



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



Mémoire de Fin d'Études
Licence Sciences et Techniques en
« Eau et Environnement »
Intitulé :

Performances du traitement
tertiaire et problématique
de la prolifération des
algues dans les bassins
golfiques de la ville de
Marrakech

Réalisé par :



BOUKOUTA ABDESSAMAD et SARA BOUGHDADI

Encadrés par :

Mr. BISSI Y. : Chef de division de la STEP – Marrakech

Mr. AL MANSOURE T. : Chef de service de la STEP - Marrakech

Mr. BENKADDOUR A. : Professeur à Faculté des Sciences et Techniques – Marrakech

Devant le jury composé de :

Pr. HANICH : Faculté des Sciences et Techniques - Marrakech

Année universitaire : 2016/2017

Remerciement

Au terme de ce travail, qui a été réalisé au sein de la STEP, il nous tient à cœur de dire merci à Dieu qui est notre premier stimulateur et d'exprimer notre gratitude à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à son élaboration.

Nous exprimons nos vives gratitudees à notre encadrant
Mr.BENKADDOUR

, professeur à la FST de Marrakech pour ses conseils et renseignements, pour sa disponibilité et pour avoir accepté de nous encadrer.

Nos profonds remerciements, le corps professoral et administratif de la Faculté des sciences et technique de Marrakech, pour leur dévouement

à améliorer la qualité de notre formation ,surtout le département de science de la terre.

En premier lieu, nous voulons remercier le chef de division STEP et réutilisation Mr. BISSI Yassine notre encadrant au sein de la STEP, pour son soutien et ses encouragements.Plus spécialement, nos remerciements s'adressent à Mr. AL MANSOUR Tarik chef de service traitement des eaux pluviaux STEP et Mme KARIMA Benazouz , chef de laboratoire de contrôle de qualité , d'avoir pu nous faire profiter de leurs expériences, leur grande patience et disponibilité à notre égard. En effet, sans leurs conseils constructifs, nous n'aurions pas pu mener à bien notre stage.

Nous remercions extrêmement Mr. M. DRIOUCH Abdelouahid , Mr. Chekkraoui MONCEF, Mr KARIM Er-raysouny et Mr HAFID El briny ,Techniciens de la RADEEMA pour leur générosité et leur bienveillance.

Pour terminer, nous tenons aussi à remercier les stagiaires présents lors de notre étude pour leur aide, ainsi que la bonne ambiance de travail. Nous nous adressons ainsi à Meryem Tahri, Abdessamad Lahdili, Ismail...., Chakib Chelligui, ainsi que tout ceux ayant contribué à notre projet d'étude.

Dédicaces :

A toute nos familles, pour leurs éducation, leurs patience, leurs énormes sacrifices à nous offrir une vie pleine de joie et d'amour, leurs soutiens et encouragements ; que Dieu les gardent.

Liste des abréviations :

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

STEP : Station de Traitement des Eaux Polluées

PNA : Programme National d'Assainissement

PE : Polyélectrolyte

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

UV : Ultra-violet

DBO₅ : Demande Biologique en Oxygène en Cinq jours

DCO : Demande Chimique en Oxygène

NGL : L'azote global

NTK : L'azote Kjeldah

MES : Matière En Suspension

Cd : Cadmium

NO₃⁻ : Nitrate

NO₂⁻ : Nitrite

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme de la RADEEMA (RADEEMA, 2014)	4
Figure 2 : Vue générale de la STEP	7
Figure3 : Différents types des dégrilleurs	8
Figure 4 : Évacuation de déchets vers les bennes de décharge	9
Figure 5 : Élimination du sable et de la graisse	9
Figure 6 : Élimination du sable par filtration	10
Figure 7 : Décanteur primaire	10
Figure 8 : Coupe longitudinal d'un décanteur primaire	11
Figure 9 : Bassin d'aération (bassin biologique)	12
Figure 10 : Clarificateur de la STEP de Marrakech	12
Figure11 : Coagulation-Floculation	15
Figure 12 : Filtre à sable	15
Figure12 : Désinfection par ultra-violet	16
Figure 13 : Chloration de l'eau à la sortie du tertiaire	16
Fig : 14 Chaine de traitement des boues	17
Figure 15 : Coupe longitudinal d'un digesteur anaérobie	18
Figure16 : Composition moyenne du biogaz	20
Figure 17 : Désulfuriseur de la STEP de Marrakech	20
Figure 18 : Deux cogénérateurs de la STEP de Marrakech	20
Figure 19 : Stockeur de gaz de la STEP de Marrakech (gazomètre)	21
Figure 20 : Torchères de la STEP de Marrakech	21
Figure 21 : Phénomène d'eutrophisation dans le lac du golf ARGANA	26
Figure 22 : Évolution du pourcentage de germination des différentes variétés de graines irriguées avec les deux qualités d'eau : eau de puits et eau épurée (MOUHANNI et .al, 2014)	27
Figure 23 : Kit commercialisée pour analyser le chrome	29
Figure 24 : Protocole expérimental de la DBO₅ (méthode manométrique)	30
Figure 25 : Dispositif de la détermination de la (MES). a) Balance .b) Dessiccateur c) Filtrateur	31
Figure 26 : Dispositif de la filtration bactériologique	34
Figure 27 : Variations de la DCO des mois Avril/Mai 2017	36
Figure 28 : Variations de la DBO₅ des mois Avril/Mai	36
Figure 29 : Évolution des concentrations en MES des mois avril et mai 2017	37

<u>Figure 30 : Variations de la concentration en NGL des mois Avril/Mai 2017.....</u>	<u>37</u>
<u>Figure 31 : Variations de la concentration en Pt des mois Avril/Mai 2017.....</u>	<u>38</u>
<u>Figure 32 : Processus d'eutrophisation (Site web : 1).....</u>	<u>40</u>
<u>Figure 33 : Image de cyanobactéries dans le golf City Palace.....</u>	<u>42</u>
<u>Figure 34 : Vue microscopique de Hydrodictyon (Laplace-treuture et al, 2014).....</u>	<u>47</u>
<u>Figure35 : MOUGEOTIA dans le lac du golf Cherifia.....</u>	<u>48</u>
<u>Figure36 : Vue microscopique de <i>Mougeotia</i> (C. laplace-treuture et al, 2014).....</u>	<u>48</u>
<u>Figure 37 : Vue microscopique de Spirogyra.....</u>	<u>49</u>
<u>Figure 38 : SPIROGYRA dans le lac du golf ARGANA.....</u>	<u>50</u>
<u>Figure 39 : SPIROGYRA après la mort (golf City Palace).....</u>	<u>50</u>
<u>Figure 40 : Schéma de la filtration en masse (site web : 2).....</u>	<u>52</u>
<u>Figure 41 : Photo d'un bassin couvert par un géomembrane (Site web : 3).....</u>	<u>53</u>
<u>Figure 42 : Schéma du dispositif de filtration proposé.....</u>	<u>54</u>
<u>Figure 43 : Différents types d'aération : a) Aération hypolimnique, b) Aération par destratification dans le golf city palace.....</u>	<u>55</u>
<u>Figure 44 : Dragage des algues en France (site web : 4).....</u>	<u>56</u>
<u>Figure 45 : Exemples de poissons qui peuvent se nourrir sur les algues (Site web : 5)....</u>	<u>57</u>

LISTES DES TABLEAUX

<u>Tableau 1 : Différents composés de la STEP</u>	<u>7</u>
<u>Tableau 2 : Dimensionnement des coagulateurs (RADEEMA, 2008)</u>	<u>13</u>
<u>Tableau 3 : Dimensionnement des flocculateurs (RADEEMA, 2008).....</u>	<u>14</u>
<u>Tableau 4 : Normes du rejet dans les eaux superficielles ou souterraine (Bulletin officiel, 2013)</u>	<u>23</u>
<u>Tableau 5 : Normes marocains d'irrigation selon (Bulletin officiel, 2002)</u>	<u>24</u>
<u>Tableau 6 : Consommation en eau usée épurée par les golfs de Marrakech durant l'année 2016 (RADEEMA, 2016)</u>	<u>28</u>
<u>Tableau 7 : Résultat du traitement tertiaire pendant un mois</u>	<u>35</u>
<u>Tableau 8 : Résultats des analyses des eaux provenant de 4 golfs échantillonnées le 20/05/2017</u>	<u>39</u>

Table de matière

Partie 1 : Cadre général de la STEP

Introduction générale :	2
I. Présentation de la RADEEMA	3
I Assainissement :	5
À l'échelle	
1. national	5
1.1 Problèmes d'assainissement dans le domaine urbain :	5
1.2 Problèmes d'assainissement dans le domaine rural	5
1.3 Efforts du royaume dans le domaine d'assainissement :	5
2. A l'échelle de Marrakech :	5
II. Présentation de STEP :	6
1. Situation géographique de la station	6
2. Choix du site :	6
4. Différentes composantes de la STEP	7
5. Étapes de traitement et d'épuration des eaux usées dans la STEP Marrakech	8
5.1 Filière eau :	8
5.1.1 Prétraitement :	8
5-1-2 Traitement primaire :	10
5.1.3 Traitement secondaire :	11
5-1-4 Traitement tertiaire :	13
5.2 Filière boue	17
5.2.1 Origine des boues	17
5.2.1 Étapes du traitement de la boue :	17
5.2.1.1 Épaississement :	17
5.2.1.2 Digestion (méthanisation) :	18
5.2.1.3 Stokage de la boue :	19
5.2.1.4 Déshydratation :	19
5.2.1.5 Décharge :	19
5.3 Filière de biogaz :	19
5.4 Filière de désodorisation :	21
III. Normes marocain sur l'eau :	22
1. Normes du rejet dans les eaux superficielles ou souterraines	22
2. Normes marocain d'irrigation :	24

Partie 2 : Problématique de la prolifération des algues dans les bassins golfsiques de Marrakech.

I. Problématique étudiée et les raisons du choix du sujet :	26
II. Intérêt de la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation des gazons des golfs :	27
1. Raisons de construire une structure golfsique	28
2. Terrains du golf au niveau de Marrakech	28
III Matériels et méthode :	29
1. Présentation de laboratoire de contrôle de la RADEEMA :	29
2. Paramètres de pollution des eaux usées :	30
2.1 DBO₅ : Demande biochimique en oxygène	30
2.2 : Demande chimique en oxygène DCO	30
2.3 Matières en suspension (MES)	31
2.4 Composés chimiques et métaux lourds	31
2.5 Analyses bactériologiques :	33
3. Étude de performance du traitement tertiaire :	34
3.1 Caractérisation des eaux usées épurées à la sortie du traitement tertiaire :	34
3.2 Caractérisation des eaux usées épurées à l'entrée des golfs et dans les bassins de stockage.	38
IV. Impact négatif de la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation des golfs	40
1. Phénomène d'eutrophisation	40
2. Prolifération des algues au niveau des bassins des golfs alimentée par des eaux épurées de la STEP de Marrakech.	41
2.1 Source des éléments nutritifs au niveau de la STEP.	41
2.2 Causes de l'eutrophisation dans les bassins des golfs :	41
2.3 Effets d'eutrophisation sur les golfs :	42
V. Généralité sur les algues :	43
1. Définition :	43
2. Role des algues.	44
3. Composition des algues.	44
4. Conditions habitationnelles.	45
5. Photosynthèse :	45
VI. Identification de quelques algues existantes dans les bassins des golfs :	46
1. Genre : <i>Hydrodictyon</i>	46
2. Genre : <i>Mougeotia</i>	47

3. Genre : Spirogyra	49
<u>VII. Solutions proposées pour freiner la prolifération des algues dans les bassins golfiques.</u>	50
1. <u>Solutions chimiques :</u>	51
<u>1.1 Élimination du phosphore.</u>	51
<u>1.2 Élimination de l'azote.</u>	51
<u>1.3 Inhibition par le cuivre.</u>	51
2. <u>Solution physique:</u>	52
<u>2.1 Filtration en masse.</u>	52
<u>2.3 Abri de la lumière et de l'atmosphère.</u>	53
<u>2.4 Utilisation des filtres.</u>	53
<u>2.5 Aération des bassins :</u>	54
<u>2.6 Dragage des étangs.</u>	55
<u>2.7 Vidanges partielles.</u>	56
3. <u>Solutions biologiques :</u>	56
<u>3.1 Élimination des algues par le daphnie.</u>	56
<u>3.2 Élimination des macros algues par les poissons et les tortues.</u>	57
<u>VIII. Conclusion :</u>	58

Partie 1 :
Cadre général de la
station d'épuration
de la ville de
Marrakech (STEP)



Introduction générale :

L'accroissement démographique et l'urbanisation que connaît le Maroc actuel engendrent une utilisation importante en eau qui se trouve par la suite, dans la plupart des cas, polluée et rejetée dans la nature sans traitement.

C'est dans ce sens que la régie autonome de distribution de l'eau de Marrakech a pensé à se doter de sa propre station d'épuration permettant la recharge de la nappe phréatique et même fournir une ressource renouvelable en eau avec un potentiel de 33 millions m³/ an qui couvrent 85% de la demande en eau des golfs de la ville.

Les eaux usées traitées par la station et livrés aux golfs sont stockées, dans la plupart des cas, dans des géo-membranes, exposées au soleil et à l'atmosphère, les eaux usées étant d'origine principalement domestiques chargées en azote et en phosphore, connaissent une prolifération algale assez conséquente qui nuit à l'aspect esthétique des golfs, dégage de mauvaises odeurs et colmate les systèmes d'aspersion. La demande imprévisible de l'eau de la part des golfs ainsi que leurs habitudes d'utilisations inconnues rend la modélisation du problème une tâche assez délicate et approximative.

Le présent rapport apporte une étude amplement détaillée du problème de prolifération algale au niveau des géo-membranes en partant d'une modélisation mathématique du problème, la caractérisation de l'origine des différents problèmes liés au développement d'algues et de bio-film, puis la proposition de plusieurs solutions envisageables avant en plus d'un choix de la solution à adopter pour chaque bassin tenant en considération le degré d'efficacité qu'il exige et le coût de la solution.

I. Présentation de la RADEEMA

1. Historique :

Le 27 juin 1922 : La création de la Société d'Électricité de Marrakech (SEM) qui avait pour tâche d'assurer la distribution d'électricité au sein de la ville de Marrakech. L'eau potable était distribuée par la Municipalité. •**Le 17 juillet 1964** : la ville de Marrakech a signé un protocole pour le rachat de la concession, laquelle fut confiée à la Société Marocaine de Distribution (SMD) . •**Le 26 Décembre 1970** : suite aux délibérations du conseil communal de la ville de Marrakech, il a été décidé de créer à partir du premier janvier 1971, la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Électricité de Marrakech, dénommée RADEEMA et ce en vertu du Décret n° 2-64-394 du 29 Septembre 1964 relatif aux Régies communales.

•**Le premier janvier 1998** : la RADEEMA a pris en charge la gestion du service de l'assainissement liquide suite aux délibérations de la communauté urbaine de Marrakech. •**Le 09 Juillet 2010** : la RADEEMA est passée au contrôle d'accompagnement en substitution du contrôle préalable conformément aux dispositions de l'article 18 de la loi 69.00. Actuellement, la régie s'occupe de la distribution de l'énergie électrique, la distribution de l'eau potable notamment la gestion du réseau d'assainissement liquide dans le périmètre de la ville de Marrakech.

2. Activités et le plan d'action de la RADEEMA :

La RADEEMA assure la distribution d'eau et d'électricité et la gestion du service d'assainissement liquide au sein de la ville de Marrakech. Les trois métiers couvrent une zone d'action de 24 000 ha et une population d'environ 950 000 habitants.

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 et la bonne gestion des services assurés.

La RADEEMA participe à la protection de l'environnement, des eaux superficielles, des nappes d'eau souterraines, d'améliorer la situation des espaces naturels et de minimiser les risques de contamination par les maladies transmissibles par les eaux usées non traitées ainsi que les mauvaises odeurs.

3. Organigramme LA RADEEMA :

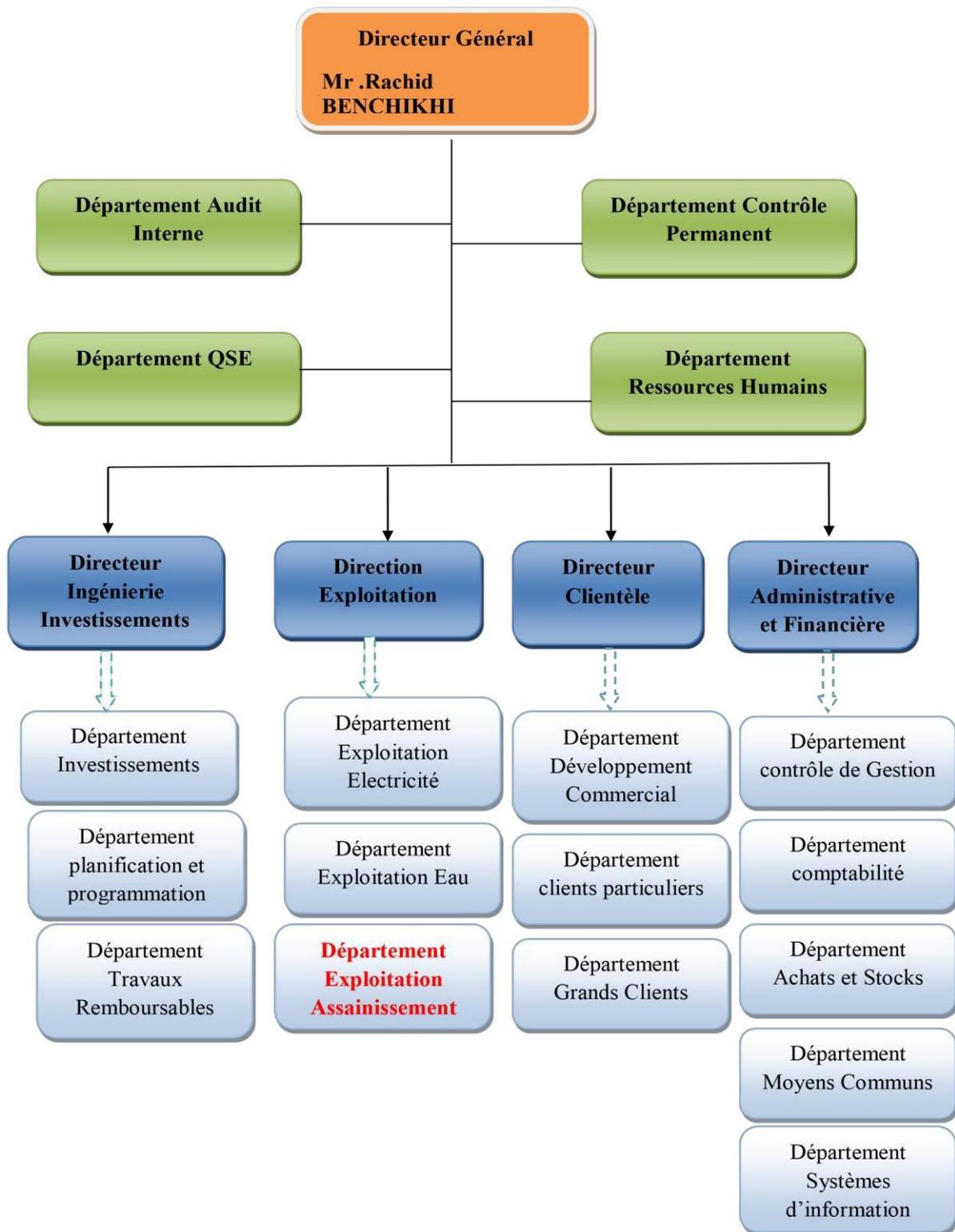


Figure 1 : Organigramme de la RADEEMA (RADEEMA, 2014)

II. Assainissement :

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

1. À l'échelle national

1.1 Problèmes d'assainissement dans le domaine urbain :

Au Maroc, la pénurie des ressources en eau est aggravée par la détérioration de leur qualité sous l'effet des rejets polluants liquides. Tandis que les écosystèmes naturels sont menacés par les inondations et l'érosion des sols. Les problèmes d'assainissement liquide et pluvial affectent, en premier lieu, l'environnement urbain où la population des quartiers pauvres les supporte plutôt mieux que le manque d'eau potable. Cependant, ces problèmes donnent un mauvais cachet aux villes où les règles d'urbanisme ne sont pas respectées. Généralement, il n'y a pas de correspondance entre le développement de l'habitat et l'expansion de l'infrastructure d'assainissement liquide et pluvial.

1.2 Problèmes d'assainissement dans le domaine rural

A travers son programme de Généralisation de l'Eau Potable, le Maroc réalise actuellement d'importants efforts pour augmenter les services d'eau potable dans le secteur rural. Ces efforts visent cependant en priorité à fournir l'accès à l'eau potable, laissant la question de l'assainissement en suspens. L'histoire récente de l'assainissement au Maroc est marquée par une approche abordant en priorité les problèmes posés par l'assainissement *urbain*. Si elle peut s'expliquer sans peine par la quantité des eaux usées produites et leur impact, cette approche a cependant marginalisé la question de l'assainissement en milieu rural, en particulier dans les douars.

1.3 Efforts du royaume dans le domaine d'assainissement :

Le Royaume du Maroc a engagé depuis 10 ans un ambitieux programme national d'assainissement (PNA) qui vise à l'améliorer la qualité de vie des citoyens marocains et à protéger l'environnement. Dans le contexte de stress hydrique que connaît le pays, ce programme constitue également une composante importante de la stratégie nationale d'adaptation aux changements climatiques. D'importants progrès ont déjà été obtenus depuis le lancement de ce programme : le taux de raccordement des citoyens atteint désormais 73 % et le taux d'épuration 36 %, alors qu'il n'était que 8 % il y a 10 ans. Mais les efforts doivent encore être accrus pour atteindre les objectifs fixés pour 2020 : un taux de raccordement de 80 % et un taux d'épuration de 60 %.

2. A l'échelle de Marrakech :

La ville de Marrakech est dotée d'un réseau d'assainissement collectif de deux types : Unitaires et pseudo-séparatifs. Le mode pseudo-séparatif est adopté dans la zone industrielle, sidi Ghanemme, la zone M'hamid et les zones équipés après 1998. Le taux de raccordement unitaires de la population au réseau d'assainissement en 2006 est de 86%.

Le linéaire total du réseau d'assainissement existant en 2006 s'élève à environ **1 494 km** de diamètre variant de 200 mm à 2 000 mm pour les sections circulaires. Actuellement le réseau d'assainissement est de 2750 km de longueur (RADEEMA, 2016).

II. Présentation de STEP :

1. Situation géographique de la station

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.

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

2. Choix du site :

Le choix du site est motivé, par sa côte la plus basse qui permet la collecte et le transport gravitaire des eaux usées, et 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 de grilles.

Aussi le choix du site est lié à la proximité de l'oued TANSIFT pour l'évacuation de l'eau, et l'existence des conditions géotechniques favorables liées à la dureté du sol et du sous sol ainsi il se caractérise par une stabilité géologique.

3. Objectif de la station d'épuration

- Élimination des rejets dans le milieu naturel d'eau usée à l'état brute.
- Sauvegarde des ressources en eau.
- Élimination des nuisances olfactives.
- Réduction des émissions des gaz à effets de serre.
- Économie de l'eau par l'usage d'une ressource alternative.
- Mobilisation de 33 millions de m³ d'eau pour l'irrigation des espaces verts sauvegarde des ressources en eau conventionnelles.
- La Protection des ressources contre la pollution.

4. Différentes composantes de la STEP

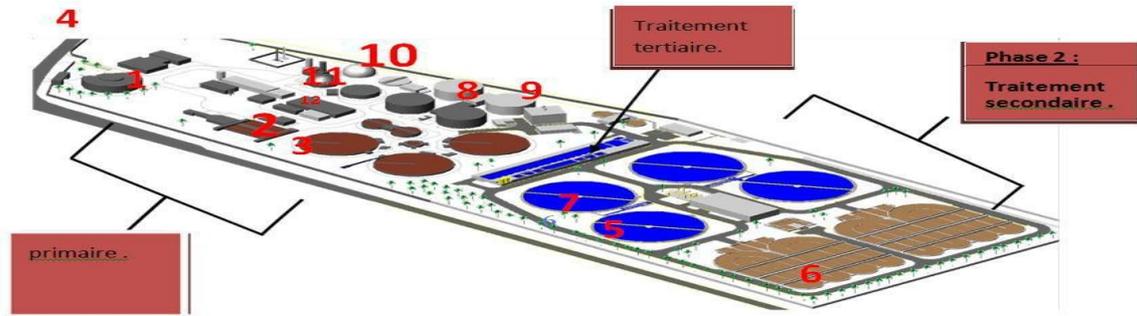


Figure 2 : Vue générale de la STEP

1	Bâtiment administratif
2	*Dégrillage
3	*Dessablage et déshuilage
4	*Décanteur circulaire gravitaire 1
5	*Décanteur 2
6	*Bassin biologique
7	*Coagulation-floculation ; *Dessablage ; *désinfection UV ; *Injection de Chlore.
8	*Épaississeur
9	*Digesteur
10	*Gazomètre
11	*Torçère
12	*Déshydratation de la boue

Tableau 1 : Différents composés de la STEP .

5. Etapes de traitement et d'épuration des eaux usées dans la STEP Marrakech

Le traitement des eaux usées au niveau de STEP de Marrakech se déroule suivant quatre filière : (Filière eau, boue, biogaz et désodorisation)

5.1 Filière eau :

5.1.1 Prétraitement :

Le prétraitement a pour mission de protéger les étapes ultérieures de traitement contre les risques de débouchage et d'abrasion ou causer des dommages aux équipements, s'ils ne sont pas éliminés. Ces opérations sont : le dégrillage, le dessablage et le dégraissage (figure 1 ,tableau 1) .

a)Dégrillage :

A l'entrée de l'ouvrage de prétraitement, il y a une *fosse à bâtards* de volume 4,5 m³ qui sert à piéger les corps grossiers afin d'alléger la pression sur les éléments en aval. Où son curage est fait manuellement par un opérateur à l'aide d'un *grappin*. Permet d'éliminer les gros déchets (morceau de bois, partie d'arbre...).

Le dégrillage est classé en trois catégories selon l'écartement entre barreaux de grille

200 mm



Figure3 : Différents types des dégrilleurs

Les déchets récupérés par les grilles sont évacués vers la benne menue d'une vis spirale qui permet de pousser les ordures vers les bacs de décharges (fig : 4)



Figure 4 : Evacuation de déchets vers les bennes de décharge

b) Dessablage dégraissage

Le dessablage : Il a pour but d'extraire des eaux brutes les graviers, les sables et les particules minérales plus ou moins fines, de façon à éviter les dépôts dans les canaux et conduites, à protéger les pompes et autres appareils contre l'abrasion et à éviter de surcharger les stades de traitements suivants.(fig. : 5,6,)

Le dégraissage/déshuilage: est une opération de séparation liquide-liquide pour éliminer la présence des corps gras dans les eaux usées, qui peuvent gêner l'efficacité du traitement biologique..

Le dessaleur et déshuileur enlèvera, sable l'huile et les graisses de l'eau usée. Un dessaleur & déshuileur a deux zones, séparées l'une de l'autre par un rideau composé de bandes :

- **Une zone aérée** : où le sable est lavé et capturé dans une gouttière au fond .
- **Une zone non-aérée et calme** : où l'huile et les graisses sont capturées à la surface. Les sables et graisses peuvent formées une mince couche autour du flocon de boue, de sorte que la diffusion de l'oxygène et de composés organiques dans le flocon sont inhibés(fig : 5)



Figure 5 : Élimination du sable et de la graisse.



Figure 6 : Élimination du sable par filtration

5-1-2 Traitement primaire :

Le traitement primaire consiste en une décantation primaire. Les eaux prétraitées sont acheminées vers le répartiteur afin de les distribuer de manière égale entre les 3 décanteurs (de 39 m de diamètre, d'une capacité de 3 500 m³ chacun). La capacité totale des décanteurs est de 12000 m³. Le temps de séjour est de 2 h 30 mn. Les décanteurs vont, par gravitation, séparer l'eau de la matière en suspension (>1,5 mm). À l'issue de l'unité de décantation primaire, il y a trois sorties : eaux traitées, boues primaires et graisses. Les eaux traitées passent par un chenal de sortie (*Venturi*) avant d'être déchargées vers la deuxième étape. Rendement épuratoire : 66 % pour MES et 33 % pour DBO₅. Le décanteur est de type circulaire-conique au fond de pente 15° (fig : 7,8).



Figure 7 : Décanteur primaire.

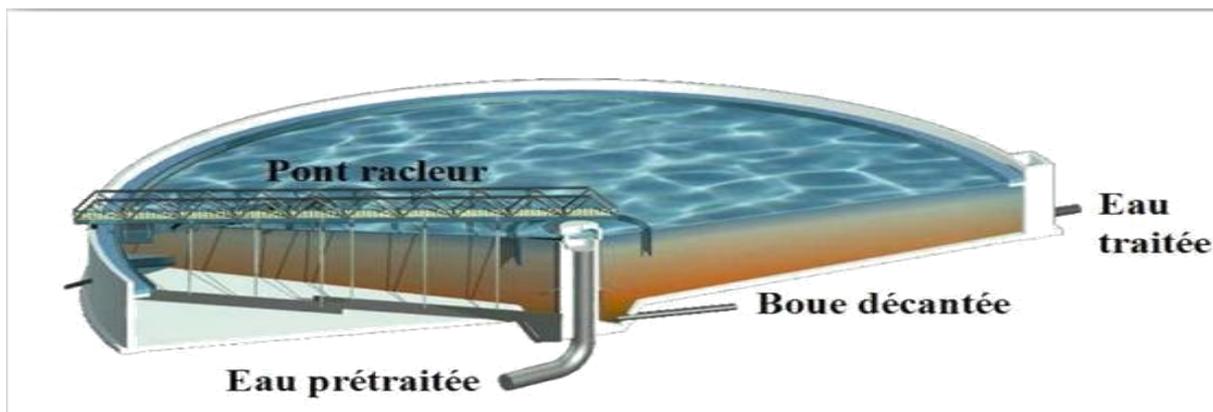


Figure 8 : Coupe longitudinale d'un décanteur primaire

5.1.3 Traitement secondaire :

Le traitement secondaire consiste à un traitement biologique des eaux au niveau de quatre bassins d'aération ouverts d'un volume total de 65.000 m³. Dans lesquels on injecte de l'air grâce à des diffuseurs d'air (local supprimeur) . Ce traitement repose sur l'activité de bactéries qui vont se nourrir des matières organiques encore présentes dans l'eau (fig. : 9).

Le rôle de ces bactéries est de transformer naturellement la pollution organique et d'éliminer le carbone, l'azote et le phosphore contenus dans les eaux résiduaires. L'eau est ensuite laissée au repos durant environ neuf heures et demie dans quatre clarificateurs circulaires gravitaires d'un volume total utile de 40.000 m³. L'eau et les boues biologiques s'y séparent par un processus naturel de décantation alors que l'eau claire sort par les goulottes de débordement.

Deux procédés sont adoptés pour l'élimination de l'azote dans la STEP de Marrakech : la [nitrification](#) et la [dénitrification](#).

a) La nitrification :

C'est l'oxydation de l'azote ammoniacal en nitrite puis en nitrate, cette réaction se déroule dans le bassin d'aération dans des conditions aérobies. Elle s'effectue en deux étapes par l'activité des micro-organismes autotrophes :

Oxydation de NH_4^+ en NO_2^- : c'est l'œuvre essentiellement des germes Nitrosomonas, -

Oxydation de NO_2^- en NO_3^- : les bactéries responsables de cette deuxième réaction, appartiennent principalement au genre Nitrobacter.

L'oxygène étant ajouté par les supprimeurs. La nitrification se fait selon la réaction suivante :



b) La dénitrification :

C'est la technique par laquelle les nitrates (NO_3^-) sont transformés en azote gazeux (N_2) et en oxygène (O_2) dans des conditions anoxiques (sans oxygène). Au cours du processus de la dénitrification, les organismes responsables de la libération du carbone peuvent utiliser les nitrates (NO_3^-) et les nitrites (NO_2^-) comme source d'oxygène. On parle de la boue activée lors de la présence d'une masse active d'organismes qui consomme et concentre de la matière organique. Elle est recirculée vers le réacteur biologique. Le mélange composé du retour des boues et des eaux usées est appelé liquide mixte. La dénitrification est assurée selon la réaction suivante :



Figure 9 : Bassin d'aération (bassin biologique)

Clarificateurs :

Cette étape de clarification consiste à séparer l'eau des boues ou des résidus secondaires issus de la dégradation des matières organiques.

Cette décantation est opérée dans des bassins spéciaux, les "clarificateurs" qui sont des ouvrages circulaires équipés d'un pont avec deux racleurs l'un est en bas et l'autre en haut. Le volume du clarificateur est de 10100 m^3 la surface est de 2525 m^2

Les boues se déposent au fond du bassin, où elles sont raclées et évacuées.

L'eau débarrassée de 80 à 90 % de ses impuretés subit alors des analyses et des contrôles avant d'être rejetée dans le milieu naturel. Alors que les boues décantées sont renvoyées vers les bassins d'aérations.



Figure 10 : Clarificateur de la STEP de Marrakech

5-1-4 Traitement tertiaire :

Vu les dépenses supplémentaires qu'engendre le traitement tertiaire, la STEP de Marrakech ne procède à ce traitement qu'en cas de demande pour l'irrigation des golfs. Ce traitement est basé sur une coagulation, floculation, suivies d'une filtration sur des lits de sables puis une désinfection à l'UV.

a) Coagulation – floculation :

Ce processus se passe dans les bassins de coagulation-floculation, il facilite l'élimination des particules solides en suspension et des particules colloïdales, Il est donc utilisé dans l'étape d'une séparation solide-liquide.

□ Coagulation :

A la sortie des quatre chenaux venturi, les eaux clarifiées s'écoulent vers une fosse commune. Cette fosse est en connexion avec la station de pompage vers le traitement tertiaire. La station de pompage est équipée de 5 pompes pouvant au total pomper 4.400 m³/h, débit retenu pour le dimensionnement du traitement tertiaire.

Trois pompes de 2.200 m³/h et deux pompes de 1.100 m³/h.

Les pompes refoulent l'eau à filtrer au moyen de deux tuyauteries, chacune alimentant un module de filtration.

Après cette eau clarifiée, entre dans deux bassins de coagulation (tab: 4) Chaque réservoir est équipé d'un mélangeur rapide, permettant de disperser le coagulant énergiquement. Le chlorure ferrique (FeCl₃) en solution est ajouté pour assurer une meilleure formation de floes. Afin d'avoir une bonne répartition du temps de séjour. Le chlorure ferrique à 40% est stocké dans deux cuves en matière synthétique placées dans un cuvelage étanche. Une station de dépotage est prévue pour effectuer le remplissage des cuves. Le dosage s'effectue au moyen de trois pompes doseuses à vitesse variable. Le débit des pompes doseuses est asservi au débit d'eau à traiter.

La réaction de dissolution du (fecl₃).



Nombre	2
Débit par unité	2.200 m ³ /h
Temps de séjour	2 min
Volume	73,3 m ³
Puissance spécifique	min. 50 W/m ³
Puissance transmise à l'eau	3,7 kW

Tableau 2 : Dimensionnement des coagulateurs (RADEEMA, 2008)

▫ **Floculation :**

Grâce à des déversoirs et des canaux, l'eau coagulée s'écoule vers quatre réservoirs de floculation. (Tab. : 5 fig. : 11)

Chaque réservoir de floculation contient un agitateur à vitesse lente et réglable et qui marche sans arrêt pour garantir un meilleur brassage, et une rampe de dosage de polyélectrolyte anionique. Le polyélectrolyte est un floculant qui est ajouté pour améliorer le processus de floculation. La combinaison des étapes de coagulation et de floculation nous permet d'obtenir des gros Floccs qui vont se séparer beaucoup plus rapidement de l'eau à traiter par décantation ou bien Flottation grace aux lits de sable.

Le polyélectrolyte est préparé dans une unité de préparation en continu à trois compartiments (préparation, maturation et stockage). Le dosage s'effectue au moyen de cinq pompes doseuses vers les flocculateurs. Une dilution en ligne est prévue pour chaque point de dosage de PE. Le débit des pompes doseuses est asservi au débit d'eau à traite .

Nombre	4
Débit par unité	1.100m ³
Temps de séjour	7 min
Volume	128 m ³
Puissance spécifique	Min. 10 W /m ³
Puissance transmise à l'eau	1,3 KW

Tableau 3 : Dimensionnement des flocculateurs (RADEEMA, 2008)

Avantages de la Coagulation / Floculation

- Particulièrement efficace
- Dimensions des installations réduites
- Les rendements sont excellents sur les Matières en Suspension et bons sur la matières Oxydables
- Exploitation très facile
- Mise en service et arrêt instantané.



Figure11 : Coagulation-Floculation

b) Filtration sur lit de sable :

C'est une méthode d'épuration biologique qui assure le passage de l'eau à traiter à travers des lits de sables (fig:12) . Ces lits sont au nombre de 20 à une capacité unitaire de 27,5 m³. Au niveau de ce parcours, la qualité de l'eau est amélioré considérablement par la diminution du nombre de microorganismes (bactéries, virus), par l'élimination de matières en suspension et colloïdales et par des transformations dans sa composition chimique. A la surface du lit se forme une mince couche appelée "membrane biologique". Cette mince couche superficielle est essentielle, car elle effectue le déroulement du processus d'épuration.



Figure 12 : Filtre à sable

C) Désinfection à l'Ultra-violet :

Le traitement par la lumière ultraviolette (UV) est une technologie établie de désinfection de l'eau en raison de sa très grande capacité à tuer ou à inactiver de nombreuses espèces de micro-organismes pathogènes. La désinfection par rayonnement ultraviolet est efficace contre les bactéries, les parasites protozoaires, et à fortes doses, peut aussi être efficace contre la plupart des virus.

Les systèmes types de désinfection par traitement UV comprennent la circulation de l'eau à travers 2 canaux ayant 2 bancs chacun et contenant 256 lampes UV. Durant le passage de l'eau dans le récipient, les micro-organismes sont exposés à une énergie lumineuse ultraviolette dont la puissance est de 250W qui endommage les molécules génétiques, et empêchent les micro-organismes de se multiplier (fig. : 12).



Figure12 : Désinfection par ultra-violet

e) Chloration :

Le chlore est un agent oxydant fort qui réagit facilement avec plusieurs substances organiques et inorganiques trouvées dans les eaux usées. Il est particulièrement efficace pour détruire les bactéries, mais moins efficace contre les virus. Aux fins de désinfection, le chlore est utilisé sous les formes suivantes : chlore gazeux, hypochlorite de sodium (eau de javel) et bioxyde de chlore, l'injection du chlore se fait par deux rampes (Fig. : 13).

A la fin de ce traitement, l'eau épurée peut être utilisée dans l'irrigation des Golfs de Marrakech.



Figure 13 : Chloration de l'eau à la sortie du tertiaire

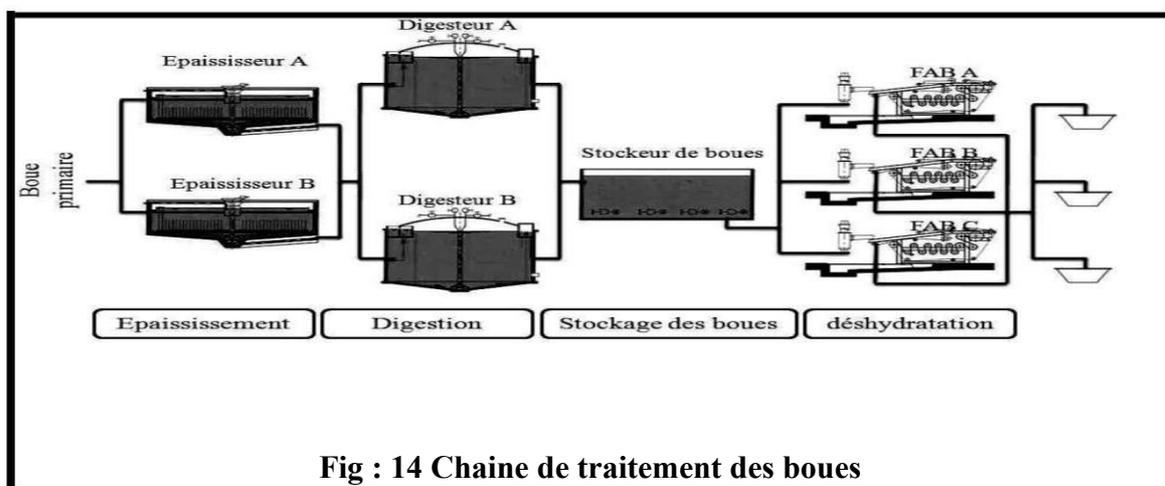
5.2 Filière boue

5.2.1 Origine des boues

Les boues de la station sont des boues résiduaires, qui résultent de traitement des eaux usées en aval. Ces boues peuvent être de différentes origines :

- **Des eaux industriels** pouvant contenir des matières organiques (des effluents d'abattoirs ou de fermentations), et inorganiques (composés toxiques, métaux lourds, etc.)
- **Les eaux usées domestiques** produisent des boues décantables (boues de traitement primaire) caractérisées par de mauvaises odeurs et un pourcentage en eau de 94 à 98% et 1,5 à 2,5% de matières solides.

5.2.1 Etapes du traitement de la boue :



5.2.1.1 Épaississement :

L'objectif de cette étape est de réduire la quantité d'eau pour diminuer le volume des boues.

Très souvent l'épaississement ou

Il existe deux types d'épaississement :

- Épaississement gravitaire: la mise dans des bassins pour une simple sédimentation généralement la boue primaire.
- Épaississement dynamique : est réalisé par des moyens physiques tels la centrifugation (flottation). Utilisée pour la boue secondaire.), permet d'obtenir des meilleurs taux d'épaississement mais avec une plus forte dépense d'énergie électrique et éventuellement de réactifs flocculant.

5.2.1.2 Digestion (méthanisation) :

La méthanisation ou digestion anaérobie est un procédé naturel de transformation de la matière organique par des bactéries méthanogènes. Les boues riches en MO sont introduites dans des enceintes confinées appelées digesteurs à l'intérieur desquelles les réactions de fermentation sont optimisées et contrôlées, elles y séjournent pendant 3 à 4 semaines.

Les digesteurs sont maintenus à une température de 37 °C (ou 55°C) et brassés pour maintenir des conditions favorables au développement de micro-organismes. La matière organique de nombreux déchets ou sous-produits biodégradables se réduit quasiment de moitié. Plusieurs populations bactériennes se développent et transforment les composés organiques complexes formés de longue chaîne hydrocarbonée en molécules simples à un seul carbone tels que le méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂). En fait, Le biogaz produit est composé majoritairement de méthane. et h₂S qui est toxique.

La STEP est équipé par quatre digesteurs anaérobie de type mésophile .(fig. : 15)

Chaque digesteur est caractérisé par :

- Volume unitaire : 6000 m³.
- Volume total : 12000 m.
- Diamètre : 24 m.
- Hauteur cylindrique : 12,25 m.

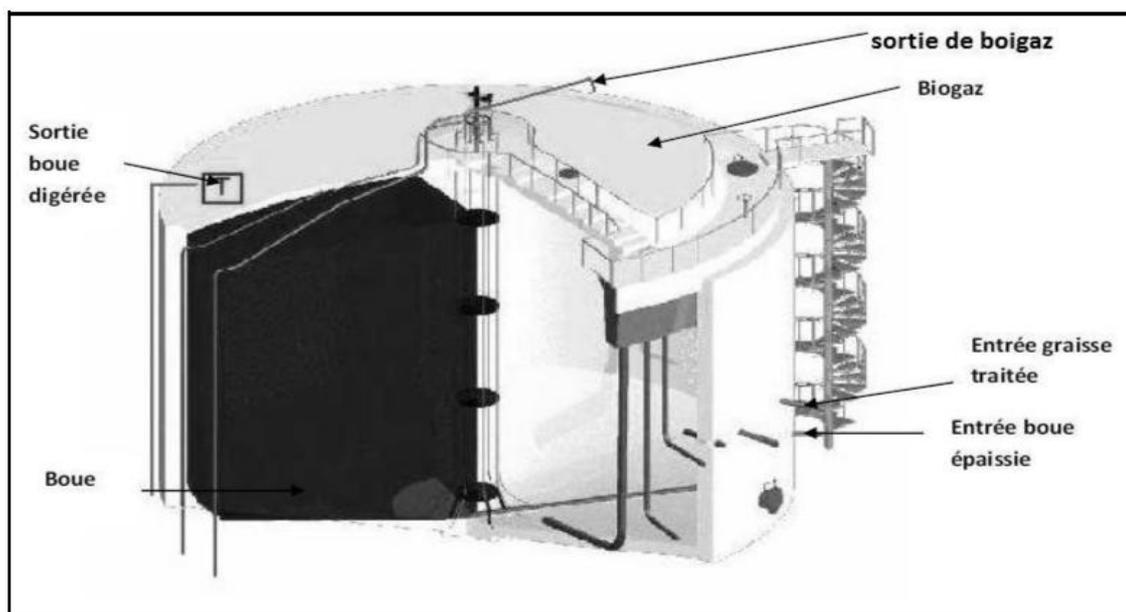


Figure 15 : Coupe longitudinale d'un digesteur anaérobie

5.2.1.3 Stokage de la boue :

Les boues digérées sont stockées dans une bache qui présente l'intérêt de constituer un tampon vis-à-vis de l'unité de déshydratation des boues qui ne fonctionne que les jours ouvrés contrairement à la digestion fonctionnant en continu. Les boues digérées s'écoulent par gravité depuis des digesteurs vers une unité de stockage de forme circulaire dont la capacité est de 1210 m³. Le stockeur est non couvert et équipé de trois agitateurs submersibles assurant l'homogénéité de la boue digérée.

5.2.1.4 Déshydratation :

Les boues digérées sont envoyées du stockeur de boues vers la déshydratation. Cette opération est effectuée sur des filtres à bandes, Ces FAB sont alimentés par des pompes situées dans un local à côté du stockeur. Après la digestion on aura une boue avec une sicité de 25%.

5.2.1.5 Décharge :

C'est la dernière étape du taitement de la boue effectuer au niveau de la STEP au niveau de laquel se fait l'évacuation de la boue vers le décharge publique en attendant la fin du projet du séchage solaire.

5.3 Filière de biogaz :

Au niveau de la STEP, le biogaz suit le cheminement suivant :



Du fait que le biogaz contient des taux plus ou moins élevés de soufre (H₂S) qui a des effets nocifs tels que : la corrosion, l'endommagement des installations ...etc. Une partie du biogaz provenant des digesteurs va être comprimées puis réinjectées dans ces derniers, et l'autre partie va subir une désulfuration en éliminant le soufre par lavage. Le biogaz produit au sein de la station a une composition hétérogène, il comporte :

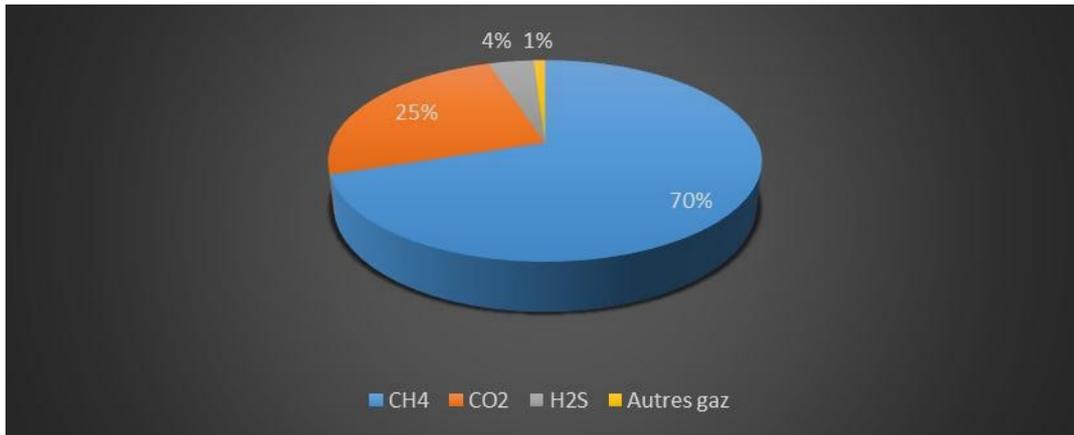


Figure16 : Composition moyenne du biogaz



Figure 17 : Désulfuriseur de la STEP de Marrakech

Le biogaz désulfuré suit deux chemins ; en premier lieu vers les cogénérateurs dont le nombre est de 4 et dont la puissance est de 800 KW chacun dont l'utilité est manifestée par la production de la chaleur qui sert au chauffage de la boue au niveau des digesteurs(fig :18) . Ainsi il assure une autosuffisance de 50 % de l'électricité utilisée au niveau de la STEP, finalement il est stocké dans de grands réservoirs circulaires à double membrane appelés gazomètres. (fig. :19)



Figure 18 : Deux cogénérateurs de la STEP de Marrakech



Figure 19 : Stockeur de gaz de la STEP de Marrakech (gazomètre)

Dans le cas où les gazomètres sont pleins, le biogaz en excès va subir une combustion au niveau de la torchère (fig. : 20).



Figure 20 : Torchères de la STEP de Marrakech

5.4 Filière de désodorisation :

Le processus de purification des eaux usées urbaines génère des composés malodorants qui constituent une forme de nuisance olfactive. L'air vicié doit être débarrassé des produits malodorants avant être rejeté dans l'atmosphère.

Les différents bâtiments et secteurs de traitement sont mis en dépression pour que le gaz malodorant soit capté puis envoyé vers deux tours de lavage où de l'eau et des réactifs chimiques sont pulvérisés pour neutraliser les mauvaises odeurs.

III. Normes marocain sur l'eau :

1. Normes du rejet dans les eaux superficielles ou souterraines

Tableau annexé à l'arrêté conjoint du ministre de l'intérieur, du ministre de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, du ministre de l'industrie, du commerce et des nouvelles technologies et du ministre de l'artisanat n° 2942-13 du 1er hijra 1434 (7 octobre 2013) fixant les valeurs limites générales de rejet dans les eaux superficielles ou souterraines .¹

Paramètres	Valeurs limites générales de rejet dans les eaux superficielles ou souterraines.
Température (°C)	30
pH	5.5-8.5
MES (mg/l)	30
Azote kjeldhal (mg N/l)	40
Phosphore total (mg P/l)	2
DCO (mg O ₂ /l)	120
DBO ₅ (mg O ₂ /l)	40
Chlore actif (Cl ₂) (mg/l)	1
Dioxyde de chlore (ClO ₂) (mg/l)	0.05
Aluminium (Al) (mg/l)	10
Détergents (anionique, cationique et ionique) (mg/l)	2
Conductivité électrique (µS/cm)	2700
Salmonelles/5000 ml	Absence
Vibrions cholériques/5000 ml	Absence
Cyanures libres (CN ⁻) (mg/l)	0.1
Sulfates (SO ₄ ²⁻) mg/l	500
Sulfures libres (S ₂) (mg/l)	0.5
Fluorures (F ⁻) (mg/l)	3
Indice de Phénols (mg/l)	0.5

Hydrocarbures par Infra-rouge (mg/l)	20
Huiles et graisses (mg/l)	20
Antimoine (Sb) (mg/l)	0.1
Argent (Ag) (mg/l)	0.05
Arsenic (As) (mg/l)	0.05
Baryum (Ba) (mg/l)	0.5
Cadmium (Cd) (mg/l)	0.2
Cobalt (Co) (mg/l)	0.1
Cuivre total (Cu) (mg/l)	3
Mercure total (Hg) (mg/l)	0.01
Plomb total (Pb) (mg/l)	1
Chrome total (Cr) (mg/l)	0.5
Chrome hexavalent (Cr ⁶⁺) (mg/l)	0.1
Etain total (Sn) (mg/l)	2
Manganese (Mn) (mg/l)	1
Nickel total (Ni) (mg/l)	5
Sélénium (Se) (mg/l)	0.05
Zinc total (Zn) (mg/l)	5

**Tableau 4 : Normes du rejet dans les eaux superficielles ou souterraine
(Bulletin officiel, 2013)**

2. Normes marocain d'irrigation :

L'arrêté conjoint n° 1276-01 du 17 octobre 2002 portant fixation des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation Cet arrêté distingue entre les eaux naturelles et les eaux usées épurées destinées à l'irrigation et précise les critères spécifiques pour l'octroi de l'autorisation d'utilisation des eaux usées épurées par l'Agence de Bassin hydraulique.

PARAMETRES BACTERIOLOGIQUES		
1	Coliformes fécaux	1000/100 ml*
2	Salmonelle	Absence dans 5 l
3	Vibron Cholérique	Absence dans 450 ml
PARAMETRES PARASITOLOGIQUES		
4	Parasites pathogènes	Absence
5	Œufs, Kystes de parasites	Absence
6	Larves d'Ankylostomides	Absence
7	Fuococercalres de Schistosoma hoematobium	Absence
PARAMETRES TOXIQUES (1)		
8	Mercure (Hg) en mg/l	0,001
9	Cadmium (Cd) en mg/l	0,01
10	Arsenic (As) en mg/l	0,1
11	Chrome total (Cr) en mg/l	1
12	Plomb (Pb) en mg/l	5
13	Cuivre (Cu) en mg/l	2
14	Zinc (Zn) en mg/l	2
15	Sélénium (Se) en mg/l	0,02
16	Fluor (F) en mg/l	1
17	Cyanures (CN) en mg/l	1
18	Phénols en mg/l	3
19	Aluminium (Al) en mg/l	5
20	Béryllium (Be) en mg/l	0,1
21	Cobalt (Co) en mg/l	0,5
22	Fer (Fe) en mg/l	5
23	Lithium (Li) en mg/l	2,5
24	Manganèse (Mn) en mg/l	0,2
25	Molybdène (Mo) en mg/l	0,01
26	Nickel (Ni) en mg/l	2
27	Vanadium (V) en mg/l	0,1
PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES		
Salinité		
28	Salinité totale (STD) en mg/l	7680
	Conductivité électrique (CE) en mS/cm à 25°C**	12
29	Infiltration	
	Le SAR*** = 0-3 et CE =	<0,2
	Le SAR*** = 3-6 et CE =	<0,3
	Le SAR*** = 6-12 et CE =	<0,5
	Le SAR*** = 12-20 et CE =	<1,3
	Le SAR*** = 20-40 et CE =	<3
Ions toxiques (affectant les cultures sensibles)		
30	Sodium (Na) en mg/l	
	Irrigation en surface (SAR****)	69
	Irrigation par aspersion	9
31	Chlorure (Cl) en mg/l	
	Irrigation en surface	350
	Irrigation par aspersion	15
32	Bore (B) en mg/l	3
Effets divers (affectant les cultures sensibles)		
33	Température (°C)	35
34	pH	6,5 à 8,4
35	Matières en suspension en mg/l	
	Irrigation gravitaire	200
	Irrigation par aspersion localisée	100
36	Azote nitrique (N-NO3-) en mg/l	30
37	Bicarbonate (HCO3-) [irrigation par aspersion] en mg/l	518
38	Sulfates (SO42-) en mg/l	250

Tableau 5 : Normes marocains d'irrigation selon (Bulletin officiel, 2002)

Partie 2 :
Etude de la
problématique de la
prolifération des algues
dans les bassins golfeques
de marrakech

I. Problématique étudiée et les raisons du choix du sujet

Les besoins en eau augmentent avec l'accroissement de la population. Il est aujourd'hui impératif de trouver des solutions afin de réduire ou limiter les prélèvements sur la ressource. Réutiliser de l'eau usée traitée offre une sécurité et une régularité dans l'approvisionnement en eau pour le secteur agricole et peut aussi contribuer à réduire les compétitions entre les différents usages : agriculture, eau potable, structures de loisirs, nettoyage... Rappelons qu'il s'agit d'une ressource de qualité, tant sur le plan agronomique (présence de nombreux nutriments) que sanitaire en raison du traitement poussé imposé par la réglementation. Il n'est d'ailleurs pas rare que l'eau usée traitée soit de meilleure qualité que des eaux de surface prélevées pour l'irrigation. Enfin, c'est une pratique qui permet également de réduire les quantités d'eaux rejetées dans le milieu sans avoir subi de traitement complémentaire. Suite aux nouvelles lois régissant l'irrigation des golfs en eaux traitées, ainsi que l'augmentation des demandes hydrauliques des entreprises partenaires golfique de la RADEEMA. La STEP doit suivre la qualité de l'eau fournie. Dans ce cadre, on se retrouve confronté à un problème au niveau des bassins golfique de stockage des eaux usées épurées sortant de la STEP. C'est la problématique de la prolifération des algues à cause du phénomène d'eutrophisation (fig : 21).

A ce moment là, nous avons décidé de travailler sur ce sujet vue leur impact négatif sur les entreprises golfiques de la ville de Marrakech. Afin de trouver des solutions pour freiner ou réduire ce phénomène, qui diminuer la qualité et les attentes du golf au niveau de la ville de Marrakech.



Figure 21 : Phénomène d'eutrophisation dans le lac du golf ARGANA

II. Intérêt de la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation des gazons des golfs :

L'étude faite par MOUHANNI et al (2011) sur la faisabilité et la réutilisation des eaux usées de la STEP de M'zar (Agadir) a porté sur : la planification, le protocole et les résultats préliminaires des essais. Les résultats préliminaires présentés dans cette étude, qui concernent le suivi pendant les 21 premiers jours d'irrigation montrent que l'irrigation par les eaux usées épurées n'affecte pas le taux de germination des graines. Elles ont, également, un effet positif sur la pousse du gazon : tallage et évolution de la longueur des feuilles et ce en comparaison avec l'irrigation par une eau conventionnelle (eau souterraine). Trois variétés de gazon ont été testées. Les résultats confirment une bonne adaptation à la qualité des eaux épurées malgré leur degré de salinité élevé. Cela est essentiellement, du aux éléments nutritifs dissout dans l'eau notamment le phosphore et l'azote .

- La germination des graines accuse un temps d'adaptation à la salinité des eaux épurées pendant la première quinzaine. Cependant, l'influence de la qualité de l'eau sur le % de germination maximal atteint reste faible pour toutes les variétés et fluctue autour de $\pm 5\%$.
- Au-delà du 13^{ème} jour, le taux de germination maximal est atteint, l'irrigation par l'eau des puits favorise le tallage dans un premier temps, mais l'écart enregistré par rapport à l'irrigation avec les eaux épurées se réduit rapidement et s'annule au 21^{ème} jour de croissance.

Après le 13^{ème} jour de croissance, l'irrigation par les eaux épurées favorise l'augmentation de la longueur des feuilles en comparaison avec l'irrigation par les eaux souterraines (Fig. 22).

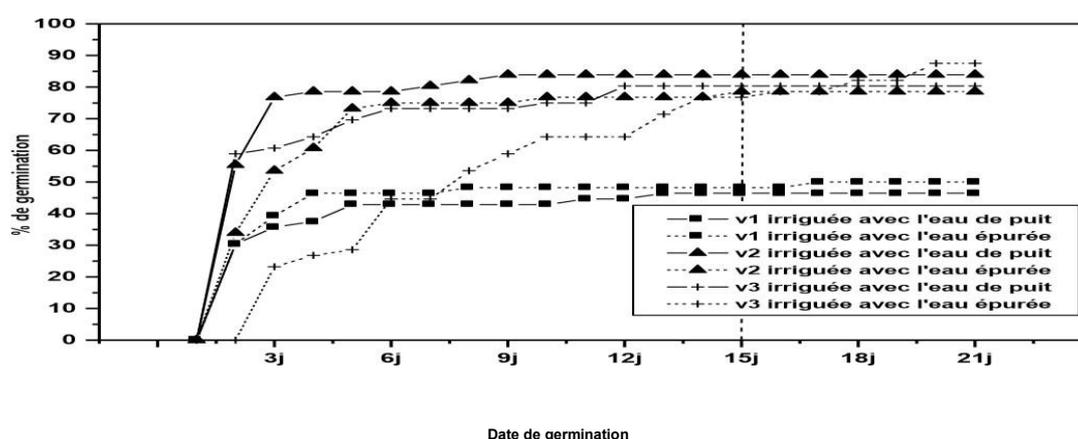


Figure 22 : Evolution du pourcentage de germination des différentes variétés de graines irriguées avec les deux qualités d'eau : eau de puit et eau épurée (MOUHANNI et al, 2014) .

1. Raisons de construire une structure golfique

La réalisation d'un golf est un projet qui s'inscrit dans le développement durable, dont l'objectif de la préservation de l'environnement (eau, biodiversité, développement durable...), 90% des golfs utilisent les eaux usées épurées. D'une part il est considéré comme un territoire, un nouveau poumon, vert urbain avec des loisirs sportifs. D'autre part, est un atout touristique local supplémentaire pour du tourisme d'opportunité notamment en période estivale qui peut valoriser un foncier inutilisé ou inutilisable qui coûte de l'argent en entretien à la collectivité .

2. Terrains du golf au niveau de marrakech

En effet, avec 19 golfs, **Marrakech** veut devenir la Floride **Golfique** de l'**Europe** et s'en donne tous les moyens. Et quel bonheur de pouvoir venir jouer une partie de golf à **Marrakech** en plein hiver, avec souvent plus de 20°C. De plus, de nombreux pros viennent régulièrement chaque année de France, Belgique, Suisse ou Royaume-Uni avec leurs stagiaires pour profiter des températures clémentes de l'hiver pour pouvoir enseigner le golf avec des conditions exceptionnelles.

Golf	superficie	Diamètre de piquage	Volume minimal annuel	Volume maximal journalier
CHRIFIA	268 ha	250 mm	960 000 m ³	5400 m ³
FADESA	174 ha et 40 are	250 mm	800 000 m ³	4500 m ³
GOLF CITY	189 ha	250 mm	800 000 m ³	4500 m ³
ARGANA	221 ha	250 mm	800 000 m ³	4500 m ³
AL MAADEN	170 ha	200 mm	800 000 m ³	4500 m ³
DOMAINE PALM	230 ha	250 mm	1 300 000 m ³	100 000 m ³
GOLF PALACE	175 ha	250 mm	800 000 m ³	4000 m ³

Tableau 6 : Consommation en eau usée épurée par les golfs de Marrakech durant l'année 2016 (RADEEMA, 2016)

III. Matériels et méthode :

Dans la cadre de ce travail on a suit la qualité des eaux à la sortie de la STEP durant un mois, afin de contrôler la performance du traitement tertiaire. En plus on a suit la qualité des eaux à l'entrée des golfs (picage), et au niveau des bassins de stockage pour avoir une idée sur le pourcentage des éléments nutritifs qui causent la prolifération des algues, et le respect des normes marocains d'irrigation.

1. Présentation de laboratoire de contrôle de la RADEEMA :

La station dispose d'un laboratoire permettant d'effectuer les analyses nécessaires sur les eaux usées pour caractériser leur qualité et déterminer les performances de la STEP et assurer une bonne qualité des eaux épurées destinée à l'irrigation des golfs et des espaces verts. Le laboratoire de contrôle des eaux usées de la RADEEMA utilise la méthode rapide pour analyser les échantillons prélevés. Vue de leur rapidité d'analyse et de réponse et facilité d'exécution, fidélité , limite de détection ... etc. à l'aide des **Kit commercialisées** . Par contre, les méthodes standard ont été utilisées depuis longtemps et elles sont retenues et validées expérimentalement, mais elles ne sont pas rapides pour des analyses quotidiennes (Fig : 23).



Figure 23 : Kit commercialisée pour analyser le chrome

Le laboratoire de la STEP peut intervenir à différents niveaux :

- Au niveau de réseau d'assainissement : Le laboratoire effectue des prélèvements et des analyses des paramètres de pollution et des éléments toxiques aux points demandés. Afin de détecter les sources responsables des rejets non conformes afin de protéger la STEP de ces rejets.
- Au niveau de la STEP : Le laboratoire effectue des prélèvements chaque 24h à l'aide d'un préleveur automatique, à l'entrée (Eau brute) et à la sortie des différents ouvrages de la filière eau, pour contrôler la qualité des différents traitements.
- Au niveau des complexes golfiques : Le laboratoire effectue des prélèvement mensuels à l'amont de chaque complexe golfique pour contrôler la qualité des eaux livrés.

2. Paramètres de pollution des eaux usées :

2.1 Demande biochimique en oxygène (DBO₅)

La DBO₅ est la quantité d'oxygène qui est utilisée pour la dégradation des matières organiques décomposables par les processus biochimiques induits par des microorganismes, exprimée en (mg O₂/l). Pour déterminer la DBO₅ d'une eau usée, un échantillon est inoculé à l'aide de micro-organismes et placé 5 jours à l'abri de la lumière (cellule noire) à une température de 20°C. La consommation d'oxygène est alors mesurée. L'échantillon reste placé dans le noir de manière à éviter les réactions photosynthétiques des algues présentes. Le résultat obtenu représente la mesure de la quantité totale de contamination organique dégradable biologiquement (Fig. : 24).

La détermination de la DBO₅ sert à :

- évaluer la concentration des polluants organiques dans les entrées et sorties de stations
- déterminer les besoins en O₂ des bassins de boues activées
- calculer le rapport DBO₅ / DCO qui varie de 0.01 à 0.7. Ce rapport a une importance déterminante pour la définition de la chaîne d'épuration d'un effluent.

En effet, une valeur importante du rapport DBO₅/DCO implique la présence d'une grande proportion de matières biodégradables. Inversement, une valeur faible de ce rapport indique qu'une grande partie de la matière organique n'est pas biodégradable.



Figure 24 : Protocol expérimental de la DBO₅ (méthode manométrique)

2.2 Demande chimique en oxygène (DCO)

Dans les stations d'épuration, la DCO est un indicateur fiable des performances du traitement. Elle s'exprime en milligramme par litre (mg/l) d'oxygène et correspond effectivement à la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder dans des conditions opératoires définies, les matières organiques et minérale présente dans un échantillon donné. Cette analyse permet la détermination de la charge polluante d'une eau usée en matières organiques et minérale avant et après un traitement physique, chimique ou biologique afin de contrôler le fonctionnement d'une STEP et l'activité des microorganismes. Cette analyse se fait par méthode rapide en utilisant des kits.

2.3 Matières en suspension (MES)

C'est l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux. Elle est fonction des terrains traversés, de la nature des rejets, de la pluviométrie et du régime d'écoulement des eaux. C'est un facteur essentiel de la turbidité des eaux. L'unité utilisée est le mg/l.

Matériel : Pompe à vide Entonnoir de filtration inox, Fiole à vide, Tubes Balance Dessiccateur, Étuve et filtres circulaires en papier.

Méthode :

Un échantillon représentatif est filtré à travers une membrane filtrante ayant une porosité nominale de 1,5µm. Les matières retenues sur le filtre sont séchées à 105°C. Puis pesées avec le filtre. La masse des matières en suspension est obtenue en faisant la différence entre la masse du filtre incluant les résidus séchés et la masse initiale du filtre, tout en tenant compte du volume filtré. La quantité de matières en suspension volatiles est obtenue par la différence entre la masse du résidu calciné à 550°C et celui du résidu séché à 105° (fig : 25).

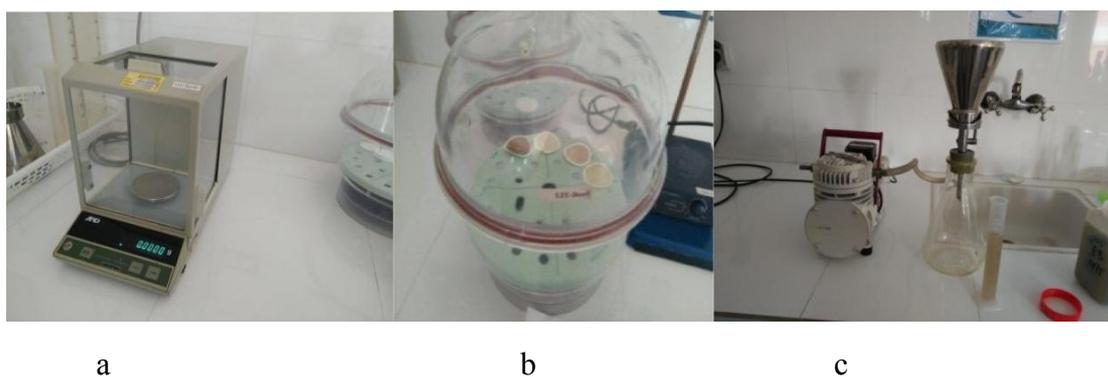


Figure 25 : Dispositif de la détermination de la (MES). a) Balance .b) Dessiccateur c) Filtrateur

La matière en suspension est calculée par la relation suivante :

$$\text{MES} = m_1 - m_0 / V$$

m_1 : masse du filtre après utilisation , m_0 : masse du filtre avant utilisation

V : volume d'eau utilisée

2.4 Composés chimiques et métaux lourds

Les composés chimiques et les métaux lourds sont également mesurés par des kits commercialisés à savoir : le phénol, le sulfure, le sulfate, le sulfite, le chrome, l'ammonium, le nitrate, le nitrite, l'azote total, le phosphate total, l'ortho phosphate, le nickel et le cuivre.

Composés chimiques

Nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) :

Les nitrites et les nitrates sont considérées comme polluants très nuisibles à la santé de l'homme et aux animaux (le taux de NO_2 et NO_3 devient nocif quand il dépasse 30 mg/l). Ce taux doit être contrôlé régulièrement. Un taux important survient en générale lorsque l'eau est surchargée en matière organique.

Azote total (NGL) :

L'azote total dissous représente la totalité de l'azote contenu dans les formes azotées minérales et organiques en solution dans l'eau (excepté le di-azote N_2). L'azote organique dissous peut être caractérisé par des composés particuliers (urée par exemple), des familles de composés (amines, acides aminés, protéines ...), mais également par sa résistance à la dégradation bactérienne, c'est-à-dire qu'il peut être biodégradable ou réfractaire.

Azote Total Kjeldahl (NTK) :

L'Azote Total Kjeldahl (NTK) est une appellation qui désigne la somme de l'azote ammoniacal et de l'azote organique. L'azote qui se retrouve sous forme oxydée, tel que les nitrites ou les nitrates par exemple, n'est pas mesuré par cette méthode. Les composés azotés mesurés par cette méthode proviennent principalement de la dégradation bactérienne des composés organiques provenant de l'azote.

Phosphore :

Le phosphore est utilisé dans les engrais agricoles (c'est avec l'azote le deuxième facteur limitant qui conditionne la croissance des plantes) et dans l'industrie chimique, mais il est surtout utilisé dans les lessives où un de ses dérivés constitue un adoucisseur d'eau qui facilite le lavage. Il est à ce titre massivement présent dans les eaux usées d'origine urbaine.

Tandis que le phosphore d'origine agricole reste dans le sol et dans la plante, le phosphore d'origine domestique se trouve directement dans les eaux usées qui agissent alors en vecteur de pollution.

Le phosphore, naturellement peu présent dans l'eau, cesse d'être un facteur limitant et, au contraire, favorise la prolifération algale qui est l'un des principaux signes de l'eutrophisation des eaux. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les eaux stagnantes.

Turbidité :

La turbidité est une caractéristique optique de l'eau, à savoir sa capacité à diffuser ou absorber la lumière incidente. La turbidité est due à la présence de particules en suspension dans l'eau. L'échantillon d'eau est introduit dans un flacon de mesure normalisé et mesuré dans un turbidimètre, qui mesure et calcule le rapport entre la lumière transmise et la lumière diffusée.

Potentiel d'hydrogène pH :

Principe :

C'est un paramètre indicateur de l'alcalinité ou l'acidité de ces eaux. Il est très important pour la croissance des micro-organismes qui ont généralement un pH optimal variant de 6,5 à 7,5. Il est mesuré par un pH-mètre.

Méthode :

Plonger l'électrode dans l'échantillon et le pH mètre va donner la valeur du pH.

Température T° :

C'est un paramètre essentiel favorable à l'activité des micro-organismes consommateurs d'O₂, et il influence sur tous les paramètres physico-chimiques. Il est mesuré par un thermomètre à mercure. L'unité est le degré °C.

Conductivité K :

C'est la capacité des ions dissous dans l'eau à laisser passer le courant électrique, c'est un indicateur direct de la salinité de l'eau. C'est un indicateur à suivre, puisqu'on est intéressé par la réutilisation de cette eau usée. Il est mesuré à l'aide d'un conductimètre. L'unité est le (µs/cm ou ms/cm).

Métaux lourds :

Cadmium Cd) :

Il provient des rejets industriels, des incinérations de déchets, de l'utilisation d'engrais ainsi que d'autres activités humaines. Le cadmium est extrêmement toxique. Il s'accumule dans les chaînes alimentaires et menace les consommateurs secondaires.

Chrome (Cr) :

Métal très dur utilisé en traitement de surface des métaux pour améliorer leur résistance. La forme chrome VI et les chromates (CrO₄) sont extrêmement toxiques et cancérigènes.

Cuivre (Cu) :

Au niveau de traces il n'est pas toxique. Sa présence dans les eaux provient de l'érosion des conduites ou de l'activité industrielle. Dans les sols agricoles, il colore les eaux.

2.5 Analyses bactériologiques :

Germes fécaux :

Les coliformes totaux sont des entérobactéries qui incluent des espèces bactériennes qui vivent dans l'intestin des animaux homéothermes, mais aussi dans l'environnement en général (sols, végétation et eau). Ce groupe bactérien est utilisé comme indicateur de la qualité microbienne de l'eau parce qu'il contient notamment des bactéries d'origine fécale (fig :26) .

Méthode :

- Mettre le papier filtre dans l'entonnoir
- Ajout de 100 ml d'eau a filtrée
- Enlever le papier filtre et on le met dans la boite à pétri
- laisser la boite dans une étuve à 44°C pendant 24h
- Comptaer les unités Formant Colonnies(UFC)



Figure 26 : Dispositif de la filtration bactériologique

3. Etude de performance du traitement tertiaire :

3.1 Caractérisation des eaux usées épurées à la sortie du traitement tertiaire :

Les résultats du suivi de la concentration des différents éléments de pollution à la sortie du traitement tertiaire sont consignés dans le tableau : 7.

Résultats et Interprétations :

Jours	DCO	MES	NGL	PT	DBO5
	mg O ₂ /l	mg/l	mg N/l	mg P/l	mg O ₂ /l
17/04/2017	25,0	2,00	5,25	2,74	4,9
18/04/2017	27,8	2,10	10,34	2,53	0,5
19/04/2017	29,9	1,20	5,16	2,53	2,1
20/04/2017	36,6	2,40	5,40	2,50	2,3
21/04/2017	43,1	2,00	4,31	2,23	1,5
22/04/2017	30,4	2,60	2,72	1,58	2,5
23/04/2017	29,4	1,90	3,46	2,02	2,5
24/04/2017	27,6	3,20	4,93	2,31	3,4
25/04/2017	35,0	4,80	3,68	2,14	2,4
26/04/2017	35,2	2,50	6,46	2,62	2,7
27/04/2017	37,4	2,20	10,10	3,86	1,5
28/04/2017	38,6	3,90	15,60	5,60	3,1
29/04/2017	45,6	4,20	13,20	4,45	2,9
02/05/2017	37,0	4,40	3,85	1,94	3,7
03/05/2017	31,8	2,20	5,84	2,94	1,5
04/05/2017	46,2	3,50	8,60	2,83	2,6
05/05/2017	35,5	2,30	12,00	2,40	2
06/05/2017	44,3	1,20	10,25	2,63	2,7
07/05/2017	34,4	2,00	7,40	1,91	4,4

08/05/2017	39,0	3,20	8,08	1,20	3,3
09/05/2017	47,5	1,80	10,80	1,43	3,8
10/05/2017	42,9	4,30	10,40	2,20	3,8
11/05/2017	40,9	2,90	5,40	1,72	3,8
12/05/2017	43,5	1,70	3,20	1,51	4
13/05/2017	40,3	2,20	3,93	1,90	5,1
14/05/2017	36,6	2,7	5,17	2,33	5,4
15/05/2017	40,7	2,3	5,58	2,72	3,4
16/05/2017	45	4,7	10,9	5,25	3
17/05/2017	43,3	5	9,09	4,65	5,6

Tableau 7 : Résultat du traitement tertiaire pendant un mois

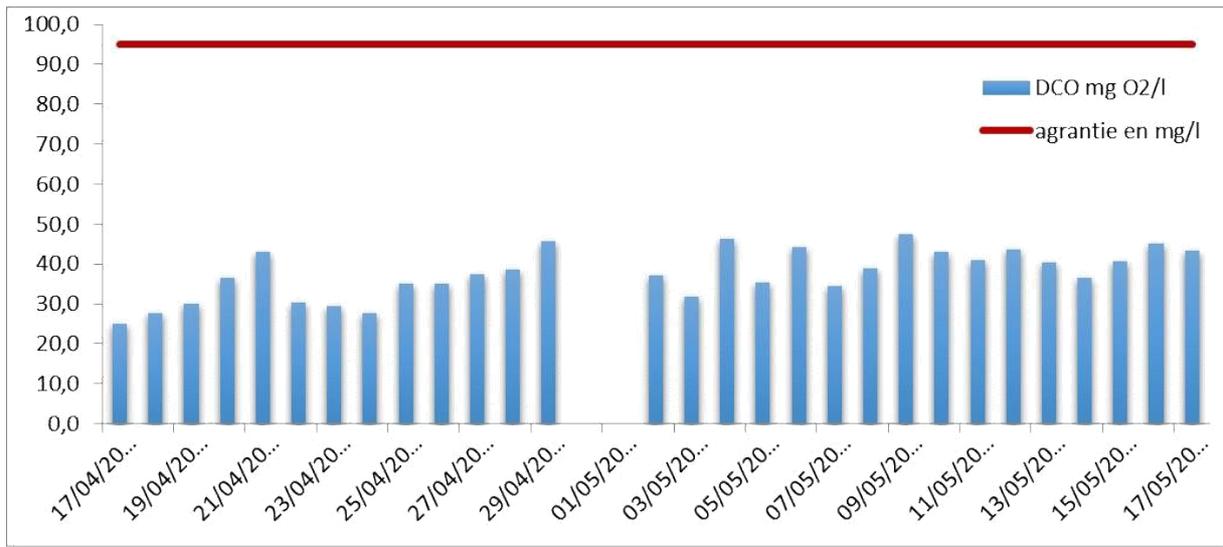


Figure 27 : Variations de la DCO des mois Avril/Mai 2017

D'après l'évolution de la DCO pendant un mois (Fig. 27), on remarque que les valeurs varient entre 25 mg/l comme valeur minimale enregistrée le 17/04/2017 et 45 mg/l comme valeur maximale enregistrée le 05/05/2017. Les valeurs mesurées sont toutes au dessous de la garantie fixée dans la cahier de charge de la RADEEMA qui est autour de 95 mg/l. Cela montre que l'eau tertiaire ne contient pas trop de matière organique et minérale et qu'elle est conforme aux normes.

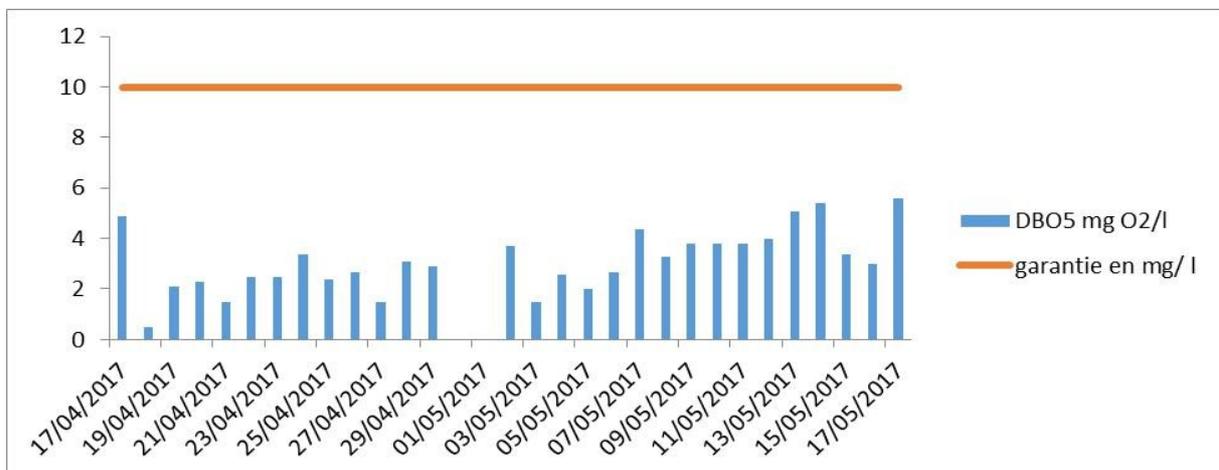


Figure 28 : Variations de la DBO5 des mois Avril/Mai

D'après les mesures de la DBO5 pendant le mois d'avril 2017 (Fig. 28), on remarque que les valeurs oscillent entre 0,5 mg/l comme valeur minimale enregistrée le 19/04/2017, et 6 mg/l comme valeur maximale enregistrée le 17/05/2017. Ces valeurs sont au dessous de la garantie fixés par la RADEEMA qui est autour de 10 mg/l. Cela montre que l'eau tertiaire ne contient pas trop de matière organique.

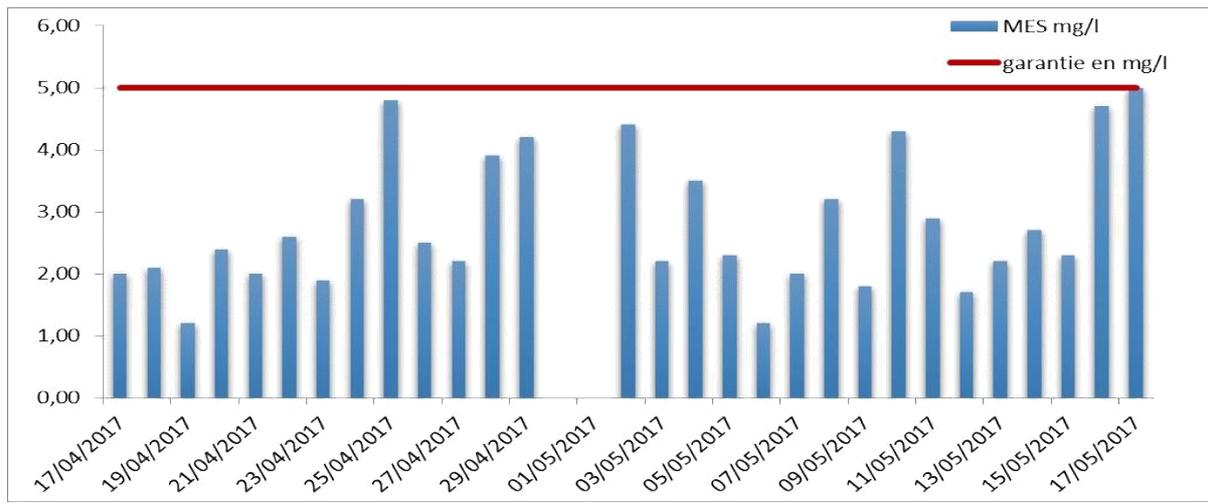


Figure 29 : Evolution des concentrations en MES des mois avril et mai 2017

D'après la figure 29 relative à la MES mesurée durant un mois, on remarque que les valeurs varient de 1 mg/l comme valeur minimale enregistrée le 06/05/2017, et 5 mg/l comme valeur maximale enregistrée le 17/05/2017. Cette dernière valeurs est égale à la garantie qui elle est aussi 5 mg/l. En conclusion, les concentrations en MES restent inférieures à la norme fixée par la RADEEMA.

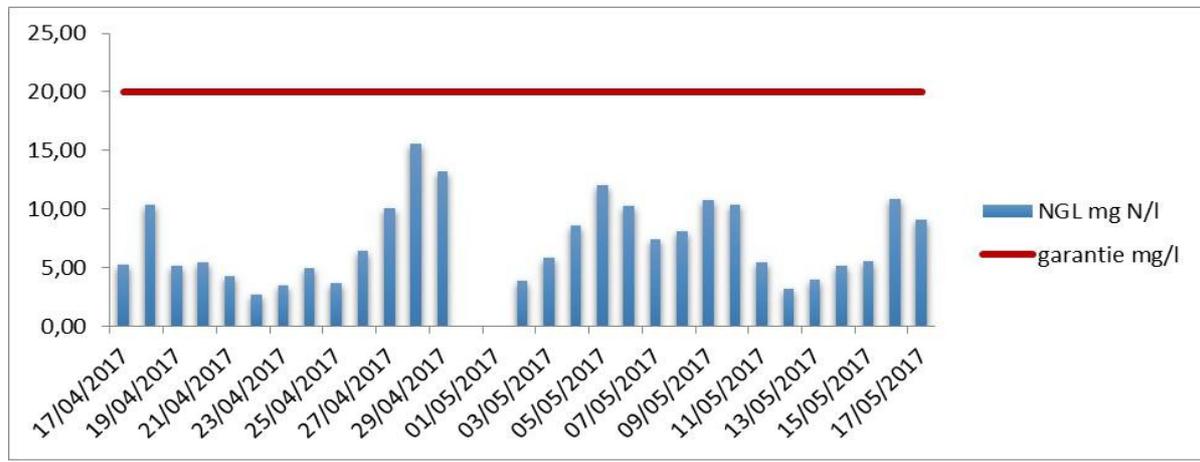


Figure 30 : Variations de la concentration en NGL des mois Avril/Mai 2017

D'après les analyses de NGL pendant un mois (Fig. 30), on remarque que les valeurs varient entre 2,5 mg/l comme valeur minimale enregistrée le 22/04/2017, et 15 mg/l comme maximale enregistrée le 28/04/2017. Toutes ces valeurs sont au dessous de la garantie qui est de 20 mg/l, et sont conformes aux normes marocains d'irrigation .

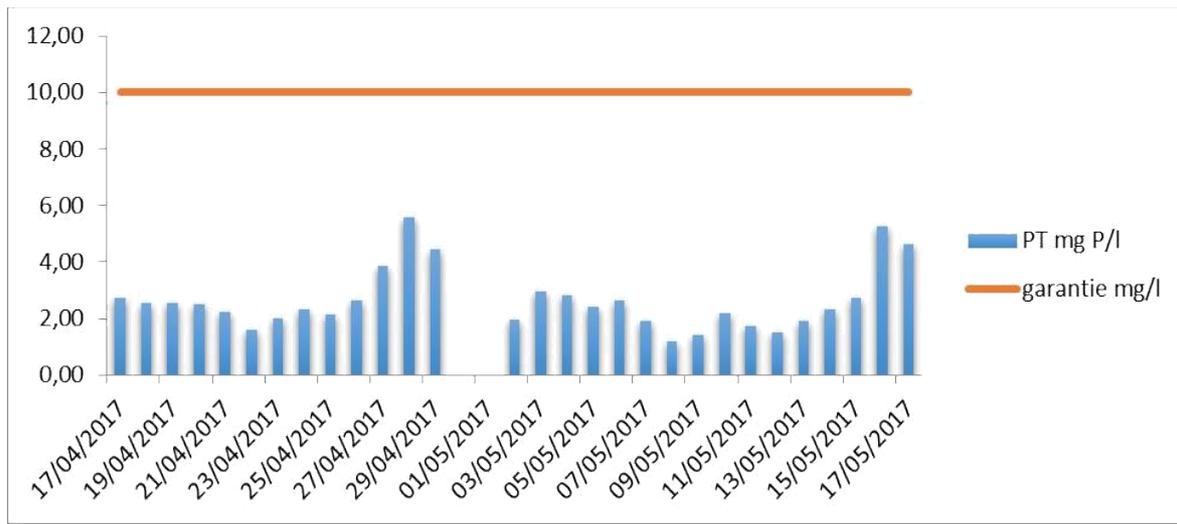


Figure 31 : Variations de la concentration en Pt des mois Avril/Mai 2017

D'après les analyses du Pt pendant un mois (Fig. 31), on remarque que les valeurs sont entre 1 mg/l comme valeur minimale enregistrée le 08/05/2017, et 6 mg/l comme maximale enregistrée le 28/04/2017. Toutes ces valeurs sont au dessous de la garantie qui est de 10 mg/l. et sont conformes normes marocains d'irrigation.

Conclusion :

- D'après les analyses effectuées sur les eaux tertiaires on constate que les concentrations de ces éléments sont conformes aux garanties contractuelles. Ce qui implique un bon fonctionnement de l'ensemble des ouvrages du traitement tertiaire (Tab. 7).

3.2 Caractérisation des eaux usées épurées à l'entrée des golfs et dans les bassins de stockage

- Suite à la visite de 4 golfs desservis par la STEP Marrakech le 20/05/2017, nous avons procédé à un échantillonnage des eaux des bassins et des lacs de stockage des golfs et les eaux de picages en amont de chaque golf. Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Complexe golfique	CITY lac	CITY picage	ARGA NAT lac	ARGA NAT picage	D.PAL M Lac	D.PAL M picage	CHRIF IA lac	CHRIF IA picage
MES	51.4	4.2	8	4.8	27.8	4.2	60.33	0.14
NGL	12.3	11.4	2.93	1.2	6	5.58	6.77	3.07
Pt	2.49	1.82	2.24	0.205	3.02	2.13	2.57	1.57
chlorures	596	466	560	542	468	450	498	436
chrome	0.05	0.045	0.05	0.03	0.026	0.024	0.024	0.024
sulfure	0	0	0	0	0	0	0	0
phénol	2.3	0	0.6	0.3	0.381	0.318	0.511	0.312
cuivre	0.3	0.2	0.3	0.27	0.322	0.203	0.546	0.243
nickel	0.25	0.1	0.19	0.14	0.831	0.595	0.942	0.925
zinc	0	0	0.45	0	0	0	0	0
NO ₂ ⁻	0.375	0.015	0.391	0.39	0.501	0.033	0.329	0.052
NO ₃ ⁻	1.86	0.395	2.3	1.67	4.01	2.93	3.28	1.12

Tableau 8 : Résultats des analyses des eaux provenant de 4 golfs échantillonnées le 20/05/2017

Les analyses réalisées pour les eaux des bassins de ces 4 golfs sont conformes aux garanties. Sauf dans le cas de la MES et les chlorures qui dépassent les normes Par contre, on observe une nette augmentation de la MES dans les bassins golifiques avec un maximum de 60 ,3 mg/l. Les dépôts de cette MES est composé de divers débris apportés par le vent ou les eaux pluviales, mais également par des êtres vivants planctonique dont la prolifération est accentuée par la stagnation des eaux. Ces particus peuvent donner à l'eau une apparence trouble, une odeur déplaisante, elles peuvent ainsi colmater les installations d'irrigation (conduites, arroseurs...) chose qui réduit surement la cadence d'arrosage et agit directement sur la qualité du gazon.

Des concentrations excessives des chlorures peuvent causer des brûlures sur le bout des feuilles du gazon et la corrosion des arroseurs.

L'historique des consommations des golfs au cours de l'année indique un stockage des eaux au niveau des golfs pendant de longues durées, chose qui peut agir fortement sur la qualité de ces eaux et favorise la prolifération algale d'une manière très importante.

IV. Impact négatif de la réutilisation des eaux usées pour l'irrigation des golfs

1. Phénomène d'eutrophisation

Par définition, (du grec *eu* : « bien, vrai » et *trophein* : « nourrir ») est le processus par lequel des nutriments s'accumulent dans un milieu ou un habitat (terrestre ou aquatique).

L'eutrophisation est une forme particulière mais naturelle de pollution de certains écosystèmes aquatiques qui se produit lorsque le milieu reçoit trop de matières nourrissantes. Les principaux nutriments à l'origine de ce phénomène sont le phosphore (contenu dans les phosphates) et l'azote (contenu dans l'ammonium, les nitrates, et les nitrites). Le processus naturel est à l'origine très lent, il peut s'étaler sur des siècles ou des millénaires, et parfois sur de plus longues périodes encore. Mais l'eutrophisation peut être fortement accélérée par l'apport d'effluents domestiques, industriels et ou agricoles et conduire à la mort de l'écosystème aquatique en quelques décennies voire même en quelques années. Une acidification du milieu, qui peut aussi rendre les espèces plus vulnérables à certaines pollutions et maladies.. On parle alors d'hyper eutrophisation ou encore de dystrophisation.

Comprendre le processus d'eutrophisation

Voici en résumé les grandes étapes de ce phénomène complexe :

1. Le lac reçoit des apports en d'éléments nutritifs (particulièrement en phosphore) provenant de sources diverses (naturelles et anthropiques sur une longue ou courte période de temps).
2. L'accumulation d'éléments nutritifs dans l'eau provoque, à plus ou moins long terme, une prolifération de plantes aquatiques et d'algues dans la couche supérieure du lac et dans le littoral, ce qui réduit considérablement la transparence de l'eau (l'eau devient plus turbide).
3. L'augmentation de la turbidité limite le passage de la lumière à travers la colonne d'eau. La photosynthèse ne peut alors s'effectuer que près de la surface du lac.
4. Le surplus de matière végétale produit dans l'épilimnion (voir fiche sur la stratification thermique) se dépose au fond du lac, suite à sa **sénescence** (mortalité).
5. Les décomposeurs utilisent l'oxygène dissous afin de décomposer la matière végétale, ce qui provoque une diminution des concentrations d'oxygène dissous en profondeur.
6. La raréfaction de l'oxygène dissous de la couche inférieure du lac occasionne un changement dans la biodiversité des espèces présentes au lac (ex. : disparition des espèces de poissons d'intérêt sportif tels que les truites).



Figure 32 : Processus d'eutrophisation (Site web : 1)

2. Prolifération des algues au niveau des bassins des golfs alimentée par des eaux épurée de la STEP de Marrakech

2.1 Source des éléments nutritifs au niveau de la STEP

La STEP de Marrakech reçoit un effluent domestique de nature biodégradable riche en nutriments tel que : le carbone (C), l'azote (N) et du phosphore (P) et des effluents industrielles qui peuvent être localement très importantes, dépendant du type d'industrie, du volume d'effluent et de la quantité de traitement qu'elle reçoivent .

2.2 Causes de l'eutrophisation dans les bassins des golfs :

La principale cause est un enrichissement des bassins golfiques en azote et en phosphore. Toutefois, en milieu aride, pour des eaux douces, dans la quasi-totalité des cas, on sait que c'est le phosphore qui est le facteur nutritionnel limitant de la prolifération végétale. À la différence de l'azote dont une partie passe de l'eau dans l'atmosphère, le phosphore n'est pas transformé en élément gazeux et l'autoépuration tend à dégrader les formes phosphorées complexes vers des molécules plus simples qui sont les plus assimilables par les végétaux.

Ces phosphates sont ensuite stockés dans les sédiments ou transportés jusqu'à ce que l'évolution des conditions du milieu permette aux végétaux de les utiliser. (Ce transport peut d'ailleurs induire, pour des cours d'eau ne présentant apparemment pas de problèmes, des phénomènes d'eutrophisation au niveau des bassins golfiques ou de retenues dus à un flux faible mais régulier de phosphore).

Ces deux composés (azote et phosphore) sont naturellement dissous dans les eaux épurées au niveau de la STEP.

Autres facteurs :

- 1) Température élevée : les végétaux aquatiques prolifèrent particulièrement entre 15 et 25° C.
- 2) Le pH optimal pour la croissance algale est situé entre 8.2 et 8.7. Par ailleurs, il existe quelques espèces qui croissent d'une manière optimale dans des environnements acides ou basiques
- 3) Éclairement fort : les espèces végétales aquatiques recherchent les fortes insulations pour leur photosynthèse.
- 4) Courant faible : si le courant est faible les végétaux s'implantent facilement. Par ailleurs, plus le courant est faible moins le milieu se renouvelle ce qui favorise le développement du phytoplancton.
- 5) Amplitude de variations de la ligne d'eau faible : un fort débit provoque des remaniements du fond du cours d'eau et l'arrachement des végétaux.

6) Homogénéisation des conditions d'habitats des cours d'eau : une espèce prolifère d'autant plus facilement qu'elle rencontre un habitat favorable sur des grandes distances. Un habitat diversifié limite donc ces proliférations.

7) Stagnation de l'eau dans des conditions favorables à la prolifération des algues avec un manque d'entretien des bassins de stockage au niveau des golfs.

2.3 Effets d'eutrophisation sur les golfs :

L'impact est principalement une diminution de la teneur en oxygène de l'eau issue de différents phénomènes:

- Le développement des algues unicellulaires va entraîner une diminution de la teneur en oxygène dissout durant la nuit (la respiration est alors la seule fonction active la nuit alors que le jour la photosynthèse dégage plus d'oxygène que la respiration n'en absorbe).
- Le développement des algues bleues dans les lacs des golfs entraîne une sécrétion de toxines.

Il existe trois catégories de toxines produites par les cyanobactéries, chacune pouvant avoir des effets variables sur la santé :

Les dermatotoxines peuvent causer des irritations et créer des problèmes d'allergies. En contact avec la peau, ces toxines peuvent provoquer des sensations de brûlures ainsi que des démangeaisons rougeâtres et boursoufflées.

Les hépatotoxines favoriseraient l'apparition de troubles chroniques du foie et du tube digestif.

Les neurotoxines affectent le fonctionnement du système nerveux. En stimulant constamment les muscles, elles peuvent provoquer des crampes, une grande fatigue et même une paralysie.



Figure 33 : Image de cyanobactéries dans le golf City Palace

□ Le taux de renouvellement du phytoplancton est plus rapide que sa consommation par le zooplancton et beaucoup d'algues vont donc se décomposer ce qui provoque une augmentation de l'activité bactérienne consommatrice d'oxygène.

□ Dégagement d'odeurs

L'appauvrissement du milieu en O₂ favorise l'activité des bactéries anaérobies qui décomposent les composés organiques et soufrés, produisant ainsi des gaz à effet de serre et à forte odeur notamment le H₂S qui se caractérise par l'odeur nauséabonde des œufs pourris.

□ Colmatage et bouchage des arroseurs et des filtres au niveau des stations de pompage des golfs ce qui engendre beaucoup des problèmes comme le flétrissement du gazon et la destruction du matériels dans la station de pompage et les tuyaux d'irrigation.

□ L'accroissement des frais d'investissement et de fonctionnement de L'arrosage du gazon.

□ Risque sanitaire, et la diminution de la biodiversité. La baisse de la qualité de l'eau d'irrigation.

□ Des effets négatifs sur le tourisme qui représente l'exploitant principale des golfs à Marrakech.

V. Généralité sur les algues :

1. Définition

Les algues sont des végétaux simples, le plus souvent unicellulaires capables de pratiquer la photosynthèse et vivant majoritairement dans un milieu aquatique (marin ou dulcicole). Elles sont dépourvues de tige, de racine, de feuille ou de fleur, elles sont généralement vertes car elles contiennent une concentration importante d'un pigment vert nommé chlorophylle. Toutefois, on retrouve également dans la nature des algues brunes, rouges, orangées ou jaunes. Il existe aussi quelques algues visibles à l'œil nu (ex. : algues filamenteuses) et d'autres qui ressemblent à des plantes aquatiques. Les algues microscopiques se divisent en deux principaux groupes : le périphyton et le phytoplancton, le périphyton vit attaché à des objets submergés (roches, plantes aquatiques, piliers de quais) et se concentre principalement dans les zones peu profondes du lac, tandis que le phytoplancton vit en suspension dans l'eau et se retrouve partout dans le lac, où les conditions lumineuses le permettent.

La grande classe des Algues, qui comprend tous les thallophytes pourvus de chlorophylle, qu'il soient marins ou d'eau douce, se divise en trois sous-classes, selon les caractères des pigments élaborés par les chloroplastes :

Les Chlorophycées ou Algues vertes

Les Phéophycées ou Algues brunes

Les Rhodophycées ou Algues rouges

Les Cyanophycées ou Algues bleues.

2. Role des algues

Source de nourriture Les algues sont des producteurs primaires, c'est-à-dire qu'elles sont le premier maillon de la chaîne alimentaire ; elles sont capables de convertir l'énergie lumineuse et les éléments nutritifs en composés organiques. Ainsi, elles constituent, pour un grand nombre d'organismes (poissons et petits animaux aquatiques), une source importante de nourriture.

Production d'oxygène : les algues ont la capacité de libérer l'oxygène contenu dans la molécule d'eau, grâce au processus de la photosynthèse. L'oxygène ainsi libéré participe ensuite à la respiration des organismes aquatiques.

3. Composition des algues

En total, 99,9% de la biomasse d'algue est composée de six éléments principaux :

- Le carbone (C) ;
- L'oxygène (O) ;
- L'hydrogène (H) ;
- L'azote (N) ;
- Soufre (S) ;
- Phosphore (P).

En plus du calcium (Ca), potassium (K), sodium (Na), chlorure (Cl), magnésium (Mg), fer (Fe), et silicium (Si). D'autres éléments sont disponibles en traces, parce qu'ils sont utilisés seulement en catalyse. Parmi les nutriments qui sont fournis en faibles quantités, les nitrates (NO_3^-), le fer (Fe), les phosphates (PO_4^{3-}), et le silicium dissous [$Si(OH)_4$] qui sont souvent présents en concentrations bien en dessous de celles de demi-saturation qui donnent une croissance maximale de phytoplancton. En particulier, les algues jouent un rôle important dans les cycles biochimiques des éléments qu'ils absorbent, assimilent, et produisent, tel que le carbone, l'oxygène, azote, phosphore, silicium et soufre.

4. Conditions habitationnelles

Les algues filamenteuses sont très souvent fixées, certaines uniquement dans leur jeune âge. Trois paramètres sont retenus pour caractériser l'habitat des organismes benthiques : substrat, vitesse de courant, hauteur d'eau.

Substrat

Tous les types de substrats peuvent être colonisés par les algues, selon leur mode de croissance et le système de fixation qu'elles développent. Certaines possèdent des organes spécifiques (rhizoïdes des characées, disque basal des *Rhizoclonium*) qui leur permettent un ancrage, au moins en début de croissance, sur des substrats très variés, même sur ceux soumis à un très fort courant (*Lemanea*, *Cladophora*). D'autres colonisent les substrats meubles, minéraux ou organiques,

courant

Conditionnant la distribution des substrats d'eau courante, la vitesse agit mécaniquement sur la forme des filaments et la densité des masses algales (thalle lâche ou en coussinet ramassé). Certaines formes sont étroitement inféodées aux fortes vitesses de courant (*Lemanea*),

Dans la plupart des groupes, cette sensibilité au courant s'accroît avec la taille et l'âge de l'algue, des masses énormes de *Cladophora* et de *Vaucheria* pouvant ainsi se décrocher en fin de croissance ou à la suite de violents épisodes orageux.

Hauteur d'eau

Les hauteurs d'eau les plus favorables dépendent notamment de la transparence des eaux. Elles se situent entre quelques centimètres et 1 m s'il s'agit de biomasses importantes, car au-delà, les masses algales font obstacle à la pénétration de la lumière et la partie inférieure des filaments se décompose très rapidement. Certains peuplements de characées peuvent se développer jusqu'à 10 m de profondeur, voire au-delà ; d'autres sont par contre adaptés aux faibles profondeurs (< 1 m).²

5. Photosynthèse :

La photosynthèse est un processus « Bioénergétique » (de transformation de l'énergie) qui permet aux plantes de synthétiser leur matière organique grâce à l'énergie solaire. Cette fabrication de matière carbonée organique est faite à partir d'eau et de CO₂ en présence de lumière. Les besoins nutritifs de la plante sont le CO₂ de l'air, l'eau et les minéraux du sol. Conséquence importante : libération de molécules de dioxygène (O₂). La nuit, la photosynthèse est suspendue. À l'échelle planétaire, ce sont les algues qui produisent le plus d'oxygène suivi des forêts.

Les phases de la photosynthèse : La photosynthèse peut s'étudier de manière globale avec :



- Les réactions photochimiques (ou phase claire) qui se résument ainsi :



- Puis la phase fixation de carbone (ou phase sombre) :



VI. Identification de quelques algues existantes dans les bassins des golfs :

L'observation microscopique des échantillons au laboratoire de la RADEEMA et les recherches bibliographiques ont révélé que la plupart des algues vertes présentes dans les bassins de stockage et les lacs des golfs sont principalement des genres :

Spirogyra, Mougeotia, Hydrodictyon.

1. Genre : *Hydrodictyon*

Auteur, année : Roth, 1797.

Embranchement : Chlorophyta.

Ordre : Sphaeropleales.

Famille : Hydrodictyaceae.

Nombre d'espèces (et taxons infraspécifiques) continentales et marines : 5 surtout d'eau.

Morphologie

Caractères généraux

Aspect : filet cylindrique ou masse flottante à maille généralement hexagonale visible à l'œil nu dans

de bonnes conditions.

Couleur : vert.

Longueur : jusqu'à 30 (50) cm.

Odeur : non caractéristique.

Toucher : rêche.

Écologie

Développement tardif, apparaissant aux mois les plus chauds (juillet-août) et pouvant subsister assez tard dans la saison.

Habitat : eaux douces à légèrement saumâtres, alcalines, dures ; un niveau élevé de minéralisation est lié à son développement. Faciès lentique, en plan d'eau (lacs, étangs).

Substrat : pas d'affinité particulière avec un substrat donné, cette algue n'étant pas fixée. Développement dans la tranche d'eau et en surface.

Qualité : eaux eutrophes (azote, parfois sulfates) (fig : 34).



Figure 34 : Vue microscopique de Hydrodictyon (Laplace-treytur et al, 2014)

2. Genre : *Mougeotia*

Auteur, année : Agardh, 1824.

Embranchement : Charophyta.

Ordre : Zygnematales.

Famille : Zygnemataceae.

Nombre d'espèces (et taxons infraspécifiques) continentales et marines : 166 ; dont nombreuses espèces d'eau douce.

Morphologie

Aspect : masse floconneuse.

Couleur : vert à vert-clair.

Longueur : 10 à 25 cm.

Odeur : non caractéristique.

Toucher : visqueux.

Remarques : fixé ou libre flottant, parfois en masse.

Écologie

Habitat : Préfère les eaux froides et printanières, en particulier dans des environnements exposés à la lumière. Eaux courantes mais surtout stagnantes (faciès lenticles, zones littorales, baies, plans d'eau, petits cours d'eau, fossés). Milieux acides (lacs, tourbières, zones de montagne..), parfois alcalins.

Substrat : pierres, galets, végétaux.

Qualité : milieu oligo à mésotrophes, pollution saprobique moyenne.



Figure35 : Mougeotia dans le lac du golf Cherifia



Figure36 : Vue microscopique de *Mougeotia* (C. laplace-treyture et al, 2014)

3. Genre : Spirogyra

Auteur, année : Link, 1820.

Embranchement : Charophyta.

Ordre : Zygnematales.

Famille : Zygnemataceae.

Nombre d'espèces (et taxons infrasécifiques) continentales et marines : 509.

Morphologie

Aspect : masse floconneuse.

Couleur : vert brillant à brun-jaunâtre (en fin de cycle).

Longueur : 5 à 20 cm.

Odeur : non caractéristique.

Toucher : visqueux.

Écologie

Développement précoce printanier (affinité ou tolérance à de fortes irradiances et températures) et disparition dès la mi-juin pour certaines espèces avec une réapparition possible à l'automne. Certaines espèces plus grosses perdurent l'été avec des températures plus élevées.

Habitat : eaux stagnantes, faciès lénitique (espèces non fixées) – eaux courantes (espèces fixées). Fossés, étangs, anses calmes, zones littorales. Préférence pour les eaux douces, mais certaines espèces sont saumâtres. Secteurs ombragés à très éclairés. Gamme de minéralisation et de dureté moyenne à forte, pH de faiblement acide à alcalin (pas à pH < 5), la plupart des espèces étant liées aux milieux neutres à acides. Achève son développement en conditions d'éclairage et de température élevés (20 à 25 °C).

Substrat : relative indépendance par rapport au substrat (pas ou peu fixé, dans la tranche d'eau), vases, graviers, pierres, galets. **Qualité** : gamme de trophie assez large selon les espèces, de méso à eutrophe (relation entre le niveau trophique et la largeur des filaments : trophie élevée, grande largeur du filament).

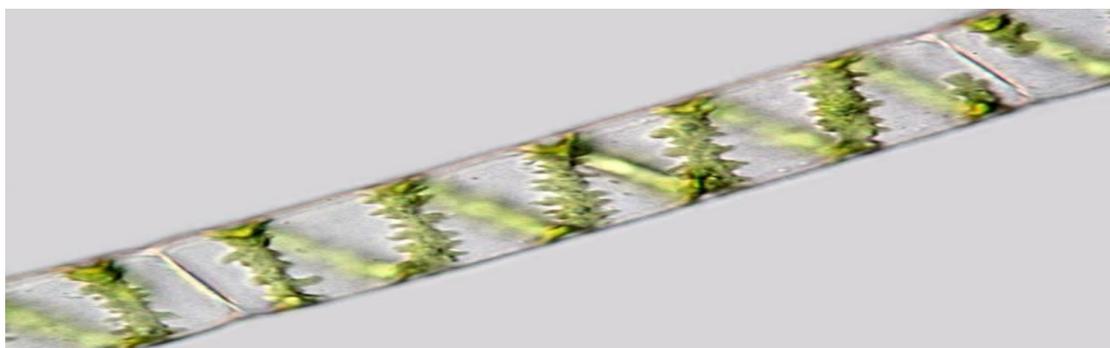


Figure 37 : Vue microscopique de Spirogyra (C. laplace-treuture et al, 2014)



Figure 38 : Spirogyra dans le lac du golf ARGANA.



Figure 39 :Spirogyra après la mort (golf City Palace)

VII. Solutions proposées pour freiner la prolifération des algues dans les bassins golfs

Dans le cadre de l'étude de la problématique de la prolifération des algues dans les bassins golfs, on a proposé trois genres de solutions (chimique, physique et biologique) pour éliminer ou réduire ce phénomène.

1. Solutions chimiques :

Les solutions chimiques sont très efficaces pour freiner la prolifération des algues, mais elles ont un effet négatif sur la croissance du gazon.

1.1 Élimination du phosphore

Les formes typiques du phosphore présents dans les eaux usées sont les ortho phosphates, poly phosphates, et le phosphate organique. L'enrichissement excessif d'un milieu en phosphore est l'un des principales causes de son eutrophisation. L'élimination du phosphore permet donc la prévention de ce phénomène. L'élimination du nutriment peut se faire à l'aide de plusieurs méthodes :

- Traitement biologique : Effectuer au niveau de traitement secondaire par deux réactions majeurs (la nitrification et la dénitrification). En parallèle de l'élimination d'azote on aura une élimination de phosphore.
- Traitement chimique : L'élimination du phosphore s'effectue principalement en traitement tertiaire (traitement par coagulation-floculation et filtration sur sable). Nous allons considérer donc le traitement du phosphore par précipitation chimique grâce à des sels métalliques (aluminium ou fer) et ou à l'aide d'un polymère. Les ions d'aluminium peuvent faire flocculer les ions phosphate sous forme de phosphate d'aluminium qui se précipite.

1.2 Élimination de l'azote

L'azote (N) est présent dans les eaux usées sous forme organique, ammoniacale, nitrite, nitrate, et azote gazeux. L'azote organique inclut les deux formes soluble et particulaire. L'azote organique soluble est principalement sous forme d'urée et d'acides aminés. La source principale en est les excréments humains, déchets ménagers et industriels (Industrie alimentaire, fertilisants...). Les procédés de traitement ont été développés dans le même but de transformer ou d'éliminer l'azote des eaux usées.

- Procédé biologique qui élimine l'azote organique et le transforme en ammonium et d'autres formes inorganiques (nitrification-dénitrification) au niveau du traitement secondaire d'une manière plus poussée.

1.3 Inhibition par le cuivre

Le cuivre active certaines enzymes des plantes, lesquelles jouent un rôle dans la synthèse de la lignine, en plus d'être essentiel dans plusieurs systèmes enzymatiques. Il est également requis dans le processus de la photosynthèse, est nécessaire à la respiration des plantes et aide au métabolisme des glucides et des protéines.

Le cuivre sert aussi à la croissance des algues, mais une quantité excessive de cuivre dans le substrat peut limiter la croissance des racines en brûlant leurs extrémités, et éliminer la prolifération des algues. Mais si on veut utiliser cette solution pour l'inhibition des algues la concentration du cuivre va agir sur la croissance du gazon. Dans cette perspective, et après traitement avec le cuivre, une dilution des eaux d'irrigation est requise afin de ne pas endommager la croissance du gazon.

2. Solution physique :

Dans les bassins golfeques les solutions physiques sont plus faisables et pratiques que les solutions chimiques.

2.1 Filtration en masse

C'est une solution au problème de développement d'algues. L'utilisation des systèmes de filtration des piscines est envisageable. Cependant, cette dernière n'est adaptée qu'aux bassins de petite taille. Elle est très efficace lorsqu'elle est bien dimensionnée. Dans une piscine, si l'eau n'est pas filtrée, elle stagne, les impuretés s'accumulent, ainsi que la pollution, les algues s'y prolifèrent très rapidement.

Pour éviter le manque d'hygiène évident dû à la stagnation de l'eau, le bassin de la piscine n'est pas complètement fermé et l'eau se renouvelle, c'est le principe de la filtration : renouveler l'eau du bassin pour qu'elle soit toujours propre, c'est toujours la même eau, mais elle est régulièrement purifiée. Le filtre et la pompe sont responsables de la qualité de l'eau d'une piscine ou d'un lac. Raccordés par le biais de tuyaux au bassin, ce groupe technique est situé dans un local technique, indépendant et protégé de l'intérieur. Le groupe technique (filtre + pompe) est relié au bassin par un réseau de canalisations qui assure l'adduction d'eau : Aspiration de l'eau en amont de la pompe et Refoulement de l'eau en aval de la pompe. (Fig : 40)

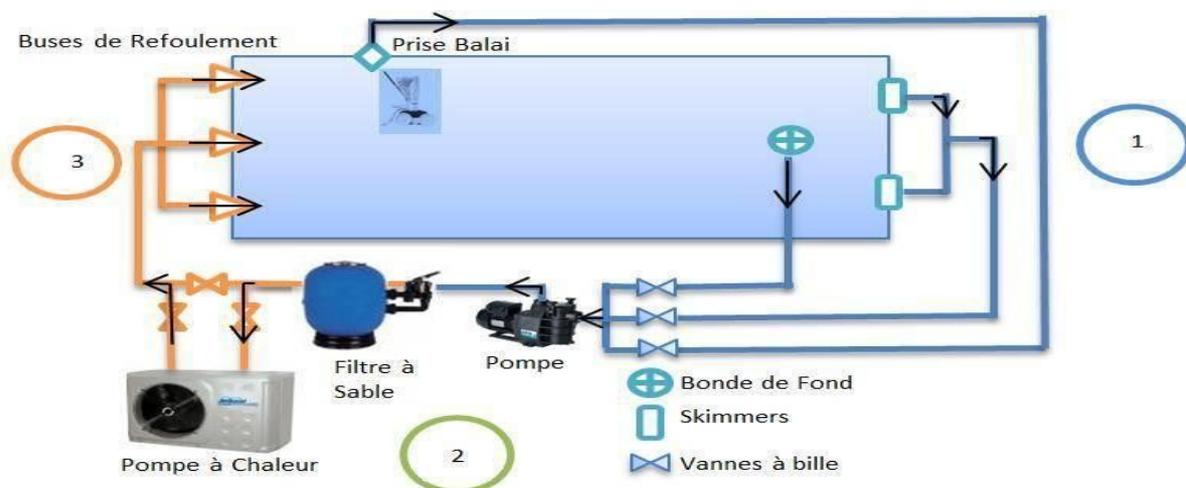


Figure 40 : Schéma de la filtration en masse (site web : 2)

2.3 Abri de la lumière et de l'atmosphère

Le fait que les bassins de stockage soient ouverts à l'air libre, l'ensemencement par les graines, les spores ainsi que les pollens portés par le vent devient préjudiciable. Couvrir les bassins golfiques par des géo membranes (fig. : 41) va permettre donc d'inhiber la croissance d'algues qui sont principalement des organismes photosynthétiques et de faire diminuer l'évaporation de l'eau.

Mais cette solution aura des inconvénients comme :

- Le rayonnement du soleil chauffera l'eau du bassin, ce qui n'est pas recommandé pour l'irrigation.
- L'arrêt de l'activité photosynthétique dans les couches profondes du bassin diminuera la Quantité d'oxygène dissous ce qui fait que la qualité de l'eau se dégrade en plus du Dégagement des mauvaises odeurs causées par la fermentation des composés organiques soufrés
- pour les lacs, la couverture n'est pas esthétiquement recommandable, car les lacs golfiques entrent dans le jeu.



Figure 41 : Photo d'un bassin couvert par un géo membrane (Site web : 3)

2.4 Utilisation des filtres

A la sortie de l'eau du bassin de stockage vers la station de pompage au niveau des golfs l'installation d'une série de filtres avec différents diamètres, allant du plus grand vers le plus bas, est envisageable. Cette solution aiderait à piéger les macros et les micros algues qui peuvent colmater les filtres de la station de pompage ainsi que les arroseurs (Fig. : 42).

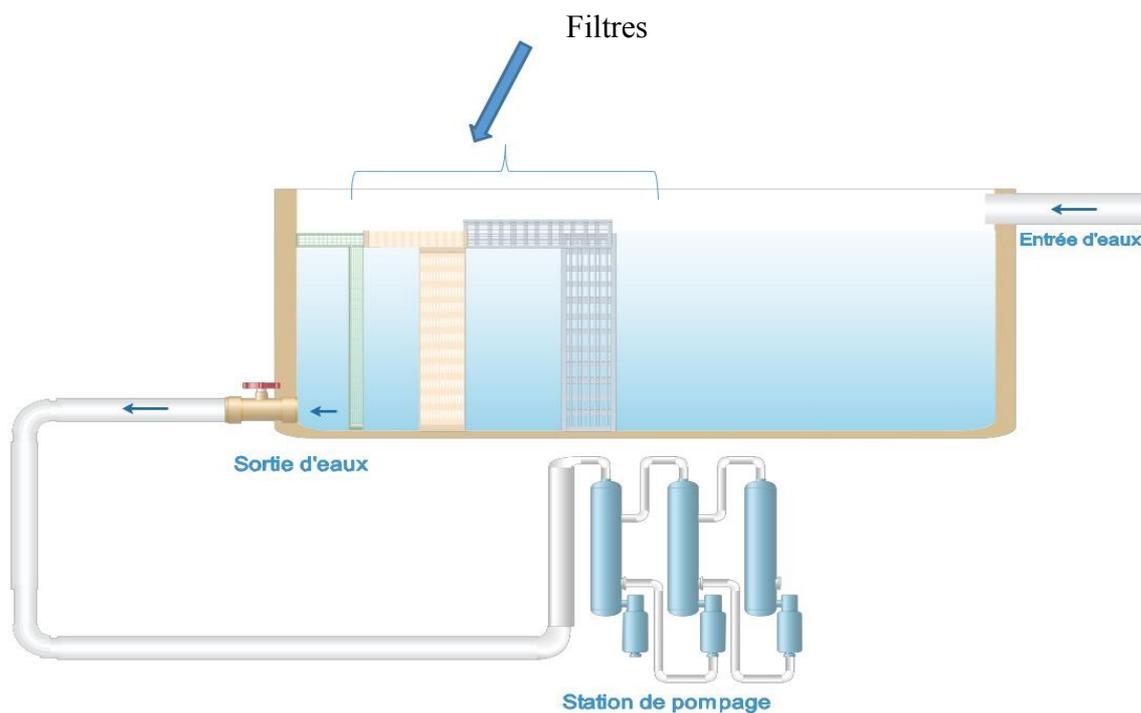


Figure 42 : Schéma du dispositif de filtration proposé.

2.5 Aération des bassins :

L'aération du lac est un processus qui permet une agitation de l'eau et ne permettant pas la stagnation de l'eau et par conséquent on aura une diminution de la prolifération des algues au niveau des bassins.

Aération par destratification

L'air est envoyé sous pression dans un réseau de canalisations immergées et judicieusement perforées reposant sur le fond du plan d'eau. Ces lignes de diffusion d'air, dont la longueur totale peut atteindre plusieurs mètres, créent des rideaux de bulles. En montant les bulles entraînent avec elles des masses d'eau très importantes par effet d'air lift. Ces masses d'eau sont certes aérées, mais surtout par leur mise en contact avec l'atmosphère : les couches froides du fond sont progressivement ramenées en surface où elles s'aèrent avant d'être retournées au fond. L'installation de destratification fonctionne durant la période hivernale d'octobre à avril (Fig : 43).

Aération hypo limnique

L'aérateur hypo limnique aère les couches profondes des plans d'eau en y maintenant une teneur minimale en oxygène dissous (3mg/l).

Principe de fonctionnement l'air est envoyé sous pression dans un diffuseur placé à la base du Limno. Les bulles d'air montent et entraînent avec elles une masse d'eau anoxique importante par effet d'air lift. L'eau entraînée est aérée au contact des bulles lors de la montée dans le Limno puis retourne vers le bas pour être éjectée horizontalement sur le fond de la retenue. L'air en excès s'échappe naturellement par un évent. Il est mis en service d'avril à octobre pendant la période de stabilité thermique du plan d'eau. (Fig. : 4 3).

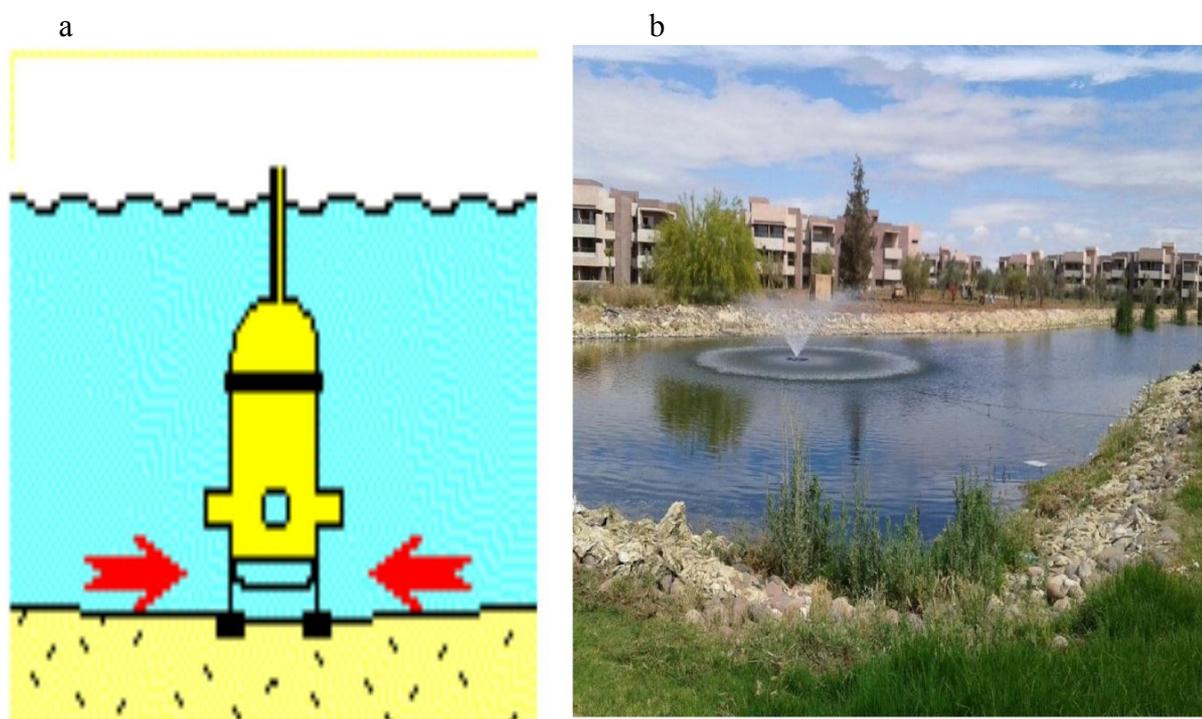


Figure 43 : Différents types d'aération : a) Aération hypo limnique, b) Aération par destratification dans le golf city palace.

2.6 Dragage des étangs

Il pourrait être envisagé, pour diminuer le problème du colmatage des étangs,. Le dragage des fonds permet d'enlever une quantité importante de la matière organique déposée et peut avoir des conséquences positives sur les problèmes d'eutrophisation. Ce type d'opération cause des perturbations importantes sur le milieu naturel (stabilité des berges, dérangement pour la faune notamment les poissons,...). donc il faut penser à isoler les ces poissons dans un lac avant de commencer le dragage (Fig. : 44).



Figure 44 : Dragage des algues en France (site web : 4)

2.7 Vidanges partielles

Cela consiste à vider les couches profondes au moins deux fois par ans, ces couches sont pauvres en oxygène dissous et riches en matière organiques qui engendrent des éléments nutritifs causant la prolifération des algues.

3. Solutions biologiques :

Les solutions biologiques sont peu coûteuses, mais sont peu efficaces que les autres (physique et chimique).

3.1 Élimination des algues par les daphnies

Les daphnies sont de petits crustacés mesurant de un à cinq millimètres, du genre *Daphnia*. Quelques espèces, relativement halophiles, supportent des conditions légèrement saumâtres. Ils vivent dans les points d'eau douce stagnante (étangs, lacs, mares plutôt en milieu forestier ou boisé en présence de feuilles mortes sur le fond). Les daphnies jouent un rôle majeur dans le cycle des nitrates et phosphates dans l'eau, et donc en termes d'« *autoépuration* » des eaux stagnantes. Elles sont aussi un régulateur efficace du phytoplancton, et l'élimination des micro-algues surtout les cyanobactéries, tant que les nutriments ne sont pas présents en quantité trop élevée. Elles sont une source d'alimentation importante pour de nombreuses espèces aquatiques et semi-aquatiques.

3.2 Élimination des macros algues par les poissons et les tortues

Les poissons ont un rôle fondamental pour éliminer les algues, car la majorité se nourrissent par les algues, donc on peut adopter cette solution sans problème au niveau des bassins golfsiques à condition de ne pas les nourrir et d'éviter la surpopulation du bassin, en gardant en mémoire qu'un poisson rouge

aura besoin de 50 Litres d'eau pour être à l'aise. (Fig :45)

Les tortues aussi vont contribuer à l'élimination des algues surtout les tortues aquatiques herbivores qui occupent une grande partie de leur temps à chercher leur nourriture surtout les algues.



Figure 45 : Exemples de poissons qui peuvent se nourrir sur les algues (Site web : 5)

VIII. Conclusion :

L'implantation de la station d'épuration de la ville de Marrakech à pour but principale d'assurer le traitement de la totalité des eaux usées de cette ville, afin d'améliorer la qualité des milieux récepteurs, des conditions sanitaires et la mobilisation d'une ressource en eau alternative et renouvelable pour l'irrigation (33 Million m³/ans).

Mais l'utilisation de cette énorme quantité à l'irrigation des complexes golfs doit être conditionnée au respect de certaines limites de qualité permettant de garantir la sécurité des systèmes d'irrigation afin d'éviter toute nuisance esthétique et olfactive.

La conformité des paramètres physicochimiques et biologiques de ces eaux traitées aux exigences fixées par la convention RADEEMA/Promoteurs golfs ne prend pas en considération les conditions de stockage.

Pour remédier à ce problème il faut impérativement adopter des solutions selon la capacité de stockage des Golfs. Ces solutions doivent être pratiques et fonctionnelles avec des degrés d'efficacité différents. Nous avons pu voir la possibilité de régler complètement le problème d'efflorescence algale d'une manière biologique et physique peu économique et faisable. Ainsi les méthodes chimiques sont efficaces mais elles sont très coûteuse et ont un impact négatif sur le gazon et le sol.

Références bibliographiques :

Bulletin officiel, la loi 10-95 sur l'eau , (du 17 octobre 2002), les normes marocains d'irrigation, l'arrêté conjoint n° 1276-01.

Bulletin officiel, 1er hija 1434 (7 octobre 2013), l'arrêté conjoint du ministre de l'intérieur, du ministre de l'énergie, des mines, de l'eau et de l'environnement, du ministre de l'industrie, du commerce et des nouvelles technologies et du ministre de l'artisanat, les valeurs limites générales de rejet dans les eaux superficielles ou souterraines, n° 2942-13.

LAPLACE-TREYTURE C., PELTRE M.C., LAMBERT E., RODRIGUEZ S., VERGON J.P ET CHAUVIN C, (2014), Guide pratique de détermination des algues macroscopiques d'eau douce et de quelques organismes hétérotrophes, Irstea Bordeaux ed., Cestas, p : 204.

MOUHANNI H., HAMDI H., BENDOU1 A. et BENZINE L., (2011) Reutilisation des eaux usées épurées pour l'irrigation du gazon des golfs : impact sur la germination et la croissance du gazon, Revue internationale d'héliotechnique, n° 43, pp 14 - 21.

RADDEMA.(2008), Note processus de la STEP, Groupement Golden State Waterleau - Sotradema – Eusebios.

RADEEMA (2014), Organigramme, rapport interne du département des ressources humaines.

RADEEMA (2016), La longueur du réseau d'assainissement dans la ville de Marrakech, rapport interne, Département assainissement et exploitation.

RADEEMA (2016), La consommation en eau des golfs, rapport interne, Service de la reutilisation de la STEP.

Références webographies :

1) <https://www.google.com/#q=eutrophisation>

2) <https://www.google.com/search?q=filtration+en+masse+dans>

3) <https://www.google.com/search?q=abri+par+géomembrane&source>

4) <https://www.google.com/search?q=les+algues&source>

5) https://www.google.com/search?q=les+algues&source=Inms&tbm=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEWij2rfh4bjUAhUCMZoKHbxpAKsQ_AUIBygC&biw=1366&bih=662#tbm=isch&q=les+poissons+qui+se+nourrissent+sur+les+algues