

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOHAMED KHIDER – BISKRA –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil et Hydraulique

N° d'ordre :

Série :



MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Hydraulique Urbaine et Ouvrages Hydrotechniques

Option : Hydraulique urbaine

Présenté par :

ABIBSI Nadjet

Ingénieur d'Etat en Hydraulique

THEME

**REUTILISATION DES EAUX USEES EPUREES PAR
FILTRES PLANTES (PHYTOEPURATION) POUR
L'IRRIGATION DES ESPACES VERTS
APPLICATION Á UN QUARTIER DE LA VILLE DE BISKRA**

Soutenue le :...../...../2011

Devant le jury composé de :

ZELLA Lakhder	Professeur	Président	Université de Blida
DEBABECHE Mahmoud	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
BENKHALED Abdelkader	MC (A)	Examineur	Université de Biskra
CHERGUI Salah	Ingénieur	Invité	Direction d'Hydraulique

DEDICACES

Je dédie ce modeste mémoire qui est la conséquence de longues années d'études, en premier lieu à :

** ma très chère MÈRE, à qui je dois beaucoup pour ces sacrifices, son amour, son aide et son soutien afin de me voir parvenir à ce que je suis devenu aujourd'hui.*

** Mon cher PÈRE qui m'a donné la volonté de réaliser et de finir ce travail.*

** A mon grand frère MOUNIR, pour ces conseils, son soutien moral et pour tout ses efforts.*

** A mes très chères sœurs NOURHANE, HOUDA et LEILA.*

** A mes très chers frères TOUFIK, SALIM, KHALED, YAZID AYMEN et ABED ANASAR,*

Je dédie également ce travail à tous mes amis avec lesquels je partage tous les souvenirs inoubliables.

NADJET ABIBSI

REMERCIEMENTS

A l'issue de cette étude, Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de mon travail .

Ma reconnaissance va plus particulièrement à :

Mon promoteur Monsieur DEBABECHE MAHMOUD professeur en hydraulique pour sa contribution à l'élaboration de cette mémoire .

Je suis également reconnaissant aux membres de Jury qui ont bien voulu examiner et discuter mon travail ; je les en Remercie vivement .

Mes sincères remerciements vont également à Messieurs MASMOUDI ALI , professeur en agronomie pour sa contribution dans ce travail .

Je Remercie toutefois tout les personnes de la direction d'Hydraulique de la wilaya de Biskra : Mr HAMIDATOU , Mr RAJASS , MR KAMEL GASSEM et Mr BARDOUD pour leurs aides , pour ses directives et ses conseils .

Je remercie Mr MAGID ROUKBAN Ingénieur hydraulicien pour leur aides .

Je remercie aussi Mr RIDA SOUALMIA Journaliste au quotidien Al-Nahar pour leur aides .

Je remercie L'ensemble des enseignants qui m'ont suivi durant mon cycle d'étude .

Enfin, je voudrais souligner les contributions efficaces de tous mes Proches et Amis qui, à des titres divers, m'ont aidé et soutenu moralement, tout au long de la préparation de cette thèse. Ce soutien moral est d'autant plus important que la rédaction d'une thèse . Je les remercie encore une fois.

ABIBSI NADJET

SOMMAIRE

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

Partie I : Synthèse bibliographique

Chapitre I: La pollution hydrique et les techniques d'épuration des eaux usées

1.1. Introduction.....	1
1.2. Origine des eaux usées.....	1
1.2.1. Origine domestique.....	1
1.2.2. Origine agricole.....	2
1.2.3. Origine industrielle.....	2
1.3. Caractéristiques des eaux usées.....	3
1.3.1. Paramètres Physiques.....	3
1.3.1.1. La température.....	3
1.3.1.2. La matière en suspension (MES).....	3
1.3.2. Paramètres Organoleptiques.....	4
1.3.2.1. La Turbidité.....	4
1.3.2.2. La couleur.....	4
1.3.3. Paramètres Chimique.....	4
1.3.3.1. Le potentiel Hydrogène (pH).....	4
1.3.3.2. La Conductivité.....	5
1.3.3.3. L'Oxygène Dissous.....	5
1.3.3.4. La Demande Chimique en Oxygène (DCO).....	5
1.3.3.5. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO).....	6
1.3.3.6. L'azote.....	6
1.3.3.7. Les nitrates.....	6
1.3.3.8. L'azote ammoniacal.....	7
1.3.3.9. Le Phosphore.....	7
1.3.3.10. Le sulfate.....	8
1.3.4. Paramètres Bactériologiques.....	8
1.3.4.1. Les coliformes.....	9
1.3.4.2. Les entérocoques.....	9
1.3.4.3. Les bactéries sulfite-réductrices.....	10
1.4. L'épuration des eaux usées.....	10
1.4.1. Les méthodes classiques de traitements.....	10
1.4.1.1. Les prétraitements.....	11
1.4.1.2. Le traitement primaire.....	11
1.4.1.3. Le traitement secondaire.....	12
1.4.1.3.1. L'élimination de l'ammoniaque : la nitrification.....	12
1.4.1.3.2. L'élimination des nitrates : la dénitrification.....	12
1.4.1.4. Le traitement tertiaire.....	13
1.4.1.4.1. La dé-phosphatation.....	13
1.4.1.4.2. La désinfection.....	13
1.4.1.5. Le traitement des boues.....	14

1.4.2. Traitement par lagunage	15
1.4.2.1. Le principe général de lagunage	16
1.4.2.2. Les différents systèmes de lagunage (phytoépuration)	16
1.4.2.2.1. Le lagunage à microphytes (lagunage naturel)	16
1.4.2.2.2. Le lagunage à macrophytes	17
1.4.2.2.3. Le bassin de finition à hydrophytes	17
1.5. la réutilisation des eaux usées	18
1.5.1. Définition	18
1.5.2. L'objectif	18
1.5.3. Applications	19
1.5.3.1. Le secteur agricole	20
1.5.3.2. Le secteur industriel	21
1.5.3.3. Le secteur urbain et périurbain	21
1.5.3.3.1. Réutilisation pour un usage non-alimentaire	21
1.5.3.3.2. Réutilisation pour un usage alimentaire (eau potable)	22
1.6 Conclusion	23

Chapitre 2 : Les espaces verts et leur besoins en eaux

2.1. Introduction	24
2.2. L'espaces verts	24
2.2.1. Les plantes des espaces verts dans la ville de Biskra	24
2.2.1.1. Le Buis (Buxus sempervirens)	24
2.2.1.2. Ficus Benjamina	25
2.2.1.3. Gazania	25
2.2.1.4 . Washingtonia robusta	25
2.2.1.5. Myoporum laetum	26
2.2.1.6. Bougainvillier	26
2.2.1.7. Le lilas	26
2.2.1.8. Lantana camara	27
2.2.1.9. Le gazon	27
2.2.1.10. Palmier Phoenix (Le Dattier des Canaries)	27
2.2.1.11. Le Laurier rose	28
2.3. Les besoins en eaux des plantes (ETM)	28
2.3.1. Définition	28
2.3.2 .L'évapotranspiration	28
2.3.2.1. Mesure de L'évapotranspiration potentielle	30
2.3.2.1.1. Méthodes directes	30
2.3.2.1.2. Méthodes indirectes	32
2.3.3. Le coefficient cultural (Kc)	34
2.4. Conclusion	35

Chapitre 3 : Les systèmes d'irrigation des espaces verts

3.1. Introduction	36
3.2. L'irrigation	36

3.2.1. Définition.....	36
3.2.2. Le réseau d'irrigation.....	36
3.2.3. Classification des réseaux d'irrigation.....	36
3.2.3.1. Selon la construction.....	36
3.2.3.2. Selon la réalisation.....	37
3.2.3.3. Selon la distribution de l'eau sur le périmètre.....	37
3.2.3.4. Selon le fonctionnement durant la période d'irrigation.....	37
3.2.4. Dose d'irrigation.....	37
3.2.5. Systèmes d'irrigation.....	37
3.2.5.1. Les systèmes gravitaires.....	38
3.2.5.2. Les systèmes sous pression.....	38
3.3. Système d'irrigation « goutte à goutte ».....	38
3.3.1. Définition de l'irrigation « goutte à goutte ».....	39
3.3.2. Le principe de système d'irrigation « goutte à goutte ».....	39
3.3.3. Organisation du réseau d'irrigation.....	39
3.3.3.1. Ouvrage de prise.....	40
3.3.3.2. Ouvrage d'adduction.....	40
3.3.3.3. Ouvrage de distribution.....	40
3.3.3.4. Réseau de colature.....	41
3.3.4. Choix du type de matériaux des conduites.....	42
3.3.4.1. Canalisation.....	42
3.3.4.1.1. Canalisations en acier.....	42
3.3.4.1.2. Canalisations en fonte.....	42
3.3.4.1.3. Canalisations en amiante ciment.....	42
3.3.4.1.4. Canalisations en matière plastique.....	42
3.3.4.2. Assemblage de tuyaux.....	43
3.3.4.3. Raccord.....	43
3.3.4.4. Matériels de contrôle des débits.....	43
3.3.4.5. Matériels de contrôle de pression.....	43
3.3.4.6. Les rampes.....	43
3.3.4.7. Les porte- rampes.....	44
3.3.4.8. Les goutteurs.....	44
3.3.5. Les avantages et les inconvénients du système goutte à goutte.....	45
3.3.5.1. Avantages.....	45
3.3.5.2. Inconvénients.....	45
3.3.5.2.1. L'obstruction des goutteurs.....	46
3.3.5.2.2. Accumulation des sels.....	46
3.3.5.2.3. Difficulté à déterminer le volume minimal de sol à humidifier.....	47
3.3.6. Automatisation.....	47
3.4. Qualité de l'eau d'irrigation.....	50
3.5. Conclusion.....	52

Chapitre 4: La phytoepuration

4.1. Introduction.....	53
4.2. Historique de la phytoepuration.....	53

4.3. Généralités sur les systèmes de la phytoépuration.....	56
4.3.1. Qu'est-ce qu'un marais naturel ?	56
4.3.2. Les biocénoses des marais (faune, flore).....	56
4.3.3. Les marais artificiels.....	57
4.3.3.1. Les composantes d'un marais artificiel.....	58
4.3.3.1.1. L'eau.....	58
4.3.3.1.2. Le substrat, sédiment et détritux	59
4.3.3.1.3. La végétation.....	59
4.3.3.1.4. Les micro-organismes	60
4.3.3.1.5. Les animaux.....	61
4.3.3.2. Les types des marais construits.....	62
4.3.3.2.1. Bassin à écoulement en surface.....	62
4.3.3.2.2. Bassin à écoulement sous-surface	62
4.3.3.2.2.1. Les filtre plantés à écoulement vertical.....	63
4.3.3.2.2.2. Les filtres plantés à écoulement horizontal.....	64
4.3.3.2.3. Les systèmes hybrides	65
4.4 . Principe de fonctionnement.....	65
4.4.1. Rôle des micro-organismes.....	66
4.4.2. Rôle des macrophytes.....	67
4.4.3. Plantes utilisées.....	68
4.4.3.1. Phragmites (Roseau).....	69
4.4.3.2. Le typha.....	70
4.5. Configuration des lits du filtre.....	70
4.5.1. Kadlec & Knight (1996).....	71
4.5.2. Selon Reed, Crites & Middlebrooks (1995).....	72
4.5.3 . Selon l'EPA (1993).....	75
4.5.4. Selon le Groupe Macrophyte de Traitement des Eaux Usées, 2005	77
4.6. L'aménagement des bassins de la phytoépuration.....	78
4.6.1. Système d'alimentation.....	78
4.6.2. Système d'évacuation.....	78
4.6.3. Imperméabilisation.....	82
4.6.3.1. Les géosynthétiques.....	82
4.6.3.1.1. Les fonction de géosynthétiques.....	79
4.6.3.1.2. Typologies.....	80
4.6.4. Milieu filtrant.....	80
4.7. Conclusion.....	81

Partie II: Dimensionnement et calcul

Chapitre5 : Calcul des besoins en eau et d'irrigation des espaces verts

5.1. Introduction.....	82
5.2. Calcul de projet	82
3 .5. Présentation de la wilaya de Biskra	82
5.3.1. Situation géographique.....	82
5.3.2. Caractéristiques climatiques.....	83

5.3.2.1. Les températures	83
5.3.2.2. L'évaporation	84
5.3.2.3. La pluviométrie	85
5.3.2.4. L'humidité relative	85
5.3.2.5. Les vents	86
5.3.2.6. L'ensoleilment	86
5.3.2.7. Diagramme Ombrothermique	86
5.3.2.8. Climmagramme d'Emberger	87
5.3.3. La végétation	88
5.4. Présentation de la région d'étude	88
5.4.1. Situation géographique du boulevard "8 mars"	88
5.4.2. Situation topographique du boulevard "8 mars"	89
5.4.3. Estimation de la surface des espaces verts étudiés	90
5.5. Calcul des besoins en eau des espaces verts du boulevard "8 mars"	91
5.5.1. Le KC de palmiers	92
5.5.2. Calcul de l'ETP	92
5.6. Irrigation	93
5.7. Calcul de volume du bassin d'accumulation	93
5.8. Calcul de débit d'irrigation	93
5.9. Volume du bassin d'accumulation	93
5.10. Calcul hydraulique du réseau	94
5.10.1. Calcul du réseau de distribution	94
5.10.2. Les formule de calcul	95
5.10.2.1. La formule de ACHOUR	95
5.10.2.2. La formule de BRESSE	96
5.10.2.3. L'équation de continuité	96
5.10.3. Résultats obtenus	96
5.10.4. Choix de la pompe	99
5.10.4.1. Calcul de l'HMT	100
5.11. Conclusion	100

Chapitre 6: Dimensionnement de station de la phytoepuration

6.1. Introduction	101
6.2. Réseau d'assainissement de boulevard " 8mars"	101
6.3. La prise des eaux usées (un regard choisi)	102
6.4. Le lieu d'installation	102
6.5. Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées du regard choisi	103
6.5.1. Le rapport DCO/DBO ₅	104
6.6. Les normes des eaux usées rejetées selon l'OMS	104
6.7. Le prétraitement	105
6.7.1. Fosse septique toutes eaux	105
6.7.2. Rôle et fonctionnement d'une fosse septique toutes eaux	106
6.7.3. Volume utile de la fosse septique toutes eaux	106
6.7.4. Dimensionnement de la fosse septique toutes eaux	106

6.7.5. Filtre de finition.....	107
6.8. Dimensionnement.....	107
6.8.1. Bassin Filtrant.....	107
6.8.1.1. Type de filtre planté (horizontale ou vertical).....	107
6.8.1.2. Données numériques du boulevard " 8 mars".....	109
6.8.1.3. Longueur et largeur du filtre.....	109
6.8.2. Temps de rétention.....	109
6.8.3. Le substrat.....	110
6.8.4. Le choix de la végétation.....	111
6.9. Choix de la pompe.....	111
6.10. L'entretien de l'installation.....	112
6.11. Conclusion.....	113

INTRODUCTION

Les villes du sud algérien présentent un climat aride à semi –aride avec de fortes chaleurs en saison estivale. Pendant cette période de l'année, les espaces verts de la ville résistent difficilement au climat et souffrent d'un déficit en eau, provoqué essentiellement par l'évaporation et l'évapotranspiration. Afin de remédier à ce problème, l'étude suggère de valoriser la possibilité de la réutilisation des eaux usées, épurées par filtres plantés (Phyto-épuration) pour l'irrigation en continu des espaces verts. Selon la littérature, le procédé d'épuration par les plantes est considéré dans certains cas comme plus avantageux que les techniques classiques d'épuration. Cette technique entre dans le cadre de la gestion des ressources en eaux non conventionnelles. C'est une technique écologique durable qui respecte l'homme et la nature, car elle peut être intégrée dans le milieu urbain sans problèmes d'impact sur le paysage.

Le processus d'épuration naturelle des eaux usées est effectué d'un ensemble de réactions physico-chimiques et biologiques effectuées par les micro-organismes et les plantes sur les polluants présents dans ces eaux. Celui-ci est défini par le terme "PHYTOEPURATION ". Parmi les systèmes de phytoépuration on distingue:

- le système à écoulement "sous-superficiel" dans lequel le bassin est submergé en permanence en eau à épurer,
- le système à écoulement "superficiel" dans lequel le bassin est submergé en permanence en eau à épurer
- et le système "flottant", où les plantes sont soutenues par des structures flottantes adaptées, avec des racines libres en travers de l'écoulement d'eau à épurer.

Selon la littérature, le système de phytoépuration à écoulement sous-superficiel est considéré comme étant le plus développé. Il est mis en œuvre dans des bassins étanches remplis d'un matériau perméable et inerte, dans lequel sont plantées des végétaux. Il peut être à écoulement horizontal ou vertical. L'acte d'épurer est réalisé principalement par des micro-organismes qui vivent en symbiose avec les plantes. Ces micro-organismes soit en aérobie ou en anaérobie, mettent en place une série de réactions chimiques et physiques permettant la dégradation des polluants.

Cette étude est divisée en deux parties et six chapitres. La première partie sera consacrée à une recherche bibliographique dans le domaine de la phytoépuration. Quant à

la seconde partie, celle-ci sera exclusivement réservée au dimensionnement d'une installation de réutilisation des eaux usées prétraitées, pour l'irrigation des espaces verts d'un quartier de la ville de Biskra.

- Le premier chapitre donnera un aperçu sur la définition, l'origine et les caractéristiques des eaux usées, ainsi que les différentes méthodes utilisées pour leur épuration.
- Le second chapitre sera consacré à la description des espaces verts et leurs besoins en eaux.
- Le troisième chapitre examinera les systèmes d'irrigation des espaces verts et leur classification.
- Le quatrième chapitre aura pour objectif de décrire en détaille le principe de la phytoépuration.
- Le cinquième chapitre de ce mémoire sera dédié à l'évaluation des besoin en eaux d'irrigation.
- Le sixième et dernier chapitre abordera le dimensionnement de l'installation d'épuration et de réutilisation des eaux usées.

Partie I

Synthèse bibliographique

Chapitre 1: La pollution hydrique et les techniques d'épuration des eaux usées

Chapitre 2 : Les espaces verts et leur besoins en eaux

Chapitre 3 : Les systèmes d'irrigation des espaces verts

Chapitre 4 : La phytoépuration

CHAPITRE I

La pollution hydrique et les techniques d'épuration des eaux usées

I- Généralités sur les eaux usées

II- L'épuration des eaux usées

**III-La réutilisation des
eaux usées**

IV - Conclusion

1.1. Introduction

Les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine (REJSEK, 2002). Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels (GROSCLAUDE, 1999).

Ce chapitre a pour principal objectif de donner une idée sur les origines des eaux usées, leurs caractéristiques, ainsi que les différentes techniques utilisées pour leur épuration.

1.2. Origines des eaux usées

D'après RODIER et al (2005), on peut classer comme eaux usées, les eaux d'origine urbaine constituées par les eaux ménagères (lavage corporel et du linge, lavage des locaux, eaux de cuisine) et les eaux vannes chargées de fèces et d'urines. Toute cette masse d'effluents est plus ou moins diluée par les eaux de lavage de la voirie et les eaux pluviales. Peuvent s'y ajouter suivant les cas les eaux d'origine industrielle et agricole. L'eau, ainsi collectée dans un réseau d'égout, apparaît comme un liquide trouble, généralement grisâtre, contenant des matières en suspension d'origine minérale et organique à des teneurs extrêmement variables.

Selon GROSCLAUDE (1999), une eau usée est une eau rejetée après usage industriel, domestique ou agricole.

1.2.1. Origine domestique

Les effluents domestiques sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines: urines, fèces (eaux vannes) et eaux de toilette et de nettoyage des sols et des aliments (eaux ménagères). Ces eaux sont généralement constituées de matières organiques dégradables et de matières minérales, ces substances sont sous forme dissoute ou en suspension.

1.2.2. Origine agricole

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

- Des fertilisants (engrais minéraux du commerce ou déjections animales produites ou non sur l'exploitation);
- Des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...) (GROSCLAUDE, 1999).

1.2.3. Origine industrielle

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

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

- Pollution due aux rejets toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des industries nucléaires....).

Les eaux résiduaires d'origine industrielle ont généralement une composition plus spécifique et directement liée au type d'industrie considérée. Indépendamment de la charge de la pollution organique ou minérale, de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propre liée aux produits chimiques transportés (RODIER ,2005).

1.3. Caractéristiques des eaux usées

Sous ce sous chapitre nous passerons en revue les principaux paramètres physico-chimiques analysés au cours de la partie expérimentale ainsi que les paramètres bactériologiques les plus rencontrés dans les eaux usées.

1.3.1. Paramètres Physiques

1.3.1.1. La température

Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, etc. (RODIER et AL, 2005).

1.3.1.2. La matière en suspension (MES)

Selon REJSEK (2002), la pollution particulaire est due à la présence de particules de grande taille, supérieure à 10 μ m, en suspension dans l'eau, et que l'on peut assimiler aux matières en suspension (MES). En fait, les matières en suspension ne sont des particules solides véritablement en suspension que dans des conditions moyenne d'écoulement des effluents correspondant à une vitesse minimale de 0,5 m/s .

1.3.2. Paramètres Organoleptiques

1.3.2.1. La Turbidité

Selon REJSEK (2002), la turbidité représente l'opacité d'un milieu trouble. C'est la réduction de la transparence d'un liquide due à la présence de matières non dissoutes. Elle est causée, dans les eaux, par la présence de matières en suspension (MES) fines, comme les argiles, les limons, les grains de silice et les microorganismes. Une faible part de la turbidité peut être due également à la présence de matières colloïdales d'origine organique ou minérale.

Les unités utilisées pour exprimer la turbidité proviennent de la normalisation ASTM (American Society for Testing Material) qui considère que les trois unités suivantes sont comparables :

Unité JTU (Jackson Turbidity Unit) = unité FTU (Formazine Turbidity Unit) = unité NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

1.3.2.2. La couleur

Une eau pure observée sous une lumière transmise sur une profondeur de plusieurs mètres émet une couleur bleu clair car les longueurs d'onde courtes sont peu absorbées alors que les grandes longueurs d'onde (rouge) sont absorbées très rapidement. (REJESK, 2002). La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration. (RODIER et Al, 2005).

1.3.3. Paramètres Chimiques

1.3.3.1. Le potentiel Hydrogène (pH)

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H_3O^+ (noté H^+ pour simplifier). De manière à faciliter cette expression; on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ : c'est le pH. (MATHIEU et PIELTAIN, 2003).

$$\mathbf{pH = \log 1/ [H^+]}$$

1.3.3.2. La Conductivité

La conductivité est la propriété que possède une eau de favoriser le passage d'un courant électrique. Elle est due à la présence dans le milieu d'ions qui sont mobiles dans un champ électrique. Elle dépend de la nature de ces ions dissous et de leurs concentrations. (REJSEK, 2002). La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm^2 .

L'unité de conductivité est le siemens par mètre (S/m).

$$1 \text{ S/m} = 10^4 \mu\text{S/cm} = 10^3 \text{ mS/m.}$$

1.3.3.3. L'Oxygène Dissous

L'oxygène dissous est un composé essentiel de l'eau car il permet la vie de la faune et il conditionne les réactions biologiques qui ont lieu dans les écosystèmes aquatiques. La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs, dont la température, la pression et la force ionique du milieu.

La concentration en oxygène dissous est exprimée en $\text{mg O}_2/\text{l}$ (REJSEK, 2002).

1.3.3.4. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)

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

La DCO étant fonction des caractéristiques des matières présentes, de leurs proportions respectives, des possibilités de l'oxydation. (RODIER, 2005).

La DCO est la concentration, exprimée en mg.L^{-1} , d'oxygène équivalente à la quantité de dichromates consommée par les matières dissoutes et en suspension lorsqu'on traite un échantillon d'eau avec cet oxydant dans des conditions définies par la norme. (REJSEK, 2002).

1.3.3.5. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO)

Pratiquement, la demande biochimique en oxygène devrait permettre d'apprécier la charge du milieu considéré en substances putrescibles, son pouvoir auto-épuration et d'en déduire la charge maximale acceptable, principalement au niveau des traitements primaires des stations d'épuration. (RODIER, 2005).

Selon REJSEK (2002), la demande biochimique en oxygène après 5 jours (DBO_5) d'un échantillon est la quantité d'oxygène consommé par les microorganismes aérobies présents dans cet échantillon pour l'oxydation biochimique des composés organiques et/ou inorganiques.

1.3.3.6. L'azote

L'azote présent dans l'eau peut avoir un caractère organique ou minéral. L'azote organique est principalement constitué par des composés tels que des protéines, des polypeptides, des acides aminés, de l'urée. Le plus souvent ces produits ne se trouvent qu'à de très faibles concentrations. Quant à l'azote minéral (ammoniaque, nitrate, nitrite), il constitue la majeure partie de l'azote total. (RODIER, 2005).

1.3.3.7. Les nitrates

Les nitrates se trouvant naturellement dans les eaux provenant en grande partie de l'action de l'écoulement des eaux sur le sol constituant le bassin versant. Leurs concentrations naturelles ne dépassent pas 3 mg /L dans les eaux superficielles et quelques mg/L dans les eaux souterraines. La nature des zones de drainage joue donc un rôle essentiel dans leur présence et l'activité humaine accélère le processus d'enrichissement des eaux en nitrates.

La teneur en nitrates est en augmentation ces dernières années, de l'ordre de 0,5 à 1 mg/L/an, voire 2 mg/L/an dans certaines régions. Cette augmentation a plusieurs origines :

- Agricole : agriculture intensive avec utilisation massive d'engrais azoté ainsi que rejets d'effluents d'élevage. Cette source représente les 2/3 de l'apport en nitrates dans le milieu naturel ;
- Urbaine : rejet des eaux épurées des stations d'épuration où l'élimination de l'azote n'est pas totale et qui peuvent rejeter des nitrates ou des ions ammonium qui se transformeront en nitrates dans le milieu naturel.

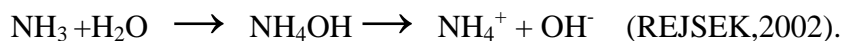
Cette source représente les 2/9 des apports ;

- Industrielle : rejet des industries minérales, en particulier de fabrication des engrais azotés. Cette source représente 1/9 des apports (REJSEK, 2002).

1.3.3.8. L'azote ammoniacal

Pour désigner l'azote ammoniacal, on utilise souvent le terme d'ammoniaque qui correspond aux formes ionisées (NH_4^+) et non ionisées (NH_3) de cette forme d'azote.

L'ammoniaque constitue un des maillons du cycle de l'azote. Dans son état primitif, l'ammoniac (NH_3) est un gaz soluble dans l'eau, mais, suivant les conditions de pH, il se transforme soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée (NH_4^+). Les réactions réversibles avec l'eau sont fonction également de la température et sont les suivantes :



1.3.3.9. Le Phosphore

Le phosphore peut exister dans les eaux en solution ou en suspension, à l'état minéral ou organique. Les composés phosphorés qui, sans hydrolyse ou minéralisation, répondent au test spectrophotométrique sont considérés comme étant des orthophosphates. L'hydrolyse en milieu acide fait apparaître le phosphore hydrolysable et minéralisation, le phosphore organique. Chaque fraction (phosphore en solution ou en suspension) peut être séparée analytiquement en orthophosphates, phosphore hydrolysable et phosphore organique.

Suivant les cas, la teneur en phosphates peut être exprimée en mg/L de PO₄ ou de P₂O₅

$$1\text{mg/L PO}_4 = 0,747 \text{ mg/L P}_2\text{O}_5 = 0,326 \text{ mg/L P (RODIER, 2005).}$$

1.3.3.10. Le sulfate

La concentration en ion sulfate des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/L, mais ce chiffre peut être très largement dépassé (jusqu'à 300 mg / L) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé.

La teneur en sulfates des eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalinoterreux de la minéralisation.

Leur présence dans l'eau est généralement due à des rejets en provenance d'ateliers de blanchiment (laine, soie, etc.), d'usines de fabrication de cellulose (pâte à papier, etc.) et d'unités de dé-chloration. Sont utilisées, par ailleurs, les propriétés réductrices des sulfites dans les eaux de chaudières pour éviter la corrosion liée à la présence d'oxygène dissous ; l'injection dans le circuit se fait habituellement en continu à la concentration de 20 mg/L. Cependant un excès d'ions sulfites dans les eaux de chaudières peut avoir des effets néfastes car il abaisse le pH et peut alors développer la corrosion. En cas de rejet dans l'environnement, les sulfites se combinent à l'oxygène en donnant des sulfates. (RODIER, 2005).

1.3.4. Paramètres Bactériologiques

Les bactéries sont ubiquitaires dans la nature car il s'agit probablement des premiers êtres vivants apparus sur la terre (archéobactéries). Seules quelques dizaines d'espèces sont adaptées à l'homme : la plupart sont inoffensives ou même utiles, étant commensales et faisant partie des flores cutanées, digestive, buccale, génitale ; certaines sont pathogènes, opportunistes ; une minorité est régulièrement pathogène (RODIER, 2005).

Il nous a paru utile l'étude de quelques bactéries les plus rencontrées :

1.3.4.1. Les coliformes

Sous le terme de « coliformes » est regroupé un certain nombre d'espèces bactériennes appartenant en fait à la famille des *Enterobacteriaceae*.

Les coliformes comprennent les genres : *Echerichia*, *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Yersinia* et *Serratia*.

Le terme de « coliformes fécaux » ou de « coliformes-tolérants » correspond à des coliformes qui présentent les mêmes propriétés (caractéristiques de coliformes) après incubation à la température de 44 C°. Le groupe des coliformes fécaux comprend les espèces suivantes : *Citrobacter freundii*, *Citrobacter diversus*, *Citrobacter amalonaticus*, *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter cloacae*, *Echerichia coli*, *Klebsiella pneumonia*, *Klebsiella oxytoca*, *Moellerella wisconsensis*, *Salmonella* (sous genre III Arizona), *Yersinia enterocolitica* (RODIER, 2005).

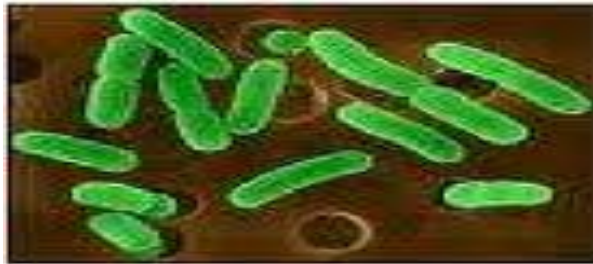


Figure 1.1: Les coliformes fécaux. [1]

1.3.4.2. Les entérocoques

Les entérocoques sont des bactéries à métabolisme anaérobie, dite cocci à Gram positif, se présentant habituellement sous forme de chaînettes. Ce sont des pathogènes opportunistes causant des septicémies, infections urinaires, ou abdominales d'origine intestinale. Ils sont la cause de plus de 10% des infections nosocomiales .

Dans l'eau, ce sont des indicateurs de contamination fécale, comme les colibacilles .

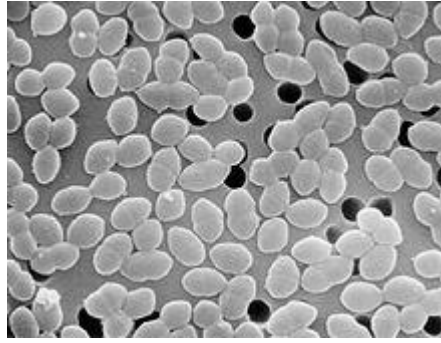
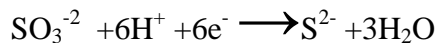


Figure 1.2: Vue au microscope électronique des entérocoques. [2]

1.3.4.3. Les bactéries sulfito-réductrices

Les bactéries sulfato-réductrices sont des bactéries anaérobies, comme par exemple *Desulfovibrio* ; ce sont les sulfates qui remplacent l'oxygène pour la respiration cellulaire. Au cours du métabolisme, les sulfates sont réduits en sulfures. Ces sulfures peuvent provoquer une corrosion, appelée bio-corrosion, en particulier sur les palplanches et les réservoirs d'hydrocarbures .



1.4. L'épuration des eaux usées

La filière de l'épuration des eaux usées recommande différents techniques à divers niveaux technologiques souvent très élaborées ceci est illustré comme étant des méthodes classiques de traitement, ainsi que de nouvelles techniques visant la protection de l'environnement et la sauvegarde du milieu naturel tel que le lagunage ou phytoépuration.

1.4.1. Les méthodes classiques de traitements

La ligne de traitement complète des eaux résiduaires peut être schématiquement scindée en deux filières :

- **La filière eau** dans laquelle l'eau est débarrassée de tous les polluants avant son rejet dans le milieu naturel ;
- **La filière boue** dans laquelle les résidus générés par la filière eau sont traités et déshydratés avant leur évacuation.

La filière eau comprend généralement les étapes suivantes :

1.4.1.1. Les prétraitements

La première étape du traitement consiste à débarrasser les effluents de tout élément susceptible (de taille comprise entre 0,1 et 50 mm) de gêner le fonctionnement des ouvrages. (GROSCLAUDE, 1999).

Ils font appel :

- A des procédés mécaniques, comme des grilles ou des tamis, pour éliminer des grosses particules transportées par les eaux. (REJSEK, 2002).
- A des procédés physiques, comme des phénomènes de décantation pour éliminer les sables, ou de flottation pour éliminer les graisses (matières grasses). (REJSEK, 2002).

En règle générale, l'élimination des MES est obtenue par décantation gravitaire alors que celle de la pollution soluble subit une dégradation biologique, mais pour certaines stations d'épuration, l'élimination des MES est réalisée dans l'ouvrage du traitement biologique. (GROSCLAUDE, 1999).

1.4.1.2. Le traitement primaire

Il s'agit le plus souvent d'une décantation qui permet d'éliminer les matières en suspension décantables en deux heures. L'utilisation de réactifs chimiques pour éliminer des particules plus fines constitue un traitement physico-chimique. Ce traitement permet donc essentiellement l'élimination de la pollution particulaire et d'une partie de la pollution

organique sous forme particulaire (de l'ordre de 65 à 80% de la DCO avec un traitement physico-chimique). (REJSEK, 2002).

1.4.1.3. Le traitement secondaire

L'élimination des matières organiques implique le recours à des traitements biologiques qui font intervenir des organismes vivants, essentiellement des bactéries. (REJSEK, 2002).

Ces traitements sont basés sur la capacité des micro-organismes à oxyder la matière minérale (NH_3 , ...) et les matières constitutives de la DCO et de la DBO d'une part (aérobie), et à réduire d'autre part les molécules comportant de l'oxygène : NO_3 (anoxie), SO_4 et CO_2 (anaérobie). Ils vont permettre ainsi d'éliminer la pollution soluble biodégradable et une partie des MES. (GROSCLAUDE, 1999).

1.4.1.3.1. L'élimination de l'ammoniaque : la nitrification

Contrairement à la matière organique, l'élimination de l'ammoniaque n'est possible qu'en présence d'oxygène. La réaction d'oxydation n'est réalisée que par un nombre très limité d'espèces bactériennes strictement aérobies, les bactéries nitrifiantes. L'oxydation de l'ammoniac en nitrates s'effectue en deux étapes :

- NH_3 est d'abord converti en nitrite (NO_2^-) par des bactéries du genre *Nitrosomonas*.
- Les nitrites sont ensuite oxydés en nitrates (NO_3^-) par des bactéries du genre *Nitrobacter* (GROSCLAUDE, 1999).

1.4.1.3.2. L'élimination des nitrates : la dénitrification

Dans le cas de l'élimination biologique des nitrates, la dénitrification, la réaction nécessite l'oxydation concomitante d'une molécule organique ou minérale qui fournira l'énergie nécessaire à la réduction des nitrates en azote N_2 (GROSCLAUDE, 1999).

On trouve deux groupes de procédés :

- Les procédés à culture fixée où la biomasse épuratrice est fixée sur des supports. L'eau à traiter coule au contact de ces supports. Les micro-organismes fixent donc la pollution organique et la dégradent (biofiltration par exemple) ;
- Les procédés à culture libre où la biomasse est en suspension dans l'eau à traiter. Les microorganismes fixent la pollution et se développent sous forme de floccs biologiques que l'on peut séparer de l'eau traitée par décantation (boues activées par exemple). (REJSEK, 2002).

1.4.1.4. Le traitement tertiaire

Ces traitements visent principalement l'élimination du phosphore (la déphosphatation) et les germes pathogène (la désinfection).

1.4.1.4.1. La dé-phosphatation

L'élimination du phosphore concerne les traitements de déphosphatation, soit physico-chimique soit biologique. La déphosphatation biologique, de développement récent, est basée sur la succession de phases anaérobies et aérobies au cours du traitement biologique mais son rendement est en générale moins bon que celui de la déphosphatation physico-chimique. (REJSEK, 2002).

La dé-phosphatation peut aussi être réalisée par précipitation physico-chimique en présence de sels minéraux comme le sulfate d'ammonium ou le chlorure ferrique et s'effectuer soit simultanément aux réactions biologiques dans le bassin de boues activées, soit en traitement final (GROSCLAUDE, 1999).

1.4.1.4.2. La désinfection

La désinfection vise à réduire la concentration des germes pathogènes dans les effluents avant rejet dans l'environnement. Contrairement aux normes de désinfection pour la production d'eau potable qui spécifie l'absence totale de coliformes, les normes de rejets pour

les eaux résiduaires urbaines ERU varient suivant la nature du milieu récepteur. On peut distinguer deux catégories de traitement :

- Les procédés extensifs comme le lagunage et l'infiltration-percolation (filtration à travers un massif filtrant). Dans le cas du lagunage, il ne subsistera qu'une bactérie pour 1000 ou 10 000 présentes dans l'eau résiduaire alors que dans le second cas il n'en subsistera qu'une pour 100 ou 1000.
- Les procédés physico-chimiques intensifs comme la désinfection par le chlore, l'acide péracétique, les UV, l'ozone ou la filtration sur membranes d'ultra ou de micro-filtration. L'efficacité de ces procédés dépendra des doses utilisées (abattement de 4 à 6 logarithmes), quant à la filtration sur membrane d'UF, elle permet une désinfection totale. (GROSCLAUDE, 1999).

1.4.1.5. Le traitement des boues

Les traitements biologiques ou physico-chimiques utilisés pour l'épuration des eaux résiduaires génèrent une production importante de boues diluées (> 99% d'eau) et contenant de la matière organique fermentescible. Les deux principaux objectifs de la filière de traitement des boues seront donc :

- De stabiliser les matières organiques pour éviter toute fermentation incontrôlée qui entraînerait des nuisances olfactives.
- D'éliminer un maximum d'eau afin de diminuer les volumes de boues à évacuer.

Après une étape préalable d'épaississement permettant de concentrer les boues, la stabilisation de la matière organique est réalisée grâce à des procédés biologiques ou physico-chimiques. L'étape finale de déshydratation permettra d'extraire le maximum d'eau. (GROSCLAUDE, 1999).

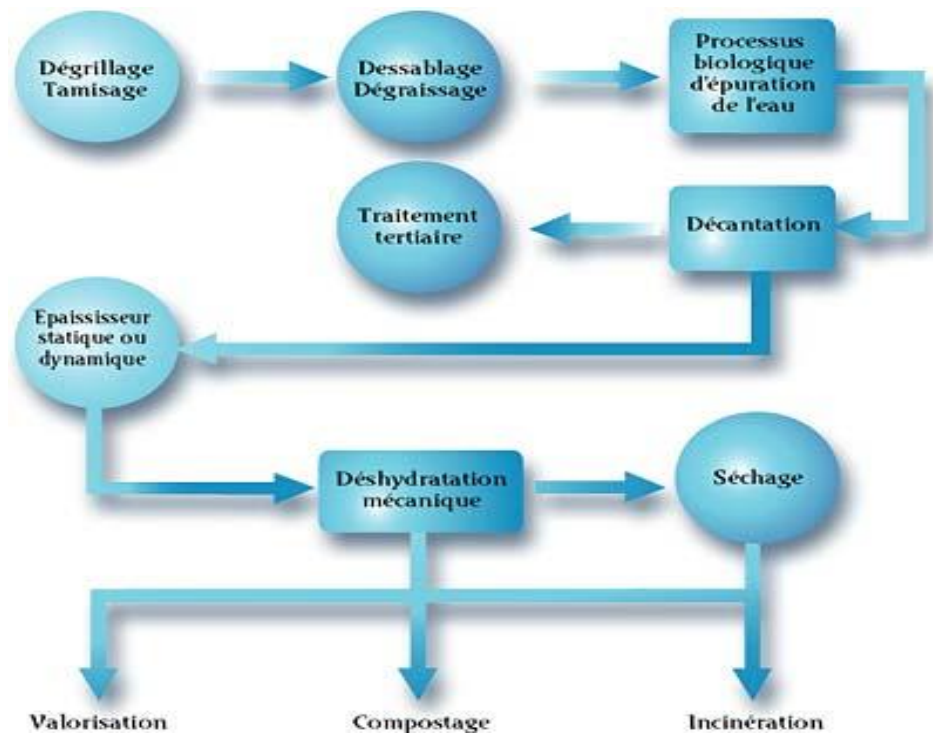


Figure 1.3 : Un traitement global des boues résiduaires. [3]

1.4.2. Traitement par lagunage

L'épuration par lagunage consiste à faire passer les effluents des eaux usées brutes ou prétraitées dans un bassin naturel, ce qui permet de stimuler en amplifiant l'action auto-épuratrice des étangs ou des lacs. La pollution est alors dégradée par l'activité bactérienne, l'activité photosynthétique et l'assimilation des substances minérales. Il permet une épuration à charges organique élevées, une bonne élimination de l'azote et du phosphore, ainsi qu'une faible production de boues en excès, mais nécessite des superficies importantes et un contrôle d'exploitation rigoureux (ROQUES, 1983).

1.4.2.1. Le principe général de lagunage

Cette filière d'épuration s'appuie sur le pouvoir épurateur des végétaux aquatiques : algues, hydrophytes (plantes d'eau libre) et hélophytes (plantes du bord des eaux).

Tous les lagunages appliquent le principe suivant : après une première décantation, les eaux usées traversent des bassins de lagunage plantés ou non. L'épuration s'effectue par les plantes et par les micro-organismes fixés sur leurs racines et sur des substrats (graviers, sable...), grâce à l'effet filtrant du sol. Dans certains types de lagunes, les conditions aérobies et anaérobies se succèdent ou co-existent, ce qui permet d'obtenir un bon rendement d'épuration des nutriments (azote et phosphore).

1.4.2.2. Les différents systèmes de lagunage

1.4.2.2.1. Le lagunage à microphytes (lagunage naturel)

Un lagunage naturel est un procédé de traitement biologique des eaux usées se faisant dans des bassins où est maintenue une tranche d'eau de 0,8 à 1,5 m. Les microphytes qui sont des algues, les petits animaux (protozoaires, rotifères, crustacés) et les bactéries en présence d'oxygène, vont transformer les charges polluantes et stabiliser les boues. Les bactéries anaérobies jouent le même rôle dans les sédiments). (MOREL et KANE, 1995).

Le fonctionnement de ce système repose sur l'action combinée des algues unicellulaires et des bactéries. Grâce au rayonnement lumineux, les algues produisent de l'oxygène qui permet la respiration et le développement des colonies bactériennes. Les bactéries – ainsi que certains champignons microscopiques – dégradent la matière organique en azote ammoniacal. Celui-ci, dans un milieu bien oxygéné, se transforme en nitrates assimilables par les algues, tout comme les phosphates qui proviennent en majeure partie des eaux de lessives. Les algues se multiplient alors dans le milieu et ainsi de suite.

1.4.2.2.2. Le lagunage à macrophytes (phytoépuration)

Dans ce système, l'eau est apparente : 30-40 cm d'eau au-dessus d'un substrat composé le plus souvent de graviers ou de sable dans lequel sont repiqués les végétaux aquatiques. Ce système nécessite une superficie suffisamment grande : 10-12 m² par usager.

Les eaux usées séjournent simplement dans une série de bassins à ciel ouvert peuplés de végétaux aquatiques. Le roseau (ou phragmite) et autres plantes vigoureuses ont été largement utilisés à cet effet sous le nom de «macrophyte ». Ces dernières consomment les composés polluants dissous dans l'eau – azote et phosphore – qui constituent pour eux des éléments nutritifs. Par ailleurs elles servent de supports à de nombreux organismes microscopiques – algues et bactéries – qui font le gros du travail.

Les végétaux fixent les colonies de bactéries sur la base de leurs tiges et leurs rhizomes (tiges souterraines), ce qui améliore les performances des organismes épurateurs. Par ailleurs, ils absorbent par leurs racines une partie (10 % environ) des sels minéraux – nitrates et phosphates – issus de la décomposition de la matière organique présente dans les eaux usées.

1.4.2.2.3. Le bassin de finition à hydrophytes

Ce système comprend deux phases :

- une décantation-digestion anaérobie ;
- un lagunage à macrophyte.

a) Décanteur-digesteur

Les eaux usées sont dirigées dans une simple fosse étanche dite décanteur-digesteur. Les matières solides non liquéfiables remontent à la surface et forment une croûte flottante qui au boue d'une quinzaine de jours est suffisamment importante pour empêcher l'introduction de l'oxygène de l'air et la propagation des mauvaises odeurs ; il est possible d'activer la formation de cette croûte en mettant à la surface de l'eau, de la paille, des brindilles ou de copeaux de bois. Les gaz malodorants (H₂S) sont oxydés par des bactéries lorsqu'ils diffusent à travers la croûte. Les plantations d'espèces semi-aquatiques améliorent encore la désodorisation et rend l'ensemble plus esthétique. Les matières piégées sous la croûte se liquéfient progressivement et sont entraînées par le courant liquide. La digestion anaérobie

des matières organiques est amorcée avec une production limitée de bio-gaz. (MOREL et KANE, 1995).

b) Lagunage à macrophyte

Les eaux passent ensuite dans des bassins de lagunage couvert de plantes aquatiques flottantes. Le traitement devient aérobie dans la rhizosphère (autour des plantes) et continue à dégrader la matière organique ; les décomposeurs anaérobies du fond produisent des bulles de biogaz qui adhèrent aux particules organiques en suspension dans l'eau, les allègent et les font remonter à la surface où elles sont piégées dans les racines des plantes.

Les plantes libèrent suffisamment d'oxygène par leur racines, leurs feuilles et ce en contact avec l'eau et les stolons pour que vivent dans leur entourage des bactéries aérobies et des invertébrés qui se nourrissent de la boue organique pour la transformer en sels minéraux. Ces sels minéraux servent au développement des plantes (MOREL et KANE, 1995).

Le séjour prolongé de l'eau au contact des hydrophytes permet une absorption importante de sels minéraux, ce qui évite l'eutrophisation du milieu naturel récepteur. L'oxygène émis par les plantes favorise l'oxydation des ions ammonium résiduels. Là où il n'existe pas d'exutoires satisfaisants, les eaux du bassin de finition peuvent être épandues de façon diffuse dans un système boisé qui servira de piège pour les nitrates résiduels.

1.5. La réutilisation des eaux usées

1.5.1. Définition

Par définition, cette réutilisation est une action volontaire et planifiée qui vise la production des quantités complémentaires en eau pour différents usages afin de combler des déficits hydriques.

1.5.2. L'objectif

L'objectif principal de la réutilisation des eaux usées est non seulement de fournir des quantités supplémentaires d'eau de bonne qualité en accélérant le cycle d'épuration naturelle

de l'eau, mais également d'assurer l'équilibre de ce cycle et la protection du milieu environnant.

1.5.3. Applications

La réutilisation de l'eau est essentiellement utilisée pour l'irrigation (70%), mais aussi essentiellement par des utilisations qui ne nécessitent pas de l'eau potable (usages industriels à environ 20% et usages domestiques pour environ 10%) (Lazarova et al, 1998).

Le recyclage de l'eau est d'abord pratiqué pour les eaux résiduaires internes des industries : certaines industries recyclent leur eau, qui fonctionne ainsi en circuit fermé. Les entreprises peuvent ainsi viser à réduire leur consommation de 40% à 90%. Mais le procédé est aussi utilisé pour les eaux usées municipales secondaires : l'eau récupérée après traitement en station d'épuration reçoit un traitement supplémentaire afin d'être utilisée, essentiellement pour des usages qui ne nécessitent pas une eau potable : irrigation, réalimentation des nappes phréatiques, utilisations industrielles... (Lazarova et al, 1998).

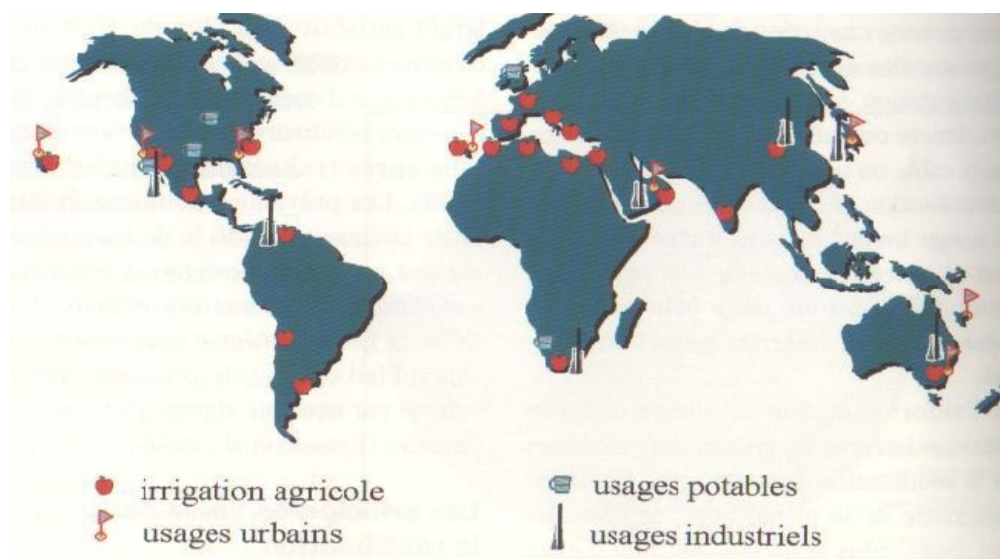


Figure 1.4: Répartition par secteur et localisation des expériences mondiales les plus importantes en réutilisation des eaux résiduaires urbaines. [4]

La figure (1.4) résume les principales voies de réutilisation dans les pays ayant une expérience significative dans ce domaine. Il apparaît que la réutilisation pour l'irrigation est essentiellement présente dans les pays réputés agricoles mais dont les ressources hydriques sont faibles, comme le bassin méditerranéen, le Sud des Etats-Unis. Les plus grands projets de réutilisation ont été développés dans les régions de l'Ouest et de l'Est des Etats-Unis, l'espace méditerranéen, l'Australie, l'Afrique du Sud et dans les zones semi-arides de l'Amérique du Sud et de l'Asie du Sud (Lazarova et al, 1998).

1.5.3.1. Le secteur agricole

La majorité des projets de réutilisation des eaux usées concerne des utilisations agricoles. Pour ce secteur, la réutilisation des eaux améliore les rendements des cultures et apporte des bénéfices financiers.

L'irrigation de cultures ou d'espaces verts est la voie la plus répandue de réutilisation des eaux usées urbaines. Au niveau mondial, c'est également la solution qui a le plus d'avenir à court et à moyen terme.

L'expérience de Mexico City apparaît comme le plus important projet de réutilisation des eaux usées au niveau mondial (Cisneros et Mejia, 1997).

Presque 100 % des eaux usées brutes de la capitale mexicaine (de 45 à 300 m³/s par temps de pluie) sont réutilisées pour l'irrigation de plus de 85 000 ha de diverses cultures agricoles.

Aux Etats-Unis, la réutilisation agricole est une pratique très répandue. 34 états disposent de réglementations ou de recommandations, souvent très sévères. Ces mesures législatives, et plus de trente ans d'expérience, font des Etats-Unis un pays phare au plan mondial dans le domaine de la réutilisation des eaux usées. En Floride et en Californie, respectivement 34 % (340 000 m³/j) et 63 % (570 000 m³/j) du volume total d'eaux usées réutilisée le sont pour l'agriculture (Wright et Missimer, 1995).

En France, l'expérience actuelle se limite à des projets de faible taille (irrigation jusqu'à 320 ha), (Renaud et al, 1997) .

1.5.3.2. Le secteur industriel

La réutilisation industrielle des eaux usées et le recyclage interne sont désormais une réalité technique et économique. Pour certains pays et types d'industries, l'eau recyclée fournit 85 % des besoins globaux en eau.

Les secteurs les plus grands consommateurs en eau sont les centrales thermiques et nucléaires (eau de refroidissement) et les papeteries. La qualité de l'eau réutilisée est réglementée et dépend du type d'application ou de production industrielle. La part des eaux usées urbaines ne dépasse pas 15% du volume des eaux réutilisées en industrie. Aux Etats-Unis, par exemple, le volume des eaux résiduaires réutilisées en industrie est d'environ 790 000 m³/j, dont 68 % pour le refroidissement (Lazarova et al, 1998).

1.5.3.3. Le secteur urbain et périurbain

1.5.3.3.1. Réutilisation pour un usage non-alimentaire

Les usages urbains et périurbains des eaux usées correctement traitées se développent rapidement et deviennent un élément fondamental de la politique de gestion intégrée de l'eau dans les grandes agglomérations (Renaud et al, 1997). Plusieurs municipalités du Japon (pionnier des pays en voie de développement : 8 % du volume total des eaux usées réutilisées soit environ 8 millions de m³ par an) et des villes des Etats-Unis ont déjà construit des systèmes de distribution double : eau potable et eaux usées à réutiliser.

Les bénéfices obtenus sont importants. Il faut noter en premier, la réduction de la demande en eau potable qui peut atteindre 10-15 %, voire 40 % dans les zones résidentielles avec beaucoup d'espaces verts (Wright, 1995). Missimer, Les usages les plus courants sont l'irrigation d'espaces verts (parcs, golfs, terrains sportifs), l'aménagement paysager (cascades, fontaines, plans d'eau), le lavage des rues ou des véhicules et la protection contre l'incendie.

Une autre application importante est le recyclage en immeuble avec, par exemple l'utilisation de l'eau ménagère traitée pour le lavage des sanitaires. Les normes qui régissent la qualité des eaux usées destinées à de tels usages sont très sévères et voisines à celles en vigueur pour l'eau potable.

Pour les usages urbains, l'Afrique du Sud et l'Australie sont les pays dont les normes sont les plus sévères. Ils exigent respectivement une qualité d'eau potable et l'élimination totale des virus. Dans ce cas, les filières de traitement se rapprochent de celles de production d'eau réutilisée pour des usages potables (Lazarova et al, 1998).

1.5.3.3.2. Réutilisation pour un usage alimentaire (eau potable)

Le progrès technologique du métier de l'eau permet de produire une eau de très bonne qualité, même à partir des eaux usées. De nombreuses études ont conclu à l'absence d'objection pertinente à la réutilisation des eaux résiduaires correctement traitées à des fins potables. Toutefois, les principales contraintes pour ce type d'usage sont psychologiques et culturelles associées à la perception de l'eau usée comme dangereuse et malsaine. De ce fait, la tendance principale aujourd'hui est l'usage indirect, après un séjour temporaire de l'eau usée traitée dans le milieu naturel. En fonction de la destination de l'eau réutilisée, ce type de réutilisation peut être classé soit dans la catégorie de réutilisation potable, soit pour des usages non potables. Dans le premier cas, il faut souligner l'impact psychologique très positif de ce détour par le milieu naturel qui permet à l'eau destinée à la réutilisation de perdre son identité d'eau usée (Lazarova et al, 1998).

1.6. Conclusion

Les eaux usées de différentes compositions et divers origines constituent un fléau pour la nature lors du rejet sans subir des traitements. D'où la nécessité impérieuse de l'épuration à moindre coût et à basses nuisances auditives et olfactives et même nulle ce qui peut être achevé avec des méthodes près de la nature tel que la phytoépuration.

La réutilisation des eaux usées est une technique en pleine expansion, principalement associée à l'agriculture. Dans les pays où les réserves actuelles d'eau douce sont, ou seront prochainement, à la limite du niveau de survie, le recyclage des eaux usées semble être la technique alternative la plus abordable, tant au niveau financier (les traitements extensifs sont les plus adaptés) qu'au niveau technique pour les réutilisations agricoles, industrielles et urbaines ne nécessitant pas une eau de qualité potable. Dans ce contexte ce chapitre a eu pour objectif de donner un aperçu sur les origines des eaux usées, leurs caractéristiques, ainsi que les différents procédés utilisés pour leur épuration.

CHAPITRE 2

Les espaces verts et leur besoins en eau

I - Définition de l'espace vert

II - Les besoins en eaux des plantes (ETM)

III - Conclusion

2.1. Introduction

Les plantes sont essentiellement constituées d'eau, leur teneur en eau variant de 80 à 95 % de leur poids total. Elles puisent cette eau et les nutriments qui leur sont nécessaires dans les sols par l'intermédiaire de leurs racines dans lesquelles l'eau pénètre par un mécanisme hydrostatique. L'eau et les nutriments minéraux constituent ce que l'on appelle la sève. Donc; les besoins en eaux des plantes varie d'une plante à une autre.

Dans ce chapitre il sera question de donner un aperçu sur quelques plantes utilisées dans les espaces verts, ainsi que la technique d'estimation des besoins en eaux de ces plantes.

2.2. L'espaces verts



Le terme d'espace vert désigne, en urbanisme, tout espace d'agrément planté de fleurs, d'arbres ou engazonné. Le gazon est un élément important dans la plupart des espaces verts. (www.wikipedia.org).

2.2.1. Les plantes des espaces verts dans la ville de Biskra

Parmi les plantes les plus importantes dans le domaine des espaces verts, qui s'adaptent au climat de la région de Biskra, on trouve les types suivants :

2.2.1.1. Le Buis (*Buxus sempervirens*)



Le Buis est un arbuste facile à vivre, peu exigeant, dont le feuillage persistant permet d'étoffer les jardins, en hiver, lorsque les feuilles sont rares. Il n'est pas réservé aux haies : en pot, taillé, il donne de bons résultats et vous permettra de vous initier à l'art topiaire. (LARCHER, 2000).

2.2.1.2. Ficus Benjamina



Cet arbuste d'origine indienne, appelé souvent figuier pleureur, décore de nombreuses maisons et appartements, car il s'adapte à des milieux très divers. Ses différentes variétés de teintes comme de formes sont assez robustes et faciles à maintenir en bonne santé, moyennant quelques précautions de base. (LARCHER, 2000).

2.2.1.3. Gazania



De part son origine, le Gazania est une plante résistante aux fortes températures et au manque d'eau. C'est aussi une plante à placer en plein soleil pour que les fleurs s'ouvrent. Vous la fertiliserez en cours de saison, et dès que le système racinaire est bien implanté, vous pourrez oublier quelques arrosages sans problèmes. (LARCHER, 2000).

2.2.1.4. Washingtonia robusta



Le palmier du Mexique ou Washingtonia Robusta est un palmier très élégant dont la taille et l'envergure de ses feuilles offrent une réelle impression de prestige. Cette espèce de palmier est non seulement des plus résistante au froid, jusqu'à moins huit degrés mais aussi de croissance très rapide atteignant les vingt mètres dans son milieu naturel. (LARCHER, 2000).

2.2.1.5. Myoporum laetum



Myoporum laetum, le myoporum, est également appelé Myoporum perforatum, et en maori "Ngaio". C'est un arbuste ou arbre originaire de Nouvelle Zélande qui convient plus particulièrement aux zones côtières de climat doux. Sa croissance est très rapide et sa résistance au vent et aux embruns est appréciée.

Cette plante est relativement résistante au froid. Si le feuillage est atteint dès environ -3°C , la souche peut résister à environ -7°C . (LARCHER, 2000).

2.2.1.6. Bougainvillier



Le bougainvillier est un petit arbuste grimpant qui ne tient en extérieur que s'il n'y a aucun risque de gel. C'est un arbuste très courant les jardins antillais comme dans toutes les régions au climat méditerranéen ou tropical. Il est cultivé pour ses bractées multicolores et très colorées. Ses fleurs sont blanches, petites et sans intérêt décoratifs. La floraison apparait toute l'année avec un pic durant la saison sèche. (LARCHER, 2000).

2.2.1.7. Le lilas



Le lilas est un arbuste aux fleurs parfumées peu exigeant et remarquable pour sa vigueur et sa longévité. Il convient à l'aménagement des grands comme des petits jardins. De plus, les nombreux cultivars permettent d'échelonner les périodes de floraison. (LARCHER, 2000).

2.2.1.8. Lantana camara



Les lantanas se cultivent comme les fuchsias. Ils sont gélifs et nécessitent d'être mis hors d'atteinte du gel pendant la période hivernale, une serre froide lumineuse sera l'endroit idéal.

Au printemps, à partir de mi-mai, vous les sortirez et éventuellement, vous les planterez avec leurs pots en terre de façon à les retirer facilement en septembre. Une taille courte est nécessaire en mars pour les remettre en forme et pour les forcer à se ramifier. (LARCHER, 2000).

2.2.1.9. Le gazon



Le gazon est un mélange de graminées (herbes), et chacune d'entre elles a ses propres qualités, sa résistance au piétinement, à la sécheresse, à la fréquence des tontes. La proportion de chacune des graminées dans le mélange détermine son utilisation. (LARCHER, 2000).

2.2.1.10. Palmier Phoenix (Le Dattier des Canaries)



Le Dattier des Canaries est un très beau palmier aux feuilles allongées et arquées qui lui donnent une certaine élégance. Il se rencontre très souvent dans les régions au climat

doux comme la côte atlantique ou la côte d'azur. Il convient tout de même de le protéger des grands froids en le plantant de préférence dans un endroit abrité et en liant l'ensemble des feuilles pour en protéger le cœur l'hiver venu. (LARCHER, 2000).

2.2.1.11. Le Laurier rose



Le Laurier rose est l'espèce la plus connue du genre Nerium. Vous trouverez des variétés aux fleurs simples ou doubles, ainsi que différentes couleurs. Concernant son exposition, plus vous lui donnerez du soleil, plus il fleurira. Néanmoins les variétés aux fleurs simples roses et blanches sont plus florifères que les autres. (LARCHER, 2000).

2.3. Les besoins en eaux des plantes (ETM)

2.3.1. Définition

Selon la FAO (food and agriculture organisation), le besoin en eau d'une culture est "la quantité d'eau nécessaire à couvrir les pertes en eau par évaporation (évapotranspiration de la culture) d'une culture saine, cultivée en grande parcelle, sans contraintes du sol (fertilité et humidité), et réalisant son potentiel de production sous les conditions considérées". Cette définition correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture (ETM) qui dépend du pouvoir d'évaporation de l'air ou demande climatique (ETP) et du coefficient cultural (Kc).

$$ETM = ETP \cdot Kc \text{ (mm)} \quad (2.1)$$

2.3.2. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration représente la quantité d'eau perdue sous forme de vapeur à partir d'une surface couverte de végétation. Cette quantité est généralement exprimée par unité de surface et par unité de temps, en m³/ha/jour, en m³/ha/mois ou en m³/ha/an. Bien entendu, l'évapotranspiration peut également s'écrire en mm/jours par mois ou par an (Ducrocq, 1990). On distingue : l'évapotranspiration de référence (ET₀), L'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

a- L'évapotranspiration de référence

Est définie comme « le niveau d'évapotranspiration d'une surface importante d'un gazon de hauteur uniforme (entre 8 et 15cm), en croissance active, recouvrant complètement le sol et alimenté en eau de façon non restrictive » (Ducrocq, 1990).

b- L'évapotranspiration potentielle

Est définie comme l'ensemble des pertes en eau d'un couvert végétal abondant, bien alimenté en eau, lorsque l'énergie (évaporation de l'atmosphère) est le seul facteur qui limite cette évaporation. On peut définir l'ETP comme l'évapotranspiration d'un couvert végétal présentant un développement foliaire maximum (au stade de pleine croissance) couvrant bien le sol, ce dernier étant à la capacité au champ, L'ETP correspond à la « demande d'évaporation » en eau « pouvoir » évaporant de l'air (Ducrocq, 1990).

c- L'évapotranspiration réelle

Pendant une période déterminée (jour, mois, cycle végétatif complet), chaque parcelle va perdre, par transpiration et évaporation directe, une certaine quantité d'eau appelée évapotranspiration réelle ETR : celle-ci pourra bien sûr être inférieur ou égal à l'ETP selon que les conditions de celle-ci sont réunies ou non (Ducrocq, 1990).

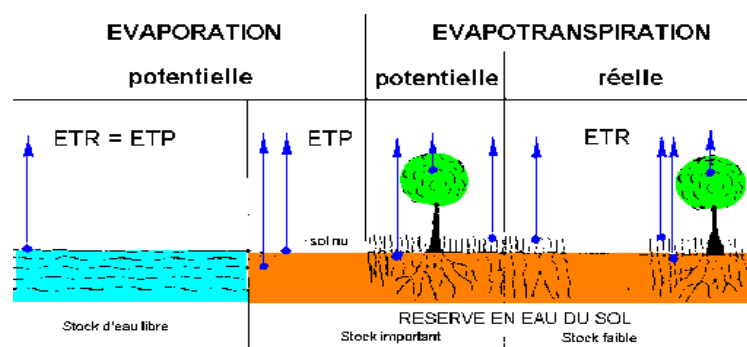


Figure 2.1: Evaporation et évapotranspiration potentielle et réelle. [5]

Le taux d'évapotranspiration est plus important sous les climats chauds et secs qu'en zones humides, mais les plantes sont capables de le réguler.

Lorsque l'humidité des sols est suffisante, les végétaux transpirent en relation directe avec la quantité d'énergie solaire qu'ils reçoivent.

2.3.2.1. Mesure de L'évapotranspiration potentielle

Globalement, l'ETP suit les variations saisonnières et journalières du rayonnement solaire (et de la température). En zone semi-aride méditerranéenne, les valeurs journalières moyennes de l'ETP se situent entre un peu moins de 1mm/j en hiver jusqu'à 8 à 10 mm/j en été. En outre, le régime d'évaporation est relativement plus stable d'une année à l'autre que le régime pluviométrique tel que décrit précédemment. Il s'en suit donc que les besoins en eau des cultures sont assez prévisibles d'une année à l'autre (PNTTA, 1998).

Il ne sera pas question ici de présenter en détail toutes les méthodes utilisées pour le calcul de l'évapotranspiration des cultures. On distingue généralement deux méthodes :

a- Les méthodes directes ; b- Les méthodes indirectes.

2.3.2.1.1. Méthodes directes

➤ **L'évapotranspiromètre ou cuve lysimétrique.**

Comme son nom l'indique, l'appareil sert à mesurer l'évapotranspiration en un lieu donné du sol nu ou plus généralement d'un couvert végétal.

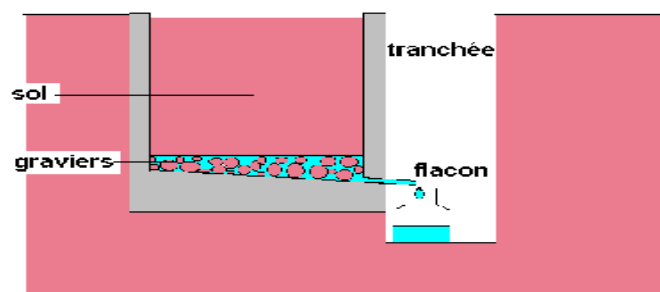


Figure 2.2: Principe d'un lysimètre (ou case lysimétrique). [6]

➤ **Le bac évaporant**

Cet appareil très simple permet de mesurer directement l'évapotranspiration d'une nappe d'eau libre. Sous réserve qu'il soit correctement installé, il permet d'obtenir une bonne estimation de l'ETP.



Figure 2.3 : Le bac évaporant. [7]

➤ **L'évaporomètre piche**

Il s'agit d'un tube de verre rempli d'eau et fermé à son extrémité inférieure par une rondelle de papier buvard. La tranche d'eau évaporée à partir de celle-ci se lie directement sur les graduations du tube.



Figure 2.4: L'évaporomètre piche. [8]

2.3.2.1.2. Méthodes indirectes

En l'absence de ces instruments de mesures, l'estimation de l'ETP ne peut s'effectuer qu'en utilisant diverses formules de calcul utilisant les données des postes d'observation météorologique. Plusieurs de ces formules sont à caractère empirique (formules de BLANEY et CRIDDLE, de THORNWAITE, de TURC de PENMAN).

➤ Formule de Blaney et Criddle

A la suite de nombreuses expérimentations, Blaney et Criddle ont estimé que la température et la durée du jour étaient les facteurs déterminants de l'évapotranspiration potentielle. Ils ont proposé la formule suivante :

$$ETP = K (0,46t + 8,13) P \quad (2.2)$$

Dans laquelle :

ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.

t : température moyenne (en degré Celsius) durant la période considérée (généralement le mois).

P : pourcentage de la durée moyenne du jour pendant la même période, par rapport à la durée moyenne du jour pour l'année.

K : Coefficient dépendant du stade végétatif de la culture et de la température moyenne (de la zone climatique).

➤ Formule de Turc

Si l'humidité relative est supérieur à 50%, l'évapotranspiration potentielle est donnée par :

$$ETP = 0,40 (I_g + 50) \frac{T}{T + 15} \text{ en (mm)} \quad (2.3)$$

Dans laquelle :

ETP : Evapotranspiration mensuelle (mm).

T : Température moyenne mensuelle (°C).

I_g : Radiation globale mensuelle (cal/cm²/jour).

Remarque :

Le coefficient 0,40 est réduit à 0,37 pour le mois de février.

- Si l'humidité relative de l'air est inférieure à 50%, l'évapotranspiration potentielle est donnée par la formule suivante:

$$\mathbf{ETP = 0,40 (I_g + 50) \left(\frac{T}{T+15} \right) \left(1 + \frac{50-Hr}{70} \right)} \quad (2.4)$$

Dans laquelle:

T: Température moyenne mensuelle (°C).

I_g: Radiation globale en (cal/cm²/jour).

H_r: L'humidité de l'air en %.

$$\mathbf{I_g = I_{ga} (0,18 + 0,62) \frac{h}{H}} \quad (2.5)$$

Avec:

I_{ga}: Radiation maximale théorique.

H: Durée astronomique de jour en (heure/mois).

h: durée d'insolation de la station considérée en heure/mois.

$\frac{h}{H}$: Insolation relative en heures.

➤ **Formule de Penman**

La méthode la plus utilisée aujourd'hui est celle de Penman, car elle donne les meilleures estimations de l'ETP et est entièrement basée sur les lois physiques des échanges d'énergie. Cette approche est la seule qui explicite réellement le phénomène d'évapotranspiration et qui permette de mettre en évidence l'importance relative des différents facteurs qui interviennent, mais elle a l'inconvénient d'exiger la connaissance de paramètres climatiques qui sont rarement mesurés dans les stations. Elle demande en outre des calculs assez compliqués et impose des conditions d'emploi bien précises (Dubost, 1994).

La méthode de Penman est proposée pour calculer de façon simple l'évapotranspiration surtout dans les régions sahariennes à partir des données météorologiques existantes (température, de l'air, humidité relative..), coefficient précis et plus cohérent que ceux que l'on obtient avec les formules classiques de BLANEY ET CRIDDLE OU DE TURC (Dubost, 1994). La formule est la suivante :

$$ETP = p'(t) \frac{Rn}{L} + \sigma \cdot \frac{Ea}{P(t) + \sigma} \quad (2.6)$$

Dans laquelle :

Rn : Rayonnement net « climatique ».

Ea : pouvoir évaporant de l'air, fonction du vent et du déficit de saturation de l'air.

L : Chaleur latente de vaporisation (est la quantité de chaleur qu'il faut *fournir* à 1kg d'eau pour obtenir 1kg de vapeur saturée). (Joule /kg).

σ : Constante psychrométrique (0, 65 h la/°C)

p' (t) : Valeur de dérivée de la fonction de pression partielle de vapeur d'eau saturante en fonction de la pression de vapeur d'eau en fonction de la température, pour la température de l'air T.

2.3.3. Le coefficient cultural (Kc)

Le second terme de la formule de calcul des besoins en eau des cultures est le coefficient cultural (Kc). Sa valeur est largement affectée par la nature de la culture, sa hauteur, sa durée de cycle, et son taux de croissance. La fréquence des pluies ou de l'irrigation au début du cycle de la culture affecte aussi le Kc. Par définition, ce coefficient traduit le rapport entre l'évapotranspiration de la culture à un stade donné et l'ETP.

Le Kc est donc toujours établi expérimentalement au début, pour une région et une culture données, puis ensuite confiné dans des tables pour une utilisation ultérieure dans la même région ou dans une région similaire. Selon la méthode utilisée pour le calcul de l'ETP ou selon l'amplitude des différences entre la culture et celle de référence, Kc obtenu expérimentalement peut légèrement dépasser la valeur de 1. (Allen et al, 1998).

Le Kc qui est un coefficient dont les valeurs sont théoriquement comprises entre 0 et 1, selon le stade de la culture.

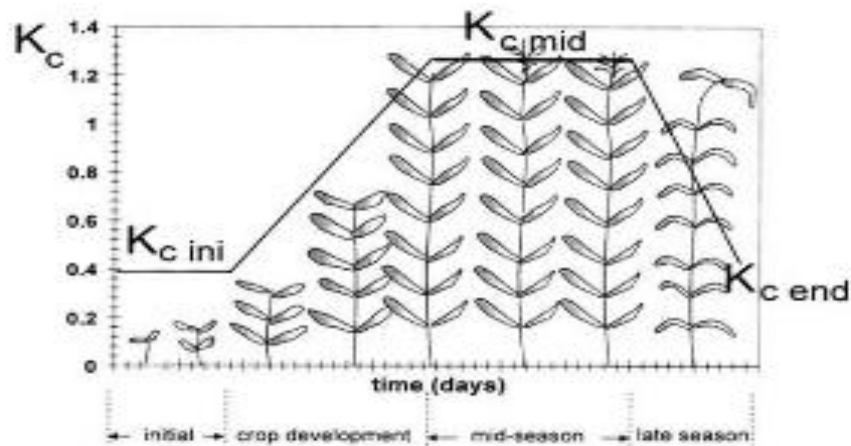


Figure 2.5: Courbe de coefficients culturaux et définition des phases

(Doorenbos et Pruitt, 1975). [9]

La courbe de K_c sur l'ensemble de la période de croissance a été présentée initialement par Doorenbos et Pruitt (1975). Elle permet de distinguer les 3 valeurs de K_c (initial, mi-saison, et d'arrière saison). Les valeurs les plus élevées du K_c sont observées au printemps et en automne, lorsque le sol est encore humide. Les valeurs les plus basses sont notées en été (Allen et al, 1998).

2.4. Conclusion

Ce chapitre s'est intéressé dans un premier temps à la présentation de quelques plantes utilisées pour les espaces verts, et surtout les espaces verts de la région de Biskra. Dans un second temps, nous avons présenté quelques méthodes directes et indirectes utilisées pour le calcul des besoins en eau des plantes. En effet, le besoin en eau d'une culture, correspond à l'évapotranspiration maximale d'une culture (ETM), qui dépend du pouvoir d'évaporation de l'air ou demande climatique (ETP) et du coefficient culturel (K_c). La méthode de Penman s'avère celle qui donne des meilleures estimations de l'ETP, surtout dans les régions sahariennes.

CHAPITRE 3

Les systèmes d'irrigation des espaces verts

I- L'irrigation

II – Système d'irrigation « goutte à goutte »

III – Les normes de qualité des eaux d'irrigation

3.1. Introduction

Pour survivre dans les zones arides, les végétaux développent d'autres stratégies d'adaptation, plus évoluées et très efficaces. Certains allongent leurs racines, qui peuvent atteindre jusqu'à plusieurs dizaines de mètres pour certains arbres, d'autres diminuent la surface de leurs feuilles, qui peuvent être réduites parfois à de simples épines, ou les recouvrent de poils fins, les épaississent. D'autres encore sont capables de stocker l'eau dans certains tissus. Pour compenser la quantité diminuée des eaux, on ajoute un surplus d'eau en irrigant le sol.

Ce présent chapitre aura pour objectif de présenter les systèmes d'irrigation les plus utilisés dans la pratique et en particulier le système à goutte à goutte, qui sera adopté pour notre cas d'étude.

3.2. L'irrigation

3.2.1. Définition

L'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production, et permettre leur développement normal en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe, en particulier dans les zones arides.

3.2.2. Le réseau d'irrigation

Un réseau d'irrigation est l'ensemble d'organes d'ouvrages et appareils qui assurent le transport, la répartition et la distribution à chaque exploitation agricole, dans chaque parcelle des eaux destinées à l'irrigation, sans oublier par ailleurs les organes qui doivent éventuellement évacuer les eaux en excès. (MESSAHEL, 1988).

3.2.3. Classification des réseaux d'irrigation

3.2.3.1. Selon la construction

a- Réseau classique

Dans ce type de réseau, le transport de l'eau est assuré gravitairement dans des canaux à ciel ouvert.

b- Réseau fermé

Dans ce type de réseau, l'eau est transportée dans des conduites en charge.

c- Réseau mixte

Dans ce réseau, l'eau est transportée dans des canaux à ciel ouvert jusqu'aux parcelles, alors que la distribution de cette eau, se fait par des conduites sous pression.

3.2.3.2. Selon la réalisation

a- Réseau permanent : à longue durée.

b- Réseau temporaire : comme les réseaux à ciel ouvert ou en terre.

c- Réseau stationnaire.

d- Réseau mobile : le matériel est déplaçable d'une exploitation à une autre.

e- Réseau semi-mobile : une partie du matériel est déplaçable.

3.2.3.3. Selon la distribution de l'eau sur le périmètre

Soit par gravité (gravitaire) ;

Soit par élévation mécanique (aspersion).

3.2.3.4. Selon le fonctionnement durant la période d'irrigation

- Réseau à service continu ;

- Réseau à service discontinu.

3.2.4. Dose d'irrigation

La dose d'irrigation est la quantité d'eau nécessaire pour assurer le déficit de l'humidité des plantes pendant la période de végétation dans la couche végétale du sol, pour garantir un rendement fixe dans les conditions de l'année de probabilité fixe. Elle est exprimée en m³/ha ou en mm. (1mm = 10m³ / ha).

3.2.5. Systèmes d'irrigation

Les systèmes d'irrigation se regroupent en 2 catégories: les systèmes gravitaires et les systèmes sous pression:

3.2.5.1. Les systèmes gravitaires

a- Irrigation en bassin (plus connue): l'eau est apportée sous forme d'une nappe dans un bassin, qui peut être cloisonné) aménagé sur un sol nivelé (pente de 0,1 à 1 %).

b- Irrigation à la raie: l'eau est apportées par ruissellement dans des sillons séparés, d'une distance de 0,6 m à 1,25 m; le sol est nivelé (pente de 0,2 à 3 %).

c- Irrigation par siphon ou rampes à vannettes : l'eau est amenée à la raie, par des siphons ou des rampes à vannettes, qui permettent la réduction de l'érosion en tête de la raie, une meilleure maîtrise des débits et de l'uniformité de répartition de l'eau.

3.2.5.2. Les systèmes sous pression

Ils sont utilisés dans l'irrigation des espaces verts;

a- Irrigation par aspersion

Épandage de l'eau sous forme de pluie avec régulation et uniformité de la dose apportée à condition que la zone ne subisse pas des vents supérieurs à 4 m/s; les systèmes d'irrigation par aspersion sont soit fixes, soit mobiles.

b- Irrigation localisée

L'eau circule dans des tuyaux souples de petit diamètre disposés à la surface du sol et sont munis de dispositifs "goutteurs" qui apportent l'eau au pied des végétaux; les systèmes d'irrigation localisée les plus répandus sont le goutte à goutte (indiqué pour le maraîchage) et le micro-jet (indiqué pour l'arboriculture). (MESSAHEL, 1988).

Les systèmes d'irrigation sous pression engendrent une économie d'eau moyenne de 30 à 60 % par rapport aux systèmes gravitaires. Les systèmes d'irrigation localisée, quant à eux, peuvent engendrer une économie d'eau allant jusqu'à 50 % par rapport aux systèmes par aspersion (limitation maximale de l'évaporation et de la percolation car l'eau est livrée à faible dose n'humidifie qu'une fraction du sol).

3.3. Le système d'irrigation « goutte à goutte »

Les premières recherches dans la création du système d'irrigation goutte à goutte, ont été réalisées aux USA en 1918, à l'université du COLORADO. A cause du coût trop excessif et de l'absence des moyens techniques pour leur réalisation, ils n'ont pu être utilisés seulement en 1950. En ANGLETERRE l'irrigation "goutte à goutte" a été appliquée dans les serres. (MESSAHEL, 1988).

Dans les débuts des années 1960 en PALESTINE Occupée, sous la direction du professeur C.S. BLASS, l'irrigation "goutte à goutte" a été utilisée au champ et dans les conditions de la production. Actuellement l'irrigation "goutte à goutte" trouve une très large diffusion dans beaucoup de pays du monde, plus particulièrement aux USA, Italie, Angleterre, Japon, Tunisie, Mexique, URSS et en Algérie. (Messahel, 1988).

3.3.1. Définition de l'irrigation "goutte à goutte"

L'irrigation "goutte à goutte" est l'une des techniques de l'irrigation localisée (micro irrigation), qui consiste à apporter à chaque plante ou arbre, individuellement la quantité d'eau dont elle a exactement besoin, en fonction des types de sol, des spécificités du climat et de son développement, sans ruissellement appréciable. (Varysse, 1980).

3.3.2. Le principe de système d'irrigation "goutte à goutte"

L'irrigation "goutte à goutte" est principalement une technique, au moyen de la quelle eau et fertilisants peuvent être mis directement à la disposition de la zone de répartition maximale, du système racinaire de la culture agricole, grâce à des arroseurs conçus pour distribuer les faibles débits appropriés.

Ces arroseurs appelés "tricklers, dripper's ou goutteurs", réalisent une infiltration différentielle de l'eau suivant les trois dimensions en maintenant la tension eau-sol à une faible valeur. (Varysse, 1980).

3.3.3. Organisation du réseau d'irrigation

Un réseau d'irrigation est l'ensemble des ouvrages permettent l'irrigation d'une superficie ou périmètre déterminé.

Schématiquement, un réseau d'irrigation est constitué par:

- Un ouvrage de prise d'eau ;
- Un ouvrage d'amenée d'eau jusqu' à la zone à irriguer ;
- Un ou plusieurs ouvrages de distribution ;
- Un réseau de colature.

3.3.3.1. Ouvrage de prise

Ce peut être :

- Un ouvrage de prise en rivière, permettant de prélever sur cette rivière un certain débit aussi constant que possible ;
- Un ouvrage de prise dans un réservoir artificiel, c'est le cas des prises réalisées par l'administration dans les barrages de retenue ou dans les lacs collinaires;
- Un ouvrage de captage de source, lorsque l'on peut disposer d'une source à débit suffisant ;
- Un ouvrage de pompage dans un puit, lorsque l'on dispose à profondeur raisonnable (frais de pompage) d'une nappe d'eau à débit suffisant ;
- Un forage artésien ou non fournissant l'eau à une pression quelque fois considérable

3.3.3.2. Ouvrage d'adduction

On désigne souvent cet ouvrage sous le nom de tête morte ou ouvrage d'amenée. Il peut être constitué selon les cas :

- D'un canal à ciel ouvert, revêtu en béton ou en terre ;
- D'une conduite sous pression ;
- ou même successivement de l'un et de l'autre (canal suivi d'une conduite ou d'une galerie franchissant une élévation de terrain par exemple).

3.3.3.3. Ouvrage de distribution

Après son arrivée sur le périmètre, l'ouvrage d'adduction alimente les ouvrages de distribution. Ces ouvrages sont constitués :

- De réseau primaire, secondaire et tertiaire, assurant le transport de l'eau jusqu'à la parcelle ;
- De réseau parcellaire assurant la distribution de l'eau à l'intérieur de la parcelle ;
- Réseau primaire, secondaire et tertiaire. Ils comprennent des conduites ou des canaux qui véhiculent l'eau.

3.3.3.4. Réseau de colature

Bien que cela soit autant que possible à éviter, il y a toujours un excès d'eau d'irrigation à évacuer, ceci peut être dû :

- A un défaut dans la conduite des irrigations à la parcelle (moins d'eau trop importante, manque de surveillance, d'où l'excès d'eau qui s'écoule ou bout de raie) ;
- Ou bien un incident ou à un incident survenant sur le réseau (fermeture inopinée d'une vanne...).(Varysse, 1980).

Le réseau de colature est destiné à éliminer cette eau en excédent. Il est constitué de rigoles, chaque parcelle irriguée étant bordée en partie basse par une rigole peu profonde destinée à recueillir les eaux qui ont détrempé sans s'infiltrer. Les rigoles se jettent dans des fossées de plus en plus importantes, qui elles mêmes rejoignent un collecteur général. Ayant pour rôle d'évacuer les eaux excédentaires hors du périmètre. (Varysse, 1980).

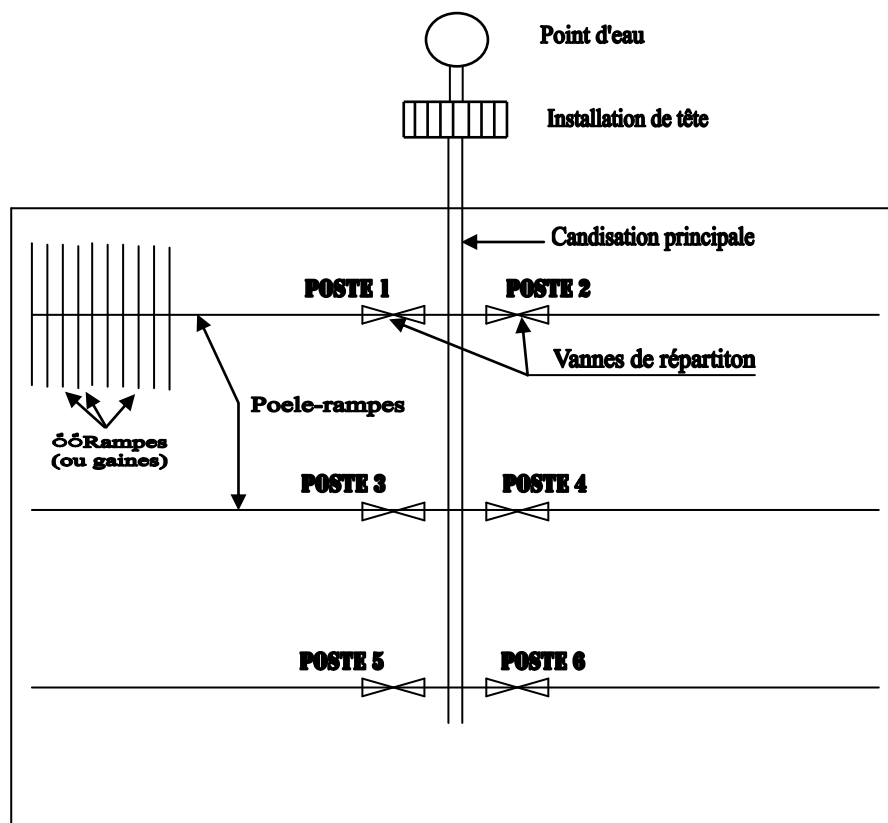


Figure 3.1 : Schéma –type d'un réseau de micro-irrigation.

3.3.4. Choix du type de matériaux des conduites

Le choix des matériaux est conditionné par :

- Le diamètre : pour les canalisations de très gros diamètres (1 à 3) m on utilise le béton armé ; pour les canalisations de petit diamètre, on utilise la matière plastique.
- La pression de service.
- Le critère économique.
- La disponibilité dans le marché.
- La technique d'arrosage.

3.3.4.1. Canalisation

3.3.4.1.1. Canalisations en acier

Elles sont particulièrement utilisées pour des débits élevés et des pressions importantes. Elles sont assemblées bout à bout par soudure et caractérisées par une bonne étanchéité et une bonne résistance, mais elles doivent être protégées contre la corrosion.

3.3.4.1.2. Canalisations en fonte

Elles sont utilisées le plus souvent malgré leur coût élevé, caractérisées par :

- Une grande étanchéité ;
- Une durée de vie assez longue ;
- Un bon coefficient d'écoulement hydraulique.

3.3.4.1.3. Canalisations en amiante ciment

Elles sont constituées, d'un mélange d'amiante en fibre diffusé dans du ciment portland artificiel; caractérisées par : des parois très lisses, un bon coefficient d'écoulement hydraulique et une bonne résistance mécanique.

3.3.4.1.4. Canalisations en matière plastique

Elles sont utilisées pour les canalisations mobiles de la distribution d'eau sur la parcelle. Elles sont souples et supportent les pressions moyennes.

3.3.4.2. Assemblage de tuyaux

L'assemblage des tuyaux en acier, se fait par soudure au chalumeau (oxyacétyline), ou soudure à l'axe électrique.

Les tuyaux en amiante ciment, peuvent être assemblés à l'aide des manchons de tuyaux.

3.3.4.3. Raccord

Les raccords servent pour les points singuliers comme :

- Raccordement de deux tronçons ;
- Changement de direction, de diamètre et de joints ;
- Interposition d'un élément de manœuvre ou d'exploitation (robinet, vanne, ventouse, vidange ... etc).

3.3.4.4. Matériels de contrôle des débits

- Les compteurs ;
- Les vannes de sectionnement et de vidange ;
- Les bornes d'irrigation ;
- Les ventouses ;
- Purgeurs.

3.3.4.5. Matériels de contrôle de pression

- Les réservoirs d'air anti-bélier ;
- Régulateurs et stabilisateurs de pression.

3.3.4.6. Les rampe

La plupart des rampes sont en tuyaux PE (polyéthylène), noir de basse densité (PEBD). Ce matériau est flexible et pas trop sensible au soleil, ce qui est important car les rampes sont posées à la surface du sol.

Les diamètres intérieurs vont de 05 à 25 mm, mais les plus courants sont 10, 12, 15 et 16 mm. L'épaisseur de parois est de 03 ou 04 mm suivant la pression (la pression de l'eau dans le tuyau réduit le risque de « craquage », mais il faut faire attention pendant la pause

car il est très facile d'endommager les tuyaux lors de leur déroulement). (Bulletin de FAO N°36,1983).

Les craquelures des tuyaux PE constituer de plusieurs fentes longitudinales, peuvent être un problème, lorsqu'on utilise les raccords cannelés extérieurement, c'est le cas des distributeurs en ligne, lorsque le diamètre extérieur de la cannelure du distributeur, est trop grand par rapport au diamètre du tuyau utilisé, pour constituer la rampe.(Bulletin de FAO N°36,1983).

3.3.4.7. Les porte- rampent

Les porte- rampes sont en PE ou en PVC, de 20 à 80 mm de diamètre, la majorité entre 20 et 50 mm de diamètre intérieur, le choix du diamètre dépend en partie, du calcul hydraulique, en partie du type de raccordement aux rampes. Parfois le porte-rampe sera d'un diamètre supérieur au diamètre nécessaire du point de vue hydraulique, surtout si la rampe pénètre simplement par pression, dans un trou réalisé dans la paroi du porte-rampe. (Bulletin de FAO N°36,1983).

3.3.4.8. Les goutteurs

Les goutteurs constituent l'organe essentiel du système, il doit satisfaire aux exigences suivantes :

- Garantir le débit prévu lors du changement de la charge d'eau dans les conduites, et de la variation de la température ;
- Pas d'obturation avec les bactéries et les éléments fins de l'eau d'irrigation ;
- Doivent être stables aux radiations solaires et à l'humectation variable ;
- Doivent être compactes, exploitables et économiques.

La plupart des goutteurs sont calculés pour un débit de 2 à 10 l / h (pression 1 à 2 atmosphères).

Actuellement, dans le monde il existe d'innombrables modèles de goutteurs, à titre d'exemples :

Goutteurs sotradies, ANJAC, MPA, subterrain, capillaire, pluidor, irrifrance...etc.

Il serait trop long d'en dresser la nomenclature dans cet ouvrage. Toutefois ils se classent suivant trois catégories :

- a- Goutteurs à orifice réduit ;
- b- Goutteurs à long parcours de l'eau ;
- c- Goutteurs tourbillon.

3.3.5. Les avantages et les inconvénients du système « goutte à goutte »

La goutte à goutte présente des avantages et des inconvénients :

3.3.5.1. Avantages

a- Agronomiques

- Bonne humidité du sol sans gêner l'aération (localisation quasi-ponctuelle) ;
- Fertilisation par des engrais incorporés avec l'eau ;
- L'atmosphère au voisinage des cultures agricoles n'est pas saturée d'humidité comme l'aspersion (pas d'insectes) ;
- Les mauvaises herbes se développent peu.

b- Cultureux

- Non gêne des activités culturales ;
- Technique compatible avec les cultures faites sous paille et sous paillage plastique, les rampes se trouvant sous la couverture.

c- Economique

- Economie d'eau ;
- Augmentation du rendement agricole ;
- Coût d'exploitation faible ;
- Se prête bien à l'automatisation ;
- Indépendance complète vis-à-vis des irrégularités du relief, de la forme des parcelles et du vent.

3.3.5.2. Inconvénients

Les inconvénients du système "goutte à goutte" sont :

3.3.5.2.1. L'obstruction des goutteurs

L'inconvénient dans ce type d'installation est le risque de colmatage (obstruction). Ce colmatage peut avoir trois causes principales:

a- Colmatage physique

Il est dû à l'introduction dans le réseau de grosses particules. Il faut un système de filtration très efficace en tête de ligne.

b- Colmatage biologique

Il est dû au développement d'algues et de bactéries, dans les canalisations. L'adjonction périodique d'antiseptique (Ex: eau de javel) à l'eau d'irrigation, peut se révéler indispensable.

c- Colmatage chimique

C'est le plus difficile à combattre, certaines eaux (souvent alcalines) précipitent des sels insolubles, surtout des sels de calcium et de fer, qui peuvent former des dépôts bruns dans les goutteurs, et les obstruer, et aussi des gels dans les filtres.

L'entartrage (l'adjonction d'héxamétaphosphate ou d'acide nitrique dilué) donne en général, assez bons résultats.

D'autre part les engrais solubles employés sans discernement peuvent être également la cause du colmatage par précipitation. Le meilleur moyen de prévenir ces obstructions des goutteurs est une filtration soignée de l'eau. (Tiercelin, 1998).

3.3.5.2.2. Accumulation des sels

Les eaux d'irrigation contiennent toujours plus ou moins de sels dissous, les plantes prennent l'eau et la majorité des sels restent dans le sol.

Pendant la période d'irrigation, les sels sont refoulés peu à peu à la périphérie du bulbe humide, plus spécialement près de la surface du sol, une pluie légère risque alors de les entraîner vers les racines.

Certes, on peut lutter contre l'accumulation des sels en apportant un excès d'eau par rapport à la consommation de la plante: on lessive ainsi une grande partie des sels et on les

déplace en dessous de la zone racinaire, mais le procédé le plus efficace, surtout dans les régions où la pluviométrie naturelle est trop faible ($P \leq 250$ mm/an) pour assurer un lessivage suffisant, et de pratiquer des arrosages complémentaires selon une méthode classique (aspersion, ruissellement). (Tiercelin, 1998).

3.3.5.2.3. Difficulté à déterminer le volume minimal de sol à humidifier

Le développement racinaire se limite à la zone humidifiée, la croissance optimale de la culture globale exige l'humidification d'un volume minimum de sol. Il apparaît que les dimensions de ce volume sont liées à différentes variables et plus spécialement, au débit des goutteurs, à leur distance et à la nature du sol. (Tiercelin, 1998).

3.3.6. Automatisation

Il est possible d'automatiser la programmation de l'arrosage des parcelles successives, ce qui rend en principe presque nulle l'intervention de l'irrigant.

Le système d'automatisation, peut être uniquement hydraulique: Cette automatisation repose sur l'emploi de deux types particuliers de vannes que l'on a appelées d'une part la vanne volumétrique et d'autre part la vanne hydraulique, que l'on met en série à l'entrée de chaque poste (figure 3.2 et figure 3.3), nous allons en premier lieu, examiner le principe de fonctionnement de chacune de ces vannes, puis voir comment elles permettent la programmation séquentielle des arrosages. (Dubost, 1994).

La vanne volumétrique comporte la vanne proprement dite, une turbine à l'intérieur de la canalisation à l'aval de la vanne et un cadran gradué dont l'aiguille est entraînée par la turbine. La vanne se ferme automatiquement, sous l'effet de la pression de l'eau, lorsque l'aiguille, parcourant le cadran dans le sens décroissant, revient à la position zéro, après être partie d'une position correspondant au volume à servir à la parcelle, c'est l'agriculteur qui, auparavant, avait affiché ce volume. Pour toute autre position de l'aiguille que la position zéro, la vanne est ouverte (Dubost, 1994).

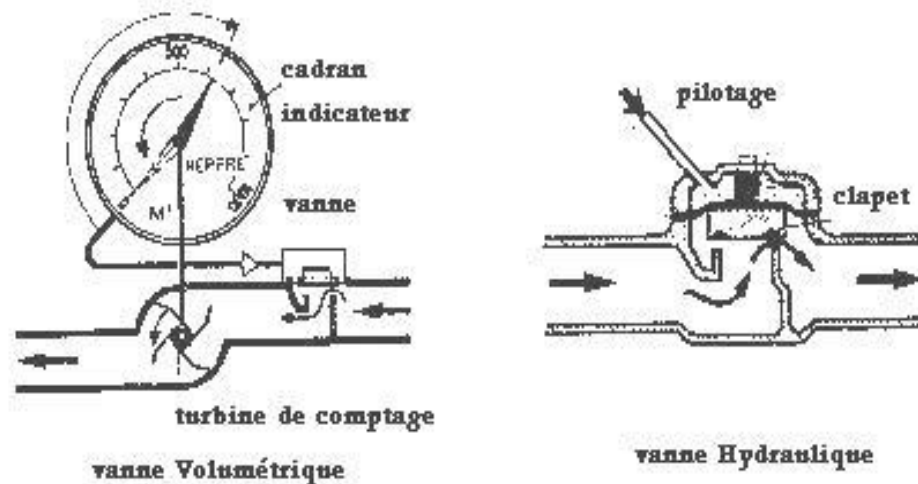


Figure 3.2: Les deux types de vannes permettant l'automatisation de l'arrosage localisé (Dubost, 1994).

La vanne hydraulique est une vanne à membrane se fermant, sous l'effet d'une pression d'eau exercée au-dessus, cette pression "de pilotage" provenant de l'alimentation en eau de la parcelle précédant, dans la programmation, la parcelle commandée par cette vanne.

Chaque parcelle ou "poste d'arrosage", à l'exception de la première, est munie à l'amont de son alimentation, d'abord d'une vanne volumétrique, puis immédiatement à l'aval, d'une vanne hydraulique à membrane.

Sur le petit élément de conduite qui les relie se trouve une prise de pression conduisant à la vanne hydraulique de la parcelle suivante.

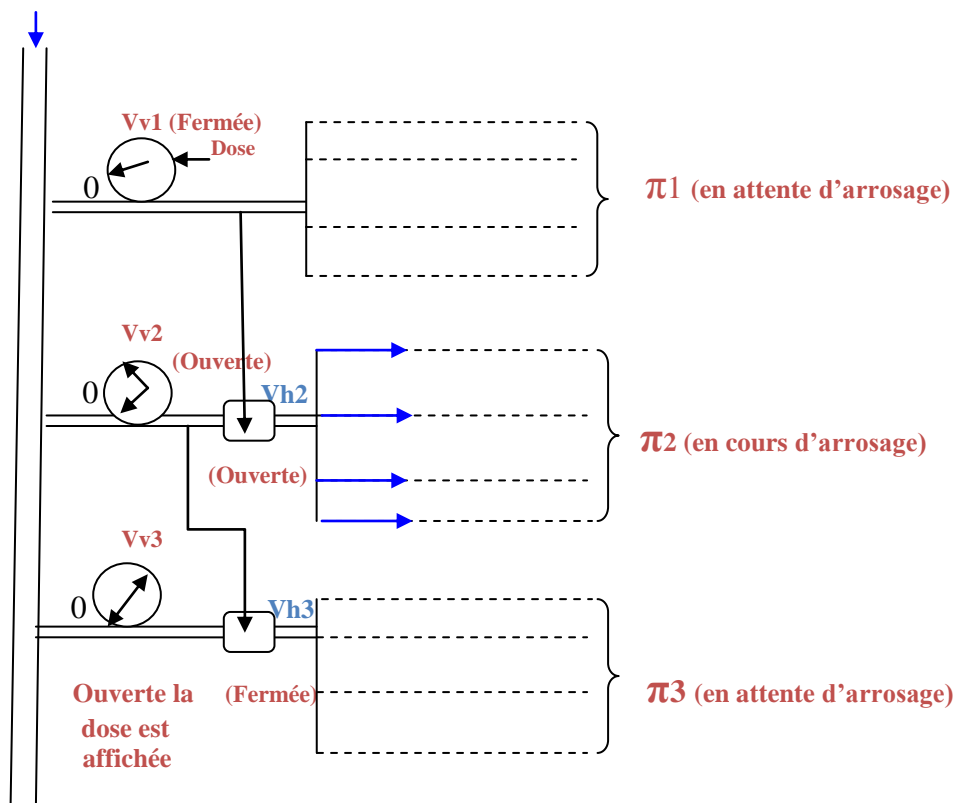
La première parcelle à arroser est seulement munie d'une vanne volumétrique et d'une prise de pression (figure 3.3).

Le cycle de fonctionnement est facile à comprendre: à l'instant 0 toutes les vannes volumétriques V_v ont affiché la dose à déverser à chaque parcelle et sont donc en position ouverte.

La pression de l'eau à l'aval immédiat de ces vannes entraîne la fermeture de toutes les vannes hydrauliques à membrane V_h . La parcelle π_1 est donc la seule à être arrosée.

Lorsqu'elle a reçu sa dose la vanne $Vv1$, dont l'aiguille est revenue à zéro, se ferme automatiquement, coupant ainsi la pression qui fermait la vanne volumétrique $Vv2$ de la seconde parcelle $\pi2$.

L'ouverture de $Vh2$ permet donc l'arrosage de la parcelle $\pi2$, dont la vanne volumétrique $Vv2$ se ferme en temps voulu, et ainsi de suite jusqu'à la dernière parcelle du cycle (Dubost, 1994).



Figur3.3: Programmation séquentielle de l'arrosage (Dubos, 1994).

On peut également, équiper le réseau d'arrosage d'un système de programmation électrique. Chaque parcelle n'est alors équipée que d'une seule vanne à commande électrique, laquelle s'ouvre et se ferme sur l'ordre d'un programmeur central qui assure la succession des mises en eau.

Ce programmeur peut se déclencher sous l'action d'un évaporomètre pilote qui commande le départ d'un nouveau cycle d'arrosage.

L'évaporomètre est constitué par un bac circulaire (diamètre de l'ordre de 10cm) qui contient de l'eau distillée dont le volume précis a été envoyé par une pompe doseuse et est

renouvelé automatiquement au cours de chaque cycle d'arrosage. Dans le bac deux électrodes trempent et un courant électrique faible circule entre elles. (Dubost, 1994).

Lorsque l'eau du bac est évaporée, correspondant à la consommation par les plantes de la dose d'arrosage précédente, le courant est coupé par suite de la baisse du niveau, ce qui provoque la mise en route du programmeur.

Il suffit que l'irrigant d'une part affiche la durée d'arrosage (c'est-à-dire la dose) sur le programmeur et règle le volume d'eau envoyé par la pompe doseuse.

On voit que la fréquence de l'arrosage dépendra du réglage de la pompe doseuse, lequel ne doit pas en principe, changer pour une culture donnée, et de l'évapotranspiration réelle (Dubost, 1994).

3.4. Qualité de l'eau d'irrigation

La qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation est un paramètre essentiel pour le rendement des cultures, le maintien de la productivité du sol et la protection de l'environnement. Ainsi, les propriétés physiques et chimiques du sol, telles que sa structure (stabilité des agrégats) et sa perméabilité, sont très sensibles au type d'ions potentiellement échangeables présents dans les eaux d'irrigation.

Tableau3.1 : Les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation selon. (Lenntech Purification et traitement de l'eau Holding B.V. (1998-2009))

<i>Paramètre</i>	<i>Signification pour l'irrigation avec de l'eau réutilisé</i>	<i>Gamme dans les effluents secondaires et tertiaires</i>	<i>But du traitement de l'eau réutilisée</i>
Solides en Suspension	Des mesures de particules peuvent être liées à la pollution microbienne: elles peuvent perturber la désinfection, obstruer des systèmes d'irrigation ou générer des dépôts.	5-50 mg/L	<5-35TSS/L
Turbidité		1-30 NTU	<0.2-35NTU
BOD ₅	Substrat organique pour la croissance microbienne; peut apporter l'encrassement microbien et le re-développement bactérien dans les systèmes de distribution.	10-30mg/	<5-45mgBOD/L
COD		50-150mg/L	<20-200 mg COD/L
Coliformes totaux	Mesure du risque d'infection due à la présence potentielle de microbes pathogènes; peuvent apporter un bio-encrassement des arroseuses et des becs dans les systèmes d'irrigation.	<10- 10 ⁷ cfu/100 mL	<1- 200cfu/10mL
Métaux lourds	Certains sels de minerais dissous sont identifiés comme aliments et sont salutaires pour la croissance de plantes, alors que d'autres peuvent être phytotoxiques ou peuvent le devenir à concentration élevée. Les éléments spécifiques (Cd, Ni, Hg, Zn, etc...) sont toxiques pour les récoltes, et des limites maximum de concentration existent pour l'irrigation.		< 0.001mgHg/L <0.01mgCd/L <0.02- 0.1mgNi/L
Inorganique	La salinité élevée et le bore sont nocifs pour l'irrigation de certaines récoltes sensibles.		<450- 4000mgTDS/L <1mgB/L
Chlore résiduel	Recommandé pour empêcher le développement bactérien; la quantité excessive de chlore libre (> 0.05mg/L) peut endommager certaines récoltes sensibles.		0.5->5mgCl/L
Azote	Engrais pour irrigation; peut contribuer à la croissance des algues et à l'eutrophisation dans des réservoirs de stockage, la corrosion (N-NH ₄), ou la formation de tartre (P).	10- 30mgN/L	<10-15mgN/L
Phosphore		0.1- 30mgP/L	<0.1-2mgP/L

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre il a été donné un aperçu sur les systèmes utilisés pour l'irrigation des espaces verts et en particulier, le système d'irrigation "goutte à goutte", qui sera adopté pour notre cas d'étude. Le système d'irrigation « goutte à goutte » est surtout réputé pour l'économie d'eau. Selon Varysse (1980), l'irrigation en "goutte à goutte" est l'une des techniques de l'irrigation localisée, qui consiste à apporter à chaque plante ou arbre, individuellement la quantité d'eau dont elle a exactement besoin, en fonction des types de sol, des spécificités du climat et de son développement. Cependant, Pour vraiment utiliser l'eau plus efficacement, il est absolument nécessaire d'améliorer à la fois les méthodes de gestion et le système d'irrigation.

CHAPITRE 4

La phytoépuration

I- Historique de la phytoépuration

II- Généralités sur les systèmes de la phytoépuration

III- Principe de fonctionnement

IV- Conclusion

4.1. Introduction

Une attention considérable a été orientée, Récemment, vers la capacité des marais naturels et artificiels pour traiter l'eau municipale et industrielle. Plusieurs investigations ont montré que les marais peuvent agir comme des systèmes d'épuration d'eau efficaces et des éviers de nutriments.

En plus, certains systèmes à base de macrophytes ont certains avantages comparés aux systèmes de traitement conventionnels:

- Fonctionnement à dépenses basses.
- Exigences moindre en énergie.
- Exigences basses en maintenance.
- Il peut être établis dans les localisations où l'eau résiduaire est produite.
- Ce sont des systèmes dit « low technologie » qui peuvent être établis et dirigés par

des personnes qui ne sont pas particulièrement qualifiés.

Pour cela l'élimination des eaux usées résiduaires vers des systèmes à base de marais peut être une alternative fiable des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées, spécialement convenable pour les agglomérations de petite à moyenne taille, dans les régions à population dispersée et pour les pays en voie de développement (BRIX, 1986).

4.2. Historique de la phytoépuration

Durant les deux dernières décennies les multiples fonctions et valeurs des marais ont été reconnus, non seulement par les scientifiques et les sociétés exploitantes, mais aussi par le large public. La capacité des marais de transformation et de stockage des matières organiques et des nutriments polluants a prouvé que leur utilisation améliore la qualité des eaux usées, ce qui n'est pas une invention nouvelle; en effet depuis longtemps l'homme évacuait les eaux usées, où les marais ont été plus ou moins impliqués dans l'épuration de ces eaux.

La plupart des travaux initiaux ont été relié à l'utilisation des marais naturels pour le traitement des eaux usées ou comme des récepteurs d'effluents traités. Cependant, il est devenu évident que les rejets eaux usées sur le système naturel cause des changements significatifs sur la composition des espèces, la structure et le fonctionnement des communautés, d'où la quantité globale de marais. Il a été réalisé que les systèmes construits « lits filtrants » ont un potentiel d'application plus large, à cause de l'opportunité d'optimiser le contrôle de la pollution d'eau.

La technique de traitement des eaux usées par les plantes est apparue en Europe de l'Ouest basée sur une recherche de SEIDEL qui a commencé durant les années soixante (1960's), et par KICKUTH à la fin des années soixante-dix (1970's) et dernièrement durant les années quatre-vingt (1980's). Des travaux avancés ont commencé aux Etats Unies au début des années quatre-vingt (1980's) avec la recherche de WOLVERTON et GERBERGET et al. (SHERWOOD, 1993).

En 1955, le Dr SEIDEL a discutait dans un rapport sur la possibilité « de diminuer la surfertilisation, la pollution et l'envasement des eaux des terres intérieures en utilisant des plantes particulières permettant aux eaux polluées de supporter la vie de nouveau ». Elle a proposée pour ce but le jonc des chaisiers « *Schoenoplectus lacustris* », ayant observées dans sa recherche que cette espèce est capable de retenir de grande quantités de substances organiques des eaux contaminées.

Le système développé par SEIDEL comprend des séries de lits composés de sable ou gravier supportant une végétation aquatique immergée tel que la massette, le jonc, et le phragmite qui a été le plus communément utilisé, et dans la majorité des cas le plan d'écoulement été vertical. (SHERWOOD, 1993).

Dans le nord d'Amérique, des observations de la capacité assimilative des terres émergées naturellement mène à l'expérimentation avec différents modèles de marécages construits (constructed wetlands) durant les années soixante-dix 70's.

KICKUTH proposa l'utilisation de sols cohésifs au lieu du sable ou du gravier, la végétation préférée été le *Phragmites* et le flux d'écoulement été horizontal. (SHERWOOD, 1993).

Commençant en 1985, un nombre de systèmes de « lits de phragmite » a été construit en Angleterre basés sur les concepts de KICKUTH, mais plusieurs cas utilisaient le gravier au lieu des sols cohésifs dus à la conductivité hydraulique élevée. (SHERWOOD, 1993).

Un prélèvement effectif de la DBO₅, d'azote, du phosphore et des complexes organiques a été déclaré dans les recherches de KICKUTH. Comme résultat, en 1990; près de 500 systèmes de lits de phragmite ou de « zone de racine » ont été construits en Allemagne, Danemark, Australie et en Suisse. Les systèmes en fonction comprennent des unités pour famille individuelle sur site et des systèmes plus larges traitant des eaux usées ménagères et industrielles. (SHERWOOD, 1993).

Les travaux de WOLVERTON en Louisiana ont commencé avec des gammes de plateaux (sur banc dans une serre) contenant des roches ou du gravier et une végétation aquatique. En 1991, il y avait près de 60 systèmes fonctionnant ou en réalisation au sud central des Etats Unies. (SHERWOOD, 1993).

Les travaux de GERSBERG ont été conduites en période de plusieurs années en Santee, concentrant sur la profondeur de pénétration d'une variété de plantes (*Typha*, *Scirpus*, *Phragmites*). (SHERWOOD, 1993).

Commençant au milieu des années quatre-vingts, l'autorité du Vallet de Tennessee (The Tennessee Valley Authority TVA) a commencé un programme de recherche et d'assistance technique sur les marais construits pour le traitement d'une variété des eaux usées (municipales, de drainage acide des mines, de ruissellement agricole, etc.) se basant sur les travaux de KICKUTH.

En 1991 il y avait probablement au moins 80 systèmes en fonction dans un nombre des Etats basés sur les critères et l'assistance du TVA. (SHERWOOD, 1993).

Selon POULET et al (2004); la technologie des filtres plantés de macrophytes pour le traitement des eaux usées domestiques est une technique au développement récent. Apparue en France dans les années quatre-vingt 80's, cette technique de traitement a vu son développement s'accroître depuis 1997. La forte demande actuelle pour ce type de station d'épuration de la part des élus est réelle. Il s'agit d'une technologie fiable, simple d'exploitation, facilitant grandement la gestion des boues d'épuration et qui, de surcroît, est bien acceptée par les habitants en raison de sa bonne aptitude à l'intégration paysagère. Ainsi, elle s'avère fortement recommandée pour les petites collectivités et les pays à faibles ressources financières.

4.3. Généralités sur les systèmes de la phytoépuration

4.3.1. Qu'est-ce qu'un marais naturel ?

En géographie, un marais est un type de formation paysagère, au relief peu accidenté, où le sol est recouvert, en permanence ou par intermittence, d'une couche d'eau stagnante, en général peu profonde, et couvert de végétations. On parle de zone humide. La végétation des marais est constituée d'espèces adaptées au milieu humide. Sa composition varie selon la hauteur de l'eau, l'importance des périodes d'assèchement, et selon le taux de salinité. Les espèces dominantes sont les poacées (roseaux), typhacées (massettes), les joncacées (joncs), cypéracées (carex), et autres plantes herbacées et aquatiques, et des plantes ligneuses basses. Dans les marais d'eau saumâtre, on rencontre des espèces halophiles .

4.3.2. Les biocénoses des marais (faune, flore)

Les organismes constituant les communautés limniques peuvent être rassemblés, de façon générale, en un ensemble de groupes distincts selon leur fonction écologique (producteurs, consommateurs, décomposeurs), leur forme de vie ou leur habitat (RAMADE ; 2003).

➤ Les phytocoenoses des marais

Les producteurs primaires sont représentés par des végétaux supérieurs macrophytes ainsi que des algues filamenteuses et par du plancton. Les macrophytes appartiennent à diverses familles, cependant les graminées (roseaux), Juncacées, Cypéracées dominent dans ces phytocoenoses de la zone littorale de même que diverses Dicotylédones. Les premiers sont inféodés à la zone littorale, de faible profondeur car il est nécessaire, en règle générale, aux phanérogames aquatiques de s'enraciner dans les vases du fond.

➤ Les zoocoenoses des marais

Les consommateurs des biocénoses appartiennent à trois groupes distincts : le zooplancton, le necton, et le neuston. Le zooplancton des eaux douces et surtout constitué par des micro- crustacés (Cladocères, Copépodes, Ostracodes) et par des Rotifères. Le necton, qui correspond à des animaux capables de se déplacer activement en milieu aquatique, est représenté par les insectes, les amphibiens et les poissons. Le terme de neuston désigne les animaux qui se reposent ou nagent à la surface de l'eau (coléoptères *Grinidae*, hétéroptères *Gerridae*, par exemple (RAMADE, 2003).

4.3.3. Les marais artificiels

La technique d'épuration des eaux usées par les plantes ou phytoépuration a pris plusieurs dénominations tels que : le lagunage, les marécages ou marais construits, le phytofiltre, la technique des zones humides, les lits filtrants...etc.

Les marais construits pour le traitement d'eau sont des systèmes complexes intégrant de l'eau, des plantes, des animaux, des microorganismes et le milieu qui les entoure. (DUPOLDT et al, 1995).

Un marécage construit est définie comme un marais construit spécifiquement pour le contrôle de pollution et l'aménagement des déchets, à un emplacement autre que celui d'un marais naturel déjà existant. (SHERWOOD, 1993).

D'après (LECOMTE, 1998) ; la méthode des « zones humides » est une technique utilisée pour les eaux usées ou pour les eaux de mines, qu'il s'agisse d'eau d'exhaure ou d'eau de drainage de zone de dépôts de déchets miniers (terrils, lagune...etc.).

Selon le même auteur; ce type de traitement utilisé pour la régénération d'effluents urbains est appelé technique de lagunage et a été essayé également pour des pulpes d'usine de traitement des bois.

D'apparence simple, le fonctionnement des lits filtrants plantés de macrophytes fait intervenir des réactions épuratoires pouvant être complexes. Mais le principe de base reste l'infiltration d'un effluent brut à travers des lits composés d'un mélange sable-gravier ou de sol en place, plantés de macrophytes(le plus souvent, des roseaux communs) . Le matériau du lit et la partie racinaire des plantes servent de support à une biomasse épuratrice. On peut ainsi considérer ces stations comme des marais artificiels (POULET et al, 2004).

4.3.3.1. Les composantes d'un marais artificiel

Un marais construit est constitué par un bassin désigné proprement pour contenir de l'eau, un substrat, et souvent, des plantes vasculaires. Ces constituants peuvent être manipulés dans la construction d'un marais. D'autres composantes importantes des marais, tels que les communautés microbiennes et les invertébrés se développeront naturellement :

4.3.3.1.1. L'eau

Les marais se forment quand l'eau est dirigée vers une dépression profonde et où une couche superficielle imperméable empêche l'eau de s'infiltrer dans le sol. Ces conditions peuvent être créés pour construire un marais. Un marais peut être construit presque n'importe où dans le paysage en formant la surface du sol afin de collecter l'eau en scellant le bassin

pour retenir l'eau. L'hydrologie est le facteur le plus important dans la conception d'un marais construit car il lie tous les fonctions dans le marais et il est souvent le facteur primaire du succès ou l'échec d'un marais construit. (DUPOLDT et al, 1995).

4.3.3.1.2. Le substrat, sédiment et détrit

Les substrats utilisés pour construire un marais comprennent le sol, le sable, le gravier, les roches et des matériaux organiques comme le composte. Les sédiments, et les détrit s'accumulent dans le filtre à cause des vitocités basses d'eau et la haute productivité typique des marais. Les substrats, les sédiments, et le détrit sont importants pour plusieurs raisons :

- Ils supportent beaucoup d'organismes vivant dans le marais ;
- La perméabilité du substrat influence le mouvement d'eau à travers le marais ;
- Plusieurs transformations biologiques (spécialement microbiennes) ont lieu dans le substrat ;
- Les substrats fournissent un stockage pour plusieurs contaminants ;
- L'accumulation du détrit augmente la quantité de la matière organique dans le marais. La matière organique fournit des sites pour l'échange de matériaux et l'attachement microbien, c'est une source de carbone ; la source d'énergie qui règle certaines réactions biologiques importantes dans le marais.

Les caractéristiques physiques et chimiques des sols et autres substrats sont altérés quand ils sont submergés. Dans un substrat saturé, l'eau remplace les gaz atmosphériques dans les espaces des pores et le métabolisme microbien consomme l'oxygène disponible. Dès que l'oxygène est consommé il peut être remplacé plus rapidement par diffusion à partir de l'atmosphère, les substrats deviennent anoxique (sans oxygène). Ce milieu réducteur est important dans le prélèvement des polluants tels que l'azote et les métaux (DUPOLDT et al, 1995).

4.3.3.1.3. La végétation

Tous deux, les plantes vasculaires (les hautes plantes) et les plantes non vasculaires (algues) sont importants dans les marais construits. La photosynthèse par les algues augmente le contenu d'oxygène dissous dans l'eau qui à son tour affecte les réactions des nutriments et

des métaux. Les plantes vasculaires contribuent au traitement des eaux résiduaires et des eaux de ruissellement en différentes manières :

- Elles stabilisent les substrats et limite l'écoulement ;
- Elles ralentissent la vitesse de l'eau, permettant aux matières suspendus de se déposer ;
- Elles prélèvent le carbone, les nutriments, et les éléments en traces et les incorporent dans les tissus des plantes ;
- Elles transfèrent les gaz entre l'atmosphère et les sédiments ;
- La fuite d'oxygène des surfaces supérieures des structures de la plante crée des macrosites oxygénés dans le substrat ;
- Les systèmes racinaires et leur tiges fournissent des sites pour l'attachement microbien ;
- Elles créent le détritrus quand elles meurent et pourrissent.

Les marais construits sont souvent plantés par une végétation immergée, qui se développent avec leurs racines dans le substrat et leurs tiges et feuilles apparaissent sur la surface d'eau. Les plantes émergentes communes utilisées dans les lits filtrants comprennent : les joncs, les massetes, les roseaux et un nombre d'espèces de feuilles larges. (DUPOLDT et al, 1995).

4.3.3.1.4. Les micro-organismes

Les micro-organismes comprennent les bactéries, les levures, les champignons, les protozoaires, les algues des écorces. La biomasse microbienne est un évier majeur du carbone organique et plusieurs nutriments. L'activité microbienne consiste à :

- Transformer un grand nombre de substances organiques et inorganiques en solution inoffensive ou insoluble ;

- Altérer les conditions réduction/oxydation (redox) du substrat et ainsi influence la capacité des processus du marais ;
- Elle est impliquée dans le recyclage des nutriments.

Quelques transformations microbiennes sont aérobiques (c.à.d. nécessitent l'oxygène libre) et d'autre sont anaérobiques, c'est à dire, elles sont capables de fonctionner sous les deux conditions aérobiques ou anaérobiques selon le changement des conditions du milieu.

La communauté microbienne d'un marais construit peut être influencée par les substances toxiques, tels que les pesticides et les métaux lourds, et des soins doivent être prises pour éviter de tels substances chimiques d'être introduites à des concentrations préjudiciables. (DUPOLDT et al, 1995).

4.3.3.1.5. Les animaux

Les marais construits offrent un habitat pour une diversité riche d'invertébrés et de vertébrés. Les animaux invertébrés, tel que les insectes, et les vers ; contribuent au processus de traitement en fragmentant le détritus et consommant la matière organique ; les larves de plusieurs insectes sont aquatiques et consomment des quantités significatives des matériaux durant leurs stades larvaires, qui peut durer pour plusieurs années. Les invertébrés accomplissent aussi un nombre de rôles écologiques ; par exemple, les nymphes des libellules sont des prédateurs importants des larves des moustiques.

Malgré que les invertébrés soient les animaux les plus importants en matière de l'amélioration de la qualité d'eau, les marais construits attirent aussi une variété d'amphibiens, tortues, oiseaux et mammifères. (DUPOLDT et al, 1995).

4.3.3.2. Les types de marais construits (Constructed Wetlands)

Il y a différents types de marais construits : bassin à écoulement en surface, bassin à écoulement sous surface et des systèmes hybrides ; qui incorporent les deux systèmes précédents. (DUPOLDT et al, 1995).

4.3.3.2.1. Bassin à écoulement en surface

Un bassin à écoulement en surface (SF surface flow) est consisté en un bassin profond, sol ou autre matériel pour supporter les racines de la végétation, et une structure contrôlant l'eau pour maintenir une petite profondeur. Des marais à écoulement en surface ressemblent aux marais naturels et peuvent offrir un habitat naturel et des bénéfices esthétiques en plus du traitement d'eau. Dans le marais à écoulement en surface, les couches superficielles sont souvent anaérobiques. Les marais des eaux de tempête et les marais construits pour traiter les eaux de drainage des mines et les ruissellements d'agriculture sont habituellement des marais à écoulement en surface. Les marais à écoulement en surface sont quelque fois appelés des marais à surface d'eau libre ou, s'ils sont pour les eaux de drainage des mines, des marais aérobiques. Les avantages des marais à écoulement en surface sont que leur coût capital et de fonctionnement sont bas, et que leur construction, fonctionnement et maintenance sont simples. L'inconvénient principal des systèmes à écoulement en surface est qu'ils nécessitent une plus grande surface que les autres systèmes. (DUPOLDT et al, 1995).

4.3.3.2.2. Bassin à écoulement sous-surface

Un bassin à écoulement sous surface (SSF Sub-Surface Flow) est consisté en un bassin en cachette avec un substrat poreux de roche ou de gravier. Le niveau d'eau est désigné de rester sous la surface du substrat. Dans la plupart des systèmes dans les Etats Unies, la voie d'écoulement est horizontale, bien que quelques systèmes Européens utilisent des flux à écoulement vertical. Les systèmes à écoulement sous surface sont appelés par plusieurs noms : les lits immergés végétés (vegetated submerged bed), la méthode de zone de racine (root-zone method), le filtre microbien de roche – phragmite (microbial rock reed filter), et les systèmes filtrants plante – roche (plant – rock filter systems).

A cause des contraintes hydrauliques imposées par le substrat, les filtres à écoulement sous surface sont plus convenables aux eaux usées à basses concentrations en solides et sous des conditions d'écoulement uniformes. Les filtres à écoulement sous surface ont été souvent utilisés pour réduire la demande biochimique en oxygène (DBO_5) des eaux usées domestiques. (DUPOLDT et al, 1995). On distingue deux types de filtres plantés suivant le sens d'écoulement :

4.3.3.2.2.1. Les filtres plantés à écoulement vertical

Les principaux mécanismes d'épuration s'appuient sur la combinaison de plusieurs processus en conditions aérobie, qui se déroulent successivement sur deux étages de traitement en série au minimum ;

- Les filtres à écoulement vertical sont alimentés en surface, l'effluent percole verticalement à travers le substrat ;
- La rétention physique des matières en suspension s'effectue en surface des filtres ;
- Ce type de dispositif permet un stockage et une minéralisation des boues sur le premier filtre de traitement par stabilisation des boues ;
- La dégradation biologique des matières dissoutes est réalisée par la biomasse bactérienne aérobie fixée sur le support non saturé.

Pour des questions de capacité d'oxygénation, les filtres du premier étage contribuent essentiellement à la dégradation de la fraction carbonée alors que ceux du deuxième étage terminent la dégradation de cette fraction et peuvent permettre une nitrification qui sera fonction des conditions d'oxygénation, de la température et du pH (POULTE et al ,2004).

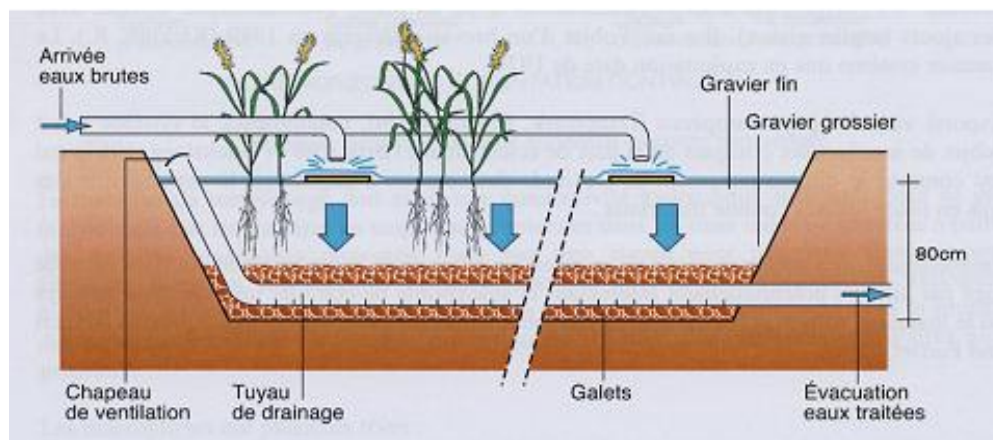


Figure 4. 1 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical (POULTE et al, 2004).

4.3.3.2.2. Les filtres plantés à écoulement horizontal

Les filtres horizontaux ne sont pas alimentés par la surface, comme les filtres verticaux. Les eaux usées décantées entrent, via un gabion d'alimentation, directement dans le massif filtrant. Il est donc nécessaire de débarrasser l'effluent, au préalable, des matières en suspension, soit par l'intermédiaire d'un décanteur placé en amont, soit par un premier étage de filtration verticale.

Les matières dissoutes sont dégradées dans le massif de filtration par la biomasse bactérienne fixée sur le support.

Le niveau d'eau dans un filtre horizontal est normalement constant. L'aération est limitée par l'absence d'un mouvement de la ligne de saturation et se fait de manière très faible par une diffusion gazeuse. L'apport d'oxygène est faible par rapport à la demande totale.

La pénurie en oxygène, limite la dégradation de la pollution carbonée et azotée, oxydation du carbone organique et de l'ammonium, et par voie de conséquence limite la croissance bactérienne hétérotrophe et autotrophe (POULET et al, 2004).

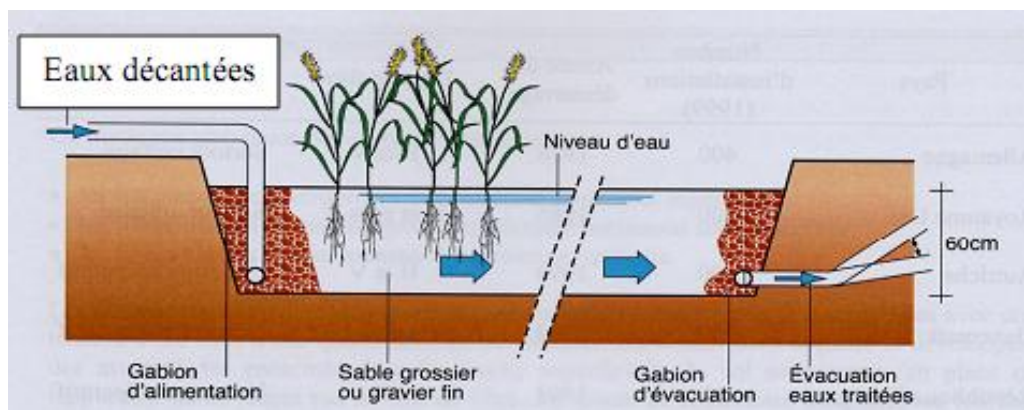


Figure 4. 2 : Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement horizontal (POULTE et al ,2004).

4.3.3.2.3. Les systèmes hybrides

Les systèmes hybrides à plate forme necessite que tous les processus de prélèvement auront lieu dans le même espace. Dans les systèmes hybrides il y a plusieurs cellules désignées pour différents types de réactions.

Un traitement effectif des drainages de mines peut necessiter une séquence de différentes cellules de marais pour promouvoir les réactions aérobiques – anaérobiques. Comme pour le prélèvement de l'ammoniac des eaux usées d'agriculture.

4. 4. Principe de fonctionnement

L'épuration est réalisée selon le principe de l'épuration biologique majoritairement aérobie dans les milieux granulaires fins à grossier (POULET et al, 2004).

Selon LECOMTE (1998), le principe consiste à développer des étendues marécageuses au travers des quelles coulent les effluents. Lors de la traversée du marécage, les métaux lourds, présents en grande quantité dans l'effluent, sont immobilisés par l'action de végétation (flore bactérienne, algues, phragmite et plantes supérieures du marais...etc.). Lorsqu'il s'agit d'eaux usées, l'action des microorganismes et de la végétation provoquent la dégradation des matières organiques et la dénitrification des eaux. En aval, on obtient ainsi une eau de qualité

acceptable qui peut être envoyée telle qu'elle dans le réseau hydrologique, sans risquer d'empoisonner le milieu naturel. Lors de la mise en place de zones humides, retenant temporairement les effluents, on crée un milieu riche en matière organique et en végétation, où vont se développer des conditions anaérobies. De telles conditions favorisent la réduction des composés, solubilisés précédemment par l'oxydation. Elles provoquent notamment la précipitation des métaux lourds sous forme sulfurée, principalement grâce à l'action catalytique des bactéries (appelées d'ailleurs sulfo-réductrices). Les métaux, immobilisés sous forme sulfurée, peuvent rester dans cet état, sans préjudice pour le milieu, tant que les conditions sont maintenues (LECOMTE, 1998).

Selon le même auteur ; le phénomène provoque également la neutralisation de l'acidité de l'eau, notamment par la forte production d' H_2S gazeux liée à l'activité bactérienne.

Si le mécanisme prépondérant reste la sulfo-réduction bactérienne, l'action des autres groupes de végétaux n'est pas négligeable ; par exemple, l'absorption d'ions métalliques est effective par les algues ou d'autres plantes supérieures : ou encore, la filtration des particules fines en suspension est réalisée au travers des enchevêtrements des racines ou d'appareils végétaux immergés (LECOMTE, 1998).

4.4.1. Rôle des micro-organismes

Particulièrement proliférantes en milieu humide, les bactéries se nourrissent des matières dont sont chargés les eaux usées. Véritables « ciseaux biologique » elles les transforment en molécules inoffensives. La dégradation de la matière organique et la dénitrification d'azote dans la région des racines des plantes où s'effectue le traitement est médiaturé par les microorganismes. L'émission d'oxygène par les racines des macrophytes crée des zones oxydées autour des racines. La plupart du contenu organique des eaux résiduares est décomposé en dioxyde de carbone (CO_2) et eau dans ces zones en utilisant l'oxygène comme dernier accepteur d'électrons. En plus l'ammoniaque est oxydée en nitrates par bactéries

nitrifiante dans ces zones. A une distance des racines de surface l'oxygène libre réduit, mais les nitrates restent présentes (la zone anoxique).

Ici la dégradation de la matière organique peut avoir lieu par bactéries dénitrifiantes. Par ces processus les nitrates sont convertis en azote (N_2), qui s'évapore vers l'atmosphère. Dans une région de la rhizosphère, la matière organique peut être décomposée anaérobiquement en dioxyde de carbone (CO_2) et méthane (CH_4) par des processus fermentatifs. L'existence simultanée des zones oxydées, anoxiques, et de réduction, et l'interaction entre les différents types de processus de dégradation microbiennes dans ces zones, est essentielle pour une décomposition de la matière organique et un prélèvement des nutriments efficace dans la région des racines des plantes où s'effectue le traitement. En plus de telles interactions peuvent être favorables pour la décomposition des composés persistants, tel que les hydrocarbures chlorés (TIEDJE et AL, 1984).

4.4.2. Rôle des macrophytes

Au delà de l'aspect esthétique, les macrophytes contribuent indirectement à la dégradation des matières volatiles en suspension (MES) de l'effluent brut ;

- **La croissance des racines et des rhizomes** permet une régulation de la conductivité hydraulique initiale. La faible granulométrie du substrat (sable ou gravier) ainsi que l'apport important de matière organique sont propices au colmatage du filtre. La croissance des parties racinaires limite ces risques en formant des pores tubulaires le long des racines qui se développent. Toutefois dans des filtres à écoulement horizontal, il ne faut pas escompter une conductivité hydraulique supérieure à celle des matériaux d'origine. (POULET et al ,2004).
- **La couverture foliaire** est un régulateur thermique ayant un impact sur les rendements épuratoires sous des climats froids.
- **De petites quantités d'oxygène** provenant des parties aériennes sont rejetées à l'apex des racines des plantes, mais elles sont insuffisantes pour contribuer seules à la satisfaction des besoins d'oxygène de la biomasse bactérienne, responsable de la dégradation (POULET et al ; 2004).

- **le développement racinaire** accroît la surface de fixation pour le développement des microorganismes et pour des réactions de précipitation. A cet accroissement de surface active, s'ajoute très certainement aussi un facteur encore très mal documenté de stimulation de l'activité, voire de la diversité et de la densité des microorganismes, impliqués à divers titres dans les processus épuratoires. Il s'agit d'un concept bien connu en agronomie et qui peut se résumer sous la forme triviale suivante « un sol planté est biologiquement plus riche et actif qu'un sol nu ». Les tissus racinaires et leurs exsudats constituent vraisemblablement des niches plus accueillantes pour les microorganismes que des substrats minéraux inertes (POULET et al, 2004).

- **Le rôle du métabolisme des plantes** (assimilation des nutriments) affecte plus ou moins le traitement en fonction des surfaces mise en jeu. Si pour les filtres plantés verticaux l'assimilation est négligeable, les surfaces plus importantes mises en jeu dans les filtres horizontaux peuvent conduire à de prélèvement pouvant être raisonnablement prises en compte dans les bilans, mais qui devraient cependant se situer au maximum à 20% pour l'azote et 10% pour le phosphore. Tous ces éléments ne sont pas directement exportables dans la biomasse faucardable, mais se trouvent aussi piégés dans le système racinaire dont le devenir à long terme, c'est-à-dire 10-15 ans, n'a pas encore été étudié. (POULET et AL, 2004).

4.4.3. Plantes utilisées

Plusieurs plantes ont été utilisées dans le processus de la phytoépuration, mais les espèces les plus utilisées sont celles supportant des conditions hydriques en excès ou se développant en bordures des cours d'eau; souvent des : phragmites (roseaux), typha, jonc, massette, bambousetc.

Le choix des végétaux à implanter comporte cinq critères importants : adaptation aux conditions climatiques locales, durée du cycle de végétation, vitesse de croissance, facilité d'exportation de la biomasse produite et efficacité d'épuration.

Notre travail est basé essentiellement sur deux genres de plantes : le *Phragmites australis* et le typha.

4.4.3.1. *Phragmites* (Roseau)



Plante vivace à rhizome rampant, très ramifié, émettant des tiges nombreuses, élevées (de 60 cm à deux mètres), dures et luisantes ; feuilles glauques, à ligule courte et ciliée, à limbe de plusieurs décimètres de long et large d'un pouce, très pointu au sommet et rude sur les bords, strié en long sur les deux faces ; inflorescence grande, très étalée, brun-jaunâtre, à axe velu sur les nœuds inférieurs ; épillet très nombreux, grands (1-2 cm), à glumes très inégales, à axe sinueux très velu, portant 4 – 10 fleurs à longue arête.- Espèce cosmopolite, surtout représentée au Sahara par une forme à feuilles courtes, raides et piquantes, un peu enroulées en long, à tiges plus courtes que dans le roseau habituel d'Europe. Lits des torrents, gueltas, un peu partout au Sahara septentrional, occidental et central. (OZENDA ,1991).

Le roseau est la plante filtrante la plus utilisée au monde pour dépolluer les eaux usées que cela soit sous forme de filtre alluvionnaire végétalisé ou sous forme de bassins plantés : transportant de l'oxygène pur dans ses rhizomes, elle est très performante pour traiter les charges organiques (demande chimique en oxygène DCO ou DBO5 ou MES). Elle est maintenant aussi utilisée pour traiter les boues urbaines.

4.4.3. 2. Le typha



Le typha est une plante vivace de 1-2 mètres, glabre, à tige robuste ; feuilles largement linéaires (6 à 18 mm.), planes, glaucescentes, dépassant la tige ; épis proches ou à peine espacés et qui colonise les marées, étranges, rivière dans presque toute la France, l'Europe, l'Asie, l'Afrique et l'Amérique boréale Quezel et al. (1962 – 1963).

Le typha est une plante très résistante qui peut être utilisée pour les cas de pollution les plus désespérés. Elle est capable de dépolluer des eaux usées très polluées à la limite de l'asphyxie (lisiers, eaux de décharges). Elle est très performante dans les milieux à la limite de l'anoxie (peu d'oxygène). Elle biodégrade très bien les produits pétroliers, les composés chlorés, et résiste à tout : métaux lourds, sels, excès de DCO et DBO₅.

4.5. Configuration des lits du filtre

Selon la littérature, il existe différentes possibilités pour le dimensionnement des stations de phytoépuration à écoulement sous-superficiel horizontal. Le dimensionnement est basé essentiellement sur l'élimination d'un maximum de charge polluante, pour obtenir à la fin des effluents de qualité optimale. Des modèles mathématiques ont été établies, basés sur la cinétique d'élimination des principaux polluants, en utilisant des coefficients semi-empirique, on se basant sur un certain nombre données d'un certains nombre de stations existantes.

4.5.1. Selon Kadlec & Knight (1996)

Les auteurs proposent une équation de premier ordre valable pour tous les paramètres : DBO, MES, Phosphate total, NH₄-N, NO₃-N, Coliformes fécaux. L'équation est cependant, indépendante de la température. Ceci, semble réduire sa fiabilité car il est connu que le processus biologique est fortement dépendant de la température de l'eau. La formule proposée est la suivante :

$$\ln\left(\frac{C_s - C^*}{C_e - C^*}\right) = \frac{-K}{q} \quad (4.1)$$

Où :

$q = \frac{365Q}{A_s}$ est la charge hydraulique en m / an.

A_s : Surface du bassin filtrant.

C_s : Concentration de la pollution de l'effluent fixée, selon l'objectif d'épuration voulu, en mg/l.

C_e : Concentration de la pollution à l'entrée de la station (après un éventuel traitement primaire) en mg/l.

C^* : Concentration du fond du polluant en mg / l.

$K = K_{20} \theta^{(T-20)}$: Constante de premier ordre en m / an.

Q = Débit hydraulique moyen journalier en m³/ jours.

L'aire superficielle peut être calculée alors par la relation suivante :

$$A_s = \frac{365.Q}{K} \ln\left(\frac{C_s - C^*}{C_e - C^*}\right) \quad (4.2)$$

Les paramètres de références proposés par *Kadlec & Knight (1996)* pour la typologie de l'écoulement sous superficiel horizontal, sont représentés au tableau 4.1. Les valeurs de θ différentes de 1 indiquent une dépendance du processus d'élimination des polluants de la température du rejet.

Tableau 4. 1 : Paramètres de références proposées par Kadlec & Knight (1996) pour le filtre à écoulement horizontal

Paramètre	BOD5	MES	NH4-N	NO3-N	P.T	C.F
K₂₀	180	1000	34	50	12	95
θ	1,00	1,00	1,04	1,09	1,00	1,00
C*	3.5+0.053Ci	7.8+0.063Ci	0,00	0,00	0,02	10

PT : Phosphate total.

CF : Coliformes fécaux.

4.5.2. Selon Reed, Crites & Middlebrooks (1995)

Les auteurs proposent une formule de premier ordre, qui considère trois paramètres d'élimination biologique de polluants : DBO₅, azote ammoniacal et azote nitrique. Pour les autres paramètres les auteurs proposent d'autres relations différentes. L'équation proposée est la suivante :

$$\ln\left(\frac{C_e}{C_s}\right) = K_T \cdot t \quad (4.3)$$

Où :

$$t = \frac{A_s \cdot n \cdot y}{Q} \quad (4.4)$$

t : temps de rétention hydraulique en jours.

A_s : Surface du bassin filtrant.

C_s : Concentration de la pollution de l'effluent fixée, selon l'objectif d'épuration voulu, en mg/l.

C_e : Concentration de la pollution à l'entrée de la station (après un éventuel traitement primaire) en mg/l.

$K_T = K_R \theta_R^{(T_w - T_R)}$: Constante cinétique à la température T_w, en Jours⁻¹.

Q : Débit hydraulique moyen journalier en m³/jours.

T_w : température de référence dans la zone humide, en °C.

T_R : température de référence, en °C.

n : porosité du milieu, en %.

y : profondeur au milieu de la zone humide.

La surface du bassin nécessaire pour le traitement, peut être écrite comme suit :

$$A_s = \frac{Q}{K_T \cdot y \cdot n} \ln\left(\frac{C_e}{C_s}\right) \quad (4.5)$$

Les auteurs proposent les valeurs du tableau (4.2) pour les coefficients entrant en considération, selon le degré de pollution du rejet considéré.

Tableau 4. 2 : Paramètres de références proposées par **Reed, Crites & Middlebrooks (1995)**
Pour le filtre à écoulement horizontal.

Paramètre	BOD5	NH4-N	NO3-N	C.F
1 < T_w < 10				
T_R	20	10	10	20
C résidu	6	0,2	0,2	-
K_R	1,104	K10	1,000	2,6
θ	1,06	1,15	1,15	1,19
T_w > 10				
T_R	20	20	20	20
C résidu	6	0,2	0,2	-
K_R	1,104	K _{NH}	1,000	2,6
θ	1,06	1,048	1,15	1,19

K_{NH} est la constante cinétique de nitrification et dépend du taux d'occupation des racines à hauteur du lit filtrant (rz).

$$K_{NH} = 0,01854 + 0,3922 (rz)^{2,6077} \quad (4.6)$$

K₁₀ est obtenue à partir de l'équation (3.7) comme suit :

$$K_{10} = K_{NH} (1,048)^{-10} \quad (4.7)$$

La méthode considère la dépendance de la température T_w dans le dimensionnement des installations de phytoépuration et la température hivernale est considérée comme celle du cas

le plus critique. Pour l'élimination de la matière en suspension les auteurs proposent la formule suivante, avec un seuil minimal de 6mg/l :

$$C_s = C_e (0,1058 + 0,0011.HLR) \quad (4.8)$$

Où :

HLR = Coefficient de charge hydraulique en cm/jours;

C_s = Concentration des MES de l'effluent fixée, selon l'objectif d'épuration voulu, en mg/l;

C_e = Concentration des MES à l'entrée de la station (après un éventuel traitement primaire) en mg/l .

Pour ce qui concerne les éléments pathogènes, Reed remarque que les mécanismes d'élimination sont plutôt similaire à ceux qui se produisent dans les étangs de stabilisation est propose la formule suivante :

$$\left(\frac{C_e}{C_s} \right) = \frac{1}{(1 + t.K_T)^N} \quad (4.9)$$

Où

C_s : Concentration des coliformes fécaux de l'effluent fixée, selon l'objectif d'épuration voulu, en UFC/100ml ;

C_e : Concentration des coliformes fécaux à l'entrée de la station (après un éventuel traitement primaire) en UFC / 100ml.

N: nombre de cellules en série.

Pour le phosphore les auteurs proposent, par contre la relation suivante :

$$\left(\frac{C_e}{C_s} \right) = \exp\left(\frac{-K_p}{HLR} \right) \quad (4.10)$$

La formula è la seguente ed indica, tra l'altro, che le rese sono migliori con più bacini in serie :

Ou :

K_p: au quota constant de réaction du phosphore, environ 2,73 cm/jours.

4.5.3. Selon l'EPA (1993)

L'EPA suggéra aussi en 1993, pour l'écoulement horizontal, l'équation suivante :

$$\frac{C_e}{C_s} = \exp(-K_T.t) \quad (4.11)$$

Où,

t : temps de rétention hydraulique en jours ;

C_s : Concentration en DBO5 de l'effluent fixée, selon l'objectif d'épuration voulu, en mg/l;

C_e : Concentration en DBO5 à l'entrée de la station (après un éventuel traitement primaire) en mg/l.

K_T : Constante cinétique dépendant de la température et de la densité des plantes, en Jours⁻¹.

Le temps de rétention hydraulique est :

$$t = \frac{n.L.W.d.0,95}{Q} \quad (4.12)$$

Où :

n : porosité du lit ;

W : largeur du lit (m) ;

d : profondeur du lit (m) ;

L : longueur du lit (m) ;

Q : Débit moyen qui traverse le système (m³/j).

La combinaison des deux équations précédente donne :

$$A = L.W = \frac{Q.(\ln C_e - \ln C_s)}{n..K_T.d.0,95} \quad (4.13)$$

$$\text{Avec } K_t = K_{20} \theta^{(T-20)}$$

Le tableau (4. 3) présente les valeurs de K_T et θ, selon les auteurs correspondants .

Tableau 4. 3 : Valeurs de K₂₀ et θ selon les auteurs.

Auteurs	K ₂₀	θ
WPCF (1990)	0,806	1,06
EPA (1993)	1,104	1,06

En 1999 la même EPA suggère pour le dimensionnement des systèmes à écoulement horizontal HSSF, un coefficient de charge organique par unité de surface (ALR: areal loading rate ou taux de charge surfacique) de 6 gr DBO/m².jour, qui donne comme concentration de DBO5 à la sortie inférieure à 30 mg/l, indépendamment de la concentration à l'entrée.

La forme d'un bassin de type HSSF doit être de forme rectangulaire; pendant que la pente du fond du lit peut varier de 1 à 5%. L'aire transversale peut être calculée en utilisant la relation de Darcy, comme suit :

$$Q = A \times K \times \left[\frac{dH}{dL} \right] \quad (4.14)$$

Où :

A = H.l : l'aire transversale du filtre (H = hauteur d'eau dans le filtre et l = largeur), m²;

Q : débit moyen journalier du rejet, m³/j ;

K : conductivité hydraulique du matériau saturé, m/j ;

dH/dL : gradient hydraulique correspondant à la pente de la ligne d'eau à obtenir en fonctionnement, depuis la surface du filtre au niveau de l'entrée jusqu'à environ 10 cm de la hauteur totale au niveau de la sortie, en m/m.

La surface et la profondeur du filtré étant fixées, restent à déterminer la longueur et la largeur. Elles dépendent étroitement de la conductivité hydraulique du matériau selon la loi de Darcy.

Pour un filtre à gravier (K élevé), le rapport L/l sera élevé et les filtres seront longs et étroits. Tandis que pour un filtre à sable (K faible), les filtres seront larges et courts.

Selon l'EPA le rapport L/l doit varier en respectant l'intervalle 0,5 à 3.

La perméabilité est liée à la granulométrie du matériau utilisé et du colmatage progressif du massif, sachant que celui-ci est modéré par l'effet des rhizomes et des racines.

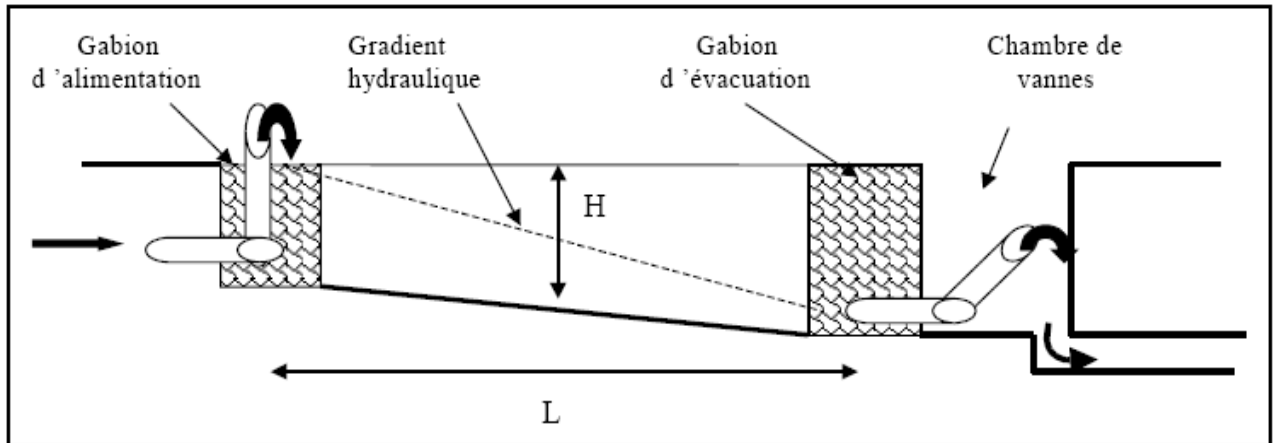


Figure 4. 3: Gradient hydraulique théorique d'un filtre horizontal (GMTEU, 2005).

4.5.4. Selon le Groupe Macrophyte de Traitement des Eaux Usées, 2005, le calcul de la géométrie du filtre se fait comme suit :

○ Sur la base de l'équation précédente on calcule la section transversale avec une première valeur de gradient hydraulique $\left(\frac{dH}{dL}\right)_1$, la connaissance de la profondeur h , généralement prise 0,6m, permet alors de déterminer une largeur l_1 , on déduit alors une longueur L_1 , à partir de la valeur de la surface horizontale A_s on peut alors déterminer la

hauteur de sortie de l'effluent
$$H_1 = \left(\frac{dH}{dL}\right)_1 \times L_1$$

○ On réitère alors ce calcul en faisant varier les valeurs de $\left(\frac{dH}{dL}\right)$ jusqu'à obtenir un niveau d'eau en sortie à environ 10cm de la surface massif.

4. 6. L'aménagement des bassins de la phytoépuration

4.6.1. Système d'alimentation

Les systèmes à écoulement sous-superficiel horizontal sont alimentés en continue, l'affluent à l'entrée peut être distribué de diverses façons, et les plus utilisées sont :

- un canal à surface libre, qui alimente le bassin en différents points ;
- des conduites perforées, avec des pièces en T permettant la distribution latérale de l'écoulement (Figure 4.4).



Figure 4.4 : Photo. d'une conduite perforée pour la distribution sous-superficielle.

Du gravier inerte de grande taille doit être disposé le long du bassin, sur une distance d'au moins 1m, afin de limiter au maximum le colmatage de la zone d'entrée.

Les diamètres utilisés dépendent essentiellement de la charge hydraulique prévue. Cependant, il est préconisé d'utiliser pour les petites installations, un diamètre minimale de 90 mm, afin d'éviter un éventuel colmatage (l'APAT, 2005).

4.6.2. Système d'évacuation

Les systèmes d'évacuation sont souvent conçus avec un tuyau de drainage disposé au fond, à l'aval du bassin, sur toute sa largeur, et relié ensuite à une conduite dans un regard, où est placé un dispositif permettant d'ajuster le niveau d'eau à l'intérieur du système, en fonction des exigences opérationnelles du système. Si le bassin a une largeur de plus de 25-30 mètres, il

est préférable d'utiliser deux systèmes à la sortie afin de réduire les zones de stagnation. (l'APAT, 2005).

4.6.3. Imperméabilisation

Afin d'éviter d'éventuelles contamination de la nappe souterraine, les bassins de phytoépuration doivent être imperméabilisés, en utilisant des géomembranes synthétiques (Les géosynthétiques) (Figure 4.5) ou de la bentonite, cependant, il déconseillé de couler un radier en ciment pour une question de coût de réalisation et de problèmes d'étanchéité.

L'utilisation d'un sol argileux est la possibilité la plus économique, qui nécessite cependant une très faible perméabilité et avec une profondeur de nappe à plus de 1m sous la base du lit du bassin (COOPER, 1993).

4.6.3.1. Les géosynthétiques

Les géosynthétiques sont des structures planes, composées de feuilles de grandes dimensions à bases de composants synthétiques (polymères le plus souvent).

Ils se distinguent en trois familles principales : les géotextiles, les géomembranes et les géogrilles. Ils sont utilisés en bâtiment, génie civil, agriculture et industries.

4.6.3.1.1. Les fonction de géosynthétiques

Leurs fonctions les plus répandues sont :

- l'étanchement (notamment de lieux de stockage (décharge) et de confinement de déchets spéciaux ou toxiques)
- la protection d'ouvrages de rétention,
- la séparation de couches de matériaux (géospaceur)
- le drainage,
- l'armature de remblais,
- le contrôle de l'érosion.

Un dispositif d'Etanchéité par Géosynthétiques (DEG) peut être combiné avec un dispositif de Drainage par Géosynthétiques (DDG) pour constituer un Dispositif d'Etanchéité et de Drainage par Géosynthétiques (DEDG).

4.6.3.1.2. Typologies

Différents types ou complexes géosynthétiques existent pour répondre à des contraintes thermiques, mécaniques, de résistance aux U.V., aux agressions chimiques ou biologiques et de durée, selon les caractéristiques des produits en contacts (lixiviats, fermentescibles, biogaz, etc.). Les matières utilisées souvent pour les géomembrane sont : le polyéthylène à basse et à haute densité, le PVC et le polypropylène.

L'épaisseur de la toile est de 0,5 à 2mm. La géomembrane imperméabilisante doit être déposée sur une couche de sable d'au moins 5 mm et recouverte d'un géotextile pour protéger la membrane du gravier et des racines des plantes.



Figure 4.5 : Photo d'une géomembrane en polyéthylène. [10]

4.6.4. Milieu filtrant

Le substrat a un rôle fondamental dans l'efficacité dépurative de la station car, en plus du fait qu'il soit un support pour la végétation, il représente un filtre mécanique et chimique pour quelques substances contenues dans le rejet. Pour cela, le choix du type de milieu filtrant est strictement lié aux caractéristiques du rejet à épurer.

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les principales recherches, relatives à la technique d'épuration par filtres plantés à macrophytes, dite la phytoépuration ou marais artificiels. En effet, en se basant sur une panoplie de recherches telles que celles de Brix (1997), Dupold (1995), Sherwood(1995), Poulet(2004) et bien d'autre, nous avons essayé de présenter l'essentiel de la phytoépuration.

En effet, les systèmes les plus connus sont : le système à écoulement superficiel (SF, Surface Flow), le système à écoulement sous superficiel (SSF, Sub-Surface Flow) et les systèmes hybrides. Pour ces trois catégories de systèmes de phytoépuration, il à été présenté la typologie et les mécanismes d'élimination des éléments polluants. Une description des plantes utilisées à été également effectuée.

Partie II

Dimensionnement et calcul

**Chapitre 5 : Calcul des besoins en eau et
d'irrigation des espaces verts**

**Chapitre 6 : Dimensionnement de la station de la
phytoépuration**

CHAPITRE 5

Calcul des besoins en eau et d'irrigation des espaces verts

I- Calcul de projet

II - Présentation de la wilaya de Biskra

III- Présentation de la région d'étude

**IV- Calcul des besoins en eau des espaces
verts du boulevard "8 mars "**

V- Calcul hydraulique de réseau

VI- Conclusion

5.1. Introduction

Les espaces verts ont toujours besoins d'une irrigation en permanence, et surtout au niveau des racines. Cependant la dose d'irrigation est évaluée en fonction du besoin de la plante qui est étroitement lié à son évapotranspiration. Celle dernière dépend de quelques paramètres, notamment l'humidité, la température, le sol, ...etc.

Dans ce chapitre il sera évalué les besoins en eau des cultures, ainsi que leur régime d'irrigation. Le calcul de ces besoins sera basé essentiellement sur le phénomène d'évapotranspiration et les phases de croissance des plantes.

5.2. Calcul du projet

Il est vrai que la mise en place d'un système d'irrigation ne s'improvise pas. En effet, quelques éléments sont à prendre en considération, depuis la conception du projet jusqu'au processus de gestion à long terme des installations.

Lors de la mise en place d'un système d'irrigation, l'ordre logique des démarches à suivre est le suivant :

- 1 - évaluation des besoins en eau des plantes cultivées ;
- 2 - détermination des doses et de la fréquence des arrosages ;
- 3 - choix, dimensionnement et budgétisation du système d'irrigation.

5.3. Présentation du cas d'étude

5.3.1. Situation géographique de la ville de Biskra

La ville de Biskra se situe au sud - est de l'Algérie, plus exactement au pied sud de la chaîne montagneuse de l'atlas saharien (figure 5.1), qui constitue la limite entre le nord et le sud de l'Algérie, elle occupe une superficie de 21.671 Km², son altitude est de 128 mètre par rapport au niveau de la mer. Elle est caractérisée par un climat saharien, agréable en hiver, et chaud et sec en été.

La wilaya de Biskra est limitée au Nord par la wilaya de Batna et M'Sila, au Sud par la wilaya de Ouargla et El-Oued, à l'Est par la wilaya de Khenchela et à l'Ouest par la wilaya de Djelfa. La ville de Biskra est divisée en 12 Daïra et 33 Communes. Elle est traversée par l'oued "Sidi Zarzour" qui descend des Aurès et qui va jusqu'à Chot Melrir au sud est de la wilaya.

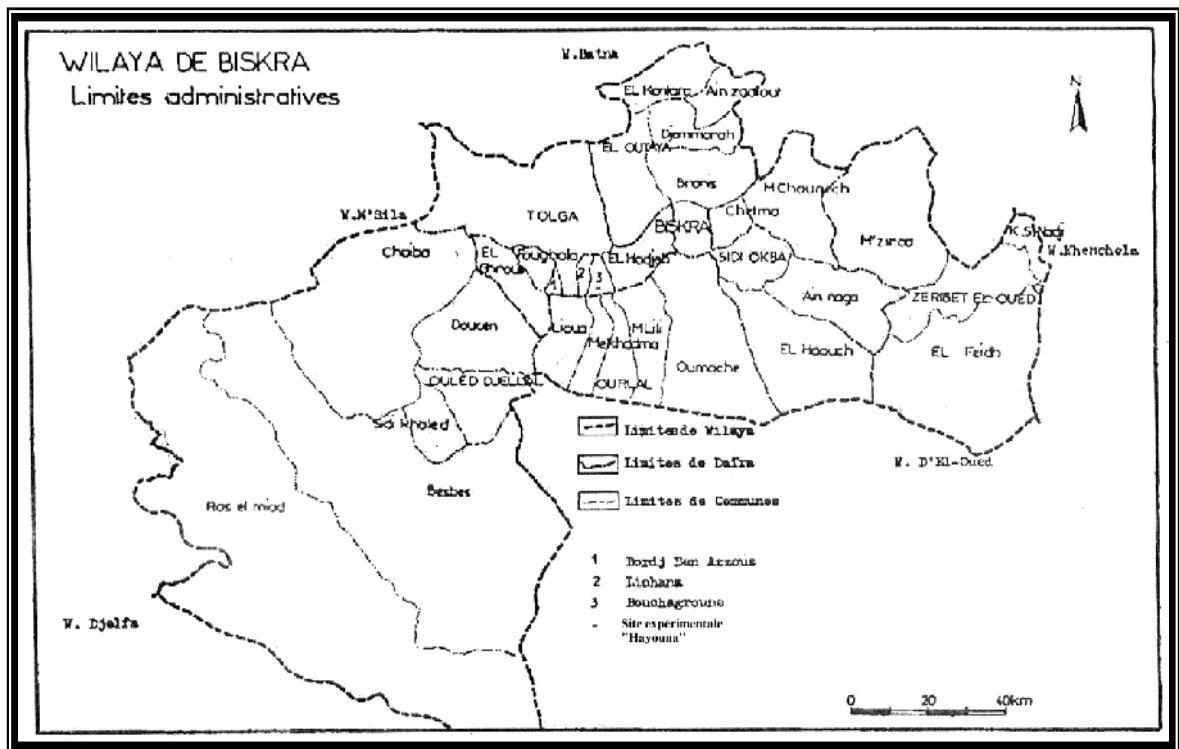


Figure 5.1 : Carte géographique de Biskra (A.N.A.T, 2002).

5.3.2. Caractéristiques climatiques

5.3.2.1. La température

Du fait de la pureté de leur atmosphère et souvent aussi de leur position continentale, les déserts présentent de forts maximums de température et de grands écarts thermiques. La température est un facteur favorable lorsqu'il y a suffisamment d'eau. Les suintements ou les oueds représentent un milieu biologique très riche. Mais en milieu sec la température devient un facteur aggravant car, elle augmente la vitesse de l'évapotranspiration. (OZENDA, 1991).

La température représente un facteur limitant de toute première importance car elle contrôle l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne de ce fait la répartition de la totalité des espèces et des communautés d'êtres vivants dans la biosphère (RAMADE, 2003).

Tableau 5.1 : Températures moyennes mensuelles (mm) dans la région de Biskra durant la période (1984-2009).

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
T (C°)	1984-2009	11.6	13.6	17	20.7	26.1	31.2	34.3	33.9	28.9	23.1	16.5	17	22.82

Durant la période (1984-2009); les températures moyennes mensuelles les plus basses sont enregistrées durant le mois de janvier (11,6°C). Les températures moyennes mensuelles maximales sont enregistrées durant les mois de juillet et d'août avec respectivement 34,3 °C et 33,9 °C (Tableau5.1).

5.3.2.2. L'évaporation

L'évaporation est liée en principe à la température, et puisque la ville de Biskra est située en une région chaude, la quantité d'eau évaporée est plus au moins grande. La figure (5.2) est accomplie selon les statistiques de la période 1990-2000. La courbe nous révèle que l'évaporation augmente pendant la saison d'été.

Tableau 5.2 : Les valeurs moyennes de l'évaporation pour la période : 1990-2000.

mois		jan	fév	mars	avr	mai	jui	juill	aout	sept	oct	nov	déc
Evapo (mm)	Moy (1990-2000)	119.09	156	205.9	293.1	354.64	413.2	450.9	412.2	329.18	246.45	163.6	123

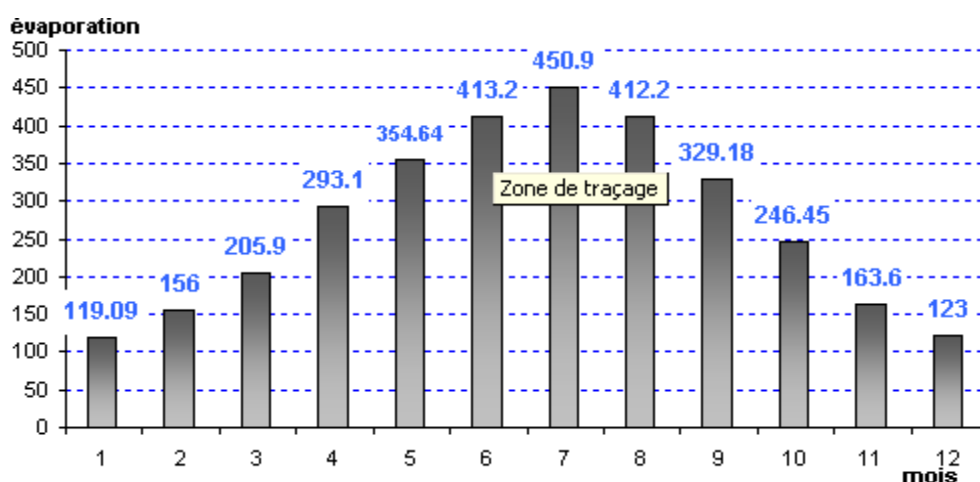


Figure 5. 2: Représentation graphique de l'évaporation moyenne mensuelle pour la période (1990-2000).

5.3.2.3. La pluviométrie

Elle constitue un facteur écologique d'importance fondamentale, non seulement pour le fonctionnement et la répartition des écosystèmes terrestres, mais aussi pour certains écosystèmes limniques tels les mares et les lacs temporaires, et les lagunes saumâtres soumises à des périodes d'assèchement. (RAMADE, 2003).

Tableau 5.3 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Biskra durant la période (1984 – 2009).

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Cumul
P	1984-2009	19.4	9.1	14.7	12.7	11.3	4.1	0.7	3.9	13.9	10.8	17.5	11.4	129.5
	2009	48.9	11.4	16	12	15.7	0	4	0	47.7	0	0.3	13.8	169.8

Durant la période (1984-2009) la période pluvieuse s'étale du mois de septembre jusqu'au mois de mai, alors que durant l'année d'étude une irrégularité des pluies est remarquée avec un pic au mois de janvier avec 48,9mm ; et des moyennes de 0mm et 0,3mm respectivement durant les mois octobre et novembre (tableau 5.3).

5.3.2.4. L'humidité relative

L'humidité relative varie entre 26% au mois de juillet et 59% au mois de décembre, alors que durant l'année d'étude (2009) les moyennes varient entre 25% au mois de juillet et 67% au mois de janvier (tableau 5.4).

Tableau 5.4 : Humidité relative moyenne mensuelle dans la région de Biskra durant la période 1984-2009 et en 2009.

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
HR (%)	1984-2009	57	48	42	37	33	29	26	29	39	46	53	59	41.5
	2009	67	52	49	44	32	26	25	26	52	46	47	62	44

5.3.2.5. Les vents

Il constitue en certains biotopes un facteur écologique limitant. Sous l'influence de vents violents, la végétation est limitée dans son développement (RAMADE, 2003).

Il intervient des fois par sa violence, par les particules qu'il transporte et qui peuvent déchirer les parties aériennes des plantes, et par les remaniements qu'il provoque dans le sol. Cependant son action peut être quelque fois favorable, par exemple lorsqu'il provoque un important dépôt de sable sur des sols salés qui étaient stériles, ou bien lorsqu'il contribue à la dispersion des végétaux et de leurs semences (OZENDA, 1991).

Tableau 5. 5 : Vitesse moyenne mensuelle de jours du vent dans la région de Biskra durant la période (1984-2009).

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
Vitesse du vent en m/s	1984-2009	4.3	4.6	4.9	6	5.6	4.5	4	4	4.2	4	4.3	4.2	4.55

La vitesse du vent est d'une moyenne annuelle de 4,55 m/s ; la moyenne minimale est enregistrée durant les mois de juillet et août avec 4 m/s ; alors que la moyenne maximale est enregistrée durant le mois d'avril.

5.3.2.6. L'enseillement

L'enseillement est la période durant laquelle le soleil brille sur le sol.

Tableau 5.6 : L'enseillement moyen mensuel.

Mois		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
	1984-2009	223	236	270	288	320	335	361	331	271	255	224	216	277.5
	2009	175	243	293	294	360	362	363	331	256	310	260	222	289.08

5.3.2.7. Diagramme Ombrothermique

Le diagramme Ombrothermique de GAUSSEN est une méthode graphique où sont portés en abscisses les mois, et en ordonnées les précipitations (P) et les températures (T) avec P=2T.

L'intersection des deux courbes P et T permet de définir la saison sèche.

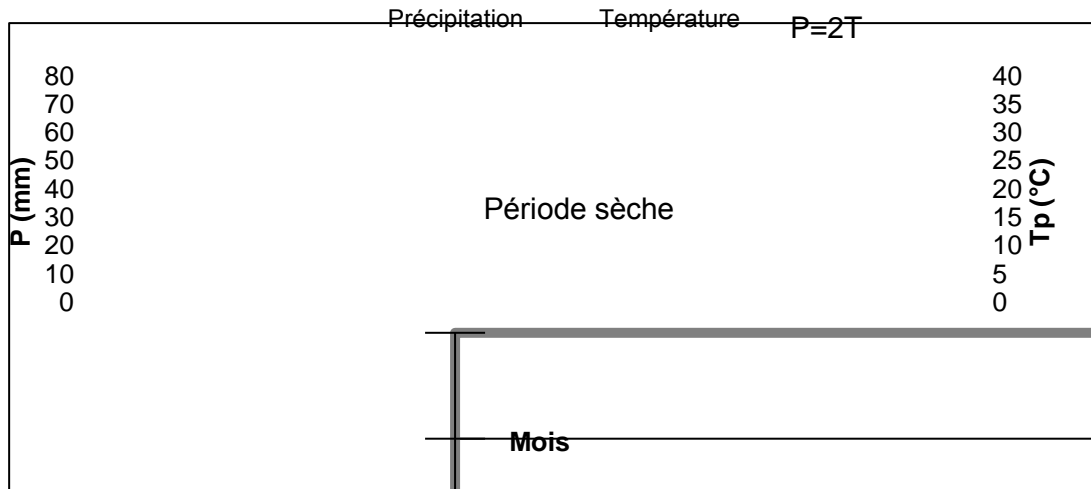


Figure 5.3 : Diagramme Ombrothermique de Gaussen de la région de Biskra (1984-2009).

5.3.2.8. Climagramme d'Emberger

Afin de déterminer l'étage bioclimatique de la région de Biskra, nous avons calculés le quotient pluviométrique d'Emberger (Q) avec des données climatiques calculées durant la période 1984 – 2009.

Selon la formule établie par Stewart (1969), le quotient pluviométrique de la région méditerranéenne est exprimé par la formule suivante :

$$Q = 3,43 \frac{P}{M - m} \quad (5.1)$$

Q : quotient pluviométrique ;

P : pluviométrie annuelle (mm) ;

M : moyenne maximale du mois le plus chaud (°C) ;

m : moyenne minimale du mois le plus froid (°C).

D'après les données climatiques de Biskra, pour la période qui s'étale de 1984 à 2009 nous avons :

$$\mathbf{P = 129,5 \text{ mm}}$$

$$\mathbf{M = 34,3 \text{ °C}}$$

$$\mathbf{m = 11,6 \text{ °C}}$$

$$Q = 3,43 \frac{129,5}{34,3} = 19,56$$

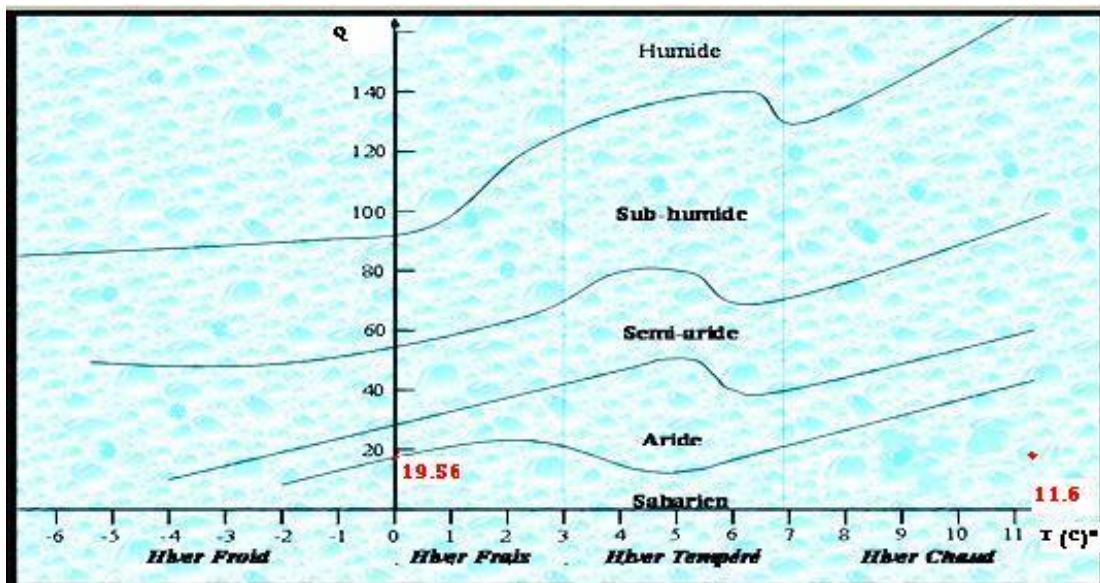


Figure 5.4 : Climagramme d'Emberger (Biskra 1995-2009).

L'observation du climagramme d'Emberger nous permet de situer la région de Biskra dans l'étage bioclimatique saharien à hiver chaud.

5.3.3. La végétation

La végétation est le résultat des interactions de trois facteurs ; climat, sol et action anthropique. L'existence des nappes favorise le développement des palmeraies dattiers dans de nombreuses Oasis comme ; Tolga, Borge Benazzouze, Ourlel et Oumech.

5.4. Présentation de la région d'étude

5.4.1. Situation géographique du boulevard « 8 mars »

Pour notre cas d'étude, on a choisi un boulevard de la ville de Biskra « boulevard du 8 mars » pour l'étude de la possibilité de réutilisation des eaux usées épurées par filtres plantés dans l'irrigation des espaces verts de ce boulevard. Celui-ci est limité par une agence touristique au Nord, l'hôtel des Ziban au Sud, Hai essalem à l'Est et le jardin London et Hai el Badr à l'Ouest.

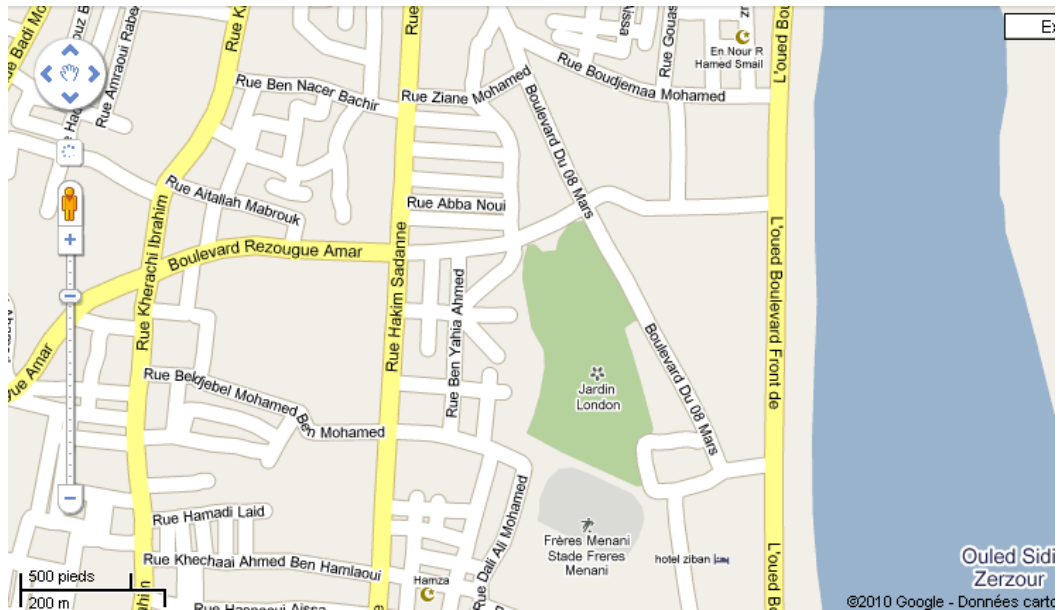


Figure 5.5 : Les délimitations du boulevard « 8 mars » de Biskra.

5.4.2. Situation topographique du boulevard « 8 mars »

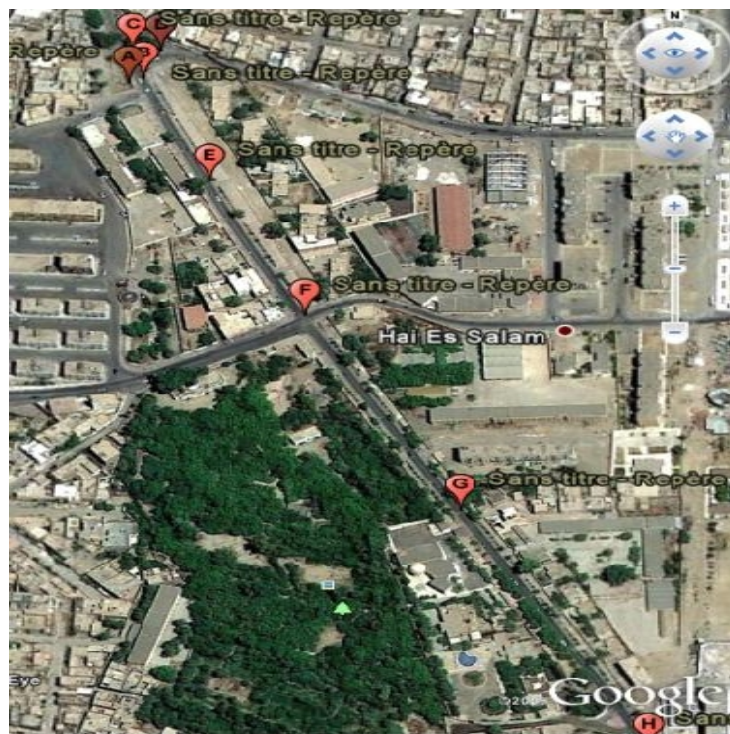


Figure 5.6 : Points topographique du boulevard 8mars.

Nous avons identifié les altitudes pour certains points du boulevard « 8 mars », avec les distances séparant ces points (tableaux 5.7 et 5.8). L'objectif est de déterminer la topographie et par conséquent la pente du boulevard.

Tableau 5.7 : Altitudes de certains points du boulevard « 8mars ».

Point	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Altitude	372	371	372	370	370	364	363	357	344

Tableau 5.8 : La pente du terrain du boulevard « 8mars ».

Points	AB	BC	CD	DE	EF	FG	GH	AI
Longueur	9	23	15.6	89	119.5	176	220	60,6
la pente %	11.11	-4.35	12.8	1.12	5.021	0.568	2.727	4.62

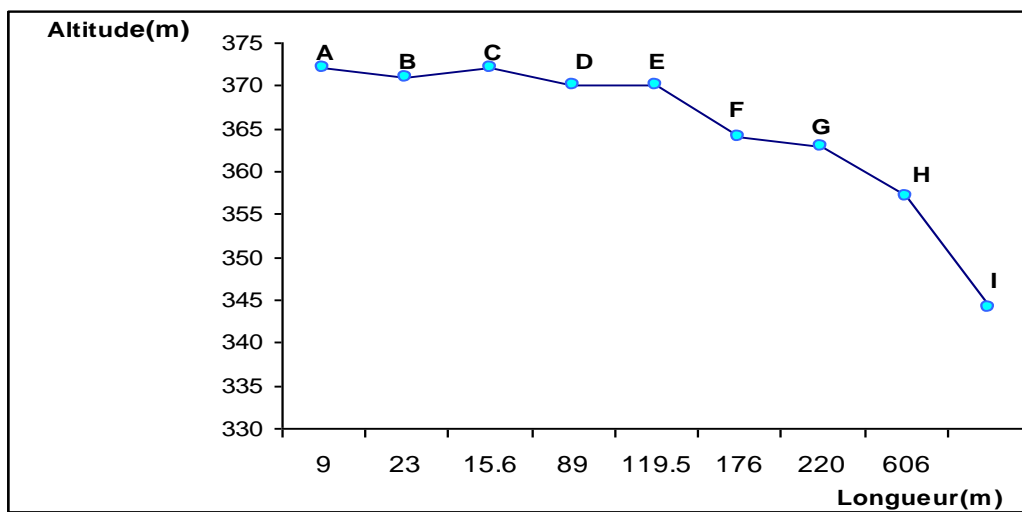


Figure 5.7 : Représentation graphique de la pente du terrain du boulevard « 8mars ».

5.4.3. Estimation de la surface des espaces verts étudiés

L'estimation de la surface a été faite d'une manière manuelle. La forme des espaces verts trouvés dans le boulevard « 8 mars » est de forme rectangulaire en majorité, à l'exception d'un square de forme triangulaire. L'espace vert de forme rectangulaire a une longueur de 468,5m et une largeur de 1,5m. La surface totale calculée est donc :

$$\text{Surface rectangulaire} = 468,5 \cdot 1,5 = 702,75 \text{ m}^2.$$

$$\text{Surface triangulaire} = 147 \text{ m}^2.$$

Soit une surface totale de = **850m²**.

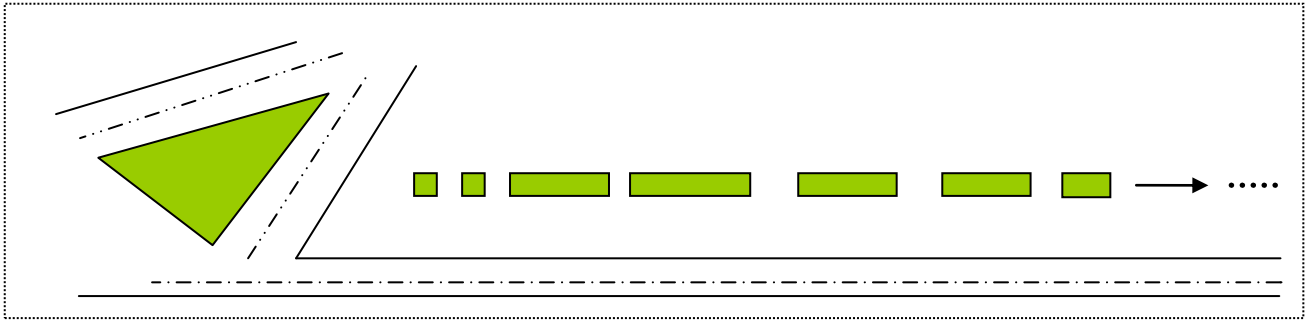


Figure 5.8 : Schéma simplifié des espaces verts du boulevard « 8mars ».

5.5. Calcul des besoins en eau des espaces verts du boulevard « 8 mars »

Par définition, le besoin en eau d'une culture est équivalent à l'ETM, calculé de la façon suivante :

$$\text{ETM (mm)} = \text{ETP} \cdot K_c \quad (5.2)$$

On a constaté que les espaces verts du site objet de notre étude présente différents types de plantes (voir chapitre 2). En effet, les besoins des plantes en eau d'irrigation sont étroitement liés au dimensionnement du réseau d'irrigation. Pour cela, notre étude s'appuiera principalement sur les besoins du Palmier Dattier, car il a exigé une dose d'arrosage assez élevée en comparaison avec les autres plantes.

Dans notre étude en faisant les calculs des besoins en eaux des plantes du boulevard "8 mars" à partir des caractéristiques (KC) du palmier dattier qui ne cesse d'accueillir des quantités Considérables de la matière hydrique plus que des autres plantes trouvées dans le boulevard "8mars ".



Figure 5.9 : Photo des espaces verts du boulevard « 8mar ».

5.5.1. Le KC du palmier

Dubost (1994) a déterminé le coefficient KC de quelques plantes du désert Algérien, il a cependant recommandé pour les palmiers le coefficient de 0,7 de novembre à février; de 0,9 à 1 à partir du mois de mars jusqu'au mois d'aout et un KC = 0,8 de septembre à novembre.

5.5.2. Calcul de l'ETP

Au cours d'une étude effectuée en 1983, sous forme de bulletin d'agronomie saharienne qui, éditée par l'institut national de la recherche agronomique d'Algérie sur les régions sahariennes de l'Algérie, Dubost mesura les caractéristiques climatiques de la région de Biskra (température; Tension maximale de la vapeur d'eau dans l'air ; évaporation ;...etc., voir l'annexe), et à partir desquelles il calcula la valeur de l'ETP dans la région de Biskra selon la relation de PENMAN.

La superficie des espaces verts du boulevard "8 mars ", lieu de notre étude, étant $A=850m^2$, nous évoluons le besoin total en eau comme suit :

- $ETM = ETP \cdot Kc \text{ (mm)}$ (Rappel : $1mm = L/m^2/mois = 10m^3/hac$)
- $ETM \text{ (l/s)} = ETM \text{ (l/m}^2\text{/ heure)} \times A \text{ (m}^2\text{)} / 3600 \text{ (s)}$

Le calcul des besoins en eau pour le palmier est indiqué dans le tableau 5.9 :

Tableau 5.9: Calcul des besoins en eau du palmier pour chaque selon PENMAN

Mois de l'année	Kc	ETP (mm)	Besoin (l/m ² /mois)	ETM (l/heure)	ETM (l/S)
Octobre	0,8	159,03	127.2	145,35	0,0403
Novembre	0,7	77,40	54.18	63,96	0,0177
Décembre	0,7	57,04	39.93	45,62	0,0127
Janvier	0,7	66,96	46.87	53,55	0,015
Février	0,7	84,56	59.19	72,28	0,023
Mars	0,9	130,20	117.18	133,87	0,0372
Avril	0,9	178,80	160.92	189,97	0,0527
Mai	0,9	226,92	204.23	233,32	0,0648
Juin	0,9	231,90	208.71	246,39	0,0684
Juillet	0,9	238,70	214.83	245,44	0,0682
Août	0,9	229,71	206.74	236,19	0,0656
Septembre	0,8	207,3	165.84	195,78	0,0543

5.6. Irrigation

Pour faire un programme d'arrosage économique, on divise l'année en deux périodes : l'une estivale (du mois d'avril jusqu'au mois de septembre) et l'autre hivernale (du mois d'octobre jusqu'au mois de mars). et on effectue une fréquence d'irrigation hebdomadaire. En effet, l'irrigation se fait durant 24 heures, une fois chaque sept (07) jour, tout en respectant le besoin mensuel des plantes.

Le dimensionnement des ouvrages hydrauliques de l'installation est établi en considérant le besoin maximal de la période estivale, à savoir **0,0684 l/s**.

5.7. Calcul du volume du bassin d'accumulation

Le volume du bassin est égal à : $V = Q.T$, tels que Q est le débit volume d'eau à distribuer et T la durée de l'irrigation.

Soient : $Q = 0,0684$ l/s et $T = 24$ heures

Pour une période d'accumulation de 07 jours le volume d'eau maximal nécessaire à l'irrigation de l'espace vert est : $VB = 0,0684 \times 7 \times 24 \times 3600 \times 10^{-3} = 41,37 \text{ m}^3$. On prendra 45 m^3 .

5.8. Calcul du débit d'irrigation

Le débit d'eau nécessaire à l'irrigation de l'espace vert du "boulevard du 8 mars" en une journée (24h) sera calculé comme suit :

$$Q_{\text{irr}} = 41,37/24 = 1,724 \text{ m}^3/\text{h} \text{ soit } 0,475 \text{ l/s}$$

Avec Q_{irr} = débit d'irrigation

5.9. Volume du bassin d'accumulation

L'eau épurée arriverait au bassin d'accumulation durant sept (07) jours en continu avec un débit constant de **0,2463 m³/h**. Ce débit d'eau est refoulé à partir du bassin à filtres plantés à macrophytes. L'opération d'irrigation commencerait alors au début du septième jour, durant lequel une pompe immergée refoulerait un débit d'eau de **1,724 m³/h**. Pour cela, le volume d'eau nécessaire est donc **41,37 m³**.

Le tableau 5.10 montre l'arrivée et la sortie d'eau du bassin d'accumulation.

Tableau 5.10: Arrivée et sortie d'eau du bassin d'accumulation.

Jours	Volume d'eau arrivé (m ³)		Volume d'eau distribué (m ³)	Volume d'eau accumulé dans le bassin $\Delta = V \text{ cumul} - V \text{ distribution}$
		Cumul		
1 ^{er} jour	5.91	5.91	0	5.91
2 ^{eme} jour	5.91	11.82	0	11.82
3 ^{eme} jour	5.91	17.73	0	17.73
4 ^{eme} jour	5.91	23.64	0	23.64
5 ^{eme} jour	5.91	29.55	0	29.55
6 ^{eme} jour	5.91	35.46	0	35.46
7 ^{eme} jour	5.91	0	41.37	-41.37

5.10. CALCUL HYDRAULIQUE DU RESEAU

5.10.1. Calcul du réseau de distribution

Il s'agit donc d'un réseau d'irrigation ramifié.

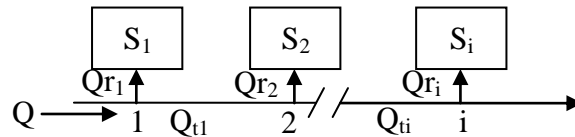


Figure 5.10 : Schéma simplifié d'un réseau ramifié.

$$Q = Q_t + Q_r$$

Q_t : débit de transitite ;

Q_r : débit de route (soutiré).

- Le débit spécifique étant $Q_{sp} = \frac{Q}{S_t}$

Le débit de route se détermine comme suit :

$$- Q_{r1} = \frac{Q}{S_t} S_1 ; Q_{r2} = \frac{Q}{S_t} S_2 ; \dots \dots \dots Q_{ri} = \frac{Q}{S_t} S_i$$

Avec :

St : surface total (m²)

Si : surface partielle irriguée de la rampe "i" (m²).

Qt : le débit transite en m³/s

5.10.2. Les formule de calcul

5.10.2.1. La formule de ACHOUR

$$D = 1.35 \bar{D} \left[-\log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}}{4.75} + \frac{8.5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5} \quad (5.3)$$

$$\bar{D} = (2\pi^2)^{-1/5} \left(\frac{Q^2}{gJ} \right)^{1/5} \quad (5.4)$$

$$\bar{R} = \frac{4Q}{\pi \bar{D} v} \quad (5.5)$$

$$J = \frac{8f}{g\pi^2} \frac{Q^2}{D^5} \quad (5.6)$$

$$f = \left[-2 \log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}}{3.7\psi} + \frac{10.04}{\bar{R}\psi^{3/2}} \right) \right]^{-2} \quad (5.7)$$

$$\psi \cong 1.35 \left[-\log \left(\frac{\varepsilon / \bar{D}}{4.75} + \frac{8.5}{\bar{R}} \right) \right]^{-2/5} \quad (5.8)$$

Avec:

Q: Débit volume de l'écoulement (m³/s) ;

D: Diamètre d'une conduite circulaire (m) ;

Đ: Diamètre du modèle rugueux de forme circulaire (m) ;

Ř: Nombre de Reynolds de l'écoulement dans le modèle rugueux ;

Ψ : Facteur de correction de la dimension linéaire ;

ε : Rugosité absolue d'une paroi (m) ;

ν : Viscosité cinématique (m^2/s) ;

J : Gradient de la perte de charge linéaire;

F : coefficient de frottement.

5.10.2.2. La formule de BRESSE

$$D=1.5 \sqrt[3]{Q} \quad (5.9)$$

Avec :

Q : Débit de l'écoulement en m^3/s ;

D : Diamètre de la conduite en m.

5.10.2.3. L'équation de continuité

La vitesse d'écoulement pour les tronçons du réseau est calculée par l'équation de continuité :

$$Q = V.S \quad \text{donc ;} \quad V = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (\text{m/s}) \quad (5.10)$$

Avec :

Q : débit en m^3/s ;

V : vitesse en m/s ;

S : section en m^2 ; section circulaire $S = \frac{\pi d^2}{4}$

5.10.3. Résultats obtenus

Il a été considéré des tuyaux en 'PVC' de rugosité équivalente 10^{-4} mm, avec une viscosité cinématique de l'eau de 10^{-6} m^2/s à 20°C .

Le nombre de Reynolds étant compris entre 4000 et 18300 dans le quasi totalité des points, le régime d'écoulement est donc turbulent et on peut utiliser alors l'équation de Achour.

Le tableau 5.11 présente le calcul du réseau d'irrigation du boulevard du 8 mars.

Tableau 5.11 : Calcul du réseau d'irrigation du boulevard « 8 mars ».

Tronçons	Longueur (m)	Surfaces des parcelles (m ²)	Q _r (l/s)	Selon BRESSE		
				Q _t (l/s)	D(m)	V (m ² /s)
B 1	30	147.00	0.082147	0.475	0.033	0.566
1 2	21	-	-	0.393	0.030	0.566
2 3	15	18.03	0.01007	0.383	0.029	0.566
3 4	15	18.03	0.01007	0.373	0.029	0.566
4 5	15	18.03	0.01007	0.363	0.029	0.566
5 6	15	18.03	0.01007	0.353	0.028	0.566
6 7	15	18.03	0.01007	0.342	0.028	0.566
7 8	15	18.03	0.01007	0.332	0.027	0.566
8 9	15	18.03	0.01007	0.322	0.027	0.566
9 10	15	18.03	0.01007	0.312	0.027	0.566
10 11	15	18.03	0.01007	0.302	0.026	0.566
11 12	15	18.03	0.01007	0.292	0.026	0.566
12 13	15	18.03	0.01007	0.282	0.025	0.566
13 14	15	18.03	0.01007	0.272	0.025	0.566
14 15	15	18.03	0.01007	0.262	0.024	0.566
15 16	15	18.03	0.01007	0.252	0.024	0.566
16 17	15	18.03	0.01007	0.242	0.023	0.566
17 18	15	18.03	0.01007	0.232	0.023	0.566
18 19	15	18.03	0.01007	0.222	0.022	0.566
19 20	15	18.03	0.01007	0.212	0.022	0.566
20 21	15	18.03	0.01007	0.201	0.021	0.566
21 22	15	18.03	0.01007	0.191	0.021	0.566
22 23	15	18.03	0.01007	0.181	0.020	0.566
23 24	15	18.03	0.01007	0.171	0.020	0.566
24 25	15	18.03	0.01007	0.161	0.019	0.566
25 26	15	18.03	0.01007	0.151	0.018	0.566
26 27	15	18.03	0.01007	0.141	0.018	0.566
27 28	15	18.03	0.01007	0.131	0.017	0.566
28 29	15	18.03	0.01007	0.121	0.016	0.566
29 30	15	18.03	0.01007	0.111	0.016	0.566
30 31	15	18.03	0.01007	0.101	0.015	0.566
31 32	15	18.03	0.01007	0.091	0.014	0.566
32 33	15	18.03	0.01007	0.081	0.013	0.566
33 34	15	18.03	0.01007	0.071	0.013	0.566
34 35	15	18.03	0.01007	0.060	0.012	0.566
35 36	15	18.03	0.01007	0.050	0.011	0.566
36 37	15	18.03	0.01007	0.040	0.010	0.566
37 38	15	18.03	0.01007	0.030	0.008	0.566
38 39	15	18.03	0.01007	0.020	0.007	0.566
39 40	15	18.03	0.01007	0.010	0.005	0.566

Tableau 5.11 (suite) : Calcul du réseau d'irrigation du boulevard « 8 mars »

Tronçons	La pente	Selon ACHOUR						D normalisé (mm)
		D(m)	f	J	ΔH Linéaire	ΔH total	V (m/s)	
B 1	0.0146	0.0332	0.0319	0.01459	0.4378	0.503	0.549	35
1 2	0.0146	0.031	0.0327	0.01459	0.3065	0.352	0.521	32
2 3	0.0146	0.0307	0.0327	0.01459	0.2189	0.251	0.517	32
3 4	0.0146	0.0304	0.033	0.01459	0.2189	0.251	0.514	32
4 5	0.0146	0.0301	0.0331	0.01459	0.2189	0.251	0.510	32
5 6	0.0146	0.0297	0.0332	0.01459	0.2189	0.251	0.509	32
6 7	0.0146	0.0294	0.0334	0.01459	0.2189	0.251	0.505	32
7 8	0.0146	0.0291	0.0335	0.01459	0.2189	0.251	0.500	32
8 9	0.046	0.0229	0.0339	0.04598	0.6897	0.793	0.783	32
9 10	0.046	0.0226	0.0341	0.04598	0.6898	0.793	0.779	32
10 11	0.046	0.0223	0.0342	0.04598	0.6898	0.793	0.774	32
11 12	0.046	0.0221	0.0344	0.04598	0.6897	0.793	0.762	22
12 13	0.046	0.0218	0.0344	0.04598	0.6897	0.793	0.756	25
13 14	0.046	0.0215	0.0348	0.04598	0.6897	0.793	0.750	25
14 15	0.046	0.0212	0.035	0.04598	0.6897	0.793	0.742	25
15 16	0.046	0.0209	0.0352	0.04598	0.6897	0.793	0.734	25
16 17	0.046	0.0206	0.0354	0.04598	0.6897	0.793	0.726	25
17 18	0.046	0.0202	0.0356	0.04598	0.6898	0.793	0.723	25
18 19	0.046	0.0199	0.0358	0.04598	0.6898	0.793	0.713	22
19 20	0.046	0.0196	0.0361	0.04598	0.6897	0.793	0.701	22
20 21	0.046	0.0192	0.0363	0.04598	0.6897	0.793	0.696	22
21 22	0.046	0.0188	0.0366	0.04598	0.6898	0.793	0.690	22
22 23	0.046	0.0185	0.0369	0.04597	0.6897	0.793	0.675	20
23 24	0.046	0.0181	0.0372	0.04597	0.6897	0.793	0.666	20
24 25	0.046	0.0177	0.0376	0.04597	0.6897	0.793	0.655	20
25 26	0.046	0.0173	0.0379	0.04597	0.6897	0.793	0.643	20
26 27	0.046	0.0168	0.0383	0.04598	0.6898	0.793	0.637	20
27 28	0.046	0.0164	0.0388	0.04597	0.6897	0.793	0.620	20
28 29	0.046	0.0159	0.0392	0.04598	0.6897	0.793	0.609	16
29 30	0.046	0.0154	0.0398	0.04598	0.6897	0.793	0.595	16
30 31	0.046	0.0149	0.0404	0.04597	0.6896	0.793	0.578	16
31 32	0.046	0.0143	0.041	0.04598	0.6897	0.793	0.565	16
32 33	0.046	0.0137	0.042	0.04597	0.6897	0.793	0.547	16
33 34	0.046	0.0131	0.042	0.04597	0.6896	0.793	0.523	16
34 35	0.046	0.0123	0.043	0.04597	0.6896	0.793	0.509	16
35 36	0.046	0.0115	0.045	0.04597	0.6896	0.793	0.485	12
36 37	0.046	0.0106	0.047	0.04596	0.6895	0.793	0.457	12
37 38	0.046	0.0095	0.049	0.04596	0.6895	0.792	0.427	12
38 39	0.046	0.0082	0.053	0.04596	0.6895	0.792	0.382	8
39 40	0.046	0.0064	0.06	0.04593	0.6891	0.792	0.313	6

La surface des espaces verts a été divisée en parcelles égales, chaque parcelle a une superficie 18m^2 environ, on a disposé donc un nœud pour chaque 15m de longueur, à l'exception du premier nœud 'N 1', qui correspond à une superficie de 147m^2 .

Les formules de Achour (2008) et de BRESSE, donnent presque les mêmes résultats vis-à-vis des diamètres des conduites. Les vitesses sont dans l'intervalle $0,3 < V \text{ (m/s)} < 0,8$; ce qui est très admissible. En outre, l'évaluation de la perte de charge totale nous a permis d'obtenir une pression au sol suffisante dans l'intervalle $30 < P \text{ (m)} < 60$,

5.10.4. Choix de la pompe

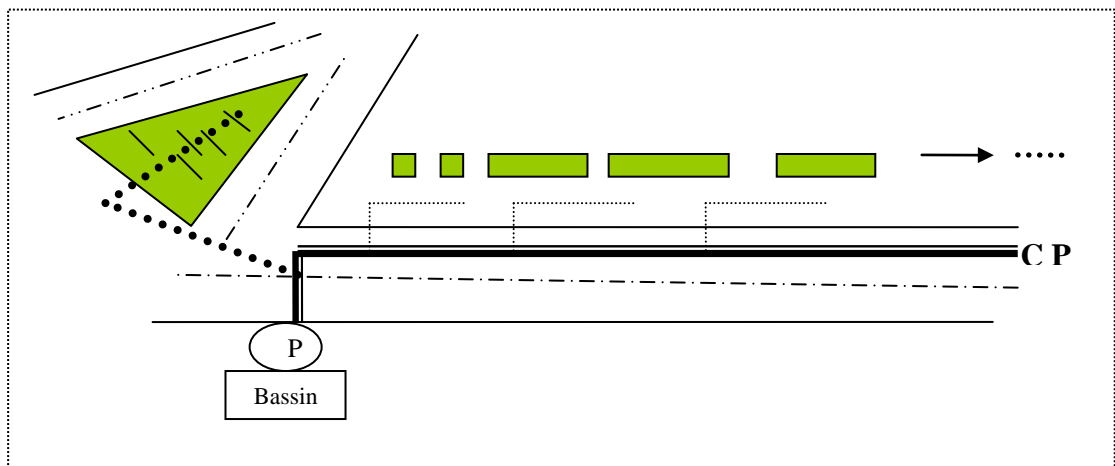


Figure 5.11 : Schéma de l'installation de la pompe.

La pompe est nécessaire pour le refoulement des eaux vers le réseau d'irrigation. Le choix d'une pompe se fera en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation envisagée à savoir le débit et la hauteur manométrique totale HMT.

5.10.4.1. Calcul de l'HMT

Elle est déterminée comme suit :

$$H_{mt} = \sum \Delta H + 10 + 0,5 \quad (5.11)$$

Avec :

$\sum \Delta H$: La somme de la perte de charge (mce) ;

10 : la pression au dernier point de réseau (mce).

0,5 : perte de charge au niveau de la pompe

On obtient donc :

$$HMT = 27.75 + 10 + 0,5 = 38.25 \text{ m c e}$$

La pompe choisie doit satisfaire aux caractéristiques suivantes :

$$Q = 0.475 \text{ l/s}, \quad HMT = 38.25 \text{ m c e}$$

La pression en tête de l'installation est 38.25 mce et dans le dernier point de réseau égale à 66.25 mce

5.11. Conclusion

Ce chapitre a été consacré au calcul des besoins en eau et d'irrigation des espaces verts. Il a été cité en premier lieu une présentation de la wilaya de Biskra (situation géographique, situation topographique, caractéristique climatique, ...etc) et en particulier le boulevard "8 mars" lieu de la présente étude. Il a été établi en second lieu le calcul des besoins en eau, issu du produit de l'évapotranspiration potentiel des plantes et du coefficient culturel (K_c). Cependant, le calcul des besoins en eau a été effectué en considérant le coefficient K_c du palmier dattier, qui est relativement le plus élevé. En outre, pour des raisons économiques il a été fait un programme d'arrosage en deux périodes : l'une estivale (du mois d'avril jusqu'au mois de septembre) et l'autre hivernale (du mois d'octobre jusqu'au mois de mars). Aussi, une fréquence d'irrigation hebdomadaire a été adoptée. L'irrigation se fait donc durant 24 heures, une fois chaque sept (07) jours, tout en respectant le besoin mensuel des plantes. A la fin de ce chapitre il a été établi un dimensionnement du réseau d'irrigation de l'espace vert proposé.

CHAPITRE 6

Dimensionnement de la station de la phytoépuration

I - Réseau d'assainissement du boulevard "

8mars"

**II -Caractéristiques physico-chimiques des eaux
usées du regard choisi**

III- Les normes des eaux usées rejetées

IV- Dimensionnement

6.1. Introduction

Le choix du traitement des eaux usées par filtres plantés à macrophytes relève de considérations diverses. En effet, ce mode d'assainissement présente, en ce qui concerne les installations de petites et moyennes tailles, des avantages tant au niveau de l'efficacité épuratoire que d'un point de vue financier. Il s'inscrit parmi les systèmes les moins onéreux tant à la construction qu'à l'usage. Dans notre étude cette technique est efficace à plus d'un titre, car elle permet d'une part la contribution à l'épuration d'une partie des eaux usées urbaines et d'autre part à l'irrigation des espaces verts en permanence.

Dans ce chapitre il sera effectué le dimensionnement de la station de phytoépuration, à installer au boulevard du "8 mars".

6.2. Réseau d'assainissement du boulevard " 8mars "

Le réseau d'assainissement du boulevard " 8mars ", est un ancien réseau, qui date de la période coloniale. C'est un réseau de type unitaire, c'est-à-dire que les eaux domestiques et les eaux pluviales sont évacuées dans un seul réseau.

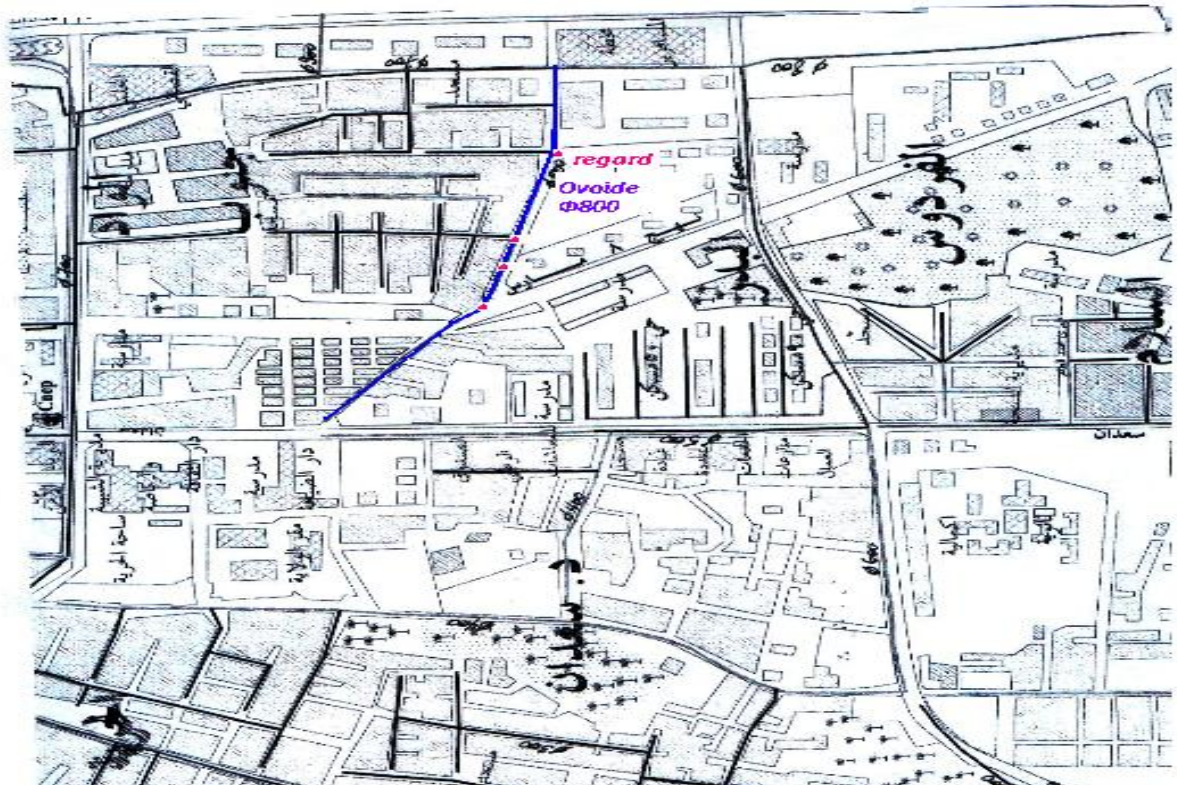


Figure 6. 1 : Plan de réseau d'assainissement du boulevard "8mars" (ONA, Biskra, 2010).

6.3. La prise des eaux usées (le regard choisi)

L'origine de l'eau usée utilisée est un regard situé au nord du boulevard "8mars" à une trentaine de mètres du lieu de la station proposée.

Comme le précise le plan du réseau d'assainissement du boulevard "8mars" (figure 6.1), le regard choisi se trouve dans un collecteur de diamètre 800 mm. Celui-ci est de forme ovoïdale, d'environ deux mètres de hauteur.

Cette ovoïde s'étend de l'avenue Al-AMIR ABED ALKADER jusqu'à la gare de voyages de " SIDI OKBA ", et rejette dans l'oued "Sidi Zarzour".

Afin d'assurer une charge d'eau suffisante pour permettre l'amorçage d'une pompe immergée, Il a été proposé de placé à coté du regard de picage choisi, un deuxième regard plus profond que le premier. En effet, par principe de vases communicante, l'eau va s'écouler par graviter du premier regard vers le second. L'eau sera ensuite refoulée par le biais d'une pompe vers l'installation de phytoépuration.

6.4. Le lieu d'installation



Figure 6. 2 : Photo du lieu proposé pour l'installation de phytoépuration.

Le site de la station de la phytoépuration proposée a une superficie de 600 m² environ. Il est situé à environ 35m du regard de picage des eaux usées.

6.5. Caractéristiques physico-chimiques des eaux usées du regard choisi

Des prélèvements d'échantillons d'eau usée ont été faits au niveau du regard de picage choisi. Les analyses des paramètres physico-chimiques ont été effectuées au laboratoire de la station de traitement des eaux de l'usine de textile TIFIB de Biskra. Les échantillons prélevés ont été analysés le jour même.

Le tableau 6.1 ; montre les résultats des analyses physico-chimiques des eaux usées du regard du boulevard "8mars".

Tableau 6.1: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux usées.

Paramètres	Unité	Résultats
Température de l'eau	°C	15
Ph	-	7.9 à 18C°
Conductivité	µS/cm	2350
Couleur	Unité couleur	496
Turbidité	F.T.U	121
O ₂ dissous	mg/l	3.8
DCO	mg/l	60
DBO5	mg/l	25
MES	mg/l	112
M.ORG	%	1.05
Azote ammoniacal	mg/l	10
Nitrate (NO ₃ ⁻)	mg/l	3.62
Nitrite (NO ₂ ⁻)	mg/l	-
Sulfate	mg/l	211
Ortho-phosphate	mg/l	21.3
Fer	mg/l	1.5
Chrome III	mg/l	-
Cuivre	mg/l	-
Nickel	mg/l	-
Zinc	mg/l	-
Silice	mg/l	41.6

6.5.1. LE RAPPORT DCO/DBO5

Ce rapport évalue la biodégradabilité d'une eau usée, c'est à dire la faculté de transformation de la matière organique en matière minérale, admissible par le milieu naturel.

- Pour un effluent à dominante domestique, ce rapport est généralement compris entre 2 et 3 (la matière organique est biodégradable).
- Pour les effluents d'industries agroalimentaires, il est inférieur, de l'ordre de 1,5 à 2, ce qui traduit une meilleure biodégradabilité.
- Enfin, lorsqu'il est supérieur à 3 cela traduit l'apport d'un effluent industriel plus ou moins difficilement biodégradable.

Dans notre cas, le rapport DCO/DBO₅ égale à 2.4, donc la matière organique est biodégradable.

Lorsqu'on compare les résultats des analyses des eaux usées avec les normes des eaux usées présenté dans le tableau (6.2), on observe que la qualité de l'eau usées de notre regard choisi est classée médiocre.

6.6. Les normes des eaux usées rejetées selon l'OMS

Tableau 6.2: Normes des eaux usées rejetées selon l'OMS (1971).

Paramètres	Bonne ou très bonne qualité	Qualité acceptable	Qualité médiocre	Mauvaise ou très mauvaise
O ₂ dissous mg/l	>5	≥3	≥1	<1
O ₂ dissous %	≥70	≥50	≥10	<10
DBO ₅ mg / l	≤5	≤10	25	>25
DCO mg / l	≤25	≤40	80	>80
NO ₃ mg / l	≤25	≤50	80	>80
NH ₄ ⁺ mg / l	≤0.5	≤2	8	>8
NO ₂ ⁻ mg / l	≤0.3	≤1	>1	-
NTK mg / l	≤2	≤3	10	>10
PO ₃₋₄ mg / l	≤0.5	≤1	2	>2
MES mg / l	≤70	-	>70	-
Phosphore total mg / l	≤0.3	≤0.6	1	>1
Conductivité	≤2	-	2000	-
Ph	≥6.5 et ≤ 8.5	-	<6.5 ou >8.5	-

6.7. Le prétraitement

Pour les eaux brutes, le prétraitement consiste en: dégrillage, dessablage déshuilage et une décantation. Le système de décantation peut être, un simple bassin de décantation, un décanteur / digesteur ou encore, une fosse septique toutes eaux. En cas d'un bassin de décantation ouvert, celui-ci doit être dimensionné pour assurer un temps de passage le plus court possible afin d'éviter la fermentation génératrice de mauvaises odeurs.

L'absence de traitement en amont induit un risque de colmatage du système de répartition par les matières en suspension. Cela entraîne des écoulements superficiels et la chaîne de traitement est alors court-circuitée, ce qui affecte ses performances et induit des problèmes d'insectes et d'odeurs.

6.7.1. Fosse septique toutes eaux

Une fosse septique toutes eaux est un ouvrage destiné à la collecte, à la liquéfaction partielle des matières polluantes contenues dans les eaux usées et à la rétention des matières solides et des déchets flottants. Elle reçoit l'ensemble des eaux usées domestiques. La fosse toutes eaux doit débarrasser les effluents brutes de leurs matières solides afin de protéger le filtre contre un risque de colmatage. Elle doit également liquéfier ces matières retenues par décantation et flottation .

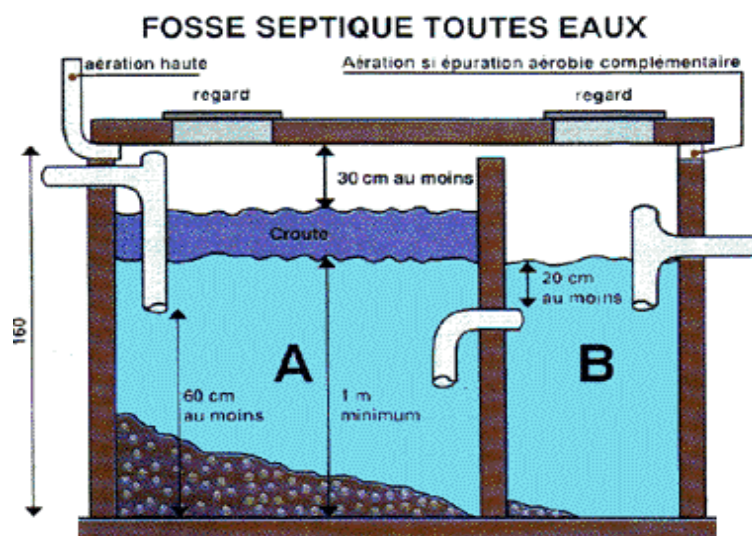


Figure 6.3: Une fosse septique toutes eaux. [11]

6.7.2. Rôle et fonctionnement d'une fosse septique toutes eaux

La fosse septique toutes eaux est composée de deux ou trois compartiments, munis de déflecteurs (plongeurs ou raccord en T). Ces derniers sont là pour empêcher le passage direct des eaux brutes dans l'élément épurateur (drainage). Les matières solides se déposent au fond et les matières légères flottent à la surface sous forme d'écume.

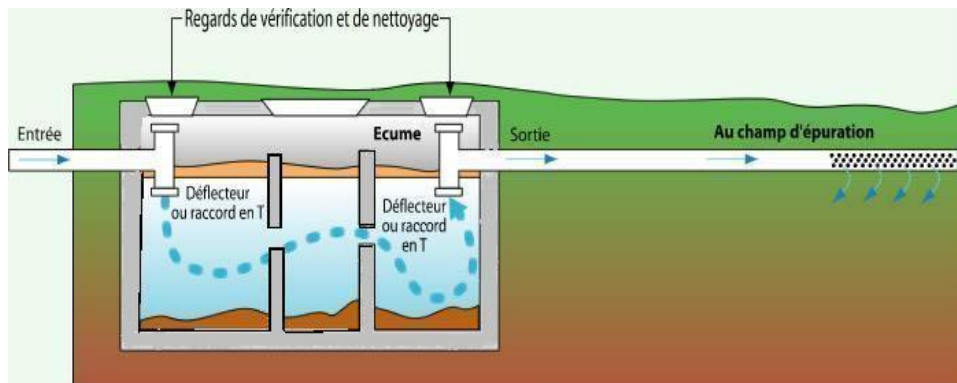


Figure 6. 4: Fonctionnement d'une fosse septique toutes eaux. [12]

6.7.3. Volume utile de la fosse septique toutes eaux

Pour le système des filtres épurateurs plantés à macrophytes, le prétraitement nécessite une fosse toutes eaux dans le but de décanter les matériaux grossiers avec un temps de rétention de 01 jour.

6.7.4. Dimensionnement de la fosse septique toutes eaux

Le temps de séjour étant $t_s = 01$ jour pour un débit d'arrivée de $0,0684$ l/s, soit $5,91$ m³/j.

$$V(m^3) = Q \times t_s = 5,91 \times 1 = 5,91 m^3$$

$$\text{Soit : } V = 5,91 m^3$$

Avec :

V : Volume utile de la fosse (en m³)

t_s : Le temps de séjour (en jour)

Q : débit moyen en (m³/j)

On propose une profondeur $H = 2,0$ m, on aura donc une surface de $2,95$ m², avec une longueur $L = 2,97$ m et une largeur $l = 1$ m

Tous les bassins de l'installation, à savoir, la fosse septique toutes eaux, le bassin d'accumulation et le bassin à filtres plantés, dispose de trop-pleins pour l'évacuation d'éventuels surplus d'eaux vers le réseau d'assainissement.

6.7.5. Filtres de finition

Une boîte (ou regard) à filtres de finition est disposée à l'aval immédiat de la fosse tous eaux, afin de piéger toutes les particules fines qui peuvent être contenues dans les eaux issues de la fosse septique. Ce dispositif est généralement trouvé uniquement dans le cas d'un système à flux horizontal.



Figure 6.5: Photos représentant le filtre de finition, composé d'un porte filtre et une éponge, avant et après utilisation.

6.8. Dimensionnement

Le dimensionnement de notre station de phytoépuration sera donc basé sur le besoin maximal des plantes, calculé pour la période estivale c'est à dire $Q=0,0684$ l/s.

6.8.1. Bassin Filtrant

6.8.1.1. Type de filtre planté (horizontale ou vertical)

Le choix du filtre planté à écoulement horizontal ou vertical se fait en fonction de la quantité de DBO_5 ou Azote ammoniacal dans les eaux usées. Les analyses des eaux usées (tableau 6.1) montrent que aussi bien la DBO_5 que l'azote ammoniacal sont à la limite de la qualité médiocre. Cependant 12% de la quantité de NH_4^+ peut être éliminée au

stade du prétraitement. Pour cette raison, nous optons pour le filtre planté à écoulement horizontale.

Le bassin de filtre planté à écoulement horizontal sera enterré, pour permettre une facilité dans la manutention, un gain en énergie et une intégration dans le paysage.

Selon Cooper *et al* (1996), le dimensionnement des filtres horizontaux est basé sur la détermination de la surface.

$$A_t = \frac{Q[\ln(C_{DBO5e}) - \ln(C_{DBO5s})]}{h \times n \times K_T} \quad (6.1)$$

$$t_r = \frac{A \times h \times n}{Q_{\max}} \quad (6.2)$$

A_t : surface du filtre (m²);

Q : Débit moyen journalier arrivant à la station (m³/j);

C_{DBO5e} : concentration moyenne journalière en DBO₅ à l'entrée (mg/l);

C_{DBO5s} : concentration moyenne journalière en DBO₅ souhaitée à la sortie (mg/l).

$K_T = K_R \times \theta_R^{T_w - T_R}$ Constante de premier ordre qui dépend de la température j⁻¹

θ_R : coefficiente de temperature ;

K_R : constante cinétique à la température de référence en jour⁻¹;

T_w : température de la zone humide, en °C;

T_R : temperature de référence, en °C, considérée par les auteurs égale à 20°C;

n : porosité du gravier

h : profondeur du filtre ;

t_r : temps de rétention .

Les valeurs de θ_R et de K_R sont représentées dans le tableau ci-dessous:

Tableau 6.3: Valeurs des paramètres K_{20} et θ , (APAT, 2005).

GUIDE	K20	θ
WPCF (1990)	0,806	1,06
EPA (1993)	1,104	1,06

NB / nous nous sommes basés dans notre étude sur les guides de l'EPA, et de l'APAT, pour cela, on prendra dans notre cas les valeurs $K_{20} = 1,104$ et $\theta = 1,06$.

6.8.1.2. Données numériques du boulevard "8 mars"

Lors de l'estimation de la surface du bassin filtrant, on suppose une valeur de DBO₅ à l'entrée égale à 60 mg/l et ceci, en prévision d'éventuelle augmentation de la charge polluante dans le futur.

- La concentration moyenne journalière en DBO₅ à l'entrée (mg/l) $DBO_{5e} = 60 \text{ mg/l}$
- La concentration moyenne journalière en DBO₅ souhaitée à la sortie (mg/l) $DBO_{5s} = 25 \text{ mg/l}$ (norme algérienne)
- La porosité du gravier $n = 0,35$
- La profondeur du filtre $h = 0,6 \text{ m}$
- Le débit moyen journalier $Q = 0,0684 \text{ l/s} = 5,91 \text{ m}^3/\text{j}$
- Les paramètres: $K_{20} = 1,104$ et $\theta = 1,06$.
- La constante $k_T = 0,82 \text{ j}^{-1}$
- La température de l'eau mesurée au niveau du rejet est de 15°C, enregistrée au mois de Février.

Selon la formule (6.1), la surface du bassin à filtres plantés est : $A_t = 29,86 \text{ m}^2$ soit $A = 30 \text{ m}^2$

6.8.1.3. Longueur et largeur du filtre

La surface et la profondeur du filtre étant fixée, reste à déterminer la longueur (L) et la largeur (l).

On a, selon la bibliographie, la condition sur le rapport des largeurs suivante : $0 \leq L/l \leq 3$.

La surface du filtre étant égale à : $A_t = L \times l = 30 \text{ m}^2$, et la profondeur : $h = 0,6 \text{ m}$

On prendra : une longueur $L = 6 \text{ m}$ et une largeur $l = 5 \text{ m}$.

La pente du filtre horizontal, est prise égale à 0,05%.

6.8.2. Temps de rétention

Selon la formule (6.2) le temps de séjour ou rétention des eaux usées dans le bassin filtrant est : $t_r \cong 1 \text{ jour}$.

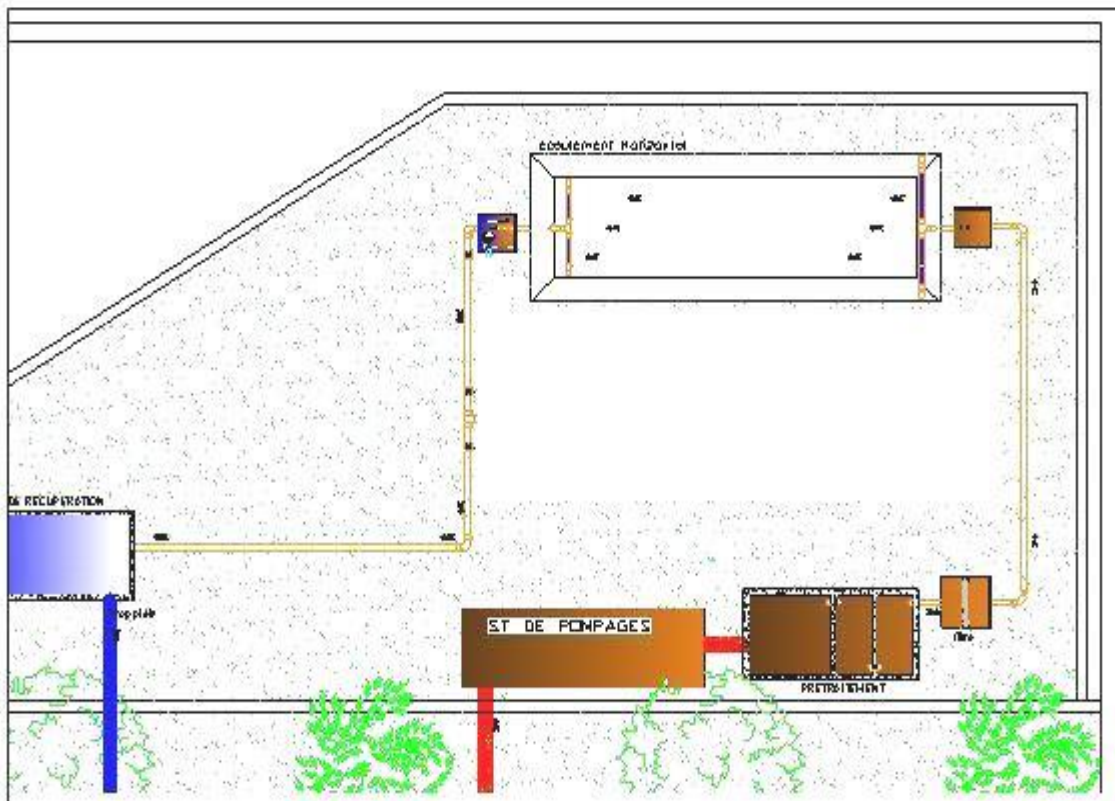


Figure 6.6: Schémas représentatif de la station "phytoépuration" du boulevard (8 mars).

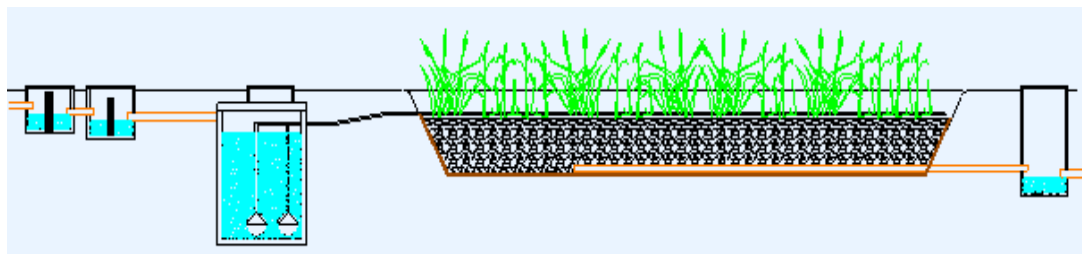


Figure 6.7: Coupe transversale du filtre horizontal

6.8.3. Le substrat

La perméabilité est liée à la granulométrie du matériau utilisé et du colmatage progressif du massif, sachant que celui-ci est modéré par l'effet des rhizomes et des racines.

Tableau 6.4: La porosité et la conductivité hydraulique du substrat (APAT, 2005).

type	dimension des grains (mm)	porosité (%)	conductivité hydraulique (KS) m/j
Sable	1-2	30-32	420-480
Gravier	8-16	35-38	500-800
Pierre	32-128	40-45	1200-1500

La couche active est du gravier de 8 à 16 mm sur 60 cm de profondeur, avec une perméabilité $K_s = 500$ m/j et une porosité $n = (35-38)$ %.

On utilise, pour un bassin filtrant, du gravier roulé lavé (inerte) de 8 à 16 mm de diamètre et pour éviter le colmatage de conduites perforées on étale, sur une longueur de 1 m, au début et à la fin du bassin des pierres de 32 à 128 mm de diamètre.

6.8.4. Le choix de la végétation

Pour les filtres à flux horizontal on choisit les plantes Phragmite Communis ou Phragmites Australis. Ces plantes possèdent un tissu particulier, permettant de transférer l'oxygène depuis les parties hautes vers les rhizomes et les racines, en favorisant le développement de la plante dans les milieux saturés en eau en permanence.

Ces plantes résistent bien à l'alternance de période d'immersion et de périodes "à-sec" et s'adaptent très facilement à des altitudes et à des climats divers. La densité des plantes dans un filtre est de 4 à 6 par mètre carré d'après l'EPA (1993).

6.9. Choix de la pompe

Pour la détermination d'une électropompe, il est impératif de connaître :

- Le débit (Q) en l/s;
- La HMT (hauteur manométrique totale) en m.c.e.
- Détermination de la hauteur manométrique totale (HMT); Se calcule en faisant la somme de :

$$HMT = HGA + HGR + Ja + Jr + P \quad (6.3)$$

Avec :

HGA : (Hauteur Géométrique d'Aspiration), C'est la différence de niveau entre les plus basses eaux et l'axe de la pompe. Elle s'exprime en mètres ;

HGR : (hauteur géométrique de refoulement), C'est la différence de niveau entre l'axe de la pompe et le point le plus élevé de la distribution. Elle s'exprime en mètres ;

Ja : Pertes de charge dans la tuyauterie d'aspiration ;

Jr : Pertes de charge dans la tuyauterie de refoulement ;

P: Pression utile, qui est la hauteur de relevage + 10% de la longueur du tuyau (exprimée en mètres).

On tiendra compte de la conversion :

$$1 \text{ bar} = 10 \text{ mètres de colonne d'eau}$$

- **Valeurs numériques:**

$$Q = 0.0684 \text{ l/s}$$

$$J_a = 22.36.10^{-4} \text{ m}$$

$$J_r = 0.039 \text{ m}$$

$$HGA = 1.5 \text{ m}$$

$$HGR = 1.2 \text{ m}$$

$$HMT = 22.36.10^{-4} + 0.039 + 1.5 + 1.2 + 4.7(\text{m.c.e})$$

$$HMT = 7.44 \text{ mce}$$

La pompe choisie doit être une pompe d'eau usée, submersible, satisfaisant les caractéristiques suivantes : $Q = 0.0684 \text{ l/s}$, $HMT = 7.44 \text{ m}$

6.10. L'entretien de l'installation

Un système d'assainissement par filtres plantes nécessite un entretien régulier mais léger et accessible à tous ce qui lui garantit pérennité et efficacité.

L'entretien annuel du système se fait par démultiplication des plantes. Il faut donc garder les plantes bien réparties dans l'espace pour qu'elles occupent le volume pendant leur développement. Une fois par an en automne, il faut couper les roseaux. Cette opération appelée faucardage, permet d'apporter de l'oxygène aux bassins.

6.11. Conclusion

Afin de réutiliser les eaux usées épurées par filtres plantés pour l'irrigation des espaces verts du boulevard « 8mars » dans la ville de Biskra, il a été procédé au dimensionnement d'une station de phytoépuration. Ce chapitre a eu pour objectif de calculer les dimensions du circuit « eau usée – prétraitement – épuration – accumulation – distribution). Il a été choisi une fosse septique toutes eaux, comme procédé de prétraitement. Quant à l'installation de phytoépuration proposée, celle-ci est de forme rectangulaire à écoulement horizontal sous superficiel (HSSF).

CONCLUSION GENERALE

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire de magister à l'étude de la réutilisation des eaux usées épurées par filtre plantés pour l'irrigation des espaces verts. La technique proposée a été appliquée à un espace vert d'un quartier de la wilaya de Biskra, à savoir le boulevard " 8mars ". Pour cet objectif, l'étude a été divisée en deux parties.

La première partie a concerné une synthèse bibliographique des principaux travaux entrepris dans ce domaine. Quatre chapitres ont été nécessaires.

A travers le premier chapitre, nous avons présenté en premier lieu, les origines et caractéristiques des eaux usées, où il a été montré qu'ils proviennent d'une origine domestique, industrielle et/ou pluviale. Nous avons exposé ensuite, les différentes méthodes utilisées pour leur épuration, où nous avons valorisé la technique d'épuration par filtres plantés à macrophyte.

Le deuxième chapitre s'est intéressé à la présentation des principales plantes utilisées pour les espaces verts et en particulier celles autochtones. Aussi, nous avons présenté les méthodes directes et indirectes utilisées, pour le calcul des besoins en eau des plantes.

Le troisième chapitre a eu pour but de présenter les systèmes d'irrigation les plus utilisés, et en particulier le système d'irrigation en "goutte à goutte ".

Le quatrième chapitre, a été consacré aux principaux travaux, relatifs à la phytoépuration ou Marais artificiels. Il ressort que les systèmes les plus connus sont : le système à écoulement superficiel (SF : Surface Flow), le système à écoulement sous-superficiel (SSF : Sub-Surface Flow) et les systèmes hybrides. Pour ces trois catégories de systèmes de phytoépuration il a été présenté la typologie et les mécanismes d'élimination des éléments polluants. Une description des plantes macrophytes utilisées a été également effectuée.

La deuxième partie "dimensionnement et calculs" a eu pour but de présenter la démarche suivie et les calculs pour le dimensionnement de l'installation d'épuration et de réutilisation des eaux usées proposée.

En effet à travers le cinquième chapitre, et après la présentation de la wilaya de Biskra (situation géographique, situation topographique, caractéristique climatique, ...etc) et en particulier le boulevard "8 mars" lieu de la présente étude, il a été établi le calcul des besoins en eau ; qui est issu du produit de l'évapotranspiration potentiel des plantes et du coefficient culturel (Kc). Cependant, le calcul des besoins en eau a été effectué en considérant le coefficient Kc du palmier dattier, qui est relativement le plus élevé. En outre, pour des

raisons économiques il a été fait un programme d'arrosage en deux périodes : l'une estivale (du mois d'avril jusqu'au mois de septembre) et l'autre hivernale (du mois d'octobre jusqu'au mois de mars). Aussi, une fréquence d'irrigation hebdomadaire a été adoptée. L'irrigation se fait donc durant 24 heures, une fois chaque sept (07) jours, tout en respectant le besoin mensuel des plantes.

Le sixième et dernier chapitre a été consacré au calcul et dimensionnement de la station de phytoépuration. Le dimensionnement a été essentiellement basé sur le débit maximal en eau d'irrigation et la concentration en DBO5.

Nous espérons que cette étude aura un impact sur les perspectives de la valorisation de la possibilité de la réutilisation des ressources en eaux non conventionnelles telles que les eaux usées, épurées par filtres plantés, pour l'irrigation en continu des espaces verts.

PRINCIPALES NOTATIONS

At	Surface du bassin filtrant	[m ²]
ALR	areal loading rate ou taux de charge surfacique	[-]
Cs	Concentration de la pollution de l'effluent fixée	[mg /l]
Ce	Concentration de la pollution à l'entrée de la station	[mg /l]
C*	Concentration du fond du polluant	[mg /l]
DBO5	La demande biochimique en oxygène	[mg /l]
DCO	La demande chimique en oxygène	[mg /l]
dH/dL	gradient hydraulique correspondant à la pente de la ligne d'eau	[-]
ETM	l'évapotranspiration maximale d'une culture	[mm]
ETP	L'évapotranspiration potentielle	[mm]
FAO	Food and Agriculture Organization	[-]
HLR	Coefficient de charge hydraulique	[cm/jours]
HMT	hauteur manométrique totale	[m.c.e]
ΔH	Perte de charge	[m.c.e]
J	Perte de charge	[m]
Kc	le coefficient cultural	[-]
K	Constante de premier ordre	[m/an]
K _{NH}	Constante cinétique de nitrification	[-]
K _T	Constante cinétique à la température Tw	[Jours ⁻¹]
L	longueurs du lit	[m]
M.E.S	Matières en suspension	[mg /l]
MVS	Matières volatiles en suspension	[mg /l]
M.M	Matières minérales	[mg /l]
N	azote	[mg /l]
n	porosités du milieu	[%]
NC	Nombre de capillaires par rampe	[u]
NTU	Unité de Turbidité Néphélométrique	[-]
OMS	L'Organisation Mondiale de la Santé	[-]
PE	polyéthylène	[-]
PEBD	Les <i>tubes</i> en polyéthylène <i>basse densité</i>	[-]
PEHD	Les <i>tubes</i> en polyéthylène <i>haute densité</i>	[-]
P	La pression	[m]
pH	Le potentiel hydrogène	[-]
p	Le phosphor	[mg /l]
Q	Débit hydraulique moyen journalier	[m ³ /jours]
Q _r	débit de route	[m ³ /s]
SSF	Sub-Surface Flow	[-]
SF	Surface flow	[-]
tr	Temps de rétention hydraulique	[J]
ts	Le temps de séjour en jour	[jour]
Tw	Température de référence dans la zone humide	[°C]
TR	Température de référence	[°C]
TVA	The Tennessee Valley Authority	[-]
w	largeur du lit	[m]
y, h, d	profondeur au milieu de la zone humide	[m]

LISTE DES TABLEAUX

Partie I: Synthèse bibliographique

Chapitre 3 : Systèmes d'irrigation des espaces verts

Tableau 3.1	Les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation selon (Lenntech Purification et traitement de l'eau Holding B.V (1998-2009).....	51
-------------	--	----

Chapitre 4 : La phytoépuration

Tableau 4.1	Paramètres de références proposées par Kadlec & Knight (1996) pour le filtre à écoulement horizontal.....	72
Tableau 4.2	Paramètres de références proposées par Reed, Crites et Middlebrooks (1995) pour le filtre à écoulement horizontal.....	73
Tableau 4.3	Valeurs de K ₂₀ et θ selon les auteurs.....	75

Partie II: Dimensionnement et Calcul

Chapitre 5 : Calcul des besoins en eaux et d'irrigation des espaces verts

Tableau 5.1	Températures moyennes mensuelles (mm) dans la région de Biskra durant la période (1984-2009) et en 2009.....	84
Tableau 5.2	Les valeurs moyennes de l'évaporation pour la période ;(1990- 2000).....	84
Tableau 5.3	Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Biskra durant la période (1984 – 2009)	85
Tableau 5.4	Humidité relative moyenne mensuelle (%) dans la région de Biskra durant la période 1984-2009 et en 2009.....	85
Tableau 5.5	Vitesse moyenne mensuelle de jours du vent dans la région de Biskra durant la période (1984-2009).....	86
Tableau 5.6	L'insolation moyennes mensuelles.....	86
Tableau 5.7	Altitudes de certains points de boulevard "8 mars "	90
Tableau 5.8	La pente de boulevard "8mars ".....	90
Tableau 5.9	Calcul des besoins en eau du palmier pour chaque mois selon PANMAN.....	92
Tableau 5.10	Arrivée et sortie d'eau du bassin d'accumulation	94
Tableau 5.11	Tableau 5.11 : Calcul du réseau d'irrigation du boulevard « 8 mars ».....	97

Chapitre 6: Dimensionnement de la station de la phytoépuration

Tableau 6.1	Résultats des analyses des eaux usées du regard dans le boulevard "8mars".....	104
Tableau 6.2	Représente les normes des eaux usées rejetées selon l'OMS	105
Tableau 6.3	Valeurs des paramètres K ₂₀ et θ , selon références.....	109
Tableau 6.4	La porosité et la conductivité hydraulique du substrat (APAT, 2005).....	111

LISTE DES FIGURES

Partie I : Synthèse bibliographique

Chapitre 1: La pollution hydrique et les techniques d'épuration des eaux usées

Figure 1.1	Les coliformes fécaux.....	9
Figure 1.2	Vue au microscope électronique des entérocoques.....	10
Figure 1.3	Un traitement global des boues résiduaires.....	15
Figure 1.4	Répartition par secteur et localisation des expériences mondiales les plus importantes en réutilisation des eaux résiduaires urbaines.....	19

Chapitre 2 : Les espaces verts et leur besoins en eaux

Figure 2.1	Evaporation et évapotranspiration potentielle et réelle.....	29
Figure 2.2	Principe d'un lysimètre (ou case lysimétrique.....	30
Figure 2.3	Le bac évaporant.....	31
Figure 2.4	L'évaporomètre piche.....	31
Figure 2.5	Courbe de coefficients culturaux et définition des phases (Doorenbos et Pruitt, 1975)	35

Chapitre 3 : Systèmes d'irrigation des espaces verts

Figure 3.1	Schéma –type d'un réseau de micro-irrigation.....	41
Figure 3.2	Les deux types de vannes permettant l'automatisation de l'arrosage localisé...	48
Figure 3.3	Programmation séquentielle de l'arrosage.....	49

Chapitre 4 : La phytoepuration

Figure 4.1	Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement vertical	64
Figure 4.2	Coupe transversale schématique d'un filtre à écoulement horizontal	65
Figure 4.3	Gradient hydraulique théorique d'un filtre horizontal (GMTEU, 2005)	77
Figure 4.4	Photo. D'une conduite perforé pour la distribution sous -superficielle.....	78
Figure 4.5	Photo. D'une géomembrane en polyéthylène.....	80

Partie II : Dimensionnement et Calcul

Chapitre 5 : Calcul des besoins en eaux et d'irrigation des espaces verts

Figure 5.1	Carte géographique de Biskra (A.N.A.T, 2002)	83
Figure 5.2	Représentation graphique de l'évaporation moyenne mensuelle pour la période : 1990-200.....	84
Figure 5.3	Diagramme Ombrothermique de Gausson de la région de Biskra (1984-2009).....	87
Figure 5.4	Climagramme d'EMBERGER (Biskra 1995-2009).....	88
Figure 5.5	Les délimitations du boulevard « 8 mars »Biskra.....	89
Figure 5.6	Points topographique du boulevard 8mars.....	89
Figure 5.7	Représentation graphique de la pente du terrain du boulevard « 8mars ».....	90
Figure 5.8	Schéma simplifier des espaces verts du boulevard « 8mars ».....	91
Figure 5.9	Photo des espaces vêts du boulevard « 8mar ».....	91
Figure 5.10	Schéma simplifié d'un réseau ramifié.....	94
Figure 5.11	Schéma de l'installation de la pompe.....	99
Figure 5.12	Schéma de réseau d'irrigation « goutte à goutte » du boulevard"8mars".....	101

Chapitre 6 : Dimensionnement de station de la phytoepuration

Figure 6.1	Plan de réseau d'assainissement du boulevard "8mars"	102
Figure 6.2	Photo du lieu proposé pour l'installation de phytoépuration.....	103
Figure 6.3	Une fosse septique toutes eaux	106
Figure 6.4	Fonctionnement d'une fosse septique toutes eaux	107
Figure 6.5	Photos représentant le filtre de finition, composé d'un porte filtre et une éponge avant et après utilisation.....	108
Figure 6.6	Schémas représentatif de la station "phytoépuration" du boulevard (8 mars)...	111
Figure 6.7	Coupe transversale du filtre horizontal.....	111

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHOUR, B. (2007)** : livre ; *Calcul des conduites et canaux par la MMR*, Larhyss Edition Capital ISBN 978-9961-9701-0-2.
- AERM, (1999)** : *Épuration des eaux usées domestiques par filtres plantes de Macrophytes, recommandations techniques* : Agence de l'eau Rhone méditerranée corse, groupe Macrophytes et traitement des eaux.
- ALLOUCHE, N., F. (2006)** : *la phytoremediation pour la dépollution des eaux usées*; Division Bioénergie et Environnement. Recherche et développement. (PDF)
- Armstrong, W. (1979)** : *Aeration in higher plants*. In: H.W.Woolhouse (editor), *Advances in Botanical research*. Academic Press., New York, pp. 226-332.
- Armstrong, W. (1992)** : *Waterlogging and plant ecology*. Wiley, Chichester, pp, 290-332.
- Armstrong, J., Armstrong W, and Beckett P.M. (1992)** : *Phragmites australis: venturi – and humidity – induced pressure flows enhance rhizome aeration and rhizosphere oxidation*. *New Phytol.*, 120, 197-207.
- APAT, Mazzoni, M. (2005)** : *Guide pour la conception et gestion de zones humides artificielles pour le traitement des eaux usées civile*.
- Bengouga, K. (2010)** : *Contribution à l'étude du rôle de la végétation dans l'épuration des eaux usées dans les régions arides*, *Memoir de magister en agronomie*.
- DUPOLDT and al. (1995)** : *hand book of constructed wetlands*.
- Dubost, D. (1994)** : *Référence pratique de l'irrigation au sahara Algérienne, cours spécialisé: diagnostique rapide et stratigies de développent en imbien ausien* ; C.I.H.E.A.M/I.A.M 11.
- Dubost, D., Haddad, A., Kafi, H. and Naame (1983)** : *le Bulletin d'agronomie saharienne*, L'institut National de la Recherche Agronomique d'Algerie.
- Esser, D. (1999)** : *Les phragmifiltres*. Journée d'information technique « les filtres plantés de roseaux ». Metz. 8 avril 1999. Agence de l'eau Rhin–meuse. P 14.
- GAID, A. (1984)** : *épuration biologique des eaux usées urbaines*, édition N° 1247-05-84.

Graf, W.H. et Altinakar, M.S. (1985), Hydrodynamique, une introduction. Traité de génie civil, Presses polytechniques et universitaires romandes, 481 pages.

GROSCLAUDE, G. (1999): L'eau milieu naturel et maîtrise. Ed INRA, Paris 1999 tome I.

GROSCLAUDE, G. (1999) : L'eau usages et polluants. Ed INRA, Paris 1999 tome II.

Gaussen ; H, Leroy, J.F. and Ozenda, P. (1982) : Précis de botanique, végétaux supérieurs. 2^{eme} édition. Edition Masson. 170p.

HANS, B. (1986) : treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants- the root-zone method).

Jiménez-Cisneros, B. et Chavez-Mejia, A. (1997) : « treatment of Mexico City wastewater for irrigation purposes », Env. Techn.

LARCHER, J.L (2000) : Livre, Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural.

Lazarova, V. (CIRSEE - Lyonnaise des Eaux) et al (1998) : « La réutilisation des eaux usées : un enjeu de l'an 2000 » ; « L'eau, l'industrie, les nuisances », n°212, pp.39-46.

LECOMTE (1998) : les sites polles.ed : europe media duplication s.a. france/tec. Ldoc lavoisier.

MESSAHEL, M. (1988) : l'irrigation « goutte à goutte » (irrigation et drainage), office des publications universitaires place centrale de Ben Aknoun, (alger) :10-88 codifications : 2.02.3111.

MOREL, M., A. et KANE, M. (1993-1995) : Le lagunage à macrophytes, une technique permettant l'épuration des eaux usées pour son recyclage et de multiples valorisations de la biomasse. Ed CERFER, SAD Sciences et Technologies N° 1- Janvier 1998. p5, 6, 7,8-16.

OZENDA (1991): Flore et végétation du sahara. Ed CNRS, Paris 1991,2004.

POULET, J. B., TERFOUS, A., DAP, S. et GHENAIM, A. (2004) : station d'épuration a lit filtrants plantes de macrophytes. Courier du savoir n° 05 juin 2004. Université Mohamed Kfider Biskra.

Quezal, P., Santa L., (1962-1963) : Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionale. Edition CNRS, tome 2. Paris. 1170p.

RAMADE, F. (2003) : ELEMENTS D'ÉCOLOGIE Ecologie Fondamentale. ED : Dunod, Paris.

REJSEK, F. (2002) : Analyse des eaux aspects réglementaires et techniques. Ed CRDP, Aquitaine. France.

Renaud et al, (1997) : « Wastewater reuse » ; « International Report - 21st World Congress », Madrid, Espagne.

RODIER, J., BAZIN, C., BROUTIN, J.P. (2005) : CHAMBON P., CHAMPSAUR, H. et RODI, L. (2005) : L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Ed Dunod, Paris.

ROKBANE, A. (2010) : Etude de faisabilité de l'installation de stations d'épuration des eaux usées par les plantes de quelques rejets dans la région d'el kanara, Mémoire de magister en hydraulique.

ROQUES, H. (1983) : Fondement théorique du traitement biologique des eaux, techniques et documentations. Ed LAVOISIER, Paris.

SHERWOOD (1993) : bsurface constructed wetlands for wastewater treatment a technology assessment. ed epa. USA.

U.S Envirenmental Agency (1993) : subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment, EPA 832-R-93-008 EPA Office of Water.

Ursula, J., Blumenthal, et al. (2000) : Lignes directrices pour la qualité microbiologique des eaux usées traitées utilisées dans l'agriculture : recommandations de révision des lignes directrices de l'OMS. Bulletin de l'Organisation Mondiale de la San.

Wright, R.R, and Missimer, T.M. (1995): « Reuse: the experience 1 trend direction. » Int. Desalination et Water Reuse.

- [1] <http://www.memoireonline.com/08/09/2463/Contribution--letude-des-parametres-physico-chimiques-et-bacteriologiques-de-lembouchure-de-l.html>

- [2] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ent%C3%A9rocoque>
- [3] <http://www.emo-france.com/html-eaux-usees/obj-solutions.htm>
- [4] <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/duer/ecosse/ecosse.htm>
- [5] <http://www.oleiculteur.com/L%27eau%20et%20le%20sol.htm>
- [6] <http://coursgeologie.com/126-bilan-hydrique-du-sol.html>
- [7] <http://www.hellopro.fr/mesures-d-evaporation-2003004-fr-1-feuille.html>
- [8] <http://www.hellopro.fr/evaporimetre-de-picche-2003004-85786-produit.html>
- [9] <http://www.memoireonline.com/12/09/3003/Determination-des-besoin-en-eau-des-cultures-a-laide-de-logiciel-cropwat-43-dans-l.html>
- [10] http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/maison-2/d/geomembrane_8543
- [11] <http://www.gramme.be/unite9/pmwiki/pmwiki.php?n=PrGC0607.Egouttage>
- [12] <http://sanicurage.com/vidange-fosses-septiques.php>

Résumé :

Les espaces verts de la ville de Biskra résistent difficilement au climat aride de la saison estivale et souffrent en conséquence d'un déficit en eau, provoqué essentiellement par l'évaporation et l'évapotranspiration des plantes. Afin de remédier à ce problème, l'étude suggère de valoriser la possibilité de la réutilisation des eaux usées des réseaux d'assainissements, épurées par filtres plantés (phyto-épuration), pour l'irrigation des espaces verts par un système à goutte à goutte. Cette technique a été appliquée à un quartier de la ville de Biskra.

Mots clés : *Epuration, phytoépuration, eaux usées, macrophytes, irrigation, système à goutte à goutte*

Abstract:

Green spaces in the city of Biskra resist to an arid climate of the summer season and consequently, suffer from water shortage, caused mainly by evaporation and transpiration from plants. To remedy this problem, the study suggests to value the ability to reuse wastewater of sewerage, treated by constructed wetlands (phytoremediation), for irrigation by drip system. This technique was applied to an area of the city of Biskra.

Keywords: *Purification, constructed wetlands, waste water, macrophyte, irrigation, drip system.*

ملخص

المساحات الخضراء في مدينة بسكرة تقاوم بصعوبة المناخ الحار خاصة في فصل الصيف وتعاني من نقص المياه وهذا ناجم عن التبخر ونتح النباتات. ولمعالجة هذه المشكلة، تقترح دراسة إمكانية إعادة استخدام مياه الصرف الصحي بعد تصفيتها بالمرشح النباتي (التصفية بالنباتات) لأغراض الري بالتقطير، وذلك بحي في مدينة بسكرة.

كلمات البحث : تنقية المياه، التصفية النباتية للمياه، المياه المستعملة، نباتات مائية طويلة الاوراق، الري بالتقطير.