétérotrophes.
- Les germes autotrophes utilisant le carbone des bicarbonates et du CO_2 comme source de carbone.

  Dans les procèdes des boues activées, ces deux populations cohabitent alors que leurs métabolismes sont très différents (Pandolfi, 2006).

L'observation rapide et simple par microscopie optique permet d'identifier les protozoaires, métazoaires et bactéries filamenteuses de morphologies particulières comme par exemple *Nocardia sp*. Les bactéries filamenteuses des boues activées, recouvrent une grande diversité de genres bactériens qu'il est nécessaire de pouvoir distinguer.

2.1. Flocons de boues activées

La boue activée est un mélange d'une grande variété de bactéries et autres micro-organismes (protozoaires, etc.) vivant sous des conditions aérobies.

Les bactéries (*Pseudomonas, Arthrobacter, Escherichia, Flavobacterium*, etc.) sont le genre de micro- organismes les plus présents dans un système aux boues activées. Elles peuvent être libres, sous forme de cellules non liées ou organisées en flocons de boue. L'aptitude à la formation de flocons est une propriété très importante en vue de garantir une bonne séparation entre la boue et l'eau claire obtenue (RADEEMA, 2011).

Suivant les conditions exactes de procédé, il peut y avoir d'importantes différences de morphologie, structure et taille des flocons. 3 classes peuvent être distinguées :

- Petits flocons : diamètre < 25 micromètres
- Flocons de taille moyenne : diamètre = 25 - 250 micromètres
- Gros flocons : diamètre > 250 micromètres

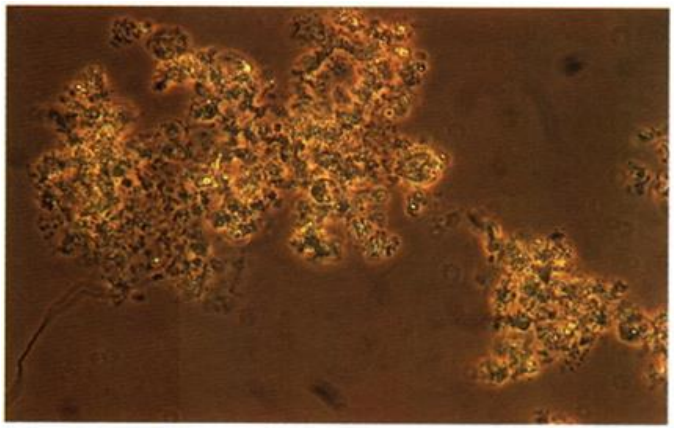


Photo 13 : structure microscopique des flocons des boues activées (500X) (Pujol, 1990).

2.2. Microfaune

Elle représente une quantité de cellules de l'ordre de 10^5 à 10^7 individus (Calmer et al *In :* Pandolfi, 2006) par litre de boues activées. Cette microfaune joue un rôle de prédateur des bactéries isolées et des bactéries mortes et participe à la clarification des effluents. Selon l'organisation cellulaire des microorganismes, On distingue deux familles principales :

- Les protozoaires
- Les métazoaires

2.2.1. Protozoaires

Ce sont des organismes eucaryotes, unicellulaires, mobiles et de taille pouvant aller de 1 à 500 µm. Ils se nourrissent essentiellement de bactéries (Gerardi et al *In :* Pandolfi 2006) et de molécules organiques dissoutes. Les protozoaires sont en majorité hétérotrophes libres aquatiques. Certains sont symbiotes.

Le rôle principal de ces protozoaires est avant tous la clarification de l'effluent par prédation des bactéries libres. Les protozoaires sont de très bons indicateurs du fonctionnement des stations d'épuration. En effet cette microfaune est très sensible aux modifications environnementales : substrats, oxygène dissous, produits toxiques (Degrémont *In :* Pandolfi, 2006). La prédation peut être effectuée par broutage des bactéries à la surface des flocons par des protozoaires rampants. De plus certains auteurs notent que le rôle bactériophage au niveau des flocons permet de maintenir des populations bactériennes jeunes pouvant assimiler plus facilement la matière organique (Rejsek *In* : Pandolfi, 2006).

2.2.2. Métazoaires

Les métazoaires sont des organismes pluricellulaires dont la taille peut aller de 100 µm à 1mm. Leur organisation cellulaire est plus complexe que celle des microorganismes unicellulaires et leur cycle de croissance est très lent. On les trouve essentiellement dans des installations avec des âges de boues élevés (stations à faible charge ou aération prolongée).

Parmi les principaux métazoaires présents dans les boues activées des stations d'épuration, on retrouve essentiellement deux familles :

- Les nématodes
- Les rotifères

Les nématodes sont présents dans les boues subissant une digestion aérobie. On les trouve dans les flocons (Canler et al *In :* Pandolfi, 2006) et leur rôle de prédateur bactérien leur permet de contribuer au renouvellement de la biomasse épuratrice.

2.3. Bactéries filamenteuses

Les micro-organismes à l'intérieur desquels les cellules restent assemblées après la division cellulaire pour former des structures allongées sont appelés bactéries filamenteuses. La croissance en filament est typique d'une certaine sorte de micro-organismes, principalement

bactéries. Des exemples sont *Microthrix parvicella, Haliscomenobacter hydrossis*, etc. (RADEEMA, 2011).

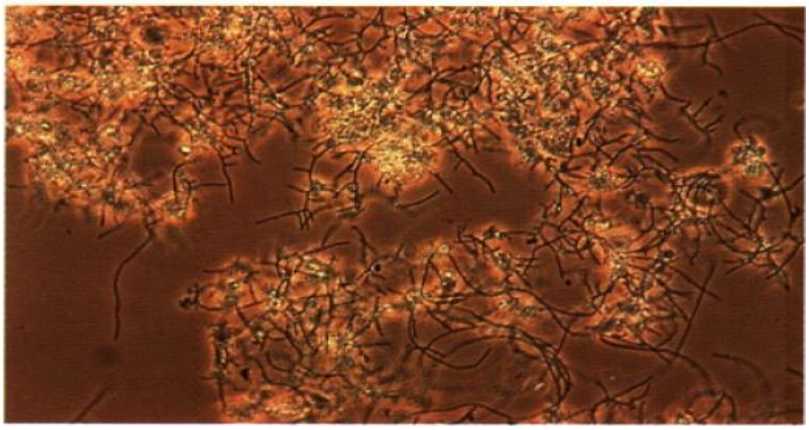


Photo 14 : Structure microscopique des bactéries filamenteuses des boues activées (500X) (Pujol, 1990).

3. Bassin d'aération à boues activées

Le bassin biologique est l'ouvrage le plus important de part sa fonction. On appelle ce bassin : bassin d'aération, bassin à boues activées ou encore bassin d'oxydation. Il assure les traitements des principaux agents polluants en éliminant les éléments organiques comme les graisses, sucres, protéines, etc…et en réduisant la DBO5, la DCO, l'azote et le phosphore.

La dégradation de ces éléments organiques est assurée par des microorganismes (bactéries) qui consomment les matières organiques en présence d'oxygène (méthode aérobie).

On distingue cinq principaux types de bassin d'aération : Bassin à flux piston**,** Bassin à mélange intégral, Bassins à boucle fermée**,** Bassin à cascades, Bassin à alimentation étagée et bassin type carrousel.

3.1. Différents types de bassins d'aération

On distingue cinq principaux types de bassin d'aération : Bassin à flux piston**,** Bassin à mélange intégral, Bassins à boucle fermée**,** Bassin à cascades, Bassin à alimentation étagée et bassin type carrousel.

3.1.1. Bassin à flux piston

L'effluent à traiter et les boues recirculées sont admis en tête du bassin qui est aménagé de façon à constituer un canal de grande longueur. Les concentrations en substrat et les besoins en oxygène de la liqueur de boues activées varient tout au long de son parcours (Louvet, 2007).

De ce fait, la puissance d'aération est normalement dégressive d'amont en aval.

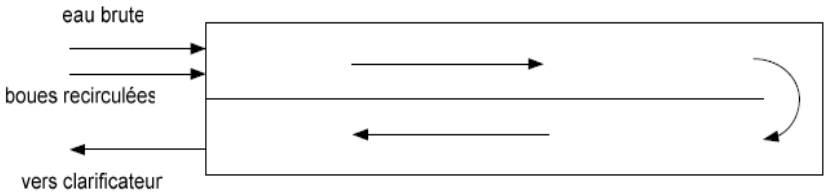


Fig. 9 : principe du bassin d'aération à flux piston (Degrémont *In* : Louvet, 2007)

3.1.2. Bassin à mélange intégral

Le but recherché est d'obtenir un réacteur totalement homogène qui présente en tout point des concentrations identiques en micro-organismes, oxygène dissous et substrat résiduel. L'avantage de ce dispositif est de limiter les surcharges dues aux pointes de pollution journalières par exemple (Louvet, 2007).

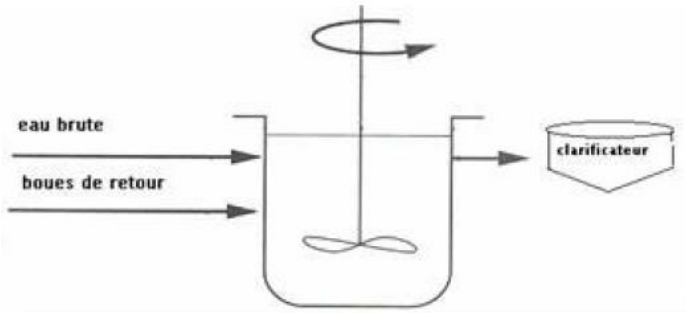


Fig. 10 : Principe du mélange intégral d'un bassin d'aération (Thonart *In* : Louvet, 2007).

3.1.3. Bassins à boucle fermée

Cette technique se rapproche de celle du mélange intégral. Cependant, la longueur de la boucle et la disposition ponctuelle des aérateurs conduisent à des variations de la teneur en oxygène dissous tout au long du bassin. L'eau est mise en mouvement par des mobiles d'agitation. La mise en rotation de l'eau dans les chenaux entraîne une augmentation de la capacité d'oxygénation standard (Thonart *In* : Louvet, 2007). Il est possible d'associer plusieurs bassins à boucle en série. Les chenaux peuvent avoir une forme circulaire. On les appelle chenaux annulaires « vrais » lorsque l'eau, canalisée le long de la paroi extérieure n'a pas accès au centre du bassin, et chenaux annulaires « faux » lorsque l'eau peut occuper pratiquement tout le volume du disque.

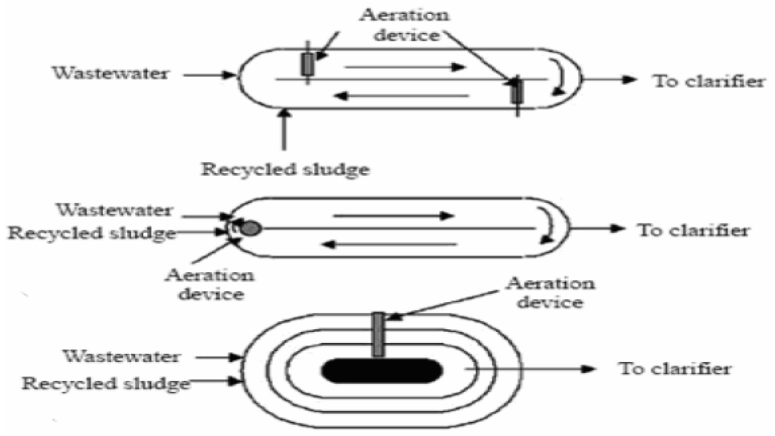


Fig. 11 : Bassins à boucles fermées (Potier *In* : Louvet, 2007).

3.1.4. Bassin à cascades

Ce type de bassin est constitué d'une série de bassins à mélange intégral que la liqueur de boues activées traverse successivement. Il permet de se rapprocher de la cinétique des bassins à flux piston, tout en mettant en œuvre des réacteurs compacts de construction simple.
Il s'adapte très bien aux traitements associant l'élimination de l'ammonium et du phosphore à celle de la pollution carbonée (Louvet, 2007).

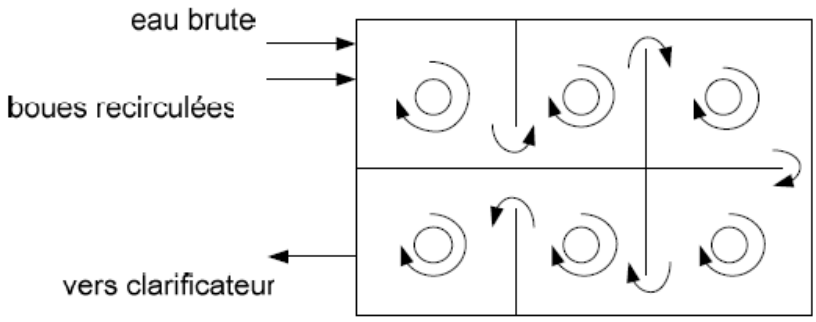


Fig. 13 : Bassin à cascades (Degrémont *In :* Louvet, 2007)

3.1.5. Bassin à alimentation étagée

L'arrivée de l'effluent est organisée de façon étagée dans le bassin d'aération comportant une série de cellules traversées successivement par la liqueur qui avance en zigzag. La boue recirculée est introduite en tête du bassin. Les besoins en oxygène sont ainsi beaucoup mieux répartis que dans un bassin à flux piston (Louvet, 2007).

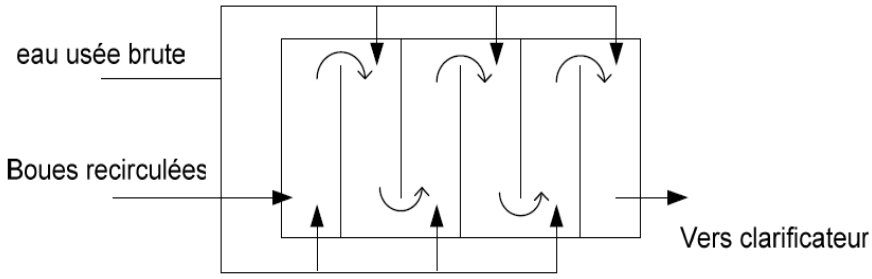


Fig. 14 : Bassin à alimentation étagée (Degrémont *In* : Louvet, 2007).

3.1.6. Bassin d'aération type carrousel (cas d'étude)

Le bassin d'aération type carrousel est l'unité adoptée par la STEP de Marrakech. L'eau à traiter passe par la chambre d'entrée du répartiteur. Ce dernier permet de distribuer ces eaux d'une façon égale sur les quatre bassins biologiques ce qui implique que chacun assure 25% de la charge. Il est destiné au transport de l'influent mélangé à la boue recyclée vers le traitement aérobie. Le débit moyen est de 90.720 m³ par jour (RADEEMA, 2011).

Photo 15 : les bassins d'aération de la STEP de Marrakech (RADEEMA).

Le mélange eau-boue est assuré par un sélecteur anoxique où la croissance des bactéries formant des flocons est stimulée, afin d'améliorer les caractéristiques de décantation et d'épaississement.

Après le sélecteur, l'eau s'écoule dans le réacteur biologique. La circulation est assurée au moyen de 6 propulseurs immergés, afin de donner une vitesse horizontale moyenne de 0,27 m/s. La longueur totale moyenne du carrousel est de 267 m et la largeur est de 9,5 m. Le temps de rétention hydraulique (TRH) est en moyenne de 16 heures. Quatre surpresseurs, chacun avec un débit maximal de 4450 m³ / h, assurent l'aération pour chaque réacteur biologique. Le débit d'air et la pression de l'air sont mesurés dans chaque ligne d'aération. Grâce à un réseau étendu de

diffuseurs de type tubulaire (1152 paires au total) montés sur des raquettes relevables, des bulles fines sont soufflées dans la liqueur mixte (mélange eau/boue) (RADEEMA, 2011).

Des bulles fines permettent une meilleure absorption de l'oxygène par les bactéries. Le niveau d'oxygène dissous est mesuré par deux sondes à oxygène. Le potentiel redox est mesuré par deux sondes redox. Ces mesures d'oxygène, ainsi que les mesures d'oxydoréduction, contrôlent le cycle d'aération.

La liqueur mixte entre dans le dégazeur via un déversoir. Le dégazeur est un ouvrage permettant une élimination des bulles contenues dans le mélange eau/boue. Ces bulles proviennent essentiellement de la formation de gaz au cours de réaction en aérobiose ou anoxie avec notamment la présence d'azote gazeux. Cette élimination évite ainsi la présence d'à coup hydraulique au niveau du clarificateur, qui pourrait réduire son bon fonctionnement.

Le mélange est effectué par un mélangeur. La concentration des matières en suspension, qui est un paramètre processus très important, est mesurée dans cette partie du traitement biologique. Les particules de boues flottantes et les matières grasses qui restent, sont raclées de la couche supérieure et pompées vers une fosse distincte à côté du dégazeur. Des pompes transportent ce liquide vers une fosse de collecte à un débit de 22 m^3 / h (contrôlé par des détecteurs de niveau). (RADEEMA, 2011).

3.2. Types d'aération des bassins biologiques

La qualité d'un système d'aération est évaluée, d'une part, par sa capacité d'oxygénation et d'autre part, par l'énergie nécessaire pour dissoudre un kg d'oxygène. La capacité d'oxygénation est par définition la quantité d'oxygène fournie en une heure à l'eau propre, à teneur en oxygène constante et nulle à 10 °C et à pression atmosphérique (Dhaouadi, 2008).

Les conditions opératoires sont standard et permettent la comparaison des différents systèmes d'aération utilisables en pratique à savoir:

- **les aérateurs de surface** que l'on peut diviser en 3 groupes:
    - aérateurs à axe vertical à faible vitesse, aspirant l'eau par le fond et la rejetant directement à l'horizontale.
    - aérateurs à axe vertical à grande vitesse (1000 à 1800 tr mn-1).
    - aérateurs à axe horizontal permettant l'oxygénation par pulvérisation d'eau dans l'air.

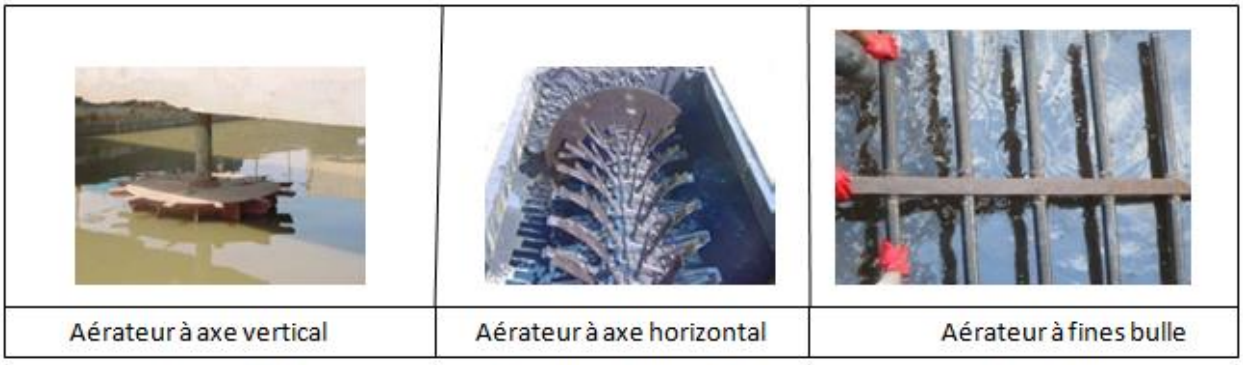


Photo 16 : Différentes types d'aérateurs (Dhaouadi, 2008).

- **les dispositifs d'injection d'air surpressé à fines bulles** (diffuseurs poreux à haut rendement d'oxygénation: 12 %), à moyennes bulles (diffuseurs à clapets) ou à grosses bulles (diffuseurs à larges orifices) à faible rendement d'oxygénation: 5 % (Dhaouadi, 2008). C'est ce type d'aération qui est utilisé dans la STEP de Marrakech, l'aération est associée à un brassage par agitation.

3.3. Brassage

Au niveau des bassins d'aération, le brassage de la liqueur mixte se fait à l'aide d'agitateurs qui sont installés au fond des bassins.

La mise en place d'agitateurs dans les bassins de traitement des stations d'épuration (Boue activée, zone d'anoxie, zone d'anaérobie, et dans certains cas zone de contact, dégazeur…) a principalement comme objectifs :

- de maintenir les flocons biologiques en suspension dans les ouvrages afin d'améliorer le contact boue / effluent, et d'éviter ainsi les dépôts en fond de bassin.

- de créer un mouvement hydraulique (chenaux, bassin circulaire) qui permet de favoriser le transfert en oxygène entre la biomasse et le liquide interstitiel (*https://gisbiostep.cemagref.fr*).

4. Réactions permettant l'épuration des eaux usées par boues activées

L'eau entrant dans le bassin va subir un traitement permettant l'élimination de la pollution organique, celle-ci est marquée essentiellement par la présence de l'azote puisque le phosphore entre généralement en faibles quantités et le carbone s'oxyde spontanément. Ce traitement consistera donc à la nitrification et la dénitrification afin d'éliminer cet azote.

Le bassin biologique est composé de trois chambres dont la première et la dernière sont anoxiques, tandis que la deuxième est aérée. L'alternance de bassin anoxique et de bassin aéré

permet d'assurer les conditions favorables aux microorganismes présents dans les boues afin d'effectuer la mission dont ils sont chargés en réalisant diverses réactions biochimiques.

4.1. Assimilation, dissimilation

Dissimilation: Réactions de production d'énergie. La matière organique de l'eau à traiter est convertie en CO_2 et eau, et de l'énergie vitale est libérée. Ce procédé est aussi appelé respiration du substrat (RADEEMA, 2011).

Assimilation: Accroissement de la biomasse. La matière organique (principalement le carbone) est convertie en nouveau matériel cellulaire par dissimilation de l'énergie et des nutriments (N et P). Quand il n'y a pas ou plus de substrat disponible, la matière cellulaire est digérée/oxydée à son tour. Ce phénomène est appelé respiration endogène (RADEEMA, 2011).

4.2. Déphosphatation

La déphosphatation biologique est une technique microbiologique pour l'élimination des concentrations élevées de phosphate par les bactéries qui accumulent les phosphates. Des bactéries aérobies spécifiques (*Acinetobacter*) sont capables, en plus de l'absorption de phosphate pour la croissance cellulaire (= absorption d'assimilation), à l'absorption de phosphore supplémentaire dans leur cellule sous la forme de polyphosphate (= absorption de luxe). Ces bactéries sont capables d'absorber de 25% de leur masse cellulaire propre sous la forme de polyphosphate (RADEEMA, 2011).

4.3. Ammonification

Les matières organiques contiennent souvent de l'azote organique. Assez rapidement cette espèce azotée se transforme en ammoniac (NH_3) ou en sels d'ammonium (NH_4^+), selon un processus bactériologique appelé ammonisation; le pH de l'eau détermine l'espèce ammoniacale formée.

$$Norg \longrightarrow NH_3/NH_4^+ + \text{Produits carbonés}$$

Ce processus s'effectue au niveau de la première chambre du bioréacteur où les conditions d'anoxie sont indispensables afin de transformer l'azote organique en NH_4+. Cela signifie que le pH augmente.

4.4. Nitrification

La nitrification est l'oxydation de l'ammonium en nitrites (NO_2-N) et de nitrate (NO_3-N). Elle se déroule en deux étapes par des bactéries autotrophes Nitrosomonas et Nitrobacter, qui génèrent leur énergie à partir de ce processus (RADEEMA, 2011).

$$NH_4^+ + 3/2\ O_2 \xrightarrow{\text{Nitrosomonas}} NO_2^- + H_2O + 2H^+ \quad (A)$$

$$NO_2^- + ½\ O_2 \xrightarrow{\text{Nitrobacter}} NO_3^- \quad (B)$$

$$NH^+_4 + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + H_2O + 2H^+$$

La première étape (A) s'appelle oxydation d'ammonium ; la deuxième (B) s'appelle oxydation de nitrite (Pandolfi, 2006). Les deux réactions sont extrêmement sensibles à un pH acide.

La nitrification se fait dans des conditions aérobies. Pour chaque molécule d'ammonium, deux molécules d'oxygène sont nécessaires, c'est-à-dire pour chaque kilogramme d'azote, la nitrification a besoin de 4,57 kilogrammes d'O_2. Des vitesses de nitrification typiques varient entre 10 – 40 g N/kg MS. Jour. Pendant la nitrification des protons sont crées, en augmentant le pH (RADEEMA, 2011).

Nitrosomonas et Nitrobacter utilisent du CO_2 comme source de carbone pour la croissance (organismes autotrophes). En plus, les bactéries nitrifiantes sont des bactéries à croissance lente ; ceci implique qu'un temps de rétention des boues long (> 10 jours) et une température relativement haute (> 15°C) sont nécessaires (RADEEMA, 2011).

L'enthalpie libre dégagée lors de la réaction permet la resynthèse de l'ATP. La nitritation nécessite l'intervention de deux enzymes : l'ammoniaque mono oxygénase et l'hydroxylamine oxydase (Pandolfi, 2006).

4.5. Dénitrification

Au cours de la dénitrification, s'effectue la réduction de nitrate en azote gazeux inerte, qui s'évapore vers l'atmosphère. Ces réactions ont lieu dans des conditions anoxique, c'est-à-dire en absence d'oxygène (O_2) (RADEEMA, 2011).

Les bactéries denitrifiantes utilisent l'oxygène des nitrates pour l'oxydation des matières organiques. Une légère augmentation du pH est obtenue.

La réaction globale de dénitrification s'écrit : (Pandolfi, 2006)

$$NO_3^- + H_3O^+ \longrightarrow N_2 + 3H_2O + 5/2\ O_2$$

Il est à noter que les vraies bactéries dénitrificatrices possèdent un système enzymatique (nitrate réductase) permettant la réaction du protoxyde d'azote :

$$NO_3^- + 2e^- + 4H^+ \longrightarrow N_2O + 2H_2O$$

En réalité la dénitrification nécessite quatre systèmes enzymatiques mentionnés dans le tableau suivant.

Tab. 9 : Système enzymatique intervenant dans la dénitrification (Cardot *In* : Pandolfi, 2006)

Enzyme	Nitrate réductase	Nitrite réductase	Oxyde nitrique réductase	Oxyde nitreux réductase
Réaction	$NO_3 \longrightarrow NO_2^-$	$NO_2^- \longrightarrow NO$	$NO \longrightarrow N_2O$	$N_2O \longrightarrow N_2$

L'étape de dénitrification nécessite l'absence d'oxygène et la présence de matières organiques. Cela signifie que la phase de dénitrification anoxique est une phase mixte et non-aérée dans laquelle les eaux usées sont nourries à la boue activée. La capacité d'oxydation de l'oxygène du nitrate est égale à presque 3 kg O_2/NO_3-N, impliquant la récupération d'une partie de l'oxygène utilisé lors de la nitrification (RADEEMA, 2011).

5. Paramètres influençant le fonctionnement des bassins d'aération

Le processus aux boues activées peut être influencé par plusieurs facteurs. On se doit de créer des conditions optimales de fonctionnement afin d'obtenir un traitement des eaux usées le plus performant possible.

Les paramètres les plus importants et surtout critiques sont les suivants :

5.1. Inhibitions liées aux paramètres caractéristiques des eaux brutes

Les caractéristiques des eaux usées entrantes à une station d'épuration à boues activées influencent le traitement au sein du bassin d'aération.

5.1.1. Débit d'alimentation

Chaque station d'épuration des eaux usées est développée pour être capable de traiter une certaine quantité de matière organique. Cette quantité ou charge organique est généralement exprimée en kg DBO ou DCO par jour ou en Equivalent Habitant = 1 EH = 54 g DBO (RADEEMA, 2011) où un Equivalent habitant est l'unité de mesure permettant d'évaluer la capacité d'une station d'épuration. Cette unité de mesure se base sur la quantité de pollution émise par personne et par jour.

Il est primordial de respecter la charge maximale et de ne pas la dépasser. Cette charge maximale est la charge prise en compte lors du dimensionnement du réacteur.

Il est aussi très important que cette charge soit homogène si l'on veut obtenir un effluent de qualité à tout instant. Les pics de charge doivent impérativement être évités. Lorsque cette charge organique nominale est dépassée, on parle de surcharge du système. Les appareils pour l'aération de l'eau usée ne pourront pas suivre et fournir la quantité d'oxygène nécessaire. Une telle situation a un impact très négatif sur le processus de traitement (RADEEMA, 2011) :

- Détérioration de la qualité de l'effluent : teneur en O_2 insuffisante pour oxyder/dégrader tous les composés organiques (DBO/DCO).
- Conditions anaérobies à l'intérieur des boues activées : production microbiologique d'acides gras et de H_2S (= problème d'odeur).

La composition de l'eau usée est également très importante. En général, la culture bactérienne se forme en fonction de la composition de l'eau usée entrante. Les grands changements dans la composition ou quantité d'eau ne peuvent être traitées de manière optimale.

5.1.2. pH

Les valeurs de pH extrêmes (supérieures à 9,5 et inférieures à 2,5) donnent lieu à une forte dégradation de la qualité de la boue. Il est évident que dans de telles conditions de pH, les boues activées subissent de fortes modifications du point de vue physico-chimique et biologique. Plus particulièrement, les plus fortes valeurs de pH donnent lieu à des hydrolyses des constituants organiques des flocs et des polymères extra cellulaires qui changent considérablement les propriétés des boues (Tixier, 2003).

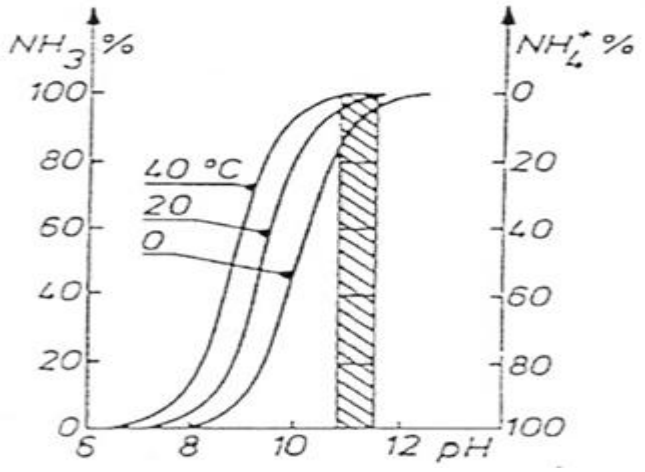


Fig. 14 : Evolution du NH_3 et NH_4 en fonction du pH et la température (Parker *In* Aubry, 2003).

Ainsi, une augmentation du pH entraîne un accroissement de la charge négative des flocons et engendre des effets de répulsion plus intenses entre particules, contribuant fortement à créer une résistance à l'écoulement. D'autre part, aux plus forts pH, la matrice des flocons est plus étendue (Sanin *In* : Tixier 2003) et par conséquent, les interactions entre flocons sont plus marquées et la viscosité augmente.

5.1.3. Température

La température de l'eau usée a une influence majeure sur le taux de biodégradation dans le bassin d'aération (conversion en CO_2, H_2O et composés minéraux). Plus la température est élevée, plus le processus de biodégradation est rapide (plus 10°C = vitesse de réaction x 2) (RADEEMA, 2011).

Les systèmes aux boues activées opèrent normalement sous une température de 5 à 35 °C (température mésophilique). La température dans un tel système, détermine le taux et la vitesse des réactions de dégradation biochimique. Plus la température est importante, plus les réactions sont rapides :

- Dégradation du substrat;
- Accroissement de la biomasse;
- Nitrification/dénitrification

En résumé : Une station d'épuration travaille plus efficacement à une haute température.

Les réactions de nitrification sont particulièrement influencées par la température. Le taux de nitrification diminue considérablement lorsque la température descend en dessous de 20°C et

est pratiquement nul si une température de 10°C est atteinte. Les réactions de dénitrification dépendent un peu moins de la température.

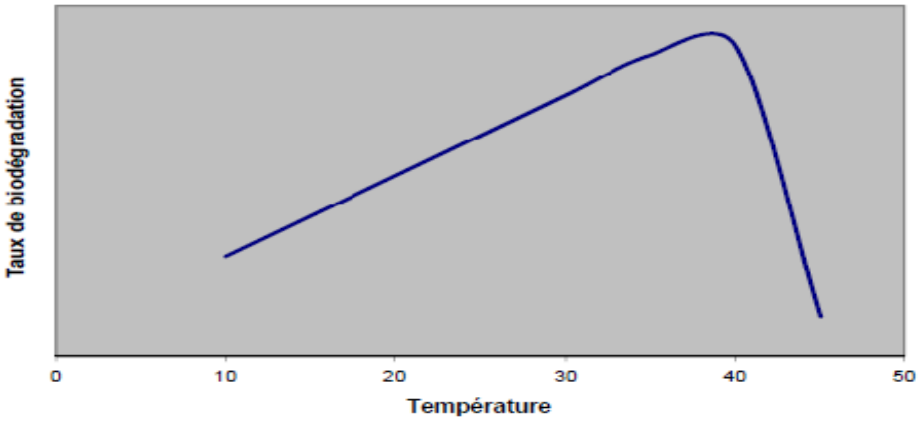


Fig. 15 : Corrélation température misophilique-activité (RADEEMA, 2011).

Ce graphique (figure 19) montre clairement qu'une température trop haute ou trop basse a un impact très négatif sur l'efficacité de la station d'épuration. A ces hautes températures (> 40 °C) ou basses (<25 °C) températures, l'activité/taux de biodégradation des boues activées est trop bas pour suffisamment supprimer les polluants de l'eau usée. À une température de moins de 15°C, les bactéries méthanogènes deviennent inactives et à une température de moins de 5°C, il n'y a plus de nitrification dans un système aérobie.

5.1.4. Nutriments

L'azote et le phosphore sont des nutriments essentiels qui doivent être présent dans l'influent en selon un rapport bien défini. Si la concentration de P et N est trop basse, cela va influencer négativement l'activité et la capacité de sédimentation des boues (structure en flocons).

Les micro-organismes ont aussi besoin de micronutriments outre Net P. En littérature, on parle de Ca, Mg, Mn, Fe, Cu, Cr et Co comme les micronutriments les plus importants.

Si les nutriments ne sont pas disponibles en quantité suffisante dans l'eau usée brute, ils doivent être ajoutés. Cela implique l'ajout de N et P en premier lieu, mais il est aussi possible que d'autres éléments soient dosés dans l'eau usée (en particulier pour le traitement de condensas) (RADEEMA, 2011).

Si un déficit de N et P dure trop longtemps (>4 jours), l'activité des boues peut se trouver réduite considérablement. De plus, la structure cellulaire des boues est fragilisée. Il y a donc de grandes chances que l'effluent soit moins clair en sortie du traitement.

5.1.5. Composés toxiques

Dans certaines circonstances, l'efficacité d'un système aux boues activées peut soudainement diminuer, et dans le pire cas, être nulle. Des composés toxiques présents dans l'influent sont normalement à l'origine de ce phénomène. Une fois dans le bioréacteur, ces substances inhibitrices ont un effet négatif sur l'activité biologique (RADEEMA, 2011).

Exemples d'inhibition : toxicité due aux métaux lourds, empoisonnement par des composés organiques particuliers (phénols, détergents cationiques, antibiotiques, etc.), présence d'oxydants forts, etc.

Pour préserver un bon fonctionnement de la station, la présence de composés toxiques dans l'influent doit être limitée à un minimum absolu définit par la loi 10-95 de l'eau (*cf* annexe 2).

L'effet de toxicité sur un procédé de traitement des eaux usées peut être divisé en 3 catégories (RADEEMA, 2011) :

- Inhibition de l'activité : la population microbiologique travaille encore, mais à un moins bon rendement qu'à l'habitude.
- Arrêt total de l'activité microbienne : toutes les bactéries meurent, ou sont « capturées » dans un état végétatif statique, dans lequel elles sont métaboliquement inactives. Dans certains cas, l'activité biologique peut reprendre une fois les composés toxiques supprimés du bioréacteur.
- La troisième catégorie est une forme de toxicité plus spécifique. L'activité générale n'est pas affectée, seule la dégradation d'une certaine sorte de substrat est inhibée. Ce problème est souvent rencontré dans des systèmes où des composés xénobiotiques sont dégradés par co-métabolisme.

Afin d'évaluer l'impact d'une inhibition sur un procédé de boues activées, il est important de connaître les mécanismes à l'origine de la toxicité des certaines substances. Les composés cellulaires et processus suivant sont sensibles aux effets toxiques :

- L'enveloppe cellulaire d'une bactérie peut être complètement détruite par les métaux lourds, phénols, détergents, ammonium quaternaire ou certains alcools.
- Le changement de structure de certaines protéines/enzymes, avec comme résultat une perte de fonction cellulaire. Ceci peut être causé par des halogènes, phénols et autres alcools.
- Interférence avec l'activité intracellulaire des enzymes peuvent ralentir voire stopper le métabolisme. Les composés toxiques produisant cet effet sont : la cyanite, les oxydants forts (chlore, hypochlorite, etc.), phénols, métaux et métalloïdes.

• Interférence avec la production d'acides nucléiques (= ADN et ARN) peuvent inhiber la reproduction bactérienne (= division cellulaire). Les métaux lourds génèrent ces effets toxiques.

5.2. Problèmes biologiques

5.2.1. Inhibition par les bactéries filamenteuses

Les bactéries filamenteuses, de même que les bactéries floconneuses, contribuent au procédé de traitement des eaux usées. Cependant, une croissance massive des microorganismes filamenteux conduit à la détérioration des propriétés de décantation et déshydratation de la boue. Un amas de filaments se crée et la migration des particules de boues jusqu'au fond du bassin est sérieusement contrariée. En d'autres termes, les filaments peuvent être à l'origine d'une mauvaise sédimentation des boues (RADEEMA, 2011).

La taille de la population en micro-organismes filamenteux dans un système de boues activées peut varier grandement et est souvent reflétée par l'index en filament (= FI). Cet index part de 0 (= absence presque totale de filaments) et termine à 5 (très grand excès de filament). La différence de quantité de filaments entre 2 niveaux FI successifs correspond à peu près à un facteur 10. L'utilisation de l'index de filament induit une certaine expérience et interprétation de chercheur/opérateur.

Remarque : De grandes quantités de bactéries filamenteuses dans la boue activée ont aussi un effet négatif sur l'efficacité de l'aération (RADEEMA, 2011).

5.2.2. Inhibition par les mousses

Les mousses sont des végétaux acotylédones cellulaires, à tige simple ou composé, à racines ramifiées et composés d'une seule série de cellules allongées, à feuilles insérées horizontalement et disposés en spirales (Schimper, 1848).

Les mousses forment des amas de flottants très stables de couleur marron clair à foncé et de structure visqueuse. Leur densité tend à s'accroître progressivement au cours du temps.

Ces mousses sont peu déstructurées par une agitation de surface et reforment rapidement un tapis uniforme en absence d'agitation. Les bulles de gaz favorisent la flottation. Ces flottants constituent un milieu favorable au développement privilégié de certaines bactéries filamenteuses responsables de moussage (Canler, 2004).

L'apparition d'une petite quantité de mousse dans une station d'épuration est plutôt normale, même quand le système fonctionne normalement. Cependant, si cette mousse est en

abondance à la surface des bassins d'aération et de clarification ce n'est pas normal. Ce moussage extrême peut être expliqué par plusieurs phénomènes :

- Présence de fortes concentrations en détergents et matières grasses
- pH trop haut ou trop bas
- Manque d'oxygène
- Manque de nutriments
- Boue trop vieille.

Dans certains cas extrêmes, les mousses peuvent représenter jusqu'à 1/3 de la biomasse totale, avec des concentrations en matières sèches pouvant atteindre 100 g/l, voire des hauteurs dépassant un mètre. Les paramètres de fonctionnement (charge massique) et d'exploitation de la station sont alors fortement dégradés par cette situation (diminution du transfert d'oxygène) (Canler, 2004).

Photo 17 : Apparition d'une couche de mousse à la surface du clarificateur.

5.3. Problèmes mécaniques

5.3.1. Problèmes d'aération

L'apport d'oxygène est indispensable pour oxyder la matière organique et l'ammonium grâce à la biomasse présente. Un manque d'oxygène influence immédiatement l'efficacité d'abattement. L'oxygène doit être fourni sous forme dissoute, d'où le terme oxygène dissous (OD).

Une concentration OD minimale entre 1 et 2 mg O_2/L doit être conservée dans le bassin d'aération.

L'approvisionnement en O_2 peut être effectué à l'aide d'aérateurs de surface (amène l'eau en contact avec l'air environnant), d'une aération à fines bulles (injection de petites bulles d'air

dans l'eau) ou d'un aérateur immergé. Il arrive parfois que l'oxygène pur soit utilisé pour l'aération de station d'épuration.

L'aération consiste en 2 procédés de base :

• Processus physique : l'oxygène est dans l'eau et ensuite transporté vers les flocons de boue (diffusion et turbulence);

• Processus biochimique : avant que l'oxygène puisse être utilisé par les cellules organiques, les molécules d'O_2 doivent être diffusées à travers la membrane cellulaire.

Evidemment, le transfert d'oxygène dans un système biologique est influencé par de nombreux facteurs : composition de l'eau usée, température, type d'aération, caractéristiques des boues et configuration du réacteur.

Une déficience en oxygène dans une station d'épuration peut être causée par des facteurs biochimiques ainsi que physiques (dysfonctionnement du système d'aération).

Les principaux facteurs biochimiques induisant un déficit en OD et par conséquent un mauvais fonctionnement du réacteur biologique sont :

- Une surcharge organique : charge supérieure à la charge maximale définie;
- Un excès de matières grasses, huiles ou autres surfactants dans le bioréacteur;
- Une Concentration en boue trop importante : impact négatif sur le taux de transfert d'oxygène et augmentation de la respiration endogène
- Amas volumineux de boue : boue filamenteuse (*Nocardia*)
- Les problèmes du système d'aération

Un manque prolongé d'oxygène peut conduire à :

• la diminution de l'efficacité d'abattement;

• la formation d'une biomasse filamenteuse, donc moins bonne décantation ;

• la nuisance olfactive, due à la formation d'acides volatils et H_2S dans des conditions anaérobies;

• l'arrêt total des réactions de nitrification (= oxydation de NH4+-N) et donc plus de suppression d'azote.

Des concentrations d'oxygène trop élevées n'influencent pas directement l'efficacité d'abattement, mais les concentrations de D.O > 5 mg O_2/L doivent être évitées car :

• Gaspillage d'énergie.

• Plus petits flocons (= mauvaise décantation /effluent turbide).

• Peut être à l'origine de la formation de filaments.

5.3.2. Dysfonctionnement lié aux agitateurs

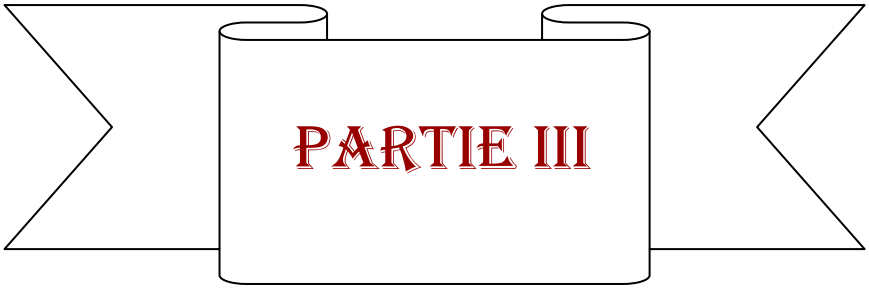
Un dysfonctionnement des agitateurs (panne, puissance spécifique insuffisante) peut induire la formation de dépôts en fond d'ouvrage et créer des zones d'anaérobie favorables au développement de populations de bactéries filamenteuses (aération moindre, septicité).

Lors de sa mise en place à la construction, une mauvaise position de l'agitateur au sein du bassin (angle, positionnement/muret, hauteur d'immersion…) ou la présence d'un obstacle (guides latéraux des raquettes de diffuseurs surdimensionnés, canaux traversiers…) devant celui-ci pénalisera fortement son efficacité et peut créer des mouvements hydrauliques contraires à ceux recherchés (spiral-flow).

De plus, l'observation visuelle des remontées de bulles (en insufflation d'air) permet d'appréhender l'existence de spiral-flow entre l'agitateur et la première raquette de diffuseurs.
L'observation d'un contre-courant de surface au devant de l'agitateur, aération et agitation en marche, ou la présence continue de mousse stable en certains points du bassin, laissent supposer un mauvais fonctionnement hydraulique.
De même, l'arrivée des bulles d'air dans la zone de balayage des pales témoigne d'une mauvaise implantation de l'appareil (https://gisbiostep.cemagref.fr).

5.4. Gestion de la concentration des boues

C'est parfois le cas lorsque les conditions de soutirage des boues en excès ne permettent pas d'extraire en quantité suffisante les boues produites (période hivernale, impossibilité d'épandre les boues,...). Cela entraîne une augmentation anormale du stock de boue dans le bassin d'aération puis le décanteur, avec pour conséquences négatives, une consommation excessive d'électricité (respiration des boues) et des risques de pertes de boue en sortie (réduction de la capacité hydraulique du clarificateur). Ce type d'exemple illustre bien l'importance de trouver une destination finale pérenne des boues pour toute station d'épuration (Duchène, 1994).



Suivi de la performance des bassins d'aération de la STEP de Marrakech

1. Méthodes d'analyse

Quotidiennement le personnel du laboratoire de la STEP de Marrakech collecte les échantillons d'eau d'entrée et d'eau épurée afin d'effectuer les analyses dont les contrôles sont des guides précieux sur l'état des traitements, des réglages et des équipements de la station.

La STEP de Marrakech est équipée de cinq préleveurs automatiques permettant de constituer un échantillon représentatif de l'effluent à analyser aux différentes étapes du traitement des eaux usées.

Le préleveur est composé :

- d'une enceinte qui contient : les 24 bidons de prélèvement, le module de commande et les équipements permettant l'aspiration de l'effluent et sa répartition dans les bidons.
- d'un tuyau d'aspiration plongeant dans l'effluent à prélever.

La réalisation de bilans sur 24 heures exigée par la réglementation, nécessite l'utilisation de préleveurs automatiques réfrigérés, isothermes et asservis au débit.

Photo 18 : Les préleveurs automatiques dans la STEP de Marrakech.

Les prélèvements sont pris chaque jour au niveau de :

- L'entrée primaire : eaux brutes.
- Sortie primaire : eaux prétraitées
- Bassin d'aération.
- Sortie secondaire : eaux clarifiées
- Sortie tertiaire : eaux traitées

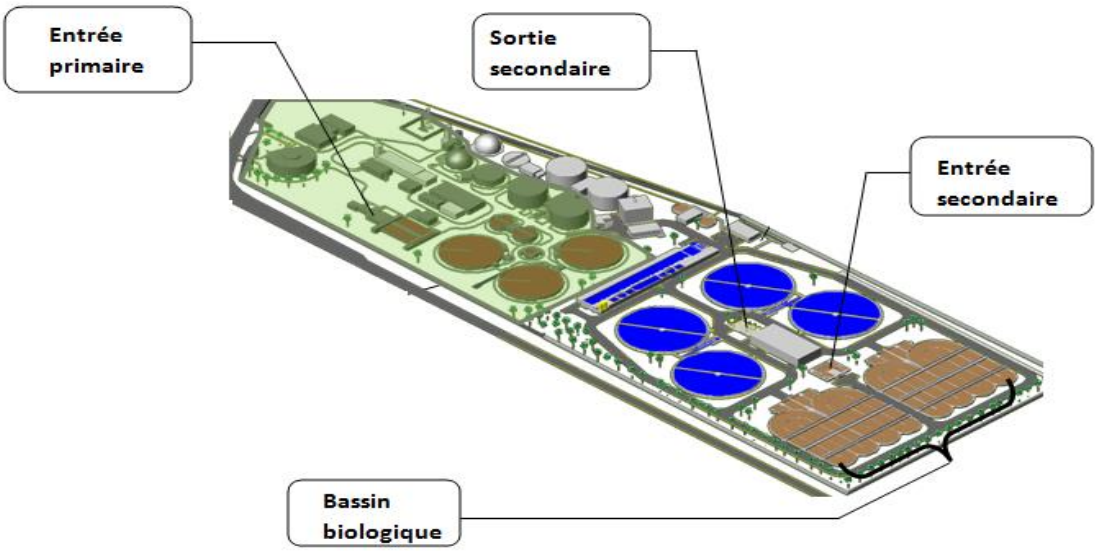


Fig. 16 : Schéma montrant les différents sites de prélèvement au niveau de la STEP de Marrakech.

1.1. Paramètres à mesurer

La STEP de Marrakech réalise quotidiennement des divers analyses des différents paramètres qui permettent le suivi du fonctionnement du traitement des eaux à épurées.

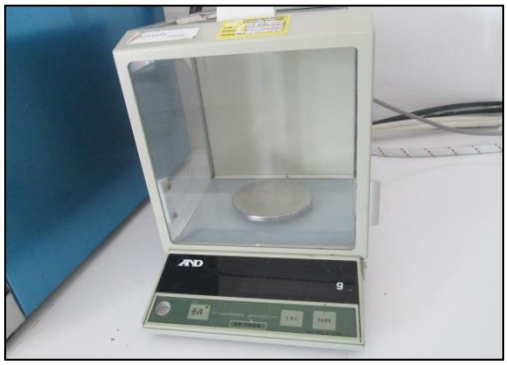
1.1.1. Matière en suspension (MES) et matière sèche (MS)

- **Matière en suspension (MES)**

La détermination des matières en suspension dans l'eau est réalisée par filtration d'un volume d'eau à analyser, séchage à 105°C et pesée.

Principe:

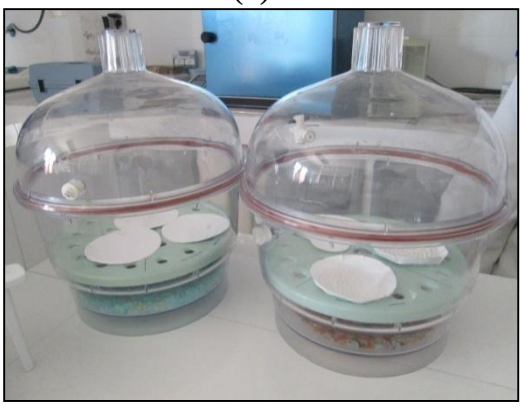
Un volume d'eau est filtré sur un filtre en fibres de verre. Ce dernier doit être préalablement pesé et gardé dans des dessiccateurs pour éviter tout type de contamination ou d'humidité. La masse de matière filtrée est déterminée par pesée après séchage à 105°C dans une étuve. Le résultat est exprimé en mg de matière en suspension par litre d'échantillon.



(a)

(b)

(c)



(d)

Photo 19 : Les appareils utilisés dans le laboratoire de la RADEEMA pour le mesure de la MES : (a) balance, (b) étuve, (c) filtre en fibres en verre, (d) dessiccateurs.

- **Matière sèche (MS)**

La MS représente la concentration en boues après évaporation (à 105 °C) d'un échantillon de boue dans une boite de pétri. La concentration en matière sèche est calculée comme suit:

MS (%) = Poids après séchage (g)/Poids initial (g)

1.1.2. Demande en oxygène

- **Demande biologique en oxygène pendant cinq jours (DBO5)**

Le DBO5 est mesuré par méthode manométrique. C'est la mesure de l'oxygène consommé en 5 jours (en mg/l) par un échantillon placé dans une enceinte thermostatée à 20°C et à l'obscurité après dilution appropriée avec une eau saturée en oxygène enrichie en sels minéraux

et ensemencée avec des germes microbiens. La concentration en oxygène avant et après incubation est mesurée avec une sonde oxymétrique (Cirad, 2004).

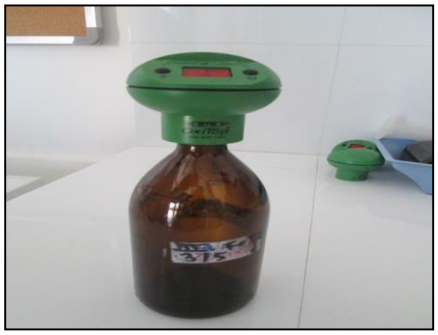


Photo 20 : Le déroulement de la mesure de la DBO5 dans le laboratoire de la RADEEMA.

➢ **Demande chimique en oxygène (DCO)**

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène consommée pour oxyder par voie chimique certaines matières oxydables contenues dans l'échantillon.

Principe:

L'oxydation est réalisée par un excès de dichromate de potassium en milieu acide, à ébullition sous reflux pendant 2 heures et en présence de catalyseurs (sulfates d'argent et de mercure). L'oxygène consommé (en mg/l) est calculé après détermination de l'excès de dichromate par titration avec du sulfate de fer et d'ammonium (Cirad, 2004).

1.1.3. Dosage de l'azote et du phosphore

➢ **Nitrites (NO_2^-)**

Principe :

En milieu acide la diazotation de la sulfanilamide par les nitrites se fait en présence du dichlorure de N-(naphtil-1) diamino-1,2 éthane (NED) un complexe rose susceptible d'un dosage colorimétrique à la longueur d'onde 540 nm.

Mode opératoire :

Dans une fiole de 50 ml, on met :

- 50 ml de l'échantillon
- 1 ml du réactif de Diazotation

On attend au moins 30 minutes et au plus 2 heures puis on mesure l'absorbance par spectrophotométrie à la longueur d'onde de 540 nm.

➢ Dosage des nitrates (NO_3^-)

Principe :

On met en réaction des nitrates avec l'acide sulfosalicylique (formé par addition à l'échantillon de salicylate de sodium et d'acide sulfurique) ; le dérivé obtenu donne en présence de l'ammoniaque une coloration jaune stable.

Mode opératoire :

- Mettre 10 ml d'échantillon dans une capsule à évaporation.
- Ajouter 1 ml de la solution de Salicylate de Sodium.
- Evaporer à sec au bain marie (ne pas surchauffer) ; laisser refroidir.
- Reprendre le résidu par 2 ml d'acide sulfurique concentré en ayant pris soin de l'humecter complètement.
- Attendre 10 mn ; ajouter 15 ml d'eau bidistillée puis 15 ml de Tartrate double de Na^+et K^+ qui développe la coloration jaune.
- Effectuer les lectures au spectrophotomètre (λ= 415 nm), soustraire les densités optiques lues des étalons, la valeur relevée par le témoin.

➢ Phosphore total (PT)

L'analyse des orthophophates se fait par spectrophotométrie d'adsorption atomique qui est basée sur le principe que les atomes libres peuvent absorber la lumière d'une certaine longueur d'ondes. L'absorption de chaque élément est spécifique, aucun autre élément n'absorbe sa longueur d'ondes.

➢ Orthophosphates (PO_4^{3-})

Ils sont mesurés également par la technique de spectrophotométrie.

Mode opératoire :

Dans une fiole de 50ml on place :

- 20 ml de l'échantillon
- 1 ml d'acide ascorbique
- 4 ml du réactif combiné

Puis on agite énergiquement. Après 30 min de repos, on observe le développement d'une coloration bleue. Ensuite on effectue la lecture à 880 nm.

1.2. Paramètres à calculer

1.2.1. Charge massique

C'est le rapport de la charge en DBO5 reçue sur la quantité de boues présentes dans le bassin d'aération. Elle est calculée par la formule :

$$Cm = \frac{\text{Nourriture reçue (kg DBO5)}}{\text{Quantité de boues (kg MVS)}}$$

Avec **:**

La quantité de boues = volume du bassin (m^3) x concentration en MVS.

MVS : matières organiques ou matières actives des boues.

Cm : charge massique en DBO5/jour*MVS.

Elle caractérise l'équilibre biologique du traitement.

1.2.2. Indice de MOLHMAN

On définit l'indice de MOLHMAN (IM) ou Sludge Volume Index (SVI), comme étant le rapport du volume occupé par un litre de boue après 30 minutes de décantation (sans dilution) par la concentration de matière en suspension (MES).

$$\text{Indice de MOLHMAN (mL/g)} = \frac{V_{30\ \text{minutes}}\ \text{(ml /L)}}{C_{MES}\ \text{(g/L)}}$$

Généralement, les boues sont bien décantables pour $80 < I_m < 150$.

- Si $\mathbf{I_m \sim}$ 80 : la décantation est très bonne mais les boues sont difficilement pompables.
- Si $\mathbf{I_m \sim}$ 150 : la décantation est très lente

Les variations de l'indice de Mohlman en fonction de la charge massique pour une température de 20°C, indique qu'il existe toujours un point de fonctionnement pour lequel cet indice atteint sa valeur minimale garantissant un fonctionnement convenable de la station (Dhaouadi, 2008).

1.2.3. Age des boues

Les boues activées s'accroissant, elles doivent être purgées vers un bassin de stockage puis déshydratées sur une base de temps régulière. De cette manière, la concentration en boue dans le bioréacteur peut être gardée à peu près constante.

Le temps de rétention cellulaire moyen est le temps de résidence des boues activées dans le réacteur. Le MCRT rend donc compte du nombre de jours durant lesquels une cellule de boue est retenue dans le réacteur, comme formulé ci-dessous :

$$\textbf{MCRT (jours)} = \frac{\textbf{Vtotal (m}^3\textbf{) * MS}_{\textbf{réacteur}}\textbf{ (kg/m}^3\textbf{)}}{\textbf{Débit boue purgée (m}^3\textbf{/jour) * MS boue purgée (kg/m}^3\textbf{)}}$$

L'âge des boues est normalement exprimé en jours. Les valeurs typiques se trouvent entre 5 et 20 jours. Ces valeurs sont valables pour des systèmes plutôt faiblement chargés. Dans des systèmes à haute charge (croissance plus importante) les MCRT diminuent, et des temps de rétention de boue de 2 jours sont plausibles.

2. Résultats et interprétations

Au niveau de cette partie, on abordera les résultats de notre travail et les interprétations détaillées des analyses physico-chimiques des eaux usées de la ville de Marrakech déterminée à partir des prélèvements journaliers effectués au mois d'avril 2013.

L'analyse des différents paramètres permet le suivi du fonctionnement de la STEP de Marrakech et plus précisément le traitement secondaire qui constitue le cœur de l'épuration des eaux usées. L'efficacité du traitement est suggérée par le degré d'accord des paramètres avec les normes optimales qui présentent les normes de rejet ou d'irrigation exigées par la loi marocaine 10-95 sur l'eau (*cf* annexe 4).

2.1. Paramètres caractéristiques des eaux brutes à l'entrée de la STEP de Marrakech

Afin d'assurer une prévention de la destruction de la biomasse des bassins d'aération, la STEP est menée à faire des analyses horaires des différents paramètres des eaux usées recueillies. Cela permet la détection de substances dangereuses pour les microorganismes épurateurs, et permet donc de garantir le fonctionnement de la station dans toutes les conditions.

2.1.1. Débit à traiter

Le débit moyen journalier est un paramètre mesuré à l'entrée de la STEP et permet d'avoir une idée sur la quantité d'eau entrante à traiter.

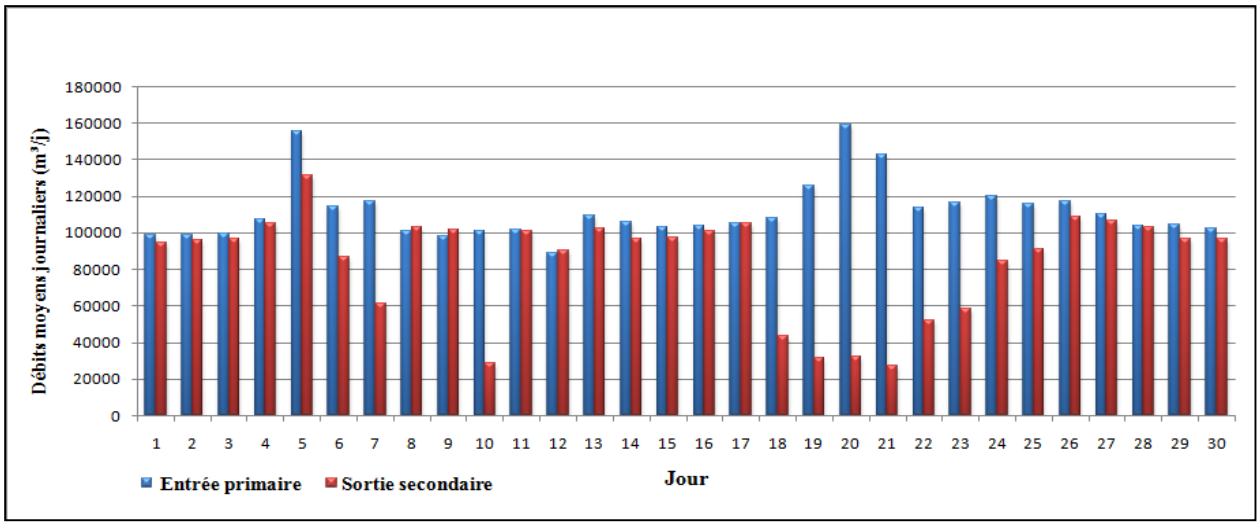


Fig. 17 : Variations des débits moyens journaliers de l'effluent à l'entrée primaire et sortie secondaire (avril 2013).

Afin de pouvoir évaluer l'effet des précipitations sur les débits des eaux usées entrantes à la STEP, le graphe de la figure 18 illustre les précipitations journalières de la ville de Marrakech au mois d'avril 2013 acquises à partir des précipitations horaires (*cf* annexe 2).

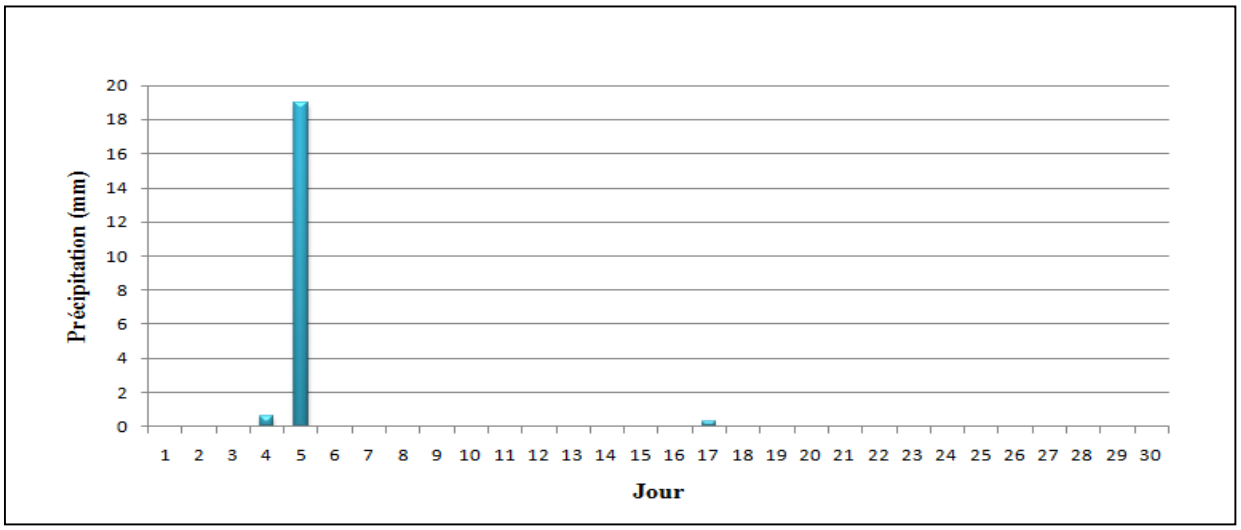


Fig. 18 : précipitations journalières de Marrakech enregistrées dans la station Agdal durant le mois d'avril 2013 (données du Laboratoire Mixte international, IRD, Univ. Cadi ayyad) (*cf* annexe 2).

La figure 17 montre que le débit moyen journalier des eaux usées entrant à la STEP est presque le même durant tous les jours du mois avec une moyenne de 111 632 m³/j excepté les deux périodes du 5 au 7 et du 18 au 26. Les pics des débits moyens sont enregistrés pendant le 5ème et le 20ème jour du mois. Le débit moyen maximal est de l'ordre de 160 000 m³/j, soit une augmentation de l'ordre de 48 368 m³/j par rapport à la moyenne représentée par 43 %.

Les débits entrant dans la STEP sont légèrement inférieurs ou égaux à ceux sortant du traitement secondaire. Les différences entre les débits entrants et sortant ne dépassent pas 6642m3/j. Cependant, ces différences sont importantes pour les deux périodes du 5 au 7, du 18 au 26 ainsi qu'au 10ème jour du mois. Ces différences coïncident avec les forts débits entrant. Pendant les deux périodes à forts débits entrants, les débits sortants sont très faibles avec une moyenne de 67 393m^3/j.

La figure 18 permet de constater que la ville de Marrakech a connu 3 jours pluvieux (4, 5 et17) durant le mois d'avril. Le jour 4 a enregistré 0.4 mm, 19 mm dans le jour 5 tandis que le jour 17 a marqué 0.3 mm de précipitations.

Les augmentations du débit durant la période du 5 au 7 sont expliquées par les précipitations importantes enregistrées durant 4 et 5 avril 2013. Ces eaux pluviales s'écoulaient dans le réseau pour être acheminées vers la STEP en augmentant ainsi le débit entrant. Tandis que les augmentations des débits dans la période du 18 au 26 sont probablement liées aux

déversements des unités industrielles ou à des précipitations locales (Orages) qui n'avaient pas été enregistrées au niveau de la station de mesure Agdal.

Tandis que les différences entre le débit entrant à la STEP et celui sortant du traitement secondaire, sont dues aux by-pass (évacuation d'eaux excédentaires dues aux fortes précipitations ainsi qu'à d'éventuels rejets d'eaux industrielles) effectués durant ces jours et qui déversent la majeure partie ou presque la totalité du débit entrant à la STEP vers l'Oued Tensift. Ces évacuations d'eaux sont nécessaires pour éviter le dysfonctionnement ou même l'arrêt total de la station. En effet, ces eaux sont chargées soit par des polluants toxiques, souvent d'origine industrielle, notamment le chrome hexavalent, les sulfures, le cuivre, le phénol et le nickel dont les concentrations dépassent les limites exigées qui peuvent gêner le traitement biologique, soit par les hydrocarbures et leurs dérivés.

2.1.2. Le potentiel hydrogène (pH)

Le potentiel hydrogène de l'eau entrante à la STEP est mesuré à fin de connaître le degré d'acidité de l'effluent.

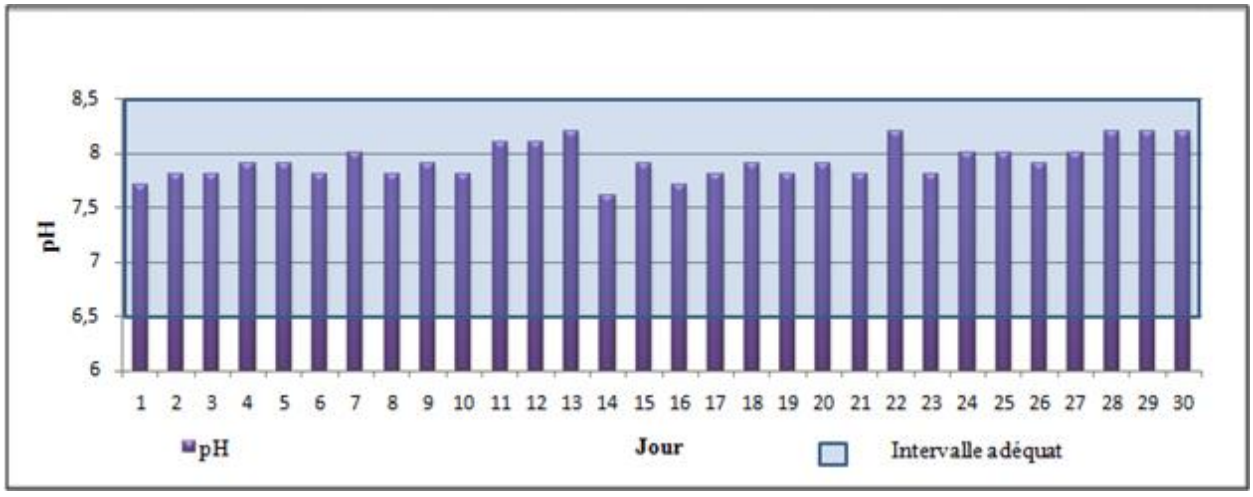


Fig. 19 : Variations du pH journalier des eaux usées à l'entrée de la STEP (avril 2013).

La figure 19 montre un pH des eaux légèrement basique compris entre 6,5 et 8,5 ce qui confirme que l'effluent est d'origine urbaine (Rejsek *In :* Hamaidi, 2012).

C'est l'intervalle optimal pour l'activité des microorganismes des boues activées donc le pH ne va pas créer de problèmes au niveau du bassin. Les faibles fluctuations de ce paramètre sont normales et elles sont généralement liées à des rejets acides ou alcalins dans le réseau.

2.1.3. La température

La température de l'eau usée a une influence majeure sur le taux de biodégradation dans le bassin d'aération. Plus la température est élevée, plus le processus de biodégradation est rapide. En revanche, la température de la boue ou de l'effluent est un facteur sensible qui a des répercussions diverses sur le traitement et génère des dysfonctionnements variés (Canler, 2004).

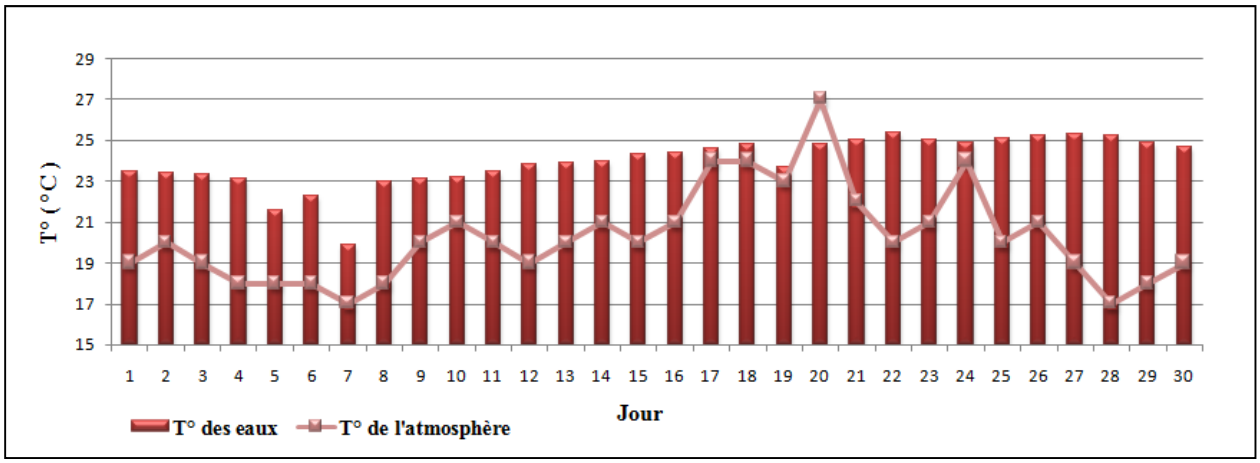


Fig. 20 : Evolution de la température moyenne journalière des eaux usées à l'entrée primaire en fonction de la température atmosphérique (avril 2013).

A l'exception des trois jours 5, 6 et 7 du mois, la température des eaux usées à l'entrée de la STEP reste relativement constante. Elle oscille autour de la moyenne qui est de l'ordre de 24°C.

La diminution de la température des eaux brutes pendant les trois jours 5, 6 et 7 est influencée par la diminution de la température de l'atmosphère comme le rapport climatique de la ville de Marrakech du mois d'avril a montré (*cf* annexe 3).

Ces différentes valeurs sont acceptables car elles restent en dessous de la norme fixée par l'OMS à 30°C (OMS, 1989).

Généralement, l'intervalle de la température durant le mois d'avril reste toujours idéal pour l'activité des bactéries épuratrices au sein du bassin d'aération. Ce qui prouve que ce paramètre ne représente pas un facteur limitant sur le traitement biologique durant ce mois.

2.1.4. La conductivité

La conductivité est probablement l'une des plus simples et des plus importantes mesures pour le contrôle de la qualité des eaux usées. Elle traduit le degré de minéralisation globale de l'eau et renseigne sur le taux de salinité des eaux brutes entrant à la STEP.

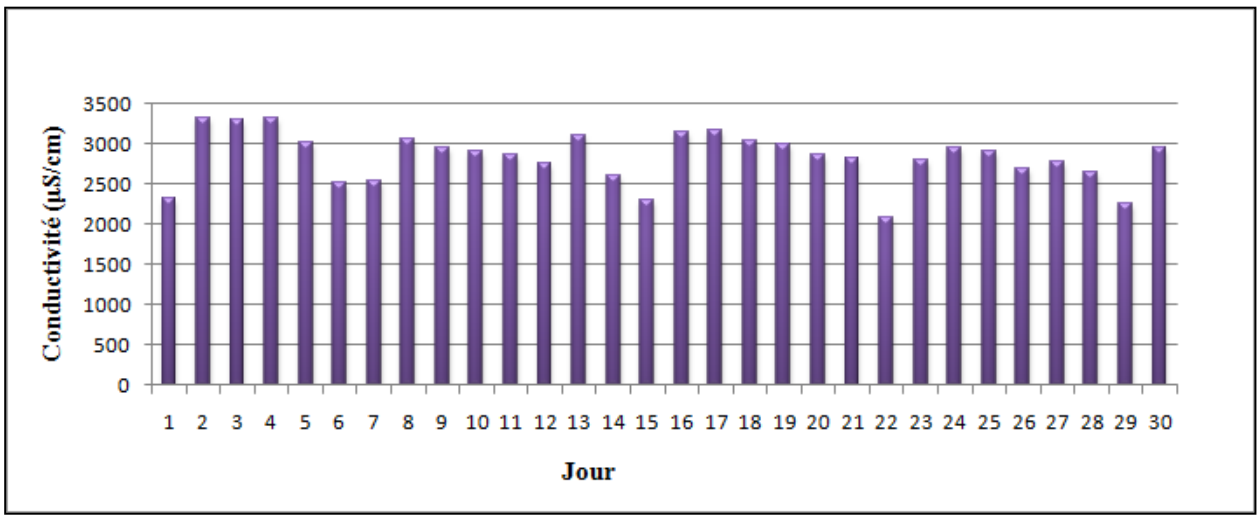


Fig. 21 : Evolution de la conductivité moyenne journalière des eaux usées à l'entrée primaire (avril 2013).

La figure 21 révèle que les eaux brutes ont une conductivité qui varie entre 2084 et 3320 µS/cm avec une moyenne de 2825 µS/cm (cf. annexe 1).

L'augmentation de la conductivité dans certains jours est expliquée par le rejet des eaux usées résiduaires des unités industrielles dans le réseau d'assainissement de la ville. Alors que la diminution marquée au niveau des jours 6, 7 et 22 du mois est liée à l'effet de dilution dû aux précipitations enregistrées durant ce mois.

2.1.5. Les métaux lourds et les éléments toxiques

La présence de métaux lourds ou d'éléments toxiques dans l'effluent de la station de traitement des eaux usées par boues activées affecte les mécanismes biologiques et biochimiques responsables de la dégradation de la matière polluante. En effet, l'arrivée d'une concentration importante de métaux lourds dans le réacteur risque de perturber le développement de la biomasse présente. L'efficacité du procédé s'en trouve ainsi diminuée (Couillard, 1991).

Parmi ces métaux on distingue : le chrome hexavalent, le cuivre, le nickel et les sulfures.

- **Le chrome hexavalent Cr VI**

Le chrome fait partie de la famille des métaux lourds, il présente donc, à concentration élevée, un risque majeur pour l'environnement et la santé humaine (cancérigène). Cet élément a été analysé puisqu'il est un élément nuisible pour les microorganismes des boues activées.

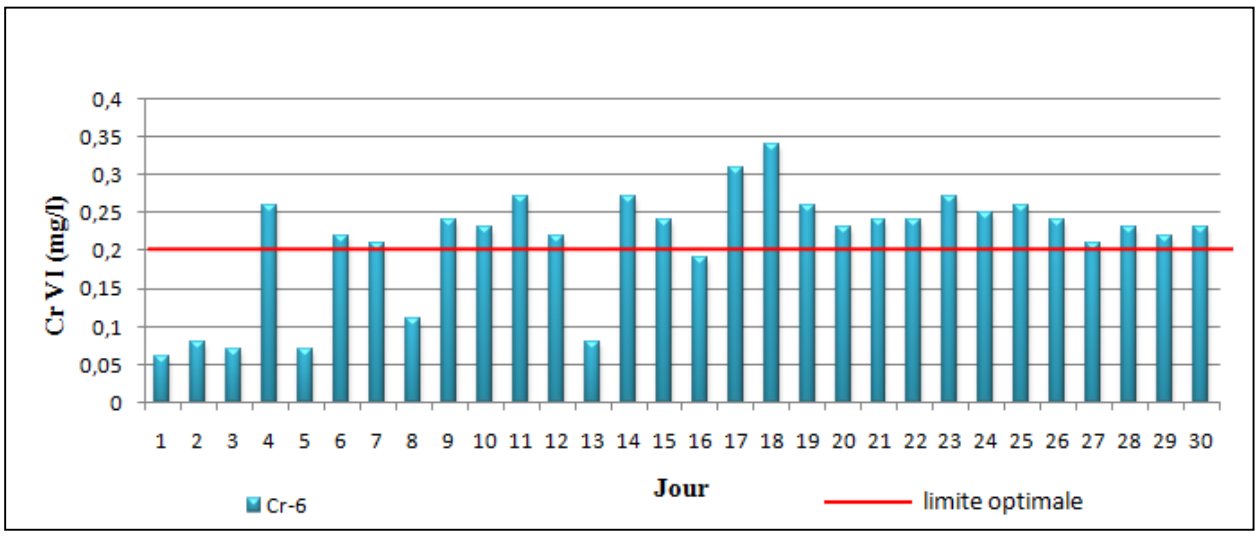


Fig. 22 : Evolution de la concentration moyenne journalière en Cr VI à l'entrée primaire (avril 2013).

Le suivi de la concentration des eaux usées brutes entrantes à la STEP en Cr VI a montré un dépassement de la limite optimale durant presque tous le mois sauf les jours du 1, 2, 3, 5, 8, 13 et 16 avec une valeur maximale de l'ordre de 0,34 mg/l enregistrée le jour du 18 avril.

Le Cr VI est présent en quantité faible dans la nature et il est caractérisé par une solubilité faible vis-à-vis des phénomènes de lessivage du sol. C'est un polluant d'origine industrielle et il est utilisé dans la galvanoplastie, la raffinerie, la métallurgie, les colorants, le textile, la peinture. Dans le cas de la ville de Marrakech, l'origine principale du chrome entrant à la STEP sont les tanneries de la ville.

- Les sulfures

Les sulfures présentent plusieurs types de structures ce qui rend difficile de les regroupés. Les principaux sulfures sont : les sulfures de Fer, les sulfures de Cu, Zn, Pb et les sulfures de Ni, Mo, Co.

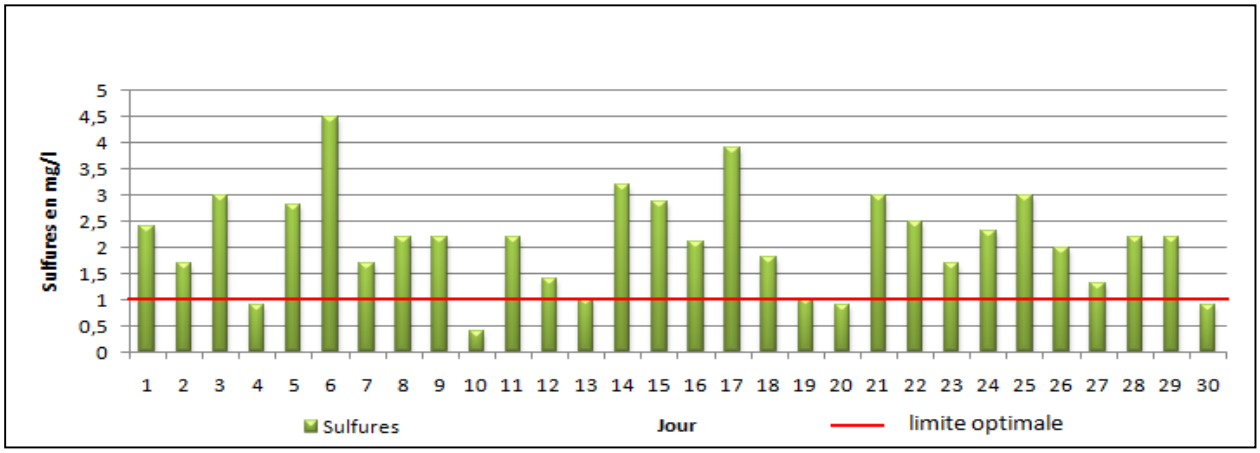


Fig. 23 : Evolution de la concentration moyenne journalière en sulfures à l'entrée primaire (avril 2013).

Les concentrations des eaux résiduaires en sulfures présentent des fluctuations très fréquentes. Ces concentrations sont comprises entre 0,4 et 4,5 mg/l avec une moyenne de l'ordre de 2,1 mg/l. les valeurs maximales sont enregistrées le 6 et le 17 avril qui suivent directement ou coïncident avec les jours pluvieux. Donc on peut conclure que les sulfures entrants à la STEP proviennent des lessivages des sols par les pluies puisque le réseau est unitaire donc il collecte également les eaux usées ainsi que les eaux pluviales.

- **Le nickel Ni**

La source principale du nickel dans les eaux naturelles est l'oxydation de la pyrite contenant du nickel substitué au fer. Le Ni est compté parmi les métaux lourds nuisibles pour la biomasse épuratrice des boues activées.

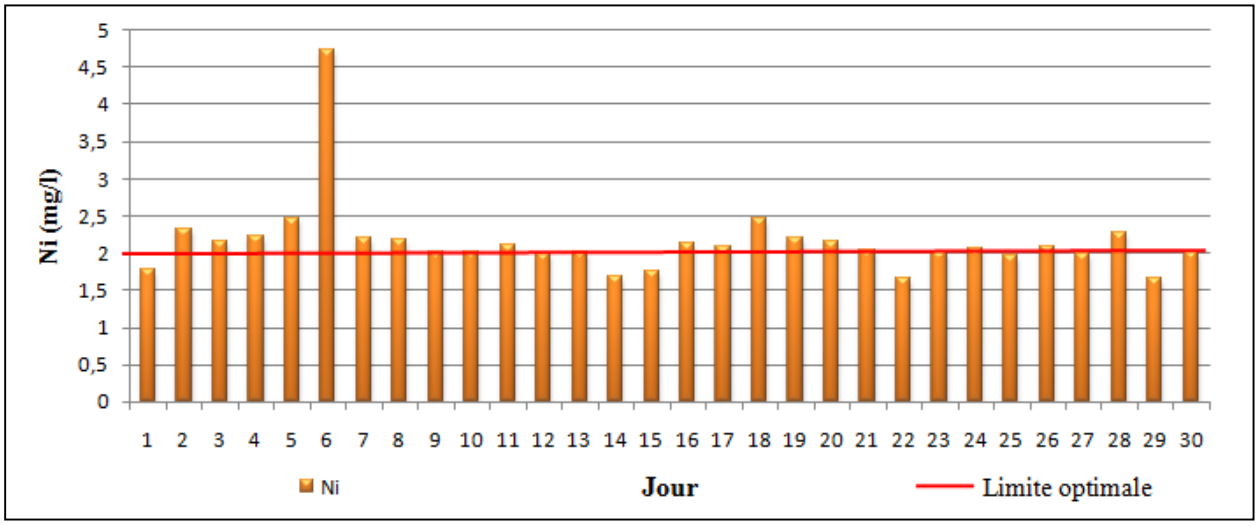


Fig. 24 : Evolution de la concentration moyenne journalière en Ni à l'entrée primaire (avril 2013).

A l'exception de la concentration (4,73 mg/l) enregistrée le 6 avril, les teneurs des eaux usées brutes de la ville de Marrakech en Ni durant le mois d'avril sont proches ou légèrement supérieures à la limite optimale qui est de l'ordre de 2 mg/l.

La pollution métallique des eaux usées en cet élément est principalement liée aux activités humaines, il présente une large gamme d'utilisation dans le domaine industriel. Le nickel entre dans la composition de nombreux alliages en raison de ses caractéristiques de dureté et de sa résistance à la corrosion. Il est aussi utilisé pour la protection des pièces métalliques et dans les traitements avant chromage. Il est également employé dans la production d'aciers inoxydables, les dépôts chimiques et électrolytiques et il sert également de catalyseur en chimie organique.

- **Le cuivre Cu**

Le Cu est assez fréquemment retrouvé dans la nature, par exemple sous forme de Chalcopyrite. Ses caractéristiques chimiques ainsi que sa faible mobilité n'autorisent cependant pas l'existence de fortes concentrations dans les eaux naturelles. Elles sont donc plutôt d'origine anthropique.

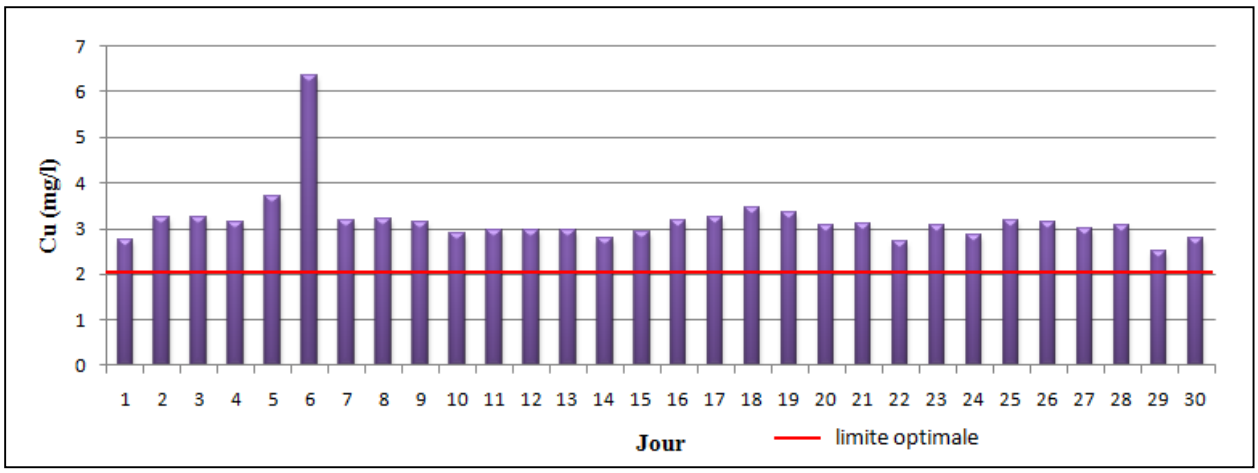


Fig. 25 : Evolution de la concentration moyenne journalière en Cu à l'entrée primaire (avril 2013).

La figure 25 montre des concentrations en Cu supérieures à la limite optimale qui est de l'ordre de 2mg/l durant tout le mois. La valeur maximale est enregistrée le jour 6 où la concentration des eaux brutes en cet élément a pu atteindre une valeur extrêmement élevée égale à 6,36mg/l.

Les concentrations élevées en cuivre des eaux sont liées aux rejets industriels de certaines industries dans le réseau.

Le cuivre est utilisé dans les domaines de l'électricité, de la métallurgie. Les sels de cuivre sont utilisés dans l'industrie de la photographie, les tanneries (fabrication de pigments), l'industrie textile, les traitements de surface (circuits imprimés, galvanoplastie, dépôts chimiques...) et les fongicides...etc.

Le Cu et le Ni montrent des concentrations élevées dans le jour 6 et des concentrations faibles dans le jour 22 du mois. Pour s'assurer si les deux éléments proviennent de la même source, on se base sur la matrice de corrélation ci-dessous.

Tab. 10 : Matrice de corrélation entre les éléments toxiques entrants à la STEP.

	Cu mg/l	Ni mg/l	Cr-6 mg/l	Sulfures mg/l
Cu mg/l	1			
Ni mg/l	0,97801309	1		
Cr-6 mg/l	-0,02013962	-0,02695788	1	
Sulfures mg/l	0,48353596	0.37335744	0.02122154	1

La matrice de corrélation montre que 98% des variations de Cu sont expliquées par les variations de Ni. Donc ces deux éléments sont fortement corrélés. Cela veut dire que le Cu et le Ni présents dans les eaux usées entrantes à la STEP ont la même origine industrielle.

2.2. L'oxygène dissous (OD) mesuré dans les bassins d'aération

La grandeur de mesure oxygène dissous indique la quantité d'oxygène physiquement dissous dans l'eau en mg/l. Elle permet dans le traitement des eaux usées d'optimiser la quantité d'oxygène à injecter dans les bassins d'aération.

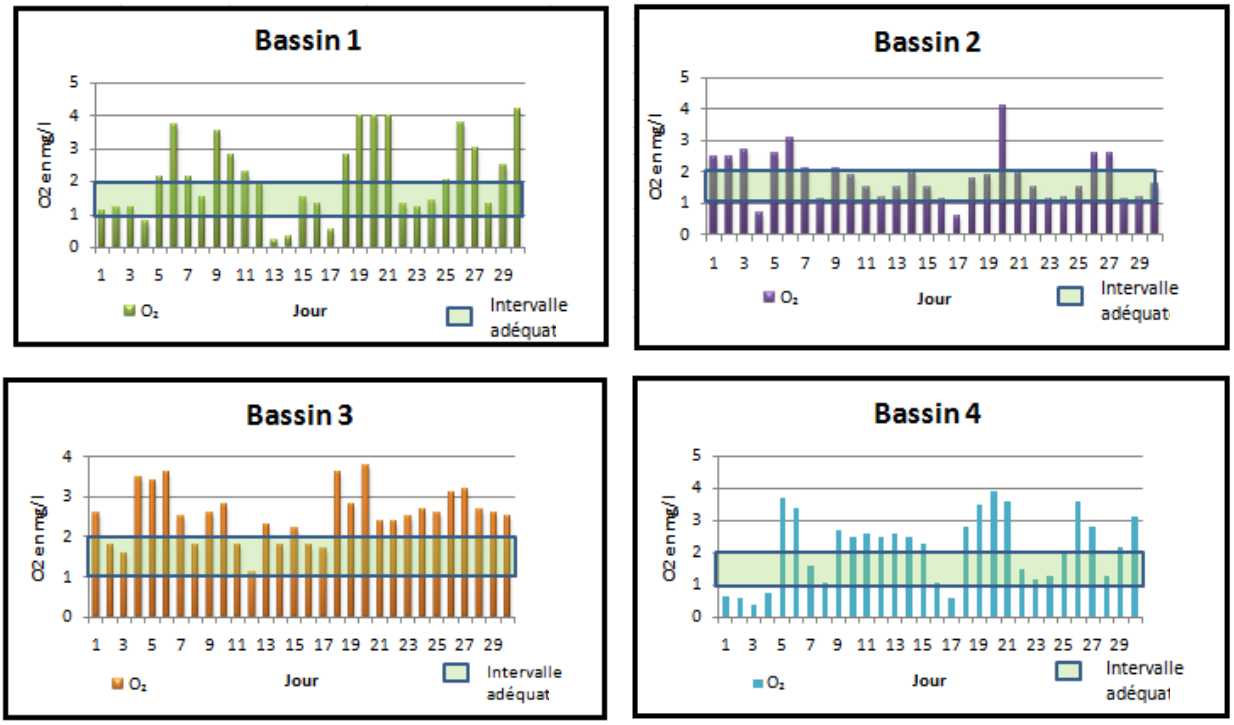


Fig. 26 : variations de la concentration moyenne journalière de l'oxygène dissous introduit dans les eaux usées au niveau des bassins d'aération (avril 2013).

Les analyses des concentrations en OD des eaux usées au niveau des quatre bassins d'aération montrent des variations d'un jour à l'autre pour les bassins 1, 2 et 4 où on remarque

des jours avec un déficit d'oxygène et d'autres avec excès. En revanche le bassin 3 est caractérisé, presque dans tous les jours du mois d'avril, par des valeurs élevées voire un excès d'oxygène dissous.

La carence d'oxygène dissous peut être due au dysfonctionnement du système d'aération par colmatage des diffuseurs d'aération à fines bulles, la défectuosité d'un compresseur ou encore l'arrêt total du système lié à la coupure temporaire d'électricité au niveau de la station. Ce déficit peut être aussi causé par la présence des bactéries filamenteuses dans les eaux ou à une surcharge en pollution organique. En revanche, certains jours montrent une concentration en O_2 relativement excessive et pourtant l'affluent est mal traité (démontré dans ce qui suit). Cela veut dire qu'il y a des fuites au niveau des rampes des aérateurs ce qui a généré des excès d'O_2 dissous et par conséquent des pertes d'énergie.

Le bassin n°3 montre un excès en O_2 dû au dysfonctionnement du système d'aération lié aux fuites. Pour remédier à ce problème, une intervention au niveau de ce bassin est menée, et on a eu l'opportunité d'assister à cette intervention au cours de notre stage au sein de la STEP. Le but a été de réparer le détachement des conduites d'air surpressé aux rampes d'aération, ainsi que le renouvellement de certains diffuseurs qui ne fonctionnent pas convenablement.

La première étape de l'intervention a consisté à vider le bassin concerné par pompage de l'eau qu'il contient vers l'autre bassin (photo 21). Cela a demandé quatre jours continus de pompage compte tenu du volume très important du bassin et qui est de l'ordre de 16 250 m³/j.

(a) (b) (c)

Photo 21 : Vidange du bassin 3 : (a) bassin rempli, (b) pompage de l'eau vers le bassin avoisinant et (c) bassin presque vide.

Le bassin n'est pas totalement vidé mais une certaine hauteur est laissée, et qui, en y introduisant l'air, permet de distinguer le lieu du problème.

(a) (b)

Photo 22 : (a) les diffuseurs introduisant l'air, (b) fuite au niveau d'une rampe d'aération liée à une conduite flexible.

Apres l'introduction de l'air, on a pu distinguer des diffuseurs colmatés ainsi que des fuites au niveau de certaines conduites. Donc, pour remédier au problème, les conduites ont été bien reliées aux rampes, et les diffuseurs colmatés ont été rechangés par de nouveaux diffuseurs.

Photo 23 : Réparation des fuites au niveau des rampes d'aération et changement de certains diffuseurs.

2.3. Paramètres analysés à l'entrée et la sortie du traitement secondaire

Le suivi de l'efficacité du traitement secondaire nécessite l'évaluation des différents paramètres des eaux à l'entré ainsi qu'à la sortie du traitement secondaire.

2.3.1. Demande en oxygène

La mesure de la demande en oxygène permet d'évaluer le contenu d'une eau en matières organiques biodégradables, donc son degré de pollution ou sa qualité (Djermakoye *In* : Hamaidi, 2012).

➢ Demande chimique en oxygène DCO

La DCO permet d'évaluer la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers de la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale (Rodier *In* : N'Diay, 2011).

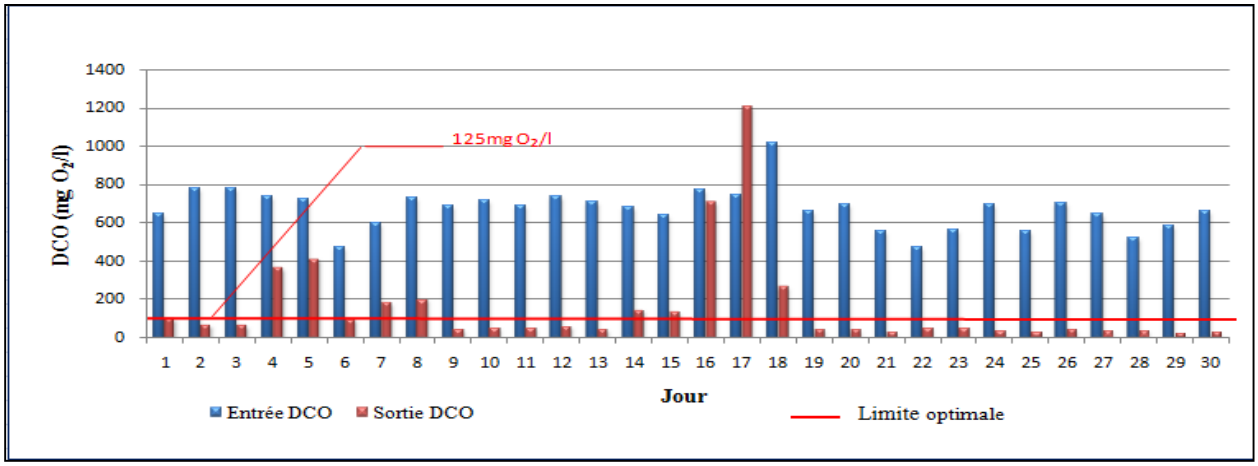


Fig. 27 : Evolution de la DCO à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire (avril 2013).

La figure 27 montre une oscillation de la concentration en DCO des eaux usées à l'entrée secondaire. La valeur minimale est celle du 6ème jour du mois d'avril et elle est de l'ordre de 471mg O2/l. Tandis que la valeur maximale est enregistrée le jour 18 et elle est égale à 1019 mg O_2/l soit une augmentation de 344 mg O_2/l par rapport à la moyenne (=675 mg O_2/l).

On remarque une diminution de la teneur du DCO des eaux à la sortie secondaire par rapport à l'entrée sauf pour le jour 17 du mois où la concentration en DCO à la sortie du traitement secondaire est supérieure de celle de l'entrée.

Les jours 1, 2, 3, 6, 9-13 et 19-30, on remarque des concentrations de sortie en DCO satisfaisantes puisqu'elles sont inférieures à la limite optimale. En revanche, pendant les jours 4, 5, 7, 8, 14, 15 et 18 la concentration de DCO dépasse légèrement la limite optimale de la sortie secondaire. Tandis que pendant les jours 16 et surtout 17 on remarque des valeurs extrêmement supérieures à la limite optimale.

Les concentrations importantes en DCO des eaux entrantes à la station sont expliquées par la présence d'une fraction des matières organiques non biodégradables dans l'effluent traité (Hamaidi, 2012).

Le faible abattement du DCO est dû à la perturbation du traitement biologique au niveau du bassin d'aération suite à l'entrée d'une partie des eaux chargées en éléments toxiques surtout le Cr VI, le Cu et les sulfures ce qui a provoqué une faible élimination de la matière polluante. Il

en résulte une surcharge de l'eau à la sortie secondaire en polluants organiques pendant ces jours.

➢ Demande biochimique en oxygène dans cinq jours DBO5

La DBO5 est une expression pour indiquer la quantité d'oxygène qui est utilisée pour la destruction de matières organiques décomposables par des processus biochimiques (Rodier *In* : N'DIAY, 2011).

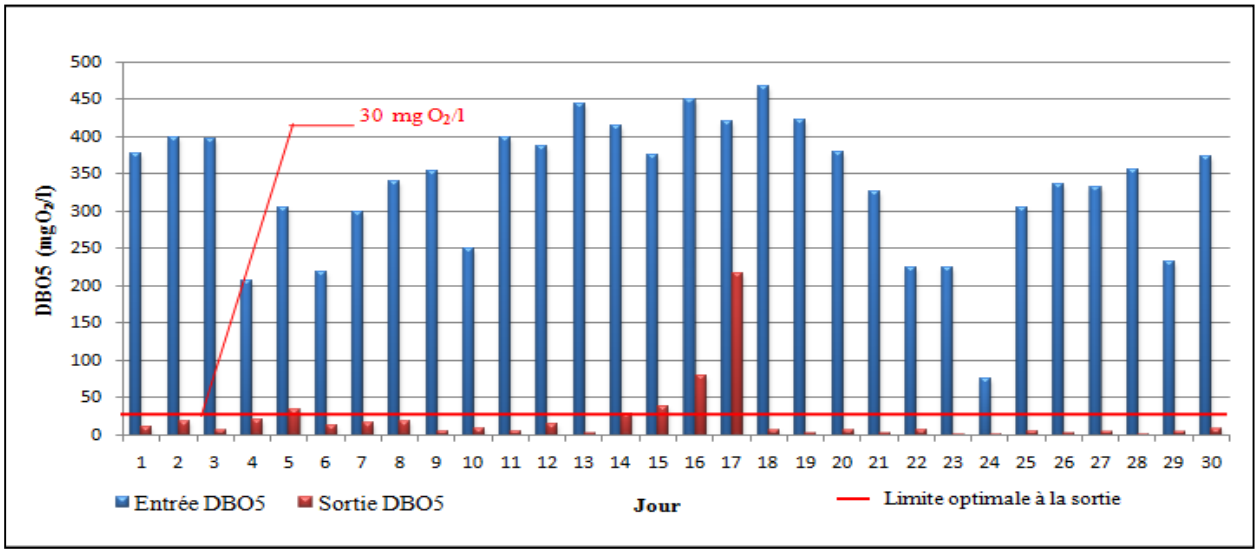


Fig. 28 : Evolution de la DBO5 à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire (avril 2013).

La figure 28 représente la variation de la DBO5 de l'eau à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire, notons que l'eau à l'entrée du traitement secondaire présente une DBO5 qui varie entre 76 et 467 mg d'O_2/l.

Par contre, la DBO5 présente une diminution importante de l'affluent de sortie secondaire avec des valeurs inférieures à la limite optimale de la sortie durant tout le mois d'avril sauf les deux jours 5, 15, 16 et 17 où la concentration en DBO5 dépasse cette limite avec une valeur maximale de l'ordre de 218 mg O_2/l.

Cette réduction dans les valeurs de la DBO5 est interprétée par l'activité des micro-organismes épurateurs qui assurent la dégradation et la transformation de la matière organique permettant donc l'élimination de la pollution organique, ainsi que le bon fonctionnement du clarificateur. Ce dernier assure une décantation efficace favorisant ainsi la sédimentation des boues responsables de l'élimination de la quasi-totalité de la DBO5 (Cardot In : Hamaidi, *2012).* Par contre, les valeurs élevées des deux jours 16 et 17 sont liées à la perturbation de cette activité suite à l'effet des éléments toxiques notamment le Cr VI prouvé par ses teneurs extrêmement fortes pendant ces deux jours (*cf* paragraphe 2.1.5 Chrome héxavalent).

➢ **Rapport DCO/DBO5**

Pour juger des chances de réussite de l'épuration d'eaux résiduaires par un procédé biologique, on se sert généralement du rapport DCO/DBO5 (Satin et Béchir, 1999).

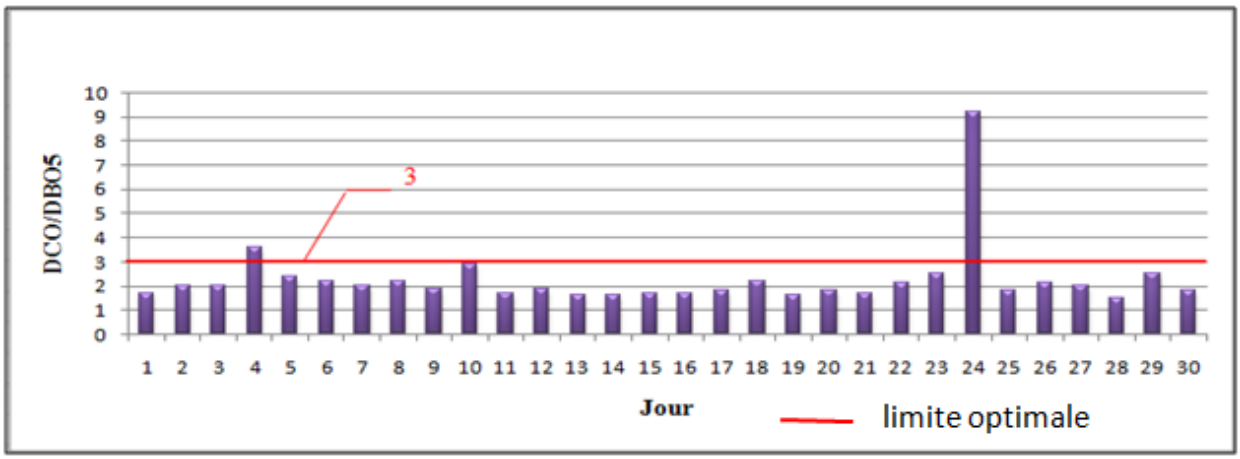


Fig. 29 : Evolution du rapport DCO/DBO5 à l'entrée du traitement primaire (avril 2013).

La figure 29 montre que le rapport DCO/DBO5 à l'entrée du traitement primaire oscille autour de 2,25. Ce rapport est inférieur à 3 qui est la valeur exigée par la RADEEMA et en dessous de laquelle les eaux usées doivent entrer, sauf pour le jour 4 et surtout le jour 24 où on remarque une augmentation importante de ce rapport et qui a pu atteindre 9,2 dans le jour 24.

Sur la base de ce rapport, le classement suivant est établi (Satin et Béchir, 1999) :

- DCO/DBO5 < 1.66 : eaux résiduaires susceptibles d'être facilement traitées biologiquement.

- 1.66 < DCO/DBO5 < 2.5 : eaux résiduaires susceptibles de subir un traitement biologique.

- 2.5 < DCO/DBO5 < 5 : eaux résiduaires non susceptibles de subir un traitement biologique.

Donc l'augmentation de ce rapport pendant les deux jours indique que l'on ait affaire à des composés peu ou difficilement biodégradables plutôt toxiques.

2.3.2. Matière en suspension MES

Les matières en suspension représentent l'ensemble des particules minérales et organiques non dissoutes contenues dans les eaux usées. Leurs effets sur les caractéristiques physicochimiques de l'eau sont très néfastes (modification de la turbidité des eaux, réduction de la pénétration de la lumière mettant en péril la photosynthèse) (EL Gouamri et Belghyti *In :* N'Diaye, 2011).

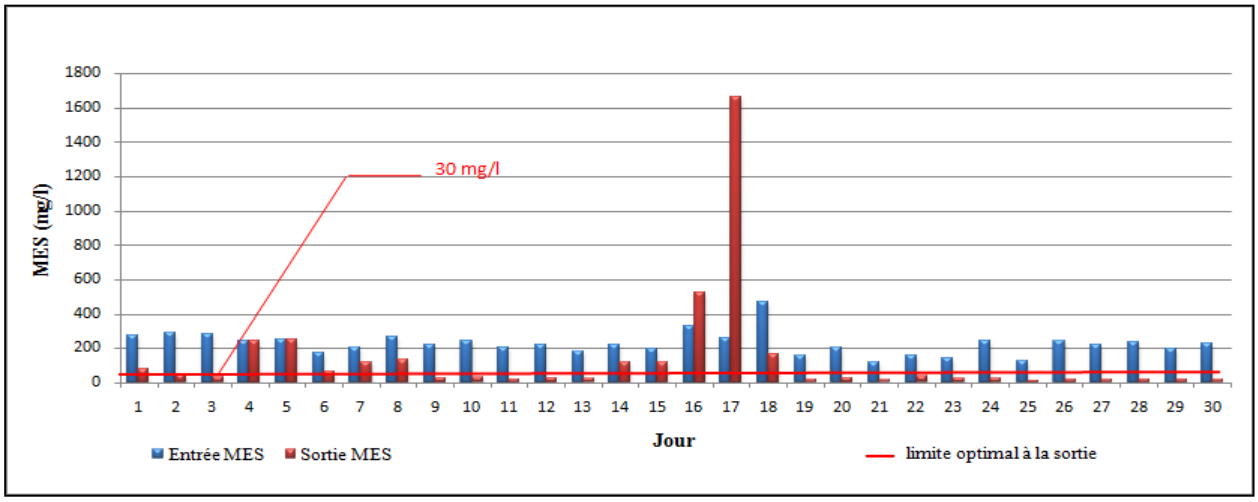


Fig. 30 : Evolution de la MES à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire (avril 2013).

Les valeurs des MES à l'entrée du traitement secondaire varient entre 116 et 470 mg/l. A la sortie de du traitement secondaire, on enregistre des valeurs des MES généralement en accord avec les normes fixées à un maximum de 30 mg/l. Cependant, on note des valeurs élevées en MES pour les jours 4, 5, 7, 8, 14, 15, 16, 17 et 18. Les pics sont enregistrés le 16 et le jour 17 jour.

La diminution importante de la teneur en MES dans les eaux traitées à la sortie du traitement secondaire par rapport à l'entrée permet un abattement moyen de 58%. Cette diminution est probablement due à au phénomène d'adsorption des matières en suspension sur les flocons biologiques d'une part et d'autre part, la bonne sédimentation au niveau du clarificateur.

Un excès de la MES est forcément lié au développement important des bactéries filamenteuses qui limite fortement les capacités hydrauliques du clarificateur et peut entraîner des départs de boue (Canler, 2004). Ce sont presque les mêmes jours où on a remarqué un dysfonctionnement au niveau du bassin d'aération lié à la toxicité (tableau 11).

Tab. 11 : Eléments toxiques entrants à la STEP dans les jours à fortes teneurs des eaux en MES à la sortie du traitement secondaire.

Jours à excès de MES	**4**	**5**	**7**	**8**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
Eléments toxiques entrants	Cr VI, Ni, Cu, Sulfures	Ni, Cu, Sulfures	Cr VI, Ni, Cu, Sulfures	Cu, Sulfure	Cr VI, Cu	Cr VI, Cu	Ni, Cu, Sulfures	Cr VI, Ni, Cu, Sulfures	Cr VI, Ni, Cu, Sulfures

Donc un affluent mal traité au niveau du bassin (à cause de la toxicité) ne va pas avoir une meilleure décantation au sein des clarificateurs.

2.3.3. Produits azotés

L'efficacité du traitement biologique de l'azote peut être évaluée par le dosage et le suivi des différentes formes de l'azote dans une eau résiduelle et dans l'affluent de sortie du traitement secondaire.

- **NTK**

L'azote total Kjeldahl (NTK) est une appellation qui désigne la somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique.

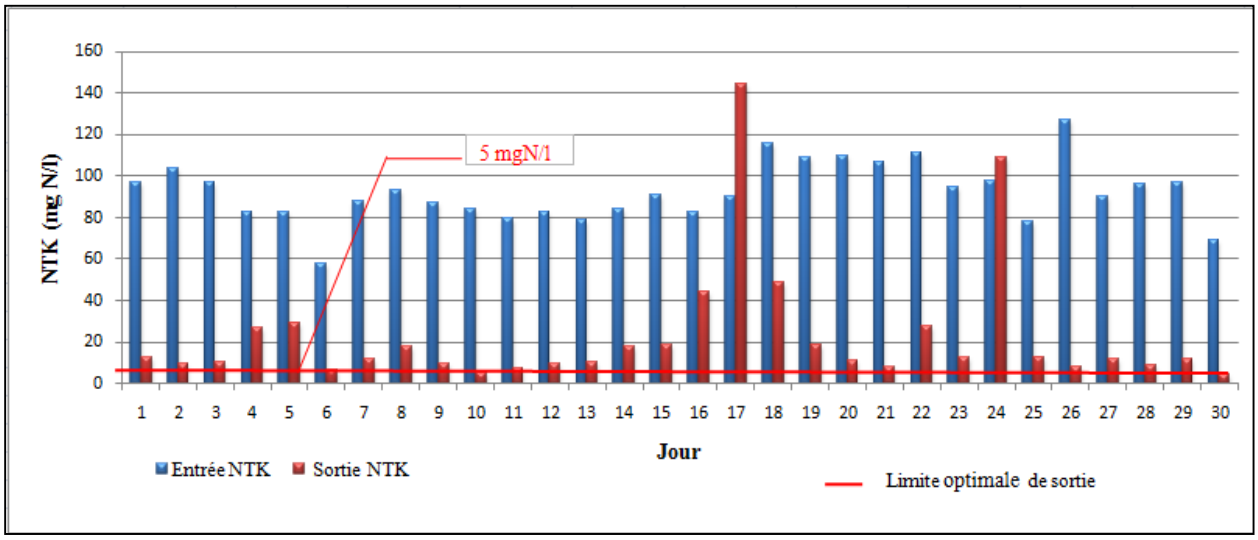


Fig. 31 : Evolution de la concentration journalière de NTK à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013).

Les résultats d'analyses du mois d'avril 2013 concernant l'NTK à l'entrée du traitement secondaire montrent des valeurs comprises entre 58 et 127 mg N/l avec une moyenne de 92mg mg N/l (figure 31).

Tandis qu'à la sortie secondaire, le NTK montre des valeurs supérieures à la limite optimale durant tous les jours du mois.

Les composés azotés mesurés par cette méthode proviennent principalement de la dégradation bactérienne des composés organiques de l'azote. L'industrie alimentaire, certaines industries de traitement des viandes non comestibles, les procédés de nettoyages industriels et l'épandage d'engrais sont aussi des sources importantes d'azote dans l'environnement.

Les concentrations en NTK des eaux à la sortie du traitement secondaire sont très élevées. Cela est dû au mauvais abattement de ce polluant au niveau des bassins d'aération. En effet, la nitrification au niveau du bassin n'a pas eu lieu convenablement surtout dans les jours coïncidant

avec l'entrée des métaux lourds ce qui a perturbé l'activité biologique des microorganismes nitrifiants.

- **NH4-N**

L'ion ammonium provient de la dégradation des protéines animales (cycle de l'azote), des effluents domestiques (urée) et des ruissellements urbains (Udert *In :* N'Diaye, 2011). Il correspond à la forme assimilable pour l'activité bactérienne nécessaire au traitement biologique.

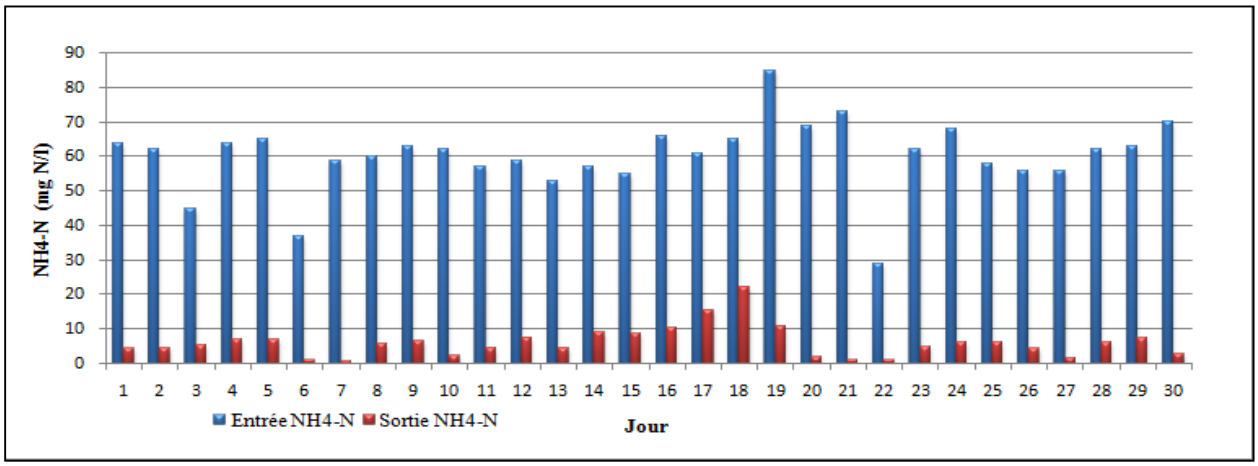


Fig. 32 : Evolution de la concentration moyenne journalière en NH_4^+ à l'entrée et la sortie secondaire en mois d'avril 2013.

La concentration en NH4-N à l'entrée du traitement secondaire révèle des valeurs comprises entre 29 et 85 mg N/l, alors qu'à la sortie, ces valeurs oscillent entre 1 et 23 mg N/l. avec une moyenne de 6,15 mg N/l (figure 32).

On constate que l'ammonium à la sortie du traitement secondaire est largement inférieur à celui à l'entrée comme le montre la figure 32. Le taux de diminution est important et il est de l'ordre de 90%. Cela est expliqué par l'utilisation de cet élément par les bactéries nitrifiantes pour le transformer en nitrites.

- **NO2-N**

Les nitrites sont le produit de la première étape de nitrification du cycle de l'azote. C'est une forme peu stable et leur présence en quantité significative est un indicateur de blocage de l'activité biologique (Canler, 2004).

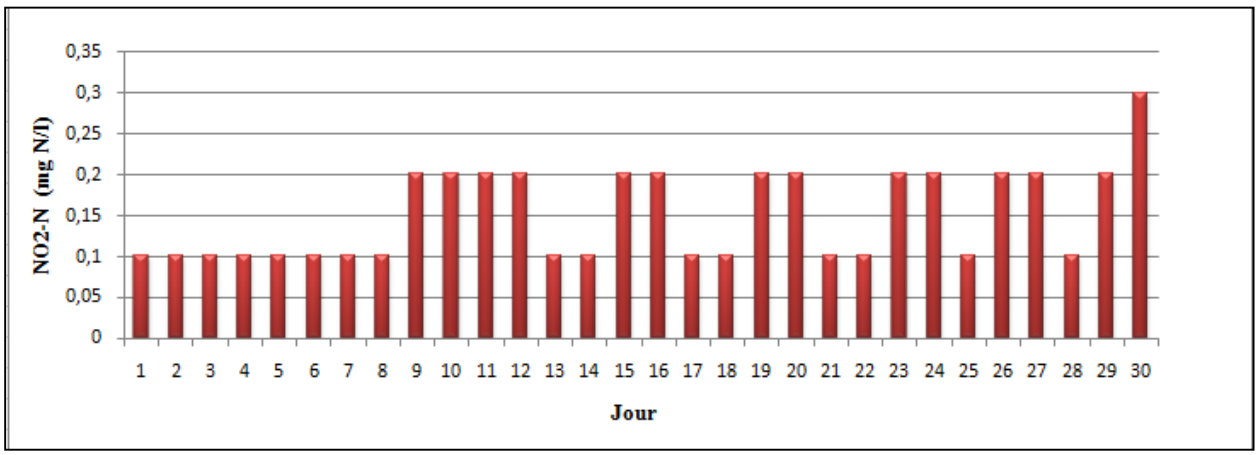


Fig. 33 : Evolution journalière de la concentration en NO_2 à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013).

L'analyse des nitrites ne s'effectue qu'à la sortie du traitement secondaire puisque les concentrations des eaux usées brutes en nitrites est négligeable voire nulle.

Les concentrations en nitrites des eaux à la sortie secondaire sont très faibles et elles varient entre 0,1mg N/l et 0,3 mg N/l (figure 33).

Les faibles concentrations en nitrites de l'affluent à la sortie du traitement secondaire, pourraient être expliquées par le fait que l'ion nitrite (NO_2^-) est un composé intermédiaire, instable en présence de l'oxygène, dont la concentration est généralement très inférieure à celle des deux formes qui lui sont liées, les ions nitrates et ammonium (Thomas *In* : N'Diaye, 2011).

- **NO3-N**

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote et la plus soluble. Ils sont le résultat de la deuxième étape de la nitrification.

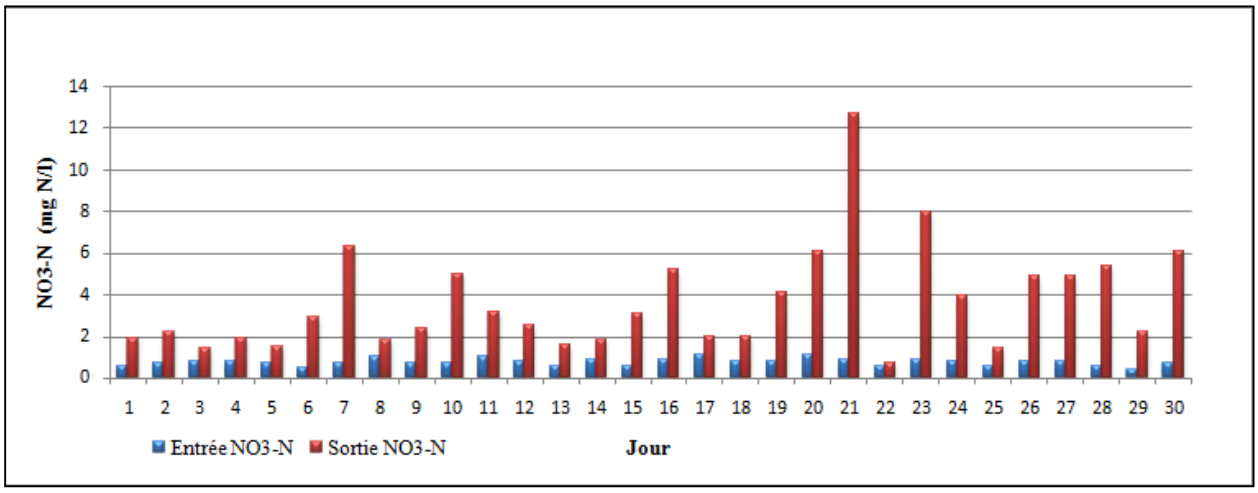


Fig. 34: Evolution journalière de la concentration en NO_3 à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013).

A l'entrée du traitement secondaire, les concentrations des eaux en NO3-N sont très faibles. Les valeurs sont presque stables dans les entourages de 0,8 mg N/l. En revanches les eaux sortant du traitement secondaire montrent des valeurs élevées dont la valeur maximale est de l'ordre de 12,7 mg N/l enregistrée le 21ème jour du mois d'avril.

L'augmentation de la concentration de l'affluent en nitrates à la sortie du traitement secondaire par rapport à l'entrée est expliquée par la nitrification effectuée par la biomasse nitrifiante des boues activées, ce qui entraîne la transformation des nitrites en nitrates.

Les fortes concentrations des nitrates à la sortie du traitement secondaire restent acceptables et conformes aux normes de l'OMS : 50mg/l.

2.3.4. Les produits phosphorés

- **Phosphore total (PT)**

Le PT représente le phosphore dans toutes ses formes : articulaire, dissous, organique et minéral. C'est un élément important dans le domaine de l'épuration des eaux usées. En effet, cet élément est responsable, lorsqu'il est rejeté dans le milieu naturel à trop forte concentration, du phénomène d'eutrophisation des eaux superficielles. L'eutrophisation est un processus naturel et très lent, par lequel les plans d'eau reçoivent une grande quantité d'éléments nutritifs (notamment du phosphore et de l'azote), ce qui stimule la croissance des algues et des plantes aquatiques. D'où la nécessité d'abattement de ce phosphore au niveau de la station.

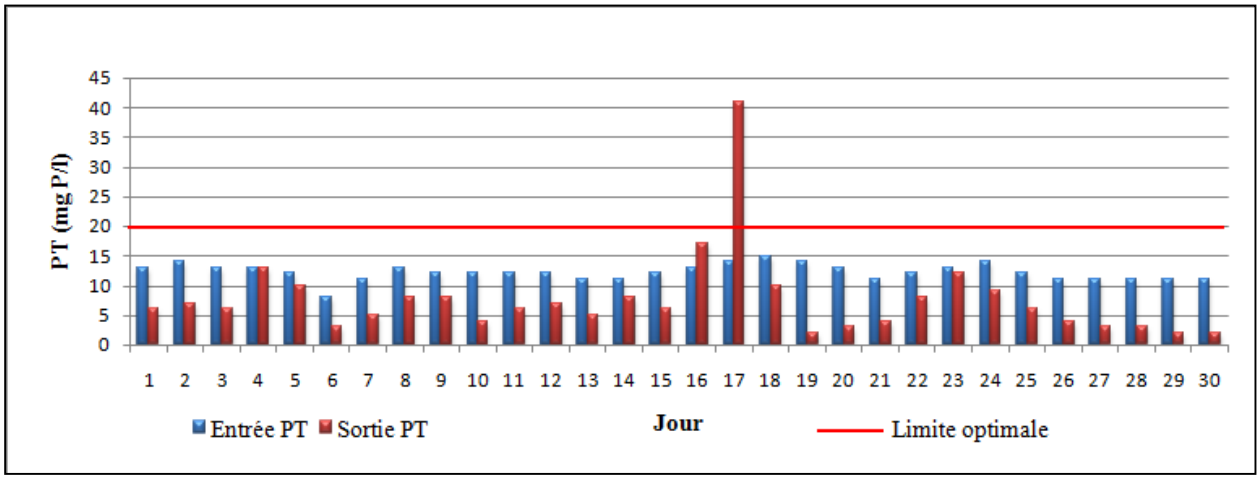


Fig. 35 : Evolution journalière de la concentration du PT à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013).

La concentration en phosphore à l'entrée du traitement secondaire révèle des valeurs comprises entre 8 et 15 mg P/l, alors qu'à la sortie, les valeurs oscillent entre 2 et 41 mg P/l avec

une moyenne de 7,6 mg P/l (figure 35). Les résultats paraissent satisfaisants par rapport aux normes (<20 mg/l) sauf pour le jour 17 où la concentration en PT est très élevée.

La diminution de la concentration en PT de la sortie par rapport à l'entrée du traitement secondaire est due à la transformation du PT en orthophosphate au niveau de ce traitement. Tandis que la teneur excessive en PT à la sortie du traitement secondaire peut être due à un rejet industriel, car cet élément est le plus souvent d'origine industrielle. Il est utilisé fréquemment dans les industries des détergents et des engrais, d'où la possibilité du déversement de ce polluant ce jour là par ces industries au niveau du réseau. Mais ce n'est pas le cas, puisque la concentration en PT à l'entrée du traitement secondaire est inférieure aux normes. Donc la contamination est au niveau du traitement secondaire. Cela est probablement aux dégâts entraînés par les substances toxiques dans cette période.

- **Orthophosphates PO4-P**

L'orthophosphate représente la forme minérale dominante du phosphore soluble dans l'eau. Il s'agit de la forme assimilable pour l'activité bactérienne.

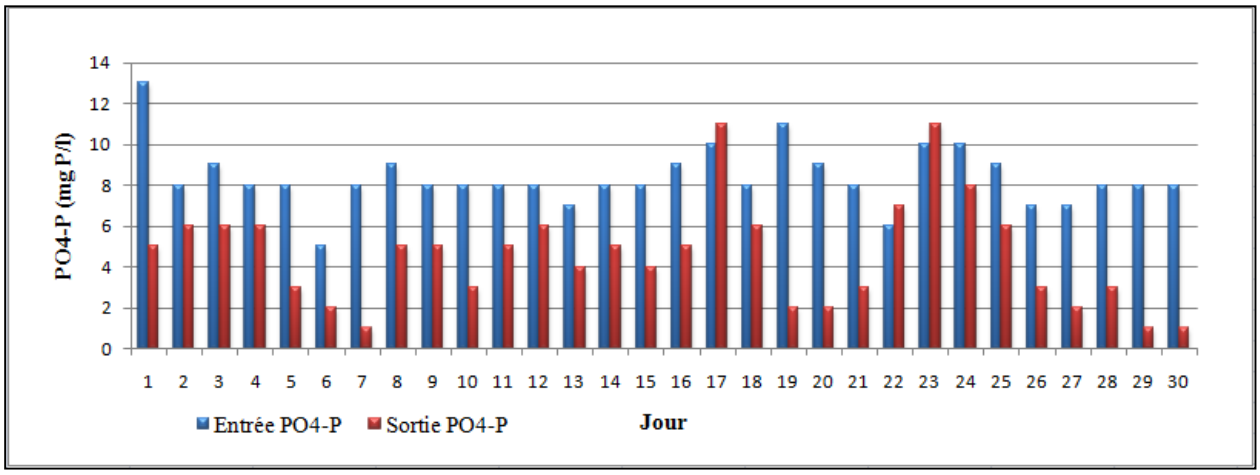


Fig. 36 : Evolution de la concentration moyenne journalière en PO4-P à l'entrée et la sortie secondaire (avril 2013).

La figure 36 révèle une fluctuation de la concentration des eaux en PO4-P à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire. La valeur maximale en PO4-P des eaux entrant au traitement secondaire est enregistrée le premier avril et elle est de l'ordre de 13 mg P/l. Tandis que le 6ème jour a connu la valeur minimale qui est égale à 5 mg P/l.

On remarque également le plus souvent une diminution des teneurs d'orthophosphate à la sortie du traitement secondaire par rapport à son entrée, sauf pour les jours 17, 22 et 23.

La diminution est liée à la déphosphatation réalisée par les microorganismes des boues activées. Par contre l'augmentation est également liée à la perturbation des bactéries permettant la déphosphatation par les composés toxiques.

2.3.5. Rapport du débit des boues recirculées sur débit d'eau sortant du traitement secondaire

Parmi les interventions menées pour le maintien du bon fonctionnement du bioréacteur au niveau de la STEP, on cite l'ajustement du taux de la boue recirculée du clarificateur vers le bassin d'aération. Pour comprendre la relation existante entre le taux de la boue recirculée et le débit d'eau sortant du traitement secondaire, la figure si dessous a été réalisée.

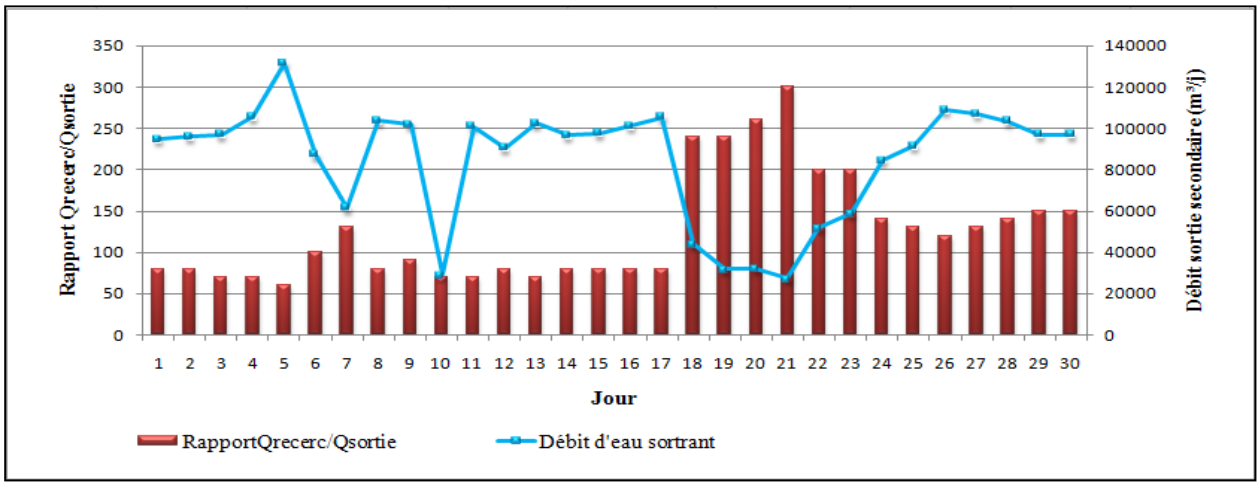


Fig. 37 : Evolution du rapport de débit des boues recirculées / débit des boues sortant du traitement secondaire en fonction des débits d'eaux à la sortie secondaire (Avril 2013).

On remarque que le rapport Qrecirc/Qsortie est inversement proportionnel au débit d'eau sortant du traitement secondaire (figure 37). Cela est clairement remarquable surtout dans le jour 7 et les jours du 18 au 25 où on remarque qu'une diminution du débit est accompagnée d'une augmentation du rapport.

Durant ce mois, la dégradation du traitement de l'azote est si importante qu'il a fallu combiner des augmentations au niveau de la recirculation de la liqueur mixte. Donc le rétablissement à des niveaux corrects des concentrations en NTK, DBO5 et en DCO a nécessité ainsi une élévation de la recirculation des boues.

Les bactéries épuratrices dans les bassins d'aération s'alimentent à partir des charges polluantes des eaux usées. Lorsque le débit entrant du bassin (et qui égal à celui sortant) est faible, c'est à dire que la charge polluante est aussi faible, d'où une quantité de nutriments moindre pour ces bactéries. C'est pour cela que la quantité de boue recirculée par rapport à celle sortant du clarificateur est augmentée afin d'enrichir le bassin.

Conclusions et recommandations

Au cours de cette étude, nous avons procédé à une évaluation des différents dysfonctionnements des bassins d'aération par appréciation de l'efficacité du traitement biologique par boues activées des eaux usées au niveau de la station d'épuration et de réutilisation de la ville de Marrakech. Au terme de ce travail, nous avons pu constater que les principaux problèmes parfois confrontés par la STEP de Marrakech sont : les problèmes d'aération, le foisonnement et moussage ainsi que le principal dysfonctionnement lié aux métaux lourds et aux éléments toxiques. Nous allons détailler ces problèmes dans notre discussion avec des solutions simples à adopter.

Après l'analyse et l'interprétation des différents paramètres des eaux à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire du mois d'avril 2013, les résultats obtenus permettent de conclure que :

Le traitement des eaux usées an niveau de la STEP de Marrakech durant le mois d'avril, présente une prestation peu satisfaisante, car il donne une élimination médiocre de la DCO, DBO5, MES et des NTK avec des rendements plus au moins acceptables surtout dans les jours où on a enregistré une entrée de toxicité.

La présence occasionnelle d'agents toxiques provoque souvent la lyse des cellules et donc la libération de polymères. En effet, les substances toxiques entraînent une perte de viabilité des micro-organismes puis leur lyse cellulaire. La lyse s'accompagne alors de la dégradation de l'ADN à l'intérieur des cellules et par conséquent la mortalité de la biomasse.

Les effets des substances toxiques sur la nitrification peuvent varier, en fonction de la nature et de la résistance du matériau. Les effets possibles sont la mort des bactéries nitrifiantes, la perte temporaire de nitrification avec la reprise des taux de nitrification normale après le retrait de l'inhibition, ou une diminution du taux de croissance des microorganismes de nitrification (Wang et Reed, 1983).

On peut déduire que le principal dysfonctionnement des bassins d'aération de la STEP de Marrakech est d'origine externe et il est lié à l'introduction de métaux lourds et d'éléments toxiques déversés par les unités industrielles dans le réseau collectif de la ville. Ces éléments nuisibles pour le bioréacteur, malgré les by-pass effectués lors de la détection de contamination, entrent en quantités faibles mais dangereuses et perturbent l'activité de la biomasse épuratrice et par conséquent engendrent un mauvais abattement de la pollution organique représentée essentiellement par l'azote, le DBO5 et le DCO. Cela influence la qualité de l'affluent à la sortie du traitement secondaire.

L'analyse de la concentration d'O_2 dissous dans les quatre bassins a permis de constater des problèmes des systèmes d'aération.

Les systèmes d'insufflation d'air en fines bulles (utilisés dans la STEP) équipant des bassins d'aération de taille et de géométrie variées connaissent depuis les années 90 un fort développement. Cependant, à ce jour, les performances du transfert d'oxygène prévues connaissent encore des perturbations liées à la réglementation du taux d'oxygénation et à la maintenance de ses différents équipements.

On a pu également constater que le foisonnement lié aux bactéries filamenteuses compte parmi les résultats des dysfonctionnements rencontrés au niveau des bassins d'aération ou les clarificateurs. Les causes sont bien souvent d'origines multiples (conception, exploitation, composition de l'effluent…). Le foisonnement entraîne une mauvaise décantation de la boue suite à une augmentation du volume occupé par celle-ci. Un développement filamenteux important limite fortement les capacités hydrauliques du clarificateur et peut entraîner des départs de boue dans le milieu naturel (Canler, 2004).

Les mousses sont aussi un problème biologique probable au niveau des stations à boues activées. Les mousses forment des amas de flottants très stables de couleur marron clair à foncé et de structure visqueuse. Leur densité tend à s'accroître progressivement au cours du temps.

Ces mousses sont peu déstructurées par une agitation de surface et reforment rapidement un tapis uniforme en absence d'agitation. Les bulles de gaz favorisent la flottation. Ces flottants constituent un milieu favorable au développement privilégié de certaines bactéries filamenteuses responsables du moussage.

Solutions adoptées pour réduire les dysfonctionnements des bassins d'aération de la STEP de Marrakech :

Au cours de notre stage, nous avons effectué des recherches générales sur les différentes solutions proposées par des experts et des chercheurs doctorants pour la lutte contre les principaux dysfonctionnements rencontrés au niveau des STEP. Et nous avons abouti aboutit aux résultats suivants.

- **Lutte contre le phénomène de moussage**

Toute situation visant à générer, à faciliter, à rendre permanente l'accumulation des flottants en surface des bassins est susceptible de provoquer ou d'aggraver le phénomène de moussage. En effet, dans ces milieux physiquement favorables au développement des filaments

hydrophobes, l'accumulation de flottants induit plus ou moins rapidement (selon l'état du milieu) une amorce de fermentation par hydrolyse acide qui va libérer des acides gras.

Ces environnements de surface sont de plus riches en tensio-actifs ou substances lipidiques (non ou mal dégradés). Toutes ces substances sont de nature à favoriser la croissance des filaments des mousses.

Donc pour faire face à ce phénomène, des traitements sont adoptés par la station :

- **La chloration** est le traitement le plus efficace. D'action rapide, elle doit cependant être renouvelée régulièrement tant que la cause biologique du phénomène de moussage n'a pas été éliminée.
- **L'ajout de réactifs chimiques** (anti-mousse, coagulant) est aussi un moyen efficace de lutte contre les mousses, mais ce type de traitement doit être maintenu en permanence.
- **La mise en place d'une zone de contact** permet de modifier le type de fonctionnement biologique. Ce traitement est donc fortement indiqué lorsque le moussage est dû à une charge massique trop faible, mais il faut attendre d'avoir modifié la nature de la biomasse (2 fois l'âge de boues) pour atteindre des résultats notables.

Le coût du traitement est modéré pour la chloration, du même ordre pour l'ajout de réactif chimique mais beaucoup plus onéreux pour les additifs biologiques. La mise en place de la zone de contact induit des coûts d'investissement, mais son coût de fonctionnement est faible (Duchene et Pujol *In* : Cailleux, 2001).

- **Moyens curatifs pour lutter contre les bactéries filamenteuses**

Deux techniques sont couramment utilisées, elles font appel soit à des agents toxiques (chlore et dérivés), soit à des agents floculants (sels de fer, chaux, ou autre floculants industriels).

- ✓ **Chloration**

Le chlore permet de détruire les organismes vivants, tels que les organismes filamenteux, gênant une bonne décantation des boues. Les filaments sont à la fois dans le liquide interstitiel et dans les flocons, ceux présents dans le liquide interstitiel sont très vulnérables vis à vis d'un oxydant. Par contre, les filaments cachés dans le floc sont moins touchés lors de la chloration et sont parfois à l'origine d'un réensemencement ultérieur. Les bords anguleux des flocons sont eux aussi attaqués, ils deviennent blanchâtres avant de disparaître. On observe la mort simultanée d'un grand nombre de protozoaires libres. La chloration doit donc être contrôlée et appliquée à des doses maîtrisées, sous peine de mettre hors service tous les micro-organismes réunis pour la

dégradation de l'eau usée (Pujol *In* : Cailleux, 2001). Le chlore utilisé est, en général, celui de l'eau de javel du commerce à 48° chlorométriques, donc sous forme liquide. Il est admis que le dosage doit être compris entre 2 et 6 g de $Cl_2.kg^{-1}$de MES/j. La dose ne doit pas dépasser 15 g de $Cl_2.kg^{-1}$ de Mes/j. Le nombre de points d'injection doit être multiplié pour rester dans une fourchette de concentration locale entre 4 et 20 mg de $Cl_2.l^{-1}$. Au point d'injection, l'agitation doit être maximale. Généralement, l'ajout de chlore s'effectue au débouché des conduites de recirculation, ou dans les dispositifs entre les bassins, voire directement dans le bassin d'aération. Habituellement on arrête la chloration dés que l'indice de boue (indice de Mohlman) chute en dessous de 200 mg/l. Souvent les effets du chlore se manifestent avec retard par rapport à l'injection. Il faut être prudent dans l'accroissement des doses mises en œuvre, et ne modifier les réglages qu'avec un pas de temps supérieur ou égal à deux jours (Cailleux, 2001).

- ✓ **agents floculants (Sels de fer et d'aluminium)**

- Ce sont des coagulants qui déchargent électriquement les colloïdes et permettent donc de rapprocher les particules et favorisent la décantation. Ils précipitent les phosphates et les sulfures dans les boues. En bloquant les sulfures de l'effluent brut ou des boues en anaérobiose, ces réactifs suppriment le substrat préférentiel de certaines bactéries filamenteuses (*Thiotrix*). Il se pourrait aussi qu'agissant sur la disponibilité du phosphore, les réactifs affectent le métabolisme et diminuent ainsi la résistance des bactéries filamenteuses à certains stress (Pujol *In* : Cailleux, 2001).

- **Adaptation de l'oxygénation**

Il est important d'avoir une bonne oxygénation, car le manque d'oxygène est souvent un facteur aggravant pour le foisonnement. S'il est relativement facile d'ajuster la teneur globale en oxygène dans le bassin, (il suffit d'agir sur quelques vannes pour augmenter ou diminuer le débit d'oxygène), il est plus difficile de détecter des zones d'anoxie locale. Il est important de pouvoir détecter ces zones où les aérateurs sont défectueux et les remettre en état. Des études ont été menées pour perfectionner le système d'aération de la STEP. Pour être le plus efficace, les bulles doivent avoir un rapport surface/volume le plus important possible, il faut donc produire de très petites bulles, car plus elles sont petites, plus le rapport est important. Pour remédier aux problèmes de colmatage des diffuseurs classiques, ce sont maintenant des diffuseurs avec une membrane hémiperméable qui sont mis en place. Lorsque l'aération est arrêtée, l'impossibilité de retour d'eau dans les canalisations d'adduction d'air limite les risques (Cailleux, 2001).

- **Actions préventives pour éviter les éléments toxiques**

Pour remédier à ce problème, des chercheurs se sont demandés s'il était possible de protéger les bactéries floculantes en les dotant de gènes de résistance aux métaux. Une équipe de Metz (Peignen et Manen *In :* Cailleux, 2001) a ensemencé de la boue avec une souche d'*Alcaligenes eutrophus* résistante aux métaux lourds. Le but était de voir si les gènes de résistance, localisés sur le plasmide, se transmettaient spontanément aux bactéries sensibles, malheureusement les résultats se sont révélés négatifs. Actuellement aucun moyen n'a été trouvé pour éviter les dégâts provoqués par l'action de produits toxiques sur les flocons. Le seul moyen de s'en prémunir est de leur interdire l'accès au réacteur biologique par les by-pass. Les grandes stations d'épuration qui fonctionnent sur plusieurs files de traitement parallèles peuvent se permettre d'en « sacrifier » une, qui servira de stockage si le toxique est détecté à temps. Une méthode consistant à créer un bassin de rétention aval peut parfois aussi être envisagée. Ces solutions restent coûteuses et sans grands résultats face au caractère imprévisible (et souvent nocturne) des rejets toxiques (Cailleux, 2001).

Donc on peut conclure que la solution définitive est de limiter les rejets industrielles dans le réseau d'assainissement de la ville de Marrakech par :

• la Poursuite de la réforme réglementaire: mise en œuvre des textes d'application de la loi 10-95 sur l'eau.

• l'application des réglementations suivantes :

- Tout déversement doit être soumis à une autorisation de déversement.

- Tout déversement doit être soumis au payement d'une redevance (pollueur-payeur).

Annexe 1

Résultats des analyses à l'entrée et à la sortie du traitement secondaire (Données de la STEP de Marrakech du mois d'avril 2013.

Date	Entrée traitement secondaire = eau décantée											
	Ph	DCO	DBO5	DCO/DBO5	MES	NGL	NTK	NH4-N	NO3-N	NO2-N	PT	PO4-P
		mg O2/l	mg O2/l		mg/l	mg N/l	mg N/l	mg N/l	mg N/l	mg N/l	mg P/l	mg P/l
Garantie												
Exigence												
1	7,7	652	378	1,7	274	97	97	64	0,6		13	13
2	7,8	785	400	2	286	105	104	62	0,7		14	8
3	7,8	785	397	2	280	98	97	45	0,8		13	9
4	7,9	739	208	3,6	242	84	83	64	0,8		13	8
5	7,9	728	306	2,4	252	84	83	65	0,7		12	8
6	7,8	471	219	2,2	174	59	58	37	0,5		8	5
7	8	599	299	2	202	88	88	59	0,7		11	8
8	7,8	736	340	2,2	267	94	93	60	1		13	9
9	7,9	692	355	1,9	222	87	87	63	0,7		12	8
10	7,8	721	250	2,9	242	85	84	62	0,7		12	8
11	8,1	691	399	1,7	204	81	80	57	1		12	8
12	8,1	737	388	1,9	222	84	83	59	0,8		12	8
13	8,2	710	445	1,6	180	80	79	53	0,6		11	7
14	7,6	681	414	1,6	222	85	84	57	0,9		11	8
15	7,9	644	376	1,7	196	92	91	55	0,6		12	8
16	7,7	778	450	1,7	330	84	83	66	0,9		13	9
17	7,8	749	420	1,8	258	91	90	61	1,1		14	10
18	7,9	1019	467	2,2	470	116	116	65	0,8		15	8
19	7,8	664	423	1,6	154	110	109	85	0,8		14	11
20	7,9	696	379	1,8	200	111	110	69	1,1		13	9
21	7,8	561	326	1,7	116	107	107	73	0,9		11	8
22	8,2	472	226	2,1	158	112	111	29	0,6		12	6
23	7,8	567	226	2,5	144	95	95	62	0,9		13	10
24	8	699	76	9,2	242	99	98	68	0,8		14	10
25	8	560	305	1,8	126	79	78	58	0,6		12	9
26	7,9	706	336	2,1	240	128	127	56	0,8		11	7
27	8	650	333	2	220	91	90	56	0,8		11	7
28	8,2	524	357	1,5	238	97	96	62	0,6		11	8
29	8,2	587	233	2,5	198	98	97	63	0,4		11	8
30	8,2	663	374	1,8	230	70	69	70	0,7		11	8

Date	Sortie traitement secondaire = eau clarifiée											
	Débit	DCO	DBO5	DCO/DBO5	MES	NGL	NTK	NH4-N	NO3-N	NO2-N	PT	PO4-P
	m3/j	mg O2/l	mg O2/l		mg/l	mg N/l	mg N/l	mg N/l	mg N/l	mg N/l	mg P/l	mg P/l
Garantie		<100	<20		<20	<15	<4				<17	
Exigence		<125	<30		<30	<20	<5				<20	
1	94653	105	12	8,8	77	15	12,9	4,4	1,9	0,1	6	5
2	95757	72	19	3,8	46	12	9,7	4,7	2,2	0,1	7	6
3	96826	67	7	9,4	31	12	10,3	5,4	1,4	0,1	6	6
4	105486	369	21	17,6	244	29	26,8	7,1	1,9	0,1	13	6
5	131280	416	35	11,9	252	31	29,1	6,9	1,5	0,1	10	3
6	87061	101	14	7,2	66	10	6,8	1,1	2,9	0,1	3	2
7	61374	187	17	11	119	19	12,2	1	6,3	0,1	5	1
8	103388	206	19	10,8	130	20	18,1	6	1,8	0,1	8	5
9	101729	47	6	8,1	26	12	9,9	6,6	2,4	0,2	8	5
10	28907	58	10	5,8	29	11	5,6	2,4	5	0,2	4	3
11	100737	57	6	10,3	20	11	7,7	4,6	3,2	0,2	6	5
12	90329	65	16	4,1	26	13	9,9	7,7	2,5	0,2	7	6
13	102245	49	3	15,4	22	12	10,3	4,5	1,6	0,1	5	4
14	96539	149	29	5,1	119	20	17,7	9,3	1,8	0,1	8	5
15	97485	137	40	3,4	120	22	18,8	8,7	3,1	0,2	6	4
16	100942	715	81	8,8	526	50	44,5	10,4	5,2	0,2	17	5
17	105138	1212	218	10,1	1664	146	144,1	15,7	2	0,1	41	11
18	43705	271	7	41,1	166	51	49,2	22,3	2	0,1	10	6
19	31485	48	3	15	18	23	18,9	11,1	4,1	0,2	2	2
20	31987	46	7	6,6	26	17	11,1	2	6,1	0,2	3	2
21	27256	35	3	11,4	16	21	7,9	1,1	12,7	0,1	4	3
22	51689	56	8	6,8	36	28	27,6	1,2	0,7	0,1	8	7
23	58518	58	1	41,3	24	21	13	4,8	8	0,2	12	11
24	84433	45	2	18,8	24	15	109	6,4	4	0,2	9	8
25	91326	36	6	6	12	15	13,1	6,3	1,4	0,1	6	6
26	108603	47	3	15,1	20	13	8,3	4,4	4,9	0,2	4	3
27	106823	40	5	8,5	18	17	12,2	1,8	4,9	0,2	3	2
28	103200	44	2	27,6	20	14	8,8	6,2	5,4	0,1	3	3
29	96724	27	5	5,5	19	14	11,7	7,4	2,2	0,2	2	1
30	96853	32	9	3,6	17	11	4,7	3,1	6,1	0,3	2	1

Résultats des analyses des eaux à l'entrée du traitement primaire (Données de la STEP de Marrakech du mois d'avril 2013).

Date	entrée traitement primaire = eau brute							
	débit (m3/j)	pH	T (C°)	cond µS/cm	Cr-6 mg/l	Sulfures mg/l	Cu mg/l	Ni mg/l
Garentie		5,5-8,5	<30		<0,2	<1	<2	<2
1	99030	8,0	23,5	2310	0,06	2,4	2,76	1,77
2	98582	7,8	23,4	3310	0,08	1,7	3,23	2,32
3	99632	7,8	23,3	3290	0,07	3	3,23	2,17
4	107636	7,9	23,1	3320	0,26	0,9	3,14	2,22
5	155452	8,0	21,6	3020	0,07	2,8	3,7	2,47
6	114065	7,8	22,3	2510	0,22	4,5	6,36	4,73
7	116924	7,9	19,9	2540	0,21	1,7	3,19	2,21
8	101106		23	3050	0,11	2,2	3,21	2,19
9	97939	7,8	23,1	2950	0,24	2,2	3,13	2,01
10	100822	7,7	23,2	2910	0,23	0,4	2,89	2,01
11	101953	8,1	23,5	2850	0,27	2,2	2,97	2,1
12	89125	8,1	23,8	2740	0,22	1,4	2,95	2
13	109475	8,1	23,9	3090	0,08	1	2,96	2,01
14	106078		24	2600	0,27	3,2	2,78	1,68
15	102985	7,9	24,3	2290	0,24	2,87	2,92	1,76
16	103811	7,6	24,4	3130	0,19	2,1	3,19	2,13
17	105037	7,8	24,6	3160	0,31	3,9	3,24	2,08
18	107911	7,8	24,8	3040	0,34	1,8	3,45	2,46
19	126047	7,8	23,7	2980	0,26	1	3,35	2,2
20	159306	7,8	24,8	2850	0,23	0,9	3,05	2,15
21	142866		25	2820	0,24	3	3,11	2,03
22	113749	7,9	25,4	2084	0,24	2,5	2,78	1,67
23	116369	7,9	25	2790	0,27	1,7	3,06	2,01
24	119894	7,9	24,9	2950	0,25	2,3	2,87	2,06
25	115901	7,9	25,1	2900	0,26	3	3,17	1,96
26	117177	8	25,2	2680	0,24	2	3,12	2,09
27	109876	8,1	25,3	2770	0,21	1,3	2,99	1,99
28	103619		25,2	2640	0,23	2,2	3,06	2,27
29	104123	8,3	24,9	2250	0,22	2,2	2,49	1,67
30	102491	8,2	24,7	2940	0,23	0,9	2,78	2,02
MOY	111632,7	7,9	24,0	2825,5	0,2	2,1	3,2	2,1
MIN	89125,0	7,6	19,9	2084,0	0,1	0,4	2,5	1,7
MAX	159306,0	8,3	25,4	3320,0	0,3	4,5	6,4	4,7

Résultats des analyses des eaux au niveau des bassins d'aération (Données de la STEP de Marrakech du mois d'avril 2013).

	Bassins biologiques			
	Oxygène dissous (mg O2/l)			
Date	Bassin 1	Bassin 2	Basin 3	Bassin 4
1	1,1	2,5	2,6	0,7
2	1,2	2,5	1,8	0,6
3	1,2	2,7	1,6	0,4
4	0,8	0,7	3,5	0,8
5	2,1	2,6	3,4	3,7
6	3,7	3,1	3,6	3,4
7	2,1	2,1	2,5	1,6
8	1,5	1,1	1,8	1,1
9	3,5	2,1	2,6	2,7
10	2,8	1,9	2,8	2,5
11	2,3	1,5	1,8	2,6
12	1,9	1,2	1,1	2,5
13	0,2	1,5	2,3	2,6
14	0,3	2	1,8	2,5
15	1,5	1,5	2,2	2,3
16	1,3	1,1	1,8	1,1
17	0,5	0,6	1,7	0,6
18	2,8	1,8	3,6	2,8
19	4	1,9	2,8	3,5
20	4	4,1	3,8	3,9
21	4	2	2,4	3,6
22	1,3	1,5	2,4	1,5
23	1,2	1,1	2,5	1,2
24	1,4	1,2	2,7	1,3
25	2	1,5	2,6	2,1
26	3,8	2,6	3,1	3,6
27	3	2,6	3,2	2,8
28	1,3	1,1	2,7	1,3
29	2,5	1,2	2,6	2,2
30	4,2	1,6	2,5	3,1

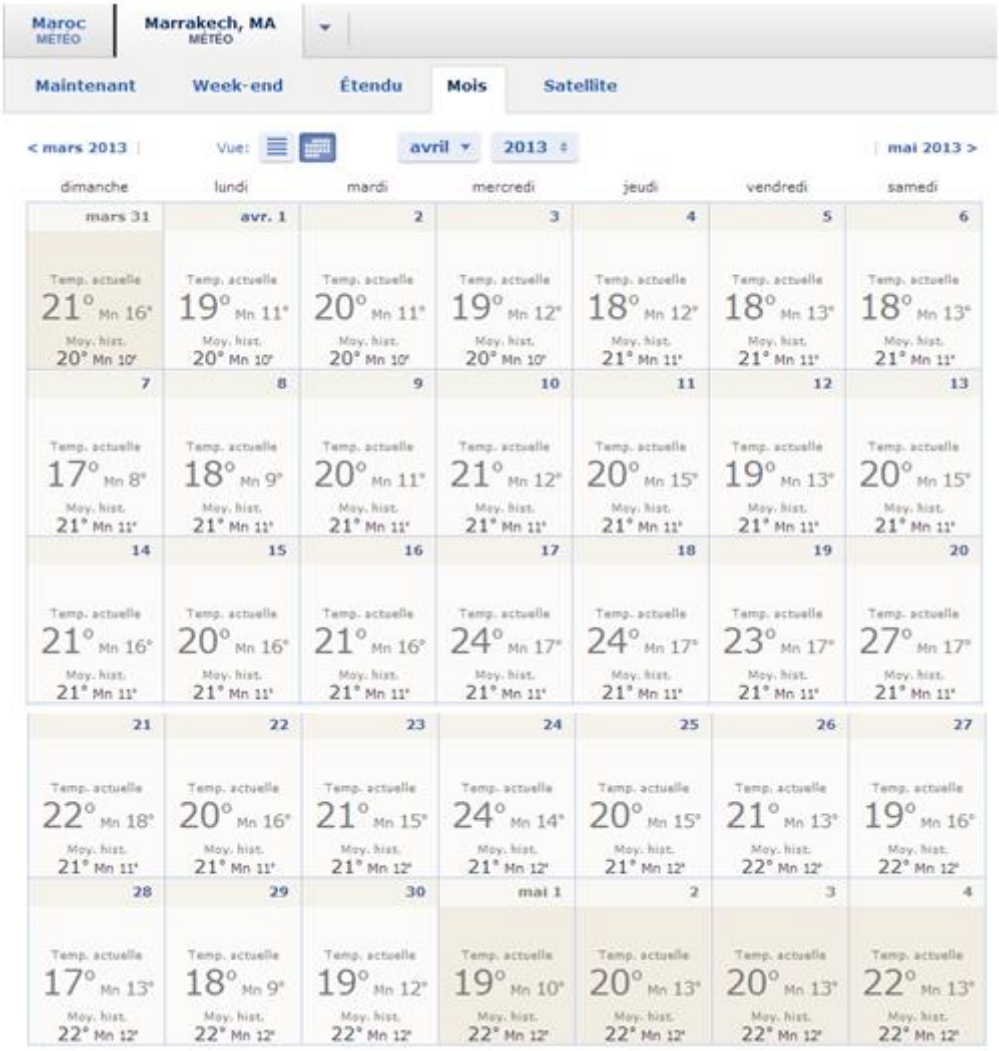
Annexe 2

Précipitations horaires journalières de Marrakech enregistrées durant le mois d'avril 2013 dans la station d'Agdal (données du Laboratoire Mixte international, IRD, Univ. Cadi ayyad).

	01/04/2013	02/04/2013	03/04/2013	04/04/2013	05/04/2013	06/04/2013	07/04/2013	08/04/2013	09/04/2013	10/04/2013	11/04/2013	12/04/2013	13/04/2013	14/04/2013	15/04/2013
00:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
00:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:30:00	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00:00	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:30:00	0	0	0	0,2	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00:00	0	0	0	0,1	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:30:00	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00:00	0	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:30:00	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:30:00	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00:00	0	0	0	0,1	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:30:00	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00:00	0	0	0	0,1	1,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08:30:00	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:30:00	0	0	0	0	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11:00:00	0	0	0	0	2,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11:30:00	0	0	0	0,1	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13:00:00	0	0	0	0	6,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13:30:00	0	0	0	0	1,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14:00:00	0	0	0	0	2,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15:30:00	0	0	0	0	1,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:30:00	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00:00	0	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:30:00	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16/04/2013	17/04/2013	18/04/2013	19/04/2013	20/04/2013	21/04/2013	22/04/2013	23/04/2013	24/04/2013	25/04/2013	26/04/2013	27/04/2013	28/04/2013	29/04/2013	30/04/2013
00:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
00:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
03:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
04:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
05:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
06:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
09:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00:00	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:30:00	0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:30:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Annexe 3

Température journalière de la ville de Marrakech durant le mois d'avril 2013 (www.accuweather.com/fr/ma/marrakech).



Maroc MÉTÉO | Marrakech, MA MÉTÉO

Maintenant | Week-end | Étendu | Mois | Satellite

< mars 2013 | Vue: | avril | 2013 | mai 2013 >

dimanche	lundi	mardi	mercredi	jeudi	vendredi	samedi
mars 31 Temp. actuelle 21° Mn 16° Moy. hist. 20° Mn 10°	avr. 1 Temp. actuelle 19° Mn 11° Moy. hist. 20° Mn 10°	2 Temp. actuelle 20° Mn 11° Moy. hist. 20° Mn 10°	3 Temp. actuelle 19° Mn 12° Moy. hist. 20° Mn 10°	4 Temp. actuelle 18° Mn 12° Moy. hist. 21° Mn 11°	5 Temp. actuelle 18° Mn 13° Moy. hist. 21° Mn 11°	6 Temp. actuelle 18° Mn 13° Moy. hist. 21° Mn 11°
7 Temp. actuelle 17° Mn 8° Moy. hist. 21° Mn 11°	8 Temp. actuelle 18° Mn 9° Moy. hist. 21° Mn 11°	9 Temp. actuelle 20° Mn 11° Moy. hist. 21° Mn 11°	10 Temp. actuelle 21° Mn 12° Moy. hist. 21° Mn 11°	11 Temp. actuelle 20° Mn 15° Moy. hist. 21° Mn 11°	12 Temp. actuelle 19° Mn 13° Moy. hist. 21° Mn 11°	13 Temp. actuelle 20° Mn 15° Moy. hist. 21° Mn 11°
14 Temp. actuelle 21° Mn 16° Moy. hist. 21° Mn 11°	15 Temp. actuelle 20° Mn 16° Moy. hist. 21° Mn 11°	16 Temp. actuelle 21° Mn 16° Moy. hist. 21° Mn 11°	17 Temp. actuelle 24° Mn 17° Moy. hist. 21° Mn 11°	18 Temp. actuelle 24° Mn 17° Moy. hist. 21° Mn 11°	19 Temp. actuelle 23° Mn 17° Moy. hist. 21° Mn 11°	20 Temp. actuelle 27° Mn 17° Moy. hist. 21° Mn 11°
21 Temp. actuelle 22° Mn 18° Moy. hist. 21° Mn 11°	22 Temp. actuelle 20° Mn 16° Moy. hist. 21° Mn 11°	23 Temp. actuelle 21° Mn 15° Moy. hist. 21° Mn 12°	24 Temp. actuelle 24° Mn 14° Moy. hist. 21° Mn 12°	25 Temp. actuelle 20° Mn 15° Moy. hist. 21° Mn 12°	26 Temp. actuelle 21° Mn 13° Moy. hist. 22° Mn 12°	27 Temp. actuelle 19° Mn 16° Moy. hist. 22° Mn 12°
28 Temp. actuelle 17° Mn 13° Moy. hist. 22° Mn 12°	29 Temp. actuelle 18° Mn 9° Moy. hist. 22° Mn 12°	30 Temp. actuelle 19° Mn 12° Moy. hist. 22° Mn 12°	mai 1 Temp. actuelle 19° Mn 10° Moy. hist. 22° Mn 12°	2 Temp. actuelle 20° Mn 13° Moy. hist. 22° Mn 12°	3 Temp. actuelle 20° Mn 13° Moy. hist. 22° Mn 12°	4 Temp. actuelle 22° Mn 13° Moy. hist. 22° Mn 12°

Annexe 4

Recueil de la loi n° 10-95 sur l'eau et de ses textes d'application, 2010.

Arrêté conjoint du ministre de l'intérieur, du ministre de l'aménagement du territoire, de l'eau et de l'environnement et du ministre de l'industrie, du commerce et de la mise à niveau de l'économie n° 1607-06 du 25 juillet 2006 portant fixation des valeurs limites spécifiques de rejet domestique.

Article premier : Les valeurs limites spécifiques de rejet visées à l'article 12 du décret n° 2-04-553 susvisé, applicables aux déversements d'eaux usées des agglomérations urbaines, sont fixées au tableau n° 1 annexé au présent arrêté.

Article 2 : Pour les déversements existants à la date de publication du présent arrêté, les valeurs limites spécifiques de rejet mentionnées à l'article premier ci-dessus, ne sont applicables qu'à compter de la onzième (11ème) année qui suit la date précitée.

Toutefois, pour ces déversements les valeurs limites spécifiques de rejet indiquées au tableau n° 2 annexé au présent arrêté sont applicables pendant la septième (7ème), la huitième (8ème), la neuvième (9ème) et la dixième (10ème) année à partir de la publication du présent arrêté.

Article 3 : Les caractéristiques physiques et chimiques des déversements sont conformes aux valeurs limites spécifiques de rejet lorsque pour chacun des paramètres :

- au moins dix (10) échantillons sur douze (12) échantillons présentent des valeurs confor-mes aux valeurs limites spécifiques de rejet ;
- les échantillons restants présentent des valeurs ne dépassant pas les valeurs limites spécifiques de rejet de plus de 25%.

Article 4 : La conformité des caractéristiques physiques et chimiques du déversement aux valeurs limites spécifiques de rejet, est appréciée sur la base d'au moins douze (12) échantillons composites de vingt quatre (24) heures prélevés à intervalles réguliers pendant la première année, et quatre (4) échantillons composites de vingt quatre (24) heures prélevés à intervalles réguliers durant les années suivantes, si les résultats des analyses des échantillons prélevés la première année montrent que les caractéristiques du déversement sont conformes aux valeurs limites spécifiques de rejet. Si l'un des quatre (4) échantillons présente des valeurs ne satisfaisant pas les valeurs limites spécifiques de rejet, douze (12) échantillons sont prélevés l'année suivante.

Au sens du présent arrêté, on entend par échantillon composite tout mélange de façon intermittente ou continue en proportions adéquates d'au moins six échantillons ou parties d'échantillons et dont peut être obtenue la valeur moyenne du paramètre désiré.

Article 5 : Les échantillons prélevés lors des inondations, des pollutions accidentelles ou des catastrophes naturelles ne sont pas pris en considération pour l'appréciation de la conformité des caractéristiques physiques et chimiques du déversement.

Article 6 : Les caractéristiques physiques et chimiques des déversements sont déterminées conformément aux normes d'essai, d'analyse et d'échantillonnage en vigueur.

Article 7 : Le présent arrêté conjoint est publié au *Bulletin Officiel.*

Valeurs limites spécifiques de rejet applicables aux déversements d'eaux usées des agglomérations urbaines		Valeurs limites spécifiques de rejet domestique applicables aux déversements existants d'eaux usées des agglomérations urbaines pendant la septième (7ème), la huitième (8ème), la neuvième (9ème) et la dixième (10ème) année à partir de la publication du présent arrêté	
Paramètres	**Valeurs limites spécifiques de rejet domestique**	**Paramètres**	**Valeurs limites spécifiques de rejet domestique**
DBO5 mg O_2/1	120	DBO5 mg O_2/1	300
DCO mg O_2/1	250	DCO mg O_2/1	600
MES mg/l	150	MES mg/1	250

MES = Matières en suspension.
DBO5 = Demande biochimique en oxygène durant cinq (5) jours.
DCO =Demande chimique en oxygène.

Annexe 5

Ordres de grandeur des paramètres de pollution de quelques activités industrielles au Maroc (Jaouher, 2009).

Activité	Conserverie légumes et fruits	Boisson non alcoolisées	Conserverie d'olives	Abattoirs	Conserverie de poisson	Huile d'olive	Peinture, vernis, laques et colorants	Tanneries
pH	7,58	8	8,4	7	7	5		
T C	15,3	28	20,4	26	26			
Cond (µS/cm)	496	1550	23540	2450	63524			
DBO_5 (mg/l)	33	540	1042	3727	6517	42000	1159	2819
DCO (mg/l)	144	623	10314	11032	10604	160000	11549	7279
MES (mg/l)	206	425	1681	3302	2182	11000	18951	3124
Huiles et graisses (mg/l)						2000		
Zn(mg/l)							0.86	0.4
Pb (mg/l)							0.19	0.45
Cu (mg/l)							0.16	0.08
As (mg/l)							0.04	
Cr (mg/l)								34

Bibliographie

Aubry G., (2003) - Enlèvement de l'azote des eaux usées par un procédé à culture fixée immergée. Mémoire pour l'obtention du grade de maitrises sciences, Faculté des Sciences et de Génie Université Laval du Québec, 147 p..

Cailleux G., (2001) - L'épuration biologique: fonctionnements et dysfonctionnements. Mémoire, Faculté Sciences, Université Picardie Jules Verne, 63 p..

Canler J.P, (2004) - Dysfonctionnements biologiques des stations d'épuration : Origines et solutions. Document technique FNDAE n° 33, Ministre de l'Agriculture et de la Pèche de Paris, 123 p..

Cirad, (2004) - Analyse d'eaux et d'eaux usées. Fiche technique, Laboratoire d'analyse Département Persyst, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, 3 p..

Cochet A., Hazan R., Monition L., (1965) - Le Haouz de Marrakech bassin représentatif d'une zone aride au contact d'une haute chaine montagneuse : le haut atlas de climat subhumide. Publication n°66, Service des Ressources en Eau Rabat, 564-569 p..

Couillard, (1991) - Contrôle adaptif du procédé à boues activées. Rapport scientifique N° 347, Institut National de la Recherche Scientifique Université du Québec, 56 p..

Debrieu C., (2004) - Lutte contre les odeurs de l'assainissement. Document technique FNDAE n° 13, Ministre de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pèche et des Affaires Rurales de Saint-Cyr-sur-Mer, 69p..

Dhaouadi H., (2008) - Traitement des eaux usées urbaines, les procédés biologiques d'épuration. Thèse, Université Virtuelle de Tunis, 34 p..

El horre K., (2009) - Le projet d'assainissement de la RADEEMA et la problématique environnementale. Mémoire, FST de Marrakech, 51 p..

Fathi N., (2010) – Diagnostic du réseau d'assainissement de la ville de Marrakech : Rejet direct des eaux dans le milieu naturel. Mémoire de fin d'études, Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, 65 p..

Fragkoulis D., (2008) - Détection et localisation des défauts provenant des actionneurs et des capteurs : application sur un système non linéaire. Thèse, Université de Toulouse III -Paul Sabatier, 160 p..

Gestion du domaine public hydraulique, Recueil de la loi n° 10-95 sur l'eau et de ses textes d'application, Applicables dans la zone d'action de l'Agence du bassin hydraulique de la Moulouya (2010). Royaume du Maroc Agence du basin hydraulique de la Moulouya, 126 p..

Hamaidi F., Zahraoui R., Kais H., (2012) - Epuration des eaux usées domestiques par les boues activées : Etude de la performance d'une STEP dans la wilaya de Médéa (Nord Ouest de l'Algérie).Document scientifique, Université Saad Dahlab Blida, vol 4, 16 p..

Jaouher T., (2009) – Gestion des eaux industrielles au Maroc. Document technique, Département de l'eau Maroc Agadir, 27 p..

LDK ECO SA, (2006) - Soutien à la DG Environnement pour la mise au point de l'Initiative de Dépollution de la Méditerranée «Horizon 2020». Rapport de bilan des activités en cours et achevées, Grèce, 236 p..

Louvet JN., (2007) - Etude des variations en oxygène dissous rencontrées dans les systèmes d'aération en épuration des eaux et mise au point d'un réacteur de type scale-down. Mémoire de Master, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, 68p..

N'Diaye A., Baidy LO., Ibno namir Kh., (2011) - Etude de la qualité physicochimique des eaux usées brutes de la ville de Nouakchott. Document scientifique, Institut National de Recherches en Santé Publique de Nouakchott, vol. 3, 13p..

OMS., (1989) - Technical Report Series. Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture. Rapport d'un Groupe Scientifique de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), Genève, 74 p..

Pandolfi D., (2006) -Caractérisation morphologique et physiologique de la biomasse des boues activées par analyse d'images. Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, 165 p..

Pujol R, (1990) - Guide technique sur le foisonnement des boues activées. document technique, Ministre de l'agriculture et de la Foret, Direction de l'Espace Rural et de la Foret, 57 P..

RADEEMA, (2008) - Le grand projet de traitement et de réutilisation des eaux usées de Marrakech. Brochure, 24 p..

RADEEMA, (2011) - Réalisation de la deuxième phase et exploitation de la station d'épuration. Manuel d'opération, 169 p..

Satin M., Béchir S., (1999) - Guide technique de l'assainissement, 2ème édition, Edition Le Moniteur, Paris, 680 p..

Schimper Wp., (1848) - Recherche sur les mousses. Thèse de Botanique, Faculté des Sciences de Strasbourg, 92 p..

Tixier N., (2003) - Approche des propriétés rhéologiques de suspensions biologiques floculées. Thèse, Université de Limoges, 160p..

Wang W., Reed P., (1983) - Nitrobacter as an indicator of toxicity in wastwaer. SWS Contract Report 326, Department of Energy and Natural Resources Illinois, 29 p..

WATERLEAU, (2011) - Réalisation de la deuxième phase et exploitation de la station d'épuration des eaux usées de Marrakech. Notice de fonctionnement, Analyse fonctionnelle, Marrakech, 204 p..

Web bibliographie :

www.accuweather.com/fr/ma/marrakech
www.choix-assainissement.org
https://gisbiostep.cemagref.fr
www.Google maps .com
http://www.isiimm.agropolis.org
www.SIAEPA.com