

LISTES DES ABREVIATIONS

- CF : Coliformes fécaux
Cf. : Confère
COT : Capacité organique totale
DBO : Demande biologique en oxygène
DCO : Demande chimique en oxygène
EH : Equivalent- habitant
FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
F : Fluor
Fe : Fer
ISN : Institut Sénégalaise de Normalisation
Km : Kilomètre
MES : Matières en Suspension
MO : Matières organiques
 μ S/cm : micro siemens/ Centimètre
NTK: Azote Kjeldahl
NGL: Azote total
OMS : Organisation mondiale de la santé
ONAS : Office nationale de l'assainissement du Sénégal
ONG : Organisation non gouvernementale
P : Phosphore
TDS : Total de Sels Dissous
UNT : Unité Néphélémétrique de Turbidité

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES TABLEAUX :

TABLEAU 1.....	5
TABLEAU 2.....	11
TABLEAU 3.....	12
TABLEAU 4.....	13
TABLEAU 5.....	25
TABLEAU 6.....	26
TABLEAU 7.....	29
TABLEAU 8.....	46
TABLEAU 9.....	48
TABLEAU 10	50
TABLEAU 11.....	52
TABLEAU 12.....	56
TABLEAU 13.....	57
TABLEAU 14.....	58

LISTE DES COURBES :

COURBE 1.....	47
COURBE 2.....	48
COURBE 3.....	49
COURBE 4.....	49
COURBE 5.....	50
COURBE 6.....	51
COURBE 7.....	51
COURBE 8.....	52
COURBE 9.....	53
COURBE 10.....	55
COURBE 11.....	58
COURBE 12.....	59

LISTE DES FIGURES :

FIGURE 1.....	34
FIGURE 2.....	42
FIGURE 3.....	43
FIGURE 4.....	45

RESUME

Vu la raréfaction de plus en plus marquée des ressources en eau potable, la réutilisation des eaux usées après traitement, est l'une des alternatives majeures pour approvisionner des secteurs tels que l'agriculture urbaine, les travaux de BTP, l'aquaculture, etc., afin de mieux préserver les réserves d'eau potable qui souffrent des conditions climatiques défavorables et de la forte croissance démographique qui sévissent dans le monde entier et en particulier en Afrique.

Les traitements utilisés pour réduire la charge polluante des eaux usées sont nombreux et varient le plus souvent d'une région à une autre selon les besoins et les possibilités des exploitants.

L'objectif principal de cette étude est de faire en sorte que les réserves naturelles d'eau potable puissent être économisées en favorisant la réutilisation des eaux usées traitées selon des normes qui répondent à la protection de l'environnement et à la santé humaine et animale.

La majorité des pays en voie de développement utilise des moyens locaux adaptés à leurs conditions climatiques et à leurs budgets pour épurer leurs eaux usées sans avoir à recourir à des technologies lourdes qui dépassent le cadre de leurs possibilités financières.

Ainsi, c'est dans cette suite logique, que nous avons décidé de faire des essais de purification des eaux usées clarifiées de la station d'épuration de Cambéréne avec une plante locale du nom de *Moringa oleifera Lam* appartenant à la famille des moringacées, originaire d'Asie, dont ses effets « purificateurs » sont connus depuis des siècles, lors de la colonisation de l'Inde par les Britanniques.

En effet, la plante porte des fruits appelés gousses, qui lorsqu'ils sont murs et secs, sont décortiqués puis broyés et tamisés ; la poudre ainsi obtenue ou amande est utilisée pour le traitement de l'eau. Cette poudre contient une protéine, polyélectrolyte cationique qui mise en solution dans l'eau, provoque la sédimentation des particules minérales et organiques, agissant ainsi comme un coagulant primaire en créant des ponts naturels entre les particules colloïdales.

Pour ce faire, on utilise soit la poudre seule, soit la solution mère de *Moringa* que l'on verse dans des échantillons d'eau usée clarifiée avec des volumes et concentrations connus, mais aussi selon un temps de réaction bien déterminé. Les résultats obtenus indiquent que le *Moringa oleifera*, en plus de son effet non toxique et purificateur (baisse de la turbidité) est un produit végétal à moindre coût qui entraîne une baisse de la teneur en fer dans l'eau et d'une façon plus significative une baisse de la teneur en fluor aussi bien dans les eaux usées clarifiées que dans les eaux potables. Celle-ci est plus accentuée lorsque les eaux sont fortement fluorées.

Mots clés : *Moringa oleifera* ; solution mère ; eau usée clarifiée ; poudre ; purification

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES EAUX USEES	4
CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DES EAUX USEES ET SITUATION AUSENEGAL.....	15
CHAPITRE 3 : POTENTIELS DU <i>Moringa oleifera</i> ET EPURATION NATURELLE DES EAUX	28
DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE	37
CHAPITRE 1 : MATERIEL ET METHODES	38
CHAPITRE 2 : RESULTATS	46
CHAPITRE 3 : INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS	54
CONCLUSION	61
RECOMMANDATIONS	62
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES EAUX USEES.....	4
1-1) DEFINITION.....	4
1-2) CLASSIFICATION.....	4
1-2-1) LES EAUX RESIDUAIRES URBAINES.....	4
1-2-2) LES EAUX RESIDUAIRES INDUSTRIELLES.....	5
1-3) RESEAUX DE COLLECTE ET D'EVACUATION DES EAUX USEES.....	6
1-3-1) LE SYSTEME DE COLLECTE A TRANSPORT COMMUNAUTAIRE	6
1-3-2) LE RESEAU « tout à l'égout » A ECOULEMENT GRAVITAIRE.....	6
1-3-2-1) LES EGOUTS.....	6
1-3-2-2) LES REGARDS.....	6
1-3-2-3) LA STATION DE POMPAGE.....	7
1-4) CARACTERISTIQUES DES EAUX USEES ET DANGERS ASSOCIES.....	7
1-4-1) PARAMETRES PHYSIQUES.....	7
1-4-1-1) LA TEMPERATURE.....	7
1-4-1-2) LE pH	6
1-4-1-3) LA TURBIDITE	8
1-4-1-4) LES MATIERES EN SUSPENSION (MES)	8
1-4-1-5) LA CONDUCTIVITE.....	8
1-4-2) PARAMETRES CHIMIQUES ORGANIQUES	8
1-4-2-1) LA DCO	9
1-4-2-2) LA DBO5	9
1-4-3) PARAMETRES CHIMIQUES MINERAUX	10
1-4-3-1) L'AZOTE TOTAL	10
1-4-3-2) LE PHOSPHORE TOTAL	10
1-4-4) PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES	10
1-4-4-1) LES COLIFORMES FECAUX	10
1-4-4-2) LES VIRUS	12
1-4-4-3) LES PROTOZOAires ET HELMINTHES.....	12
1-4-5) PARAMETRES CHIMIQUES INORGANIQUES : LES METAUX LOURDS	14
CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DES EAUX USEES ET SITUATION AU SENEGAL	15
2-1) TRAITEMENT DES EAUX USEES	15
2-1-1) PAR LES PROCEDES DITS CONVENTIONNELS	15
2-1-1-1) PRETRAITEMENT	15

2-1-1-2) TRAITEMENT PRIMAIRE	16
2-1-1-3) TRAITEMENT SECONDAIRE	16
2-1-1-3) TRAITEMENT TERTIAIRE	16
2-1-1-4) TRAITEMENT QUATERNAIRE	17
2-1-2) PAR LES AUTRES METHODES DE TRAITEMENT	18
2-1-2-1) APPLICATION DE L'ELECTROCOAGULATION	18
2-1-2-2) APPLICATION DES MEMBRANES	19
2-1-2-3) TRAITEMENT BIOLOGIQUE	19
a) PAR BOUES ACTIVEES	20
b) LITS BACTERIENS	20
c) PAR BIOFILTRE	21
2-1-2-4) LES TRAITEMENTS EXTENSIFS : LE LAGUNAGE	21
2-2) ETAT DE LA SITUATION AU SENEGAL	22
2-2-1) RESEAU D'ASSAINISSEMENT DE LA VILLE DE DAKAR	22
2-2-2) IMPACTS DES REJETS D'EAUX USEES NON TRAITEES SUR L'ENVIRONNEMENT	23
2-2-2-1) Sur l'écosystème aquatique.....	23
2-2-2-2) Sur La nappe phréatique.....	24
2-2-3) LES STATIONS D'EPURATION DES EAUX USEES DOMESTIQUES.....	25
2-2-4) LES NORMES SENEGALAISES	25
CHAPITRE 3 : POTENTIELS DU <i>Moringa oleifera</i> ET EPURATION NATURELLE DES EAUX	28
3-1) POTENTIELS DU <i>Moringa oleifera</i>	28
3-1-1) INTRODUCTION	28
3-1-2) MORPHOLOGIES ET CARACTERISTIQUES PHYSIOLOGIQUES DE LA PLANTE.....	29
3-1-3) ECOLOGIE	30
3-1-4) DIFFERENTES UTILISATIONS DE LA PLANTE	30
3-1-4-1) USAGES MEDICINAUX.....	30
3-1-4-2) USAGES ALIMENTAIRES.....	31
3-1-4-3) ACCELERATEUR DE CROISSANCE VEGETALE.....	31
3-1-4-4) SOURCE DE BIOGAZ.....	32
3-1-4-5) ESSENCE FOURRAGERE.....	32
3-1-4-6) TRAITEMENT DE L'EAU.....	32
3-2) EPURATION NATURELLE (VEGETALE) DES EAUX	34
3-2-1) DIFFERENTES FORMES DU FLOCULANT	34
3-2-2) BACTERIOLOGIE	35
3-2-3) TOXICITE ET BIODEGRADABILITE DU PRODUIT	36
DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE	37
CHAPITRE 1 : MATERIEL ET METHODES	38
1-1) CADRE DES ANALYSES	38

1-2) PRODUITS UTILISES	38
1-3) MATERIEL DE PRELEVEMENT	38
1-4) MATERIEL ET PRODUITS DE LABORATOIRE	38
1-5) METHODES.....	39
1-5-1) ECHANTILLONNAGE	39
1-5-2) ANALYSES PRELIMINAIRES	39
1-5-2-1) Température, pH, Conductivité, Salinité.....	39
1-5-2-2) LES MES : Méthode par pesée différentielle (NFT 90-105)	40
1-5-2-3) LA DCO : méthode HACH (NFT 90-101)	40
1-5-2-4) LA DBO5 : méthode manométrique (NFT 90-103)	40
1-5-3) PREPARATION DE LA POUDRE DE MORINGA OU AMANDE ..	41
1-5-4) PREPARATION ET DESCRIPTION DE LA SOLUTION MERE ..	41
1-5-5) PROTOCOLE EXPERIMENTAL	41
1-5-5-1) POUDRE DE <i>Moringa Oleifera</i> OU AMANDE	41
1-5-5-2) SOLUTION MERE DE MORINGA	44
CHAPITRE 2 : RESULTATS	46
2-1) PHASE I : POUDRE DE MORINGA	46
2-1-1) ETAPE 1 : Masse de poudre constante, Temps variable.....	46
2-1-2)ETAPE 2 : Masse de poudre variable, Temps constante.....	46
2-2) PHASE II : SOLUTION MERE	48
2-2-1 ETAPE 1 : Concentration de la Solution mère constante, Temps variable	49
2-2-2) ETAPE 2 : Concentration de la Solution mère variable, Temps constant.....	52
CHAPITRE 3 : INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS	54
3-1) INTERPRETATION	54
3-2) DISCUSSION	60
CONCLUSION	61
RECOMMANDATIONS.....	62
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	63
ANNEXES.....	67

INTRODUCTION

Face au problème sans cesse croissant de la mobilisation des ressources en eau et de la dégradation de leur qualité, bon nombre d'études sont menées dans le but de déterminer les moyens d'effectuer des économies d'eau, par une optimisation de l'utilisation ou par la mise en place de nouvelles sources d'approvisionnement.

Dans ce contexte, la réutilisation des eaux usées domestiques est considérée comme l'une des alternatives majeures de nouvelles sources d'approvisionnement en eau.

En effet, étant un enjeu politique et socio-économique pour le développement futur des services d'eau potable et d'assainissement à l'échelle mondiale, la réutilisation des eaux usées domestiques présente l'avantage majeur d'assurer une ressource alternative à moindre coût permettant de limiter les pénuries d'eau, de mieux préserver les ressources naturelles et de contribuer à la gestion intégrée de l'eau.

Cependant, si elle est effectuée de façon inappropriée, cette réutilisation peut avoir des effets négatifs sur l'environnement et par conséquent menacer la santé humaine et animale. C'est la raison pour laquelle l'OMS et la FAO ont élaboré des recommandations relatives à la qualité sanitaire des eaux usées pouvant être réutilisées pour l'irrigation agricole ou en aquaculture.

Ainsi, pour permettre une meilleure réutilisation des eaux usées traitées tout en réduisant les risques sanitaires et environnementaux, à un coût moins élevé accessible à tous, nous avons choisi une voie naturelle (végétale) de traitement des eaux usées par une plante (le *Moringa oleifera Lam*) ; d'où l'intitulé de notre sujet : « Essais de purification par voie naturelle (le *Moringa oleifera Lam*) des eaux usées clarifiées de la station d'épuration de Cambéréne (Dakar) ».

Le premier objectif de cette étude est de faire une synthèse des connaissances actuelles relatives aux eaux usées et aux différentes techniques de traitement pouvant être utilisées, afin d'en tirer des éléments de conclusion sur la nature et le niveau de ces risques. Le deuxième objectif est, de voir comment mieux traiter les eaux usées à moindre coût (par exemple par voie naturelle) de sorte qu'elles puissent être réutilisées sans aucun risque par les populations des pays en voie de développement en particulier le Sénégal, dont les capacités de production d'eau potable connaissent de plus en plus des limites, contrairement aux rejets d'eaux usées qui ne cessent de croître.

Afin de répondre à ces objectifs, nous allons analyser dans une première partie, la composition des eaux usées et les dangers sanitaires y afférents. Puis, dans une deuxième partie, nous verrons comment des traitements adéquats permettent de réduire cette charge en polluants. Dans une

troisième partie, nous verrons le rôle du *Moringa oleifera Lam*, (produit végétal) dans la « purification » des eaux en particulier les eaux usées clarifiées de la station d'épuration de Cambéréne.

Ainsi, dans le but de mieux aborder ce sujet, nous avons décidé de présenter cette étude en deux parties :

- la première partie est réservée à la synthèse bibliographique sur les eaux usées et sur les différents usages du *Moringa oleifera* ;
- la seconde partie est consacrée à l'étude expérimentale.

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES EAUX USEES

1-1) DEFINITION

Les eaux usées se définissent comme étant des eaux modifiées dans leurs qualités par utilisation domestique, commerciale, artisanale ou industrielle. Elles sont communément appelées eaux résiduaires ou effluents.

Elles sont composées de déchets liquides et des déchets transportés par les eaux provenant des résidences, des commerces, des industries et des institutions, ainsi que des eaux souterraines, des eaux de surface et des eaux pluviales qui peuvent être présentes (**SAINT-LAURENT, 2003**).

1-2) CLASSIFICATION DES EAUX USEES

Les eaux usées se divisent en quatre groupes qui peuvent être synthétisés en deux grands groupes : les eaux résiduaires urbaines (ERU) et les eaux résiduaires industrielles (ERI).

1-2-1) LES EAUX RESIDUAIRES URBAINES : (ERU)

Les eaux résiduaires urbaines regroupent deux types d'eau :

a) Les eaux domestiques

Elles proviennent des différents usages domestiques de l'eau. Elles sont essentiellement porteuses de pollution organique. Elles se répartissent en eaux ménagères, et en eaux "vannes".

Les eaux ménagères ont pour origine les salles de bains, les buanderies et les cuisines, et sont généralement chargées de détergents, de graisses, de solvants, de débris organiques, etc.

Par contre les eaux "vannes" sont des rejets des toilettes, chargés de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux. Elles représentent le tiers des eaux usées domestiques.

b) Les eaux pluviales

Les eaux pluviales peuvent être chargées d'impuretés au contact de l'air, puis en ruisselant ; des résidus déposés sur les toits et les chaussées des villes (huile de vidange, carburants, résidus de pneus, métaux lourds. Elles sont prises en compte dans le cas où le système de collecte des eaux usées est unitaire (**RADOUX, 1995**).

La composition et les caractéristiques d'une eau résiduaire urbaine sont peu variables par rapport à celles d'une eau résiduaire industrielle.

Le tableau suivant regroupe certains paramètres indicateurs de pollution des eaux résiduaires urbaines en France.

Tableau 1 : Caractéristiques des eaux résiduaires urbaines en France

Paramètres	Valeurs
pH	7,5-8,5
Résidus secs (mg/l)	1000-2000
MES (mg/l)	150-500
DBO5 (mg/l)	100-400
DCO (mg/l)	300-1000
NTK (mg/l)	30-100
COT (mg/l)	100-300
N-NH ₄ ⁺ (mg/l)	20-50
N-NO ₃ ⁻ (mg/l)	< 1
N-NO ₂ ⁻ (mg/l)	< 1
P (mg/l)	10-25
Détergents (mg/l)	6-13

Source : (SALGHI, 2000)

1-2-2) LES EAUX RESIDUAIRES INDUSTRIELLES :(ERI)

Elles sont très différentes des eaux résiduaires urbaines. Leurs caractéristiques varient d'une industrie à l'autre. En plus de matières organiques, azotées ou phosphorées, elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques, des hydrocarbures. Certaines d'entre elles font l'objet d'un prétraitement de la part des industriels avant d'être rejetées dans les réseaux de collecte (réseau unitaire). Elles sont mêlées aux eaux usées domestiques que lorsqu'elles ne présentent plus de danger pour les réseaux de collecte et ne perturbent pas le fonctionnement des usines de dépollution.

Les caractéristiques des eaux résiduaires industrielles subissent des grandes variations, elles dépendent à une multitude de paramètres : type de l'industrie, de la production, de l'entretien, de l'état des appareils, etc. Par ailleurs, il existe des caractéristiques communes entre les effluents de la même industrie.

(SALGHI, 2000)

Les principaux polluants transitant dans les eaux usées d'origine industrielle sont :

- les métaux toxiques,

- les toxines organiques,
- les hydrocarbures
- les matières plastiques
- les huiles et graisses,
- les sels, etc.

1-3) RESEAU DE COLLECTE ET D'EVACUATION DES EAUX USEES

Un réseau communautaire collecte toutes les eaux usées des résidences (habitations) pour les acheminer vers une station de traitement en vue de leur élimination.

Ainsi, on distingue deux systèmes de collecte :

- un système de collecte à transport communautaire et
- un réseau « tout à l'égout » à écoulement gravitaire.

1-3-1) LE SYSTEME DE COLLECTE A TRANSPORT COMMUNAUTAIRE

Dans ce genre de système, un réservoir de rétention est utilisé pour stocker les eaux usées à l'habitation par exemple à la maison jusqu'à ce qu'un véhicule de collecte et de transport (habituellement un camion) les amène à un site d'élimination autorisé.

Un tel système s'avère rentable dans les collectivités où les maisons sont éloignées les unes les autres. (**TPSGC, 2006**)

1-3-2) LE RESEAU « tout à l'égout » A ECOULEMENT GRAVITAIRE

Un système « tout à l'égout » est un réseau souterrain de conduites qui collecte les eaux usées de toute une ville. Les eaux usées sont acheminées jusqu'à une station de traitement en vue de leur élimination finale ou leur éventuelle réutilisation. Ce concept nécessite que tous les tuyaux aient une pente, de façon à ce que les eaux usées s'écoulent par gravité jusqu'à l'installation de traitement (**TPSGC, 2006**).

Le nom de « tout à l'égout » est celui que porte le réseau d'évacuation des eaux usées.

Cependant, il est important de reconnaître que le comportement non conforme de la population qui jette n'importe quel type de déchets dans les égouts, car trompée en cela par le nom de « tout à l'égout », contribue beaucoup au disfonctionnement du réseau. (**GAYE et NIANG, 1995**)

1-3-2-1) LES EGOUTS

L'égout est la conduite qui achemine les eaux usées des lieux de collecte à la station de traitement. Le diamètre minimal d'une conduite principale d'égout pour un réseau à écoulement gravitaire est de 200 mm (**TPSGC, 2006**).

1-3-2-2) LES REGARDS

Les regards sont des compartiments par lesquels on a accès aux égouts pour les nettoyer, les inspecter et les entretenir. Si la conduite principale se bloque, les responsables de l'entretien entrent par les regards pour la dégager.

1-3-2-3) LA STATION DE POMPAGE

Une station de pompage est utilisée dans un réseau « tout à l'égout », lorsque l'écoulement par gravité est interdit par la topographie ou la trop grande profondeur d'enfouissement des tuyaux.

Cela se produit souvent lorsque les eaux usées doivent franchir des collines ou être acheminées à une station de traitement sur un site plus élevé. La station pompe les eaux usées jusqu'à une altitude plus élevée que la sienne afin qu'elles puissent s'écouler de nouveau par gravité. (**TPSGC, 2006**)

Il y'a deux principaux types de stations de pompage :

- la station à compartiment sec ; la pompe aspire les eaux usées stockées dans un compartiment humide adjacent ; l'extérieur de la pompe est sec en tout temps, ce qui facilite les inspections et l'entretien ;
- la station à compartiment humide ; la pompe et le moteur sont immergés dans les eaux usées. Ce sont des pompes submersibles qui doivent être retirées de l'unité pour l'entretien.

1-4) CARACTERISTIQUES DES EAUX USEES ET DANGERS ASSOCIES

De par leurs origines variées et leurs compositions diverses, les eaux usées présentent des caractéristiques multiples. Ainsi, les caractéristiques physiques chimiques et biologiques permettent de quantifier les différents types de pollution des eaux usées.

1-4-1) PARAMETRES PHYSIQUES

Ces paramètres sont essentiellement la température, le pH, la turbidité, la conductivité et les M.E.S. Ils sont responsables de la pollution physique ou primaire des eaux.

1-4-1-1) La Température

Il est primordial de connaître la température d'une eau. En effet, elle joue un rôle très important dans la solubilité des sels, des gaz et dans la détermination du pH. Elle se comporte aussi comme un facteur physiologique agissant sur le métabolisme de croissance des micro-organismes vivant dans l'eau. (**SALGHI, 2000**).

La température des eaux usées influe beaucoup sur l'efficacité du procédé de traitement. Par exemple, l'activité biologique prenant place lors du traitement décroît avec le froid. (**TPSGC, 2006**).

1-4-1-2) Le pH

Le pH mesure la concentration des ions H⁺ dans l'eau. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. La valeur du pH peut altérer la croissance et la reproduction des micro-organismes vivant dans une eau lorsqu'elle est très élevée (très basique) ou très faible (très acide). La plupart des bactéries peuvent croître dans une gamme de pH comprise entre 5 et 9, l'optimum est situé entre 6,5 et 8,5 ; des valeurs de pH inférieures à 5 ou supérieures à 8,5 affectent la croissance et la survie des micro-organismes aquatiques selon l'organisation Mondiale de la Santé (OMS).

1-4-1-3) La Turbidité

La turbidité désigne l'état d'un fluide trouble, opaque à la lumière ou la teneur d'un liquide en matières qui le troublent. Elle est causée par des particules en suspension qui absorbent, diffusent et/ou réfléchissent la lumière. C'est un paramètre important dans les différentes normes fixant la qualité des eaux potables. Elle est mesurée à l'aide d'un néphélomètre et s'exprime en Unités de Turbidité Néphélémétriques (U.N.T). Le turbidimètre mesure la lumière dispersée par les particules en suspension avec un angle de 90° par rapport au faisceau de lumière incident. (**CEAEQ, 2007**)

1-4-1-4) Les Matières en suspension (M.E.S)

Ce sont pour la plupart des matières biodégradables. Les micro-organismes sont le plus souvent adsorbés à leur surface et sont ainsi « transportés » par les M.E.S. En plus de la turbidité, elles renseignent également sur le goût et l'odeur de l'eau. Car elles donnent à l'eau une apparence trouble, un mauvais goût et une mauvaise odeur. Cependant, elles peuvent avoir un intérêt pour l'irrigation des cultures.

1-4-1-5) La Conductivité.

La mesure de la conductivité de l'eau permet d'apprécier la quantité des sels dissous dans l'eau (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , PO_4^{2-}). Elle traduit la facilité avec laquelle l'eau conduit un courant électrique. Elle augmente avec la quantité de sels dissous et est plus importante lorsque la température de l'eau augmente. La conductivité électrique d'une eau usée dépend essentiellement de la qualité de l'eau initiale utilisée et du régime alimentaire de la population et des activités industrielles. Elle est exprimée en Siemens /cm. (**SALGHI, 2000**)

1-4-2) PARAMETRES CHIMIQUES ORGANIQUES

Ils sont responsables de la pollution secondaire ou organique des eaux usées et se divisent en deux composantes essentielles qui sont la DCO et la DBO5.

1-4-2-1) La DCO

La Demande Chimique en Oxygène (DCO), représente la quantité de dioxygène nécessaire à l'oxydation de l'ensemble des matières organiques (biodégradable ou non) et minérales contenues dans l'eau, par oxydoréduction à l'aide d'un oxydant, le bichromate de potassium. Elle permet d'apprécier la concentration en matières organiques ou minérales, dissoutes ou en suspension dans l'eau, au travers de la quantité d'oxygène nécessaire à leur oxydation chimique totale. (**BAUMONT et al, 2005**). Cette donnée est représentative de la pollution organique et chimique. Elle est exprimée en mg O_2/l . Généralement la DCO est 1,5 à 2 fois la DBO5 pour les eaux usées urbaines et de 1 à 10 pour tout l'ensemble des eaux résiduaires industrielles.

1-4-2-2) La DBO5

La DBO5 (demande biologique en oxygène au bout de 5 jours), est la quantité d'oxygène utilisée en 5 jours par les micro-organismes pour oxyder les matières organiques dissoutes ou en suspension dans l'eau à 20°C en milieu aérobie et dans le noir (afin d'éviter toute photosynthèse

parasite). On ensemence l'effluent et on le sature en oxygène, puis au bout de 5 jours on mesure la quantité d'oxygène consommée. Elle est exprimée en mg O₂/l.

Il s'agit donc d'une consommation potentielle de dioxygène par voie biologique. Ce paramètre constitue un bon indicateur de la teneur en matières organiques biodégradables d'une eau au cours des procédés d'autoépuration. Elle permet d'évaluer la fraction biodégradable de la charge polluante organique des eaux usées. La DBO5 est en fait une mesure de la fraction organique de la DCO. (**BAUMONT et al, 2005**)

Selon (**RADOUX, 1995**), le rapport DCO/DBO5 renseigne sur la biodégradabilité de la matière organique et permet d'adapter le traitement de l'eau par voie biologique (boues activées, lits bactériens, biofiltres, etc.)

Ainsi, lorsque le rapport DCO/DBO5 est égal à :

- ✓ 1,66 : les eaux résiduaires sont facilement traitables biologiquement ;
- ✓ 2,50 : les eaux résiduaires sont traitables biologiquement ;
- ✓ 5,00 : les eaux résiduaires sont susceptibles de subir un traitement biologique ;
- ✓ >5 : les eaux résiduaires sont toxiques et non traitables biologiquement.

La relation empirique de la matière organique (MO) en fonction de la DBO5 et la DCO est donnée par l'équation suivante : **MO = (2 DBO5 + DCO)/3**

1-4-3) PARAMETRES CHIMIQUES MINERAUX : LES SUBSTANCES NUTRITIVES

Leur présence dans les eaux usées peut avoir d'une part un impact négatif sur la santé humaine et la qualité des eaux superficielles et d'autre part un impact bénéfique sur les cultures dans le cas d'une réutilisation agricole (**BAUMONT et al., 2005**).

1-4-3-1) L'Azote total

Dans les eaux usées, l'azote se retrouve sous forme ammoniacale (NH₄⁺, NH₃), de nitrite (NO₂⁻) ou de nitrate (NO₃⁻). (**AKPO, 2006**).

Selon (**BAUMONT et al., 2005**), les rejets en matières azotées sont mesurés par 2 paramètres :

- le NGL (azote total) : c'est la mesure de l'azote total, réduit ou oxydé. L'élimination du NGL signifie que les nitrates formés ont été éliminés : c'est la dénitrification. Celle-ci permet d'éviter les phénomènes d'eutrophisation ;
- le NTK (azote Kjeldahl) : c'est la mesure des matières azotées sous forme réduite, principalement l'urée, d'origine humaine. Le rejet direct de l'azote réduit dans le milieu consomme de l'oxygène et défavorise la vie piscicole.

1-4-3-2) Le Phosphore total

C'est la somme de toutes les formes de phosphates présents normalement dans les eaux usées domestiques, dont les ortho phosphates, les poly phosphates, les méta phosphates, les pyrophosphates et les phosphates organiques, exprimée sous forme de concentration de P. (**SAINT-LAURENT, 2003**)

1-4-4) PARAMETRES MICROBIOLOGIQUES

Ils s'intéressent aux micro-organismes de taille microscopique en particulier aux bactéries, aux protozoaires, aux virus etc., qui peuvent être présents dans les eaux usées. Ils proviennent pour la majeure partie des matières fécales et sont à l'origine de la pollution quaternaire des eaux. Les micro-organismes constituent le principal danger sanitaire pour la réutilisation des eaux usées épurées, ce qui nous incite à traiter cette partie de manière détaillée.

1-4-4-1) Les coliformes fécaux

Les coliformes fécaux communément appelés coliformes thermo tolérants sont un groupe des coliformes totaux capables de fermenter le lactose à une température de 44,5°C. L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est *Escherichia Coli* et dans une moindre mesure certaines espèces des genres *Citrobacter*, *Enterobacter* et *Klebsiella* (**Elmund et al., 1999 ; Santé Canada, 1991 ; Edberg et al., 2000**), cités par (**Groupe scientifique sur l'eau, 2003**). Les bactéries coliformes existent dans les matières fécales mais peuvent également se développer dans certains milieux naturels (sol, végétation). Elles sont faciles à détecter et pour cela utilisées comme indicatrices de contamination fécale. Cependant, l'absence de coliformes totaux ne signifie pas nécessairement que l'eau ne présente pas de risque pathogène. Les eaux usées contiennent en moyenne 10^7 à 10^8 bactéries/l. La concentration en bactéries pathogènes est de l'ordre de 10^4 /l (**FABY et BRISSAUD, 1997**). Le nombre de germes peut être multiplié

par 1 000 dans les eaux de rivières après un rejet urbain ; ainsi, à Paris, le nombre de coliformes fécaux passe de 10^3 à 10^6 par millilitre, après la zone de rejet de la station d'épuration d'Achères, qui collecte les eaux usées de la ville (**MIQUEL, 2003**). Selon les directives de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), une eau d'irrigation de cultures de légumes susceptibles d'être consommés crus, ne devrait pas présenter une concentration en coliformes fécaux supérieure à 1000 par 100 ml. Le tableau suivant présente quelques bactéries pathogènes qui peuvent être présentes dans les eaux usées.

Tableau 2. Quelques bactéries pathogènes présentes dans les eaux usées.

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Voies de contamination principale
<i>Salmonella</i>	Typhoïde, paratyphoïde, salmonellose	Ingestion
<i>Shigella</i>	Dysenterie bacillaire	Ingestion
<i>Escherichia. coli</i>	Gastro-entérite	Ingestion
<i>Vibrio</i>	Choléra	Ingestion
<i>Leptospira</i>	Leptospirose	Cutanée/ Inhalation /Ingestion
<i>Mycobactérium</i>	Tuberculose	Inhalation

Source : (ASANO, 1998)

1-4-4-2) Les virus

Ce sont des organismes infectieux de très petite taille (10 à 350 nm) qui se reproduisent en infectant un organisme hôte. L'infection se produit par l'ingestion dans la majorité des cas, sauf pour le *Coronavirus* où elle peut aussi avoir lieu par inhalation. Dans le tableau 3 sont recensés la plupart des virus que l'on peut trouver dans les eaux usées, avec les symptômes de la maladie qui leur est associée, et la voie de contamination principale.

Tableau 3. Quelques virus présents dans les eaux usées.

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Voies de contamination principale
Virus de l'hépatite A	Hépatite A	Ingestion
Virus de l'hépatite E	Hépatite E	Ingestion
<i>Rotavirus</i>	Vomissement, diarrhée	Ingestion
<i>Adénovirus</i>	Maladie respiratoire, diarrhée, conjonctivite, vomissement	Ingestion
<i>Poliovirus</i>	Paralysie, méningite, fièvre	Ingestion
<i>Coronavirus</i>	Vomissement, diarrhée	Ingestion /Inhalation

Source : (ASANO, 1998)

1-4-4-3) Les protozoaires et helminthes

Ce sont des parasites ou organismes vivant sur ou dans un autre être vivant et au dépens de ce dernier. Les parasites ayant un intérêt du point de vue de la santé publique sont des protozoaires, tels que les amibes, *Toxoplasma gondii*, *Giardia lamblia* et *Cryptosporidium sp*; ainsi que des helminthes tels que *Ascaris sp*, *Trichuris sp* et *Taenia sp*. (**CHMT, 2007**)

➤ Les Protozoaires

Les protozoaires sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries.

La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites. Certains d'entre eux adoptent au cours de leur cycle de vie une forme de résistance, appelée kyste. Cette forme résiste généralement aux procédés de traitement des eaux usées, exemple *Entamoeba histolytica*, responsable de la dysenterie ou encore *Giardia lamblia*.

➤ Les Helminthes

Les helminthes sont des vers multicellulaires. Tout comme les protozoaires, ce sont majoritairement des organismes parasites. Les oeufs d'helminthes sont très résistants et peuvent notamment survivre plusieurs semaines voire plusieurs mois sur les sols ou les plantes cultivées. La concentration en oeufs d'helminthes dans les eaux usées est de l'ordre de 10 à 10^3 oeufs/l (**FABY et BRISAUD, 1997**).

Tableau 4. Quelques parasites pathogènes dans les eaux usées

Agent pathogène	Symptômes, maladie	Nombre par litre d'eau usée	Voies de contamination principale
• PROTOZOAires			
<i>Entamoeba histolytica</i>	Dysenterie amibienne	4	Ingestion
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrhée, malabsorption	125 à 100 000	Ingestion
<i>Balantidium coli</i>	Diarrhée, ulcère du colon	28 à 52	Ingestion
• HELMINTHES			
<i>Ascaris</i>	Ascaridiase : diarrhée, troubles nerveux	5 à 111	Ingestion
<i>Ankylostoma</i>	Anémie	6 à 188	Ingestion/ Cutanée
<i>Trichuris</i>	Diarrhée, douleurs abdominales	10 à 41	Ingestion

Source : (ASANO, 1998)

1-4-5) LES SUBSTANCES TOXIQUES INORGANIQUES : LES METAUX LOURDS

Les métaux lourds que l'on trouve dans les eaux usées urbaines sont extrêmement nombreux ; les plus abondants (de l'ordre de quelques µg/l)

sont le fer, le zinc, le cuivre et le plomb. Les autres métaux (manganèse, aluminium, chrome, arsenic, sélénium, mercure, cadmium, molybdène, nickel, etc.) sont présents à l'état de traces. Ce sont tous des micropolluants non organiques, dont leur présence peut influer sur la contamination de la chaîne alimentaire. Leur origine est multiple : ils proviennent des produits consommés au sens large par la population, de la corrosion des matériaux des réseaux de distribution d'eau et d'assainissement, des eaux pluviales dans le cas de réseau unitaire, des activités de service (santé, automobile) et éventuellement de rejets industriels (**CAUCHI *et al.*, 1996**).

Les éléments cités dans la littérature comme étant les plus dangereux sont le plomb (Pb), l'arsenic (As), le mercure (Hg), le cadmium (Cd) et le nickel (Ni).

➤ LE PLOMB

C'est une toxine naturelle. Il entraîne une altération de la synthèse de l'hémoglobine au niveau de la moelle osseuse et une perturbation de la fabrication des globules rouges (anémie). Chez la femme enceinte, une exposition au plomb augmente les risques d'avortement et pourrait perturber le développement du fœtus. (**BAUMONT *et al*, 2005**)

➤ L'ARSENIC

C'est un poison inodore et incolore très puissant. Il est classé parmi les cancérogènes.

➤ LE MERCURE

C'est également un dangereux poison qui se trouve dans l'environnement sous des formes diverses : le mercure métallique n'est pas toxique en phase solide, mais l'est en phase gazeuse. (**BAUMONT *et al*, 2005**)

➤ LE CADMIUM

L'exposition au cadmium peut se faire par inhalation ou par ingestion d'eau et d'aliments contaminés. Le cadmium est classé parmi les produits cancérogènes pour l'humain. Il provoque le cancer des poumons, et il est soupçonné de provoquer celui des reins et de la prostate. (**BAUMONT *et al*, 2005**)

CHAPITRE 2 : TRAITEMENT DES EAUX USEES ET SITUATION AU SENEGAL

2-1) TRAITEMENT DES EAUX USEES

Le traitement des eaux usées consiste fondamentalement à éliminer différents éléments présents afin d'obtenir une eau « épurée » conforme à des objectifs de rejet et à une éventuelle réutilisation. Chaque station de traitement des eaux usées est spécifique aux besoins d'une région donnée et elle peut comprendre de multiples combinaisons de procédés de traitement. (**SAINT-LAURENT, 2003**)

Il y a de nombreux types de traitement mais la plupart se base sur l'intégration de deux procédés importants : la séparation des solides de l'eau à traiter par des méthodes physico-chimiques, et l'action biologique de divers micro-organismes. (**DIAZ, 2001**)

2-1-1) PAR LES PROCEDES DITS CONVENTIONNELS

Dans la plupart des cas, le traitement des eaux usées urbaines se fait essentiellement par l'emploi de procédés dits conventionnels (le prétraitement, le traitement primaire, le traitement secondaire et le traitement tertiaire) et occasionnellement par des traitements avancés (quaternaires) appelés spéciaux ou complémentaires.

2-1-1-1) LE PRETRAITEMENT

C'est un traitement préliminaire qui consiste à l'élimination des éléments grossiers et visqueux capables de produire des problèmes pour le bon fonctionnement du système (**BRYAN *et al.*, 1995**).

Le prétraitement comprend :

- un dégrillage qui sert à enlever les débris grossiers d'une taille supérieure à 15-25 mm ;
- un dessablage qui permet de faire sédimenter les particules d'un diamètre compris entre 0,2 et 25 mm ;
- le prétraitement peut aussi inclure un déshuileage et un dégraissage qui sert à enlever les liquides insolubles dans l'eau

(les huiles, les hydrocarbures, les graisses, etc.) (**CHMT, 2007**).

2-1-1-2) LE TRAITEMENT PRIMAIRE

Lors du traitement primaire, les contaminants les plus faciles à séparer sont éliminés : les solides qui se séparent aisément, les couches d'huile et autres composés légers.

Le traitement primaire élimine environ 60 % des solides totaux en suspension et près de 35 % de la DBO et 50 % des agents pathogènes; les impuretés dissoutes ne sont pas éliminées. Il est habituellement utilisé comme première étape avant le traitement secondaire. Selon (**CHMT, 2007**), le traitement primaire s'effectue essentiellement par décantation, il permet d'éliminer environ 70 % des particules inorganiques de faible taille (0,05 mm à 1,0 mm), appelées matières en suspension (MES), ainsi que 40 % de la demande biologique en oxygène (DBO) qui indique le niveau de pollution par la matière organique sur la base d'une mesure spécifique effectuée en laboratoire.

2-1-1-3) TRAITEMENT SECONDAIRE

C'est une combinaison de procédés biologiques ou chimiques et de procédés mécaniques utilisant la gravité afin d'éliminer les matières dissoutes et colloïdales ainsi que les matières en suspension. On considère que ce degré de traitement procure une réduction d'eau moins 85 % des solides en suspension et de la DBO (**SAINT-LAURENT, 2003**).

C'est une étape qualifiée de biologique qui repose sur l'action de divers micro-organismes naturellement présents dans les eaux usées, surtout des bactéries, qui transforment la matière organique en biomasse microbienne et, ultimement, en éléments minéraux (par exemple : l'azote, le phosphore) ainsi qu'en CO₂.

Ce traitement permet l'enlèvement de la matière organique non décantable, qui n'a pas été retenue par le traitement primaire, et permet habituellement de détruire une fraction non négligeable de micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, champignons et protozoaires). Les procédés secondaires les plus utilisés sont les boues activées (« activated sludge ») et les lits bactériens (« trickling filters »).

Le traitement biologique est de plus en plus jugé indispensable car il est le seul capable de réduire de manière significative la pollution organique et microbienne (**CHMT, 2007**).

2-1-1-4) TRAITEMENT TERTIAIRE

Selon (**BRYAN et al., 1995**), c'est l'élimination de la matière organique résiduelle.

C'est une méthode de traitement conçue pour débarrasser l'effluent des polluants qui restent après un traitement secondaire traditionnel. Le traitement tertiaire consiste à ajouter des produits chimiques ou à faire appel à des procédés physiques ou biologiques qui améliorent la qualité de l'effluent des eaux usées ayant subi un traitement secondaire.

On y a recours lorsqu'il faut éliminer plus de 85 % des solides totaux et de la DBO, ou lorsqu'il faut réduire les concentrations d'azote et de phosphore. Les procédés chimiques comprennent l'emploi de floculants et de coagulants qui favorisent la précipitation de certaines particules organiques ainsi que du phosphore dont le pouvoir eutrophisant est très élevé.

Quant aux procédés biologiques, ils sont fondés sur l'emploi de bactéries, d'algues microscopiques ou de végétaux aquatiques, surtout pour l'élimination de l'azote ou du phosphore (la déphosphatation) (**CHMT, 2007**).

2-1-1-5) TRAITEMENT QUATERNNAIRE

Ce sont des traitements supplémentaires, essentiellement pour éliminer les micro-organismes qui pourraient poser des problèmes sanitaires.

Ils sont considérés comme des traitements avancés, ils sont beaucoup moins utilisés et visent à produire une eau presque pure, mais néanmoins non potable. Ils comprennent des procédés comme la désinfection par l'ozonation ou le rayonnement ultraviolet. Ils incluent également l'emploi de composés chlorés pour assurer la désinfection.

➤ LA CHLORATION

Le chlore est un oxydant puissant qui réagit à la fois avec des molécules réduites et organiques, et avec les micro-organismes. Les traitements de purification et de clarification en amont ont une très grande importance pour permettre une bonne efficacité du traitement, et éviter d'avoir à utiliser trop de chlore. D'autant plus que le coût de la déchloration, qui permet de limiter considérablement l'effet toxique de certains produits dérivés formés lors du traitement, est élevé.

➤ L' OZONATION

L'ozone est un procédé de désinfection utilisé aux États-Unis, en Afrique du Sud et au Moyen- Orient essentiellement. En France, seule la station d'épuration de Saint-Michel-en-Grèves (Côtes d'Armor) en est équipée à

notre connaissance. Il permet l'élimination des bactéries, des virus et des protozoaires. C'est le seul procédé vraiment efficace contre les virus. (**LAZAROVA et al., 2003**)

Les tests de toxicité effectués sur des poissons, des crustacés et des algues n'ont pas permis de mettre en évidence une quelconque toxicité (**CAUCHI et al., 1996**).

➤ L'EXPOSITION AUX UV (Ultra Violets)

Le traitement par rayons ultraviolets utilise des lampes à mercure disposées parallèlement ou perpendiculairement au flux d'eau. Leur rayonnement s'attaque directement aux microorganismes.

Ce traitement est très simple à mettre en œuvre, car il n'y a ni stockage, ni manipulation de substances chimiques et les caractéristiques chimiques de l'effluent ne sont pas modifiées. La durée d'exposition nécessaire est très courte (20 à 30 secondes).

Les désinfections utilisant des produits chimiques (chlore, ozone, etc.) sont efficaces, sauf contre *Cryptosporidium*. Il a été montré que des kystes de *Cryptosporidium* pouvaient résister à des traitements à pH = 11,2, à la chloration et à d'autres traitements chimiques (**Rose et Coll., 1999**) cité par (**BAUMONT et al., 2005**). Cependant, la plus grande partie des kystes de *Cryptosporidium* sont éliminés pendant les phases primaires de décantation et coagulation/flocculation. Par ailleurs, il faut trouver l'équilibre entre le risque posé par les désinfectants en eux-mêmes, et le risque lié aux micro-organismes pathogènes (**ASANO, 1998**). C'est essentiellement le cas pour le chlore dont l'utilisation crée des dérivés halogénés potentiellement cancérogènes. Pour les ultraviolets, ce problème ne se pose pas. Leur action sur les virus et les coliformes fécaux est bonne. Seules les formes de résistance, comme les œufs d'helminthes, ne sont pas trop affectées (**CAUCHI et al., 1996**). Le traitement aux rayons UV est plus économique et pose moins de problèmes de toxicité que le chlore. Il est beaucoup utilisé aux États-Unis et au Canada.

2-1-2) PAR LES AUTRES METHODES DE TRAITEMENT

Outre les procédés de traitement dits conventionnels, d'autres types de traitement peuvent être mis en évidence. Ces traitements sont soit physico-chimiques, soit biologiques, soit naturels et dans la majorité des cas adaptés à la situation économique des pays.

2-1-2-1) APPLICATION DE L'ELECTROCOAGULATION

La coagulation chimique et les traitements biologiques sont des techniques toujours fort utilisées dans le traitement de divers types d'effluents municipaux et industriels. Par contre, certains inconvénients sont induits par l'utilisation de sels métalliques comme l'acidification de l'eau traitée et la quantité importante de boues à disposer. Dans le cas des traitements biologiques, c'est plutôt la lenteur du traitement et l'obligation de prétraiter les eaux afin de diminuer la charge organique qui sont problématiques. Une alternative intéressante à ces procédés serait donc de former *in situ* un agent coagulant qui permettrait d'éliminer l'ajout de produit chimique tout en agissant directement sur l'eau brute, même si celle-ci est fortement chargée. La technique qui présente ces deux avantages se nomme l'électrocoagulation. Cette méthode de traitement semble également avoir des propriétés de désinfection et elle permet une diminution des odeurs reliées aux effluents industriels, deux caractéristiques intéressantes pour l'industrie.

L'électrocoagulation est un procédé électrolytique qui utilise la dissolution des anodes lors de l'imposition du courant pour traiter les eaux usées riches en métaux, mais également en matière organique. (**ASSELIN, 2006**)

2-1-2-2) APPLICATION DES MEMBRANES

Selon (**DIAZ, 2001**), les procédés membranaires sont basés sur le principe du tamis, c'est-à-dire du passage à travers des pores calibrés d'une membrane.

Les membranes peuvent être définies comme étant des pellicules barrières minces semi-perméables séparant l'eau à traiter en deux phases : le perméat et le concentrat.

Pour réaliser cette séparation, on applique une force motrice, qui peut être la pression, un champ électrique, un gradient de température ou une différence de concentration. (**MIZIER, 1998**) cité par (**DIAZ, 2001**). Les membranes permettent de filtrer et d'éliminer toutes les MES, tous les micro-organismes et toutes les substances qui s'y adsorbent. Seules subsistent les matières dissoutes.

L'efficacité épuratrice d'une membrane dépend de son « seuil de coupure ». Selon (**LAZAROVA et al., 2003**), un seuil de coupure de 0,035 µm permet de désinfecter de manière quasi-totale.

Aujourd'hui, l'utilisation des membranes dans le traitement des eaux usées se fait principalement en traitement secondaire ou tertiaire, où leur principal intérêt est de filtrer la partie bactériologique des eaux usées et de les associer alors à des procédés qui éliminent la matière organique et minérale. La filtration est très efficace pour l'élimination des micro-organismes, d'autant plus que ceux-ci sont gros. De plus, le traitement par

membranes est un procédé dont le coût est élevé. L'osmose inverse, qui est une technique de filtration encore plus fine, et qui permet de séparer également les substances dissoutes, est tout aussi efficace et dont le coût est élevé (**BAUMONT et al., 2005**).

2-1-2-3) TRAITEMENT BIOLOGIQUE

Il constitue le mode classique d'épuration de la pollution organique carbonée et azotée. Le traitement biologique est utilisé pour détruire les composés organiques contenus dans l'eau. Cette dégradation biologique à effectuer est caractérisée par le souhait de réduction de la DBO.

On distingue 2 types de traitements (**LENNTECH, 2004**) :

- un traitement aérobique et
- un traitement anaérobique.

Dans les systèmes aérobiques, l'eau est aérée avec de l'air comprimé (dans certain cas avec de l'oxygène). Les systèmes anaérobiques fonctionnent en l'absence d'oxygène.

On associe généralement à un réacteur :

- ✓ aérobique: une aération ,une décantation , une clarification ,une nitrification ;
- ✓ anaérobique : une digestion, une méthanisation, un stockage et une utilisation des gaz.

a) PAR BOUES ACTIVEES

Le traitement biologique par boues activées permet d'éliminer une grande partie de la matière organique (MO) des eaux résiduaires. L'amélioration du taux d'élimination de la matière organique et la diminution du volume des boues formées lors du traitement sont deux problèmes cruciaux d'une station d'épuration (**DIGNAC et SCRIBE, 1998**)

Pour ce type de traitement, on utilise les réacteurs biologiques à boues activées : On provoque le développement d'un floc bactérien dans un bassin d'aération alimenté en eau résiduaire en brassant suffisamment la masse pour éviter la décantation des flocons et en fournissant l'oxygène nécessaire à la prolifération des micro-organismes (**SALGHI, 2000**).

Le traitement par boues activées est très largement utilisé. Il s'agit d'un réacteur qui contient les eaux à traiter, dans lequel est injectée une boue chargée de bactéries. Les bactéries consomment la matière organique et contribuent à l'élimination de l'azote et du phosphate.

A la sortie du réacteur, l'effluent passe dans un clarificateur. La boue décantée est séparée en deux flux : l'un rejoint le réacteur (ensemencement) et l'autre est évacué vers la filière des boues. L'action des bactéries dans le réacteur nécessite de l'oxygène. Selon (**FABY et BRISAUD, 1997**), une épuration biologique (boues activées puis bassin de clarification) permet d'éliminer 90 % des virus, 60 à 90 % des bactéries, mais par contre a peu d'effet sur les kystes de protozoaires et les œufs d'helminthes. Selon (**ASANO, 1998**), un traitement par boues activées élimine 90 % des bactéries entériques, 80 à 99 % des entérovirus et des *Rotavirus*, 90 % de *Giardia* et de *Cryptosporidium*.

L'élimination a lieu grâce à la sédimentation des MES, la compétition avec les micro-organismes non pathogènes et la température ; la part la plus importante est due à la sédimentation. A titre d'exemple on peut citer le cas de la station d'épuration de Cambéréne qui fonctionne par boues activées et dont le traitement évolue du stade prétraitement jusqu'à la chloration en passant par le traitement primaire, la décantation, la clarification et la filtration.

b) L'EPURATION SUR LIT BACTERIEN

Il est le plus ancien procédé biologique. Des bactéries sont cultivées sur un substrat neutre, comme de la pierre concassée, de la pouzzolane (sable volcanique), du mâchefer ou du plastique. On fait passer l'effluent sur le substrat. La difficulté consiste à trouver la bonne vitesse du flux d'eau, qui ne doit pas être trop rapide (pour permettre la dégradation bactérienne) ni trop lent (pour une bonne évacuation des MES en excès). Une épuration sur lit bactérien élimine non seulement virus et bactéries (respectivement 30 à 40 % et 50 à 95 %) mais aussi les œufs d'helminthes (20 à 90 %) et les kystes de protozoaires (83 à 99 % des kystes *d'Entamoeba histolytica*) (**FABY et BRISAUD, 1997**).

c) PAR BIOFILTRE

Le dernier traitement biologique mis au point est le biofiltre, qui combine les actions épuratrices de la filtration et de l'activité microbienne. C'est un traitement intensif qui est rapide à mettre en place, qui prend peu de place, et qui ne nécessite pas de bassin de clarification. Il est donc beaucoup utilisé dans les unités de traitement individuelles. Par contre, il nécessite un nettoyage fréquent du filtre. Son efficacité serait similaire à celle des boues activées (**BAUMONT et al., 2005**).

2-1-2-4) LES TRAITEMENTS EXTENSIFS : LE LAGUNAGE

Le schéma de principe de l'épuration des eaux par lagunage est plus simple et moins dispendieux que ceux des autres types de traitements classiques. En effet, grâce à un système de bassins placés en série et exposés à l'air libre, les eaux usées subissent un traitement biologique. Les bassins ont une faible profondeur et une grande surface favorisant une épuration bactérienne aérobie. Ce système ne nécessite pas des dépenses d'énergie pour la fourniture d'oxygène puisqu'il est fourni par les microphytes et par une grande interface air - eau. Ainsi, la succession de plusieurs bassins en série permet de réaliser les étapes suivantes:

- une décantation primaire pour l'élimination des matières organiques en suspension qui s'effectue par simple sédimentation.
Ce processus physique assez lent, a le temps de s'effectuer car l'une des particularités des stations de lagunage est le temps de séjour qui est très long ;
- une épuration secondaire permettant la dégradation des molécules organiques qui résultent de l'activité des micro-organismes présents dans l'eau et utilisant l'oxygène fourni par le phytoplancton (photosynthèse) ;
- une épuration tertiaire qui peut être partiellement réalisée en fin de station où on assiste à un phénomène d'eutrophisation (développement exceptionnel d'algues). Les éléments éliminés durant ce traitement sont l'azote et le phosphore ; le lagunage à macrophytes joue à ce niveau un rôle important (**GAYE et NIANG, 2002**).

Le lagunage est donc un moyen peu coûteux et efficace pour le traitement des eaux usées. Il nécessite peu de moyens financiers, techniques et humains.

Cependant, il requiert une surface importante. On retiendra que l'efficacité du traitement dépend surtout de la durée de rétention et des conditions climatiques. Ainsi, il est moins efficace en hiver qu'en été (**BAUMONT et al., 2005**).

2-2) ETAT DE LA SITUATION AU SENEGAL

Au Sénégal, la ville de Dakar et sa banlieue rejettent aujourd'hui près de 200.000 mètres cubes (m^3) d'eaux usées par jour et sur cette masse importante, seulement 20.000 sont traitées dont une partie réutilisée (5000) et l'autre rejetée en mer (**source : ONAS**).

Ainsi, ces quantités importantes d'eaux usées rejetées au niveau de la mer, en dépit des problèmes d'eau potable auxquels sont confrontés les populations, offrent une alternative crédible dans la gestion de l'eau au Sénégal.

2-2-1) RESEAU D'ASSAINISSEMENT DE LA VILLE DE DAKAR

La ville de Dakar est la ville la plus urbanisée et la plus peuplée au Sénégal. Elle héberge 54 % de la population urbaine ce qui fait d'elle une grande productrice d'eaux usées. (**AKPO, 2006**).

La station d'épuration de Cambéréne est la seule station classique dont dispose la capitale, son implantation a permis de traiter quotidiennement 20.000 m³ d'eaux usées, ce qui est insignifiant par rapport au volume total de 200.000 m³ d'eaux usées.

Les eaux résiduaires urbaines qui alimentent cette station proviennent des quartiers tels que Parcelles Assainies, Patte d'Oie, Pikine, Almadies, Maristes, Yoff, Grand Yoff, Nord et Ouest Foire, Liberté 6 et Guédiawaye. (**ONAS**)

Donc les autres quartiers de la banlieue comme par exemple Thiaroye, Pikine, Yeumbeul, etc. sont laissés en rade ou bien à l'assainissement autonome qui est une des conséquences de la pollution des nappes phréatiques des zones concernées.

Dans d'autres quartiers comme Médina, Fass, Gueule Tapée, etc., les eaux usées sont rejetées sans traitement dans la mer, ce qui n'est pas sans conséquence sur l'écosystème marin.

Sur une longueur totale de 576 Km, le réseau d'eaux usées de la ville de Dakar est divisé en deux parties : les eaux usées prétraitées et les eaux usées non traitées.

La carte suivante nous permet d'être mieux édifiés sur la situation des rejets à Dakar.



Carte des rejets en mer des eaux usées à Dakar

Source : (ONAS, 2007)

D'après cette carte, on constate bien que la longueur du réseau des eaux usées non traitées dépasse de loin celle des eaux usées traitées. Ce qui a pour conséquence la pollution du milieu marin due aux rejets de volume important d'eaux usées brutes.

En outre, nous avons remarqué l'absence du réseau d'assainissement de l'ONAS dans plusieurs localités parmi lesquelles on peut citer Thiaroye, Pikine, Yeumbeul, etc. Celles-ci bénéficient le plus souvent d'un assainissement autonome avec la mise en place de fosses septiques qui sont les principales sources de pollution de la nappe phréatique en zone urbaine.

2-2-2) IMPACTS DES REJETS D'EAUX USEES NON TRAITEES SUR L'ENVIRONNEMENT

2-2-2-1) Sur l'écosystème aquatique

L'introduction massive de matières organiques et d'éléments nutritifs (azote, phosphore) dans les eaux de surface perturbe les équilibres naturels des écosystèmes aquatiques. Ces apports sont dus principalement à des rejets directs d'effluents (domestiques, industriels et agricoles), à l'écoulement d'eaux de ruissellement contaminées après leur passage sur des surfaces agricoles et non agricoles.

La manifestation la plus visible de ce type de pollution est l'eutrophisation des cours d'eau, qui se traduit par un développement excessif d'algues et un appauvrissement de l'eau en oxygène, avec pour conséquence un risque accru de mortalité chez certains organismes aquatiques (**BRAHY, 2006**)

2-2-2-2) Sur La nappe phréatique

La pollution des nappes phréatiques par les rejets d'eaux usées non traitées se font le plus souvent dans des zones où il n'y a pas d'assainissement collectif. La majeure partie des quartiers de la banlieue d'arrondissement bénéficiant d'un assainissement autonome avec la mise en place des fosses septiques qui est une des causes majeures de cette pollution.

La contamination des nappes est influencée par la nature elle-même de la nappe. Car une nappe libre ou superficielle est plus exposée à une contamination qu'une nappe captive qui est bien protégée.

Par exemple dans les localités de Thiaroye, Pikine et Yeumbeul (plus précisément dans la zone des Niayes), la nappe est superficielle et par conséquent exposée aux rejets d'eaux usées non traitées et aux fosses septiques qui y déposent directement par infiltration leurs matières organiques. Ce qui a pour conséquences la forte teneur en nitrate et en coliformes fécaux des eaux dans cette localité.

Les travaux de (**GAYE et NIANG, 2002**) montrent des concentrations de 17000 CF/ 100 ml observées dans les eaux de céan à Pikine, 17 fois plus élevées que les normes de réutilisation dans eaux usées dans l'agriculture sans restriction.

D'après les travaux de (**UNESCO, 1997**) sur la nappe phréatique à Yeumbeul, les résultats indiquent des concentrations moyennes de nitrates (NO_3^-) de 189 mg/l et des concentrations maximales de 350 mg/l, ce qui dépasse de loin la norme acceptable par l'OMS, qui est de 50 mg/l. Ceux-ci

seraient liés pour une grande part aux latrines familiales non étanches qui sont noyées pratiquement dans la nappe dans certaines zones.

2-2-3) LES STATIONS D'EPURATION DES EAUX USEES DOMESTIQUES

Outre les stations d'épuration des eaux résiduaires industrielles dont disposent certaines industries, l'Etat du Sénégal a mis en place des stations de traitement des eaux résiduaires urbaines dans certaines de ses villes. Ainsi le tableau suivant nous édifie sur la situation actuelle du Sénégal en matière d'épuration des eaux usées urbaines.

Tableau 5: Les stations d'épuration des eaux usées domestiques au Sénégal

Villes	Nombres de branchements	Nombre de stations d'épuration	Type	Capacité (E.H)	Volume (m ³ /jour)
Dakar	64 250	1	Boues activées	200.000	20.000
Rufisque	2000	1	Lagunage à microphytes	20.000	2000
ST Louis	3 600	1	Lagunage à microphytes	20.000	2170
Louga	556	1	Lagunage à microphytes	20.000	725
Saly Portudal	Hôtels	1	Lagunage à microphytes	20.000	725
Kaolack	525	1	Lagunage à microphytes	20.000	725
Thiès	-	1	Boues activées	20.000	3000
Total	70.931	7		320.000	29.345

Source : (ONAS, 2007)

2-2-4) LES NORMES SENEGALAISES

La consommation d'eau produit par la suite une quantité considérable d'eaux usées qui doivent être remises dans le milieu naturel avec des

caractéristiques de qualité devant répondre aux exigences imposées par une réglementation soucieuse de la protection de l'environnement.

Dans le souci de la protection de l'environnement et d'une éventuelle réutilisation des eaux résiduaires, le Sénégal a mis en place des normes de rejet des eaux usées selon le code de l'environnement instauré depuis 2000.

Tableau 6 : Les concentrations limites applicables au Sénégal au rejet d'eaux usées dans le milieu naturel

PARAMETRES	CONCENTRATIONS LIMITES	OBSERVATIONS
TEMPERATURE	30±5	-
pH	6-9	-
MES (mg/l)	50	-
DCO (mg O ₂ /l)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 200 mg/l si le flux journalier n'excède pas 100kg/jour ▪ 100 mg/l (au-delà de 100kg/l) 	Des valeurs limites de concentrations différentes peuvent être fixées par l'arrêté d'autorisation, lorsqu'il existe une valeur limite exprimée en flux spécifique de pollution.
DBO5 (mg O ₂ /l)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 80 mg/l si le flux journalier n'excède pas 30 kg/l ▪ 40 mg/l (au-delà) 	-
AZOTE TOTAL (mg /l)	30 mg/l (lorsque le flux journalier est \geq 50 kg/jour)	Des valeurs limites de concentrations différentes peuvent être fixées par l'arrêté d'autorisation, lorsque le rendement de la station d'épuration de l'installation atteint au moins 80% pour les installations nouvelles et 70% pour les installations modifiées
PHOSPHORE TOTAL (mg/l)	10 mg/l (lorsque le flux journalier est \geq 15	Des valeurs limites de concentrations

	kg/jour	différentes peuvent être fixées par l'arrêté d'autorisation,
COLIFORMES FECAUX	2000 UFC/ 100 ml	-

Source : (ISN, 2001)

La norme NS 05-061 Juillet 2001 qui définit ces valeurs s'applique aux rejets des eaux usées dans les limites territoriales du Sénégal, qu'ils soient sur des milieux récepteurs tels que des eaux de surface, souterraines ou marines.

Elle prévoit une législation particulière pour les milieux sensibles et intègre ainsi la possibilité d'introduction de valeurs plus sévères pour ces milieux. Excepté l'azote, aucun pourcentage de réduction des formes de pollution domestiques n'a été défini. Cela aurait l'avantage avec des eaux usées à fortes charges, de tenir compte de l'effort d'épuration à faire par la communauté pour l'élimination de la pollution.

CHAPITRE 3 : POTENTIELS DU *Moringa oleifera* ET EPURATION NATURELLE

3-1) POTENTIELS DU *Moringa oleifera Lam*

3-1-1) INTRODUCTION

Moringa oleifera Lam (Synonyme: *Moringa pterigosprema Gaertner*) appartient à une famille mono générique d'arbres et d'arbustes, les Moringacées. La famille des Moringacées comprend un seul genre, et quatorze espèces parmi les quelles seul le *Moringa oleifera Lam* est largement connu comme arbre à usages multiples. Il semble être originaire des régions d'Agra et de Oudh, au nord-est de l'Inde, au sud de la chaîne de montagne de l'Himalaya. *Moringa oleifera* est mentionné dans le « Shushruta Sanhita », écrit au début du premier siècle avant J-C, sous le nom de « Shigon ». Mais il semble que la culture de cet arbre en Inde ait en fait été établie il y a plusieurs milliers d'années. (**FOIDL et al., 2001**) Les Indiens savaient que les graines, qu'ils utilisaient en médecine, contenaient de l'huile comestible. Il semblerait également que la plupart des gens connaissaient sa valeur en tant que fourrage ou comme légume. Dans la langue dravida, on trouve diverses appellations locales pour désigner cet arbre, mais la plupart dérivent du nom générique « Morunga ». On le connaît sous les noms de « Horseradish tree », « Drumstick tree », « Never die tree », « West Indian Ben tree », « Radish tree » en anglais et sous le nom de « saiyan » en indien (**FOIDL et al., 2001**).

Le *Moringa oleifera* ou « nebedei » en wolof, tiré de l'anglais « never dies » (qui ne meurt jamais) bien qu'étant originaire d'Asie, se trouve dans toute l'Afrique, en Amérique du Sud et est cultivé aujourd'hui à travers le Moyen-Orient.

En Afrique de l'Ouest, il est apprécié pour ses propriétés médicinales et la qualité nutritionnelle de ses feuilles (par exemple le « Mbuum u nebedei »

au Sénégal, qui est un plat très consommé, à base de couscous, associe feuilles de *Moringa*, arachides broyées et viande ou poisson).

Selon la tradition indienne de l'ayurveda, les feuilles de *Moringa* guérissaient plus de 300 maladies. Par ailleurs, ses graines contiennent une protéine qui, mise en solution dans l'eau, se comporte en polyélectrolyte (tel le sulfate d'alumine) et permet la sédimentation des particules en suspension dans l'eau (**WIKIPEDIA, 2007**).

Les propriétés des polypeptides naturels obtenus à partir des graines de *Moringa* sont connues depuis des siècles en Chine. Lors de la colonisation de l'Inde par les Britanniques, ces connaissances ont été disséminées ailleurs dans le monde.

Elles ont été mises à profit très efficacement en Egypte et au Soudan, notamment, pour purifier l'eau du Nil pour la consommation humaine.

Ainsi, parmi ses usages multiples, c'est la « purification » des eaux en particulier les eaux usées clarifiées qui nous intéresse et qui est même l'objet de notre sujet de recherche.

3-1-2)MORPHOLOGIE ET CARACTERISTIQUES PHYSIOLOGIQUES DE LA PLANTE

Moringa est un arbre pérenne, à croissance rapide, qui peut atteindre 7 à 12 mètres de hauteur et dont le tronc mesure 20 à 40 cm de diamètre.

Les fruits forment des gousses à trois lobes, mesurant 20 à 60 cm de long, qui pendent des branches. Lorsqu'ils sont secs, ils s'ouvrent en trois parties. Chaque gousse contient entre 12 et 35 graines.

Les graines sont rondes, avec une coque marron semi-perméable. La coque présente trois ailes blanches qui s'étendent de la base au sommet à 120 degrés d'intervalle. Un arbre peut produire 15000 à 25000 graines par an. Une graine pèse en moyenne 0,3 g et la coque représente 25% du poids de la graine (**MAKKAR et BECKER, 1997**).

Les caractéristiques physiques des gousses et des graines sont présentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Propriétés physiques des gousses et des graines de *Moringa*

Détermination	1	2	3
Poids moyen des gousses (g)	7,60	-	7,95
Poids moyen des graines par gousse (g)	3,59	5,03	4,83
Nombre moyen de graines par gousse	12	17	16
Poids moyen de 100 graines (g)	29,90	29,60	30,2

Poids moyen de 100 amandes (g)	21,20	-	22,5
Poids de l'amande par rapport au poids de la graine (%)	72,50	-	74,50
Teneur en eau de l'amande (%)	4,50	-	6,50

Source : 1. Ferrao et Ferrao (1970) ; 2. Foletti (communication personnelle) ; 3. Biomasa. **IN (FOIDL et al., 2001)**

3-1-3) ECOLOGIE

Cet arbre se rencontre à l'état naturel jusqu'à 2000 m d'altitude au Zimbabwe et peut se développer jusqu'à moins de 600m (-600 m). Il pousse relativement bien sur les versants mais plus répandu dans les zones de pâturages et les bassins des rivières. Il pousse rapidement, jusqu'à 6 ou 7 mètres en un an, même dans des zones recevant moins de 400 mm de précipitations annuelles (ODEE, 1998) cité par (**FOIDL et al., 2001**).

C'est une plante ubiquiste qui résiste à la sécheresse et à une croissance rapide. Elle pousse dans les terrains les plus pauvres et les plus arides. Elle est peu exigeante en eau et peut également survivre dans des milieux où les températures annuelles sont comprises entre 18,7°C et 28,5°C où le pH est compris entre 4,5 et 9 (**FOIDL et al., 2001**).

3-1-4) DIFFERENTES UTILISATIONS DE LA PLANTE.

De par ses utilisations variées, le *Moringa oleifera* est appelé arbre à usages multiples. Son importance s'est révélée sur le plan de la médecine traditionnelle, sur le plan nutritionnel, traitement de l'eau, etc.

3-1-4-1) USAGES MEDICINAUX

La médecine traditionnelle indienne (Ayurveda, Siddha et Unani) est particulièrement riche en informations sur les propriétés du *Moringa oleifera*.

Des molécules originales telles que la pterygospermine, un antibiotique, ont été identifiées par analyse chimique et beaucoup de recherches pharmaceutiques ont confirmé ce que les pratiques traditionnelles indiquaient.

Parmi ces résultats, on peut citer l'effet hypcholestérolémique des feuilles de *M. oleifera* (**Ghasi et al., 2000**), l'activité contraceptive des racines de *M. oleifera* (**Shukla et al., 1988**), l'activité hypotensive de certains

composants identifiés des feuilles (**Faisi et al., 1994**) et des fruits (**Faisi et al., 1998**) de *Moringa*, l'effet anti-ulcéreux des boutons floraux de *M. oleifera* (**Aktar et Ahmad, 1995**), l'effet anti-tumoral des feuilles de *M. oleifera* (**Murakami et al., 1999; Guevara et al., 1999**) ; cités tous par (**SAINT-SAUVEUR, 2001**)

Des chercheurs se sont engagés récemment dans un programme de recherche sur l'utilisation des feuilles de *Moringa oleifera* comme stimulant immunitaire pour les personnes atteintes du VIH.

Au Zimbabwe également, la poudre de feuilles de *Moringa* est utilisée par les gens atteints du VIH.

La poudre de feuille de *Moringa* a le potentiel de devenir un aliment médical ou "aliment" d'usage courant, aussi bien dans les pays industrialisés que non industrialisés (**SAINT-SAUVEUR, 2001**).

3-1-4-2) USAGES ALIMENTAIRES

En Inde, le *Moringa* est une plante vivrière cultivée pour ses fruits, qui sont mangés cuits et exportés frais ou en conserve.

Les gousses de *Moringa* sont parmi les légumes les plus utilisés pour la cuisine dans le sud de l'Inde, où leur saveur originale est très appréciée.

Utilisé quotidiennement par les familles, le *Moringa* se trouve dans les cours de plus de 2 millions de familles dans le sud de l'Inde (**RAJANGAM et al., 2001**).

Des analyses nutritionnelles ont montré que les feuilles de *Moringa oleifera* sont plus riches en vitamines, minéraux et protéines que la plupart des légumes. Elles peuvent se substituer aux petits pois et aux arachides et constituent un aliment complet puisqu'elles contiennent deux fois plus de lipide que le lait, trois fois plus de potassium que la banane, quatre fois plus de vitamine A que la carotte et sept fois plus de vitamine C qu'une orange.

Beaucoup de programmes utilisent les feuilles de *Moringa oleifera* contre la malnutrition et ses maladies associées (cécité, etc.). (**WIKIPEDIA, 2007**). Ainsi, la poudre de feuilles de *Moringa* est utilisée dans les maternités au Sénégal, pour améliorer l'alimentation des femmes et des bébés (**SAINT-SAUVEUR, 2001**).

International Eye Foundation et Helen Keller International, deux ONG impliquées dans la lutte contre la déficience en vitamine A , utilisent les feuilles de *Moringa* comme source de précurseur de vitamine A. On peut également extraire de ses graines une huile alimentaire intéressante, notamment en Afrique où beaucoup de pays manquent d'huiles alimentaires, et une matière première intéressante pour l'industrie cosmétique (savon, parfum). Une utilisation mixte du *Moringa*, pour la production d'huile et d'agent flocculant, est possible car le tourteau issu de l'extraction d'huile conserve ses capacités flocculantes. Ses racines servent à

produire un condiment alimentaire. D'autres applications potentielles du Moringa, comme son utilisation dans l'alimentation animale, comme hormone de croissance végétale, comme engrais vert en phytopharmacie fait l'objet de recherches nombreuses (**WIKIPEDIA, 2007**).

3-1-4-3) ACCELERATEUR DE CROISSANCE VEGETALE

L'extrait à l'éthanol à 80 % obtenu à partir des feuilles de Moringa contient des facteurs de croissance (hormones du type cytokinine). Cet extrait peut être utilisé en aspersion sur les feuilles pour accélérer la croissance des jeunes plants. Ce traitement aux hormones de croissance augmente aussi la robustesse des plants et leur résistance aux maladies. De plus, les fruits sont plus abondants et plus gros, ce qui augmente le rendement des arbres lors de la récolte.

L'extrait s'obtient soit par pressage, soit à l'aide d'un ultra-turrax avec filtration de 20 g de feuilles tendres dans un volume total de 675 ml d'éthanol aqueux à 80 % (**MAKKAR et BECKER, 1997**).

3-1-4-4) SOURCE DE BIOGAZ

Des plants de *Moringa* (âgés de 30 jours environ) sont broyés avec de l'eau. Les fibres sont séparées par filtration sur des mailles de 5 mm. La fraction liquide est ensuite ajoutée à un réacteur à biogaz. La teneur moyenne en méthane du gaz produit est de 81%.(**FOIDL et al., 2001**).

3-1-4-5) ESSENCE FOURRAGERE

Les qualités nutritives du Moringa sont excellentes, ce qui en fait une source de fourrage de très bonne qualité pour les bovins et facilement accessible. Les feuilles sont riches en protéines, en carotène, en fer et en acide ascorbique, et les gousses ont une teneur élevée en lysine, un acide aminé (**CSIR, 1962 ; Chawla et al., 1998; Dogra et al., 1975**) cités par (**FOIDL et al., 2001**).

3-1-4-6) TRAITEMENT DE L'EAU

Historiquement, les premiers coagulants étaient d'origine minérale ou végétale, mais le manque de connaissance scientifique sur leurs mécanismes d'action a conduit à leur remplacement par des produits chimiques. Cependant, on s'y intéresse de nouveau aujourd'hui car de tels coagulants sont sûrement les mieux adaptés au traitement de l'eau dans les pays en voie de développement. Par exemple, *Moringa Oleifera*, ou " arbre clarificateur ", la plus répandue

en Afrique, est un coagulant naturel au même titre que le phosphate d'alumine.

Le principe actif des graines de *Moringa Oleifera* est une protéine cationique ($M = 13\,000$ g/mol), soluble dans l'eau. Cette protéine permet d'abattre à la fois la turbidité et les micro-organismes. L'efficacité des graines est comparable à celle des sels d'aluminium et elles sont, de plus, non toxiques pour l'Homme et les animaux (**CHANTREL et SAINT SAUVEUR, 2002**).

Les polyélectrolytes cationiques neutralisent les matières colloïdales dans les eaux boueuses ou sales, puisque la majorité de ces matières a une charge électrique négative. Cette protéine peut donc être utilisée comme polypeptide naturel non toxique pour provoquer la sédimentation des particules minérales et organiques dans les processus de purification de l'eau potable. Elle agit donc comme un coagulant primaire en créant en permanence des ponts naturels entre les particules colloïdales, contrairement aux coagulants industriels qui sont parfois toxiques, si bien que leur utilisation correcte exige une main d'œuvre qualifiée. La majorité des pays en développement n'a pas les moyens de produire ces coagulants industriels, qui sont chers et grèvent lourdement les réserves en devises de ces pays. (**FOIDL et al., 2001**)

Cette protéine est libérée lorsque la poudre, issue du broyage des graines, est solubilisée dans l'eau trouble. Les matières en suspension dans l'eau s'agglomèrent alors et tombent au fond du récipient par gravité.

L'eau surnageante est claire, mais pas totalement stérile. Cette méthode est traditionnellement utilisée à l'échelle de la famille par certaines populations d'Afrique de l'Est et notamment au Soudan pour obtenir une eau de boisson (**FOIDL et al., 2001**).

L'institut des établissements humains à Bandung (Indonésie) a travaillé sur un traitement par coagulation et filtration familiale au *Moringa* (25 litres) et sur une unité de traitement plus large de 200 litres avec une agitation manuelle du *Moringa* puis une filtration sur gravier, sable et charbon de bois (**JAHN et AL AZHARIA 1989**)

Une équipe germano-burundaise a créé une usine d'une capacité de $2,5\text{m}^3/\text{j}$ desservant 100 personnes. L'eau traverse gravitairement le bassin de dessablement, le décanteur et le filtre à sable lent de l'installation tandis que la solution floculante est ajoutée continuellement à l'effluent brut (**JAHN et AL AZHARIA 1989**)

En plus à l'université technique de Biomasa, des études ont été menées sur l'utilisation de graines de Moringa pour le traitement final dans des unités d'épuration des eaux usées. Dans les lagons d'oxydation, 80 % de la DBO de l'eau provient d'algues monocellulaires (**FOIDL et al., 2001**).

De plus, ces algues renferment 40 à 60 % de l'azote et du phosphore contenus dans les eaux usées avant traitement. Pour éviter l'eutrophisation

des cours d'eau et des lacs par l'écoulement de charges importantes de phosphore et d'azote, les graines peuvent être utilisées pour coaguler les algues et les éliminer par sédimentation. Ce traitement permet d'éliminer jusqu'à 98 % des algues présentes. Après sédimentation, les eaux résiduelles deviennent claires et transparentes. Ce traitement réduit d'autre part la DBO de l'eau d'environ 70%, et sa teneur en phosphore et en azote de 60 %. (**FOIDL et al., 2001**)

Le polyélectrolyte cationique du *Moringa* réagit préférentiellement avec la matière organique, les doses requises varient donc en fonction du taux de matière organique présent dans l'eau (**FOLKARD, 1997**).

Ce floculant n'affecte pas le pH et diminue les taux de fer et de manganèse. Selon (**FOIDL et al., 2001**), pour assurer le traitement final des eaux usées d'une ville de 10 000 ha bitants, il faut environ 960 kg de tourteau de *Moringa* par jour. Une plantation d'environ 105 ha à 1100 arbres/hectare permettrait donc de produire assez de graines pour traiter les eaux usées de la ville. Cependant, le volume et le poids importants du tourteau de *Moringa* pose des problèmes de stockage et de gestion. Le Département de Biomasa a donc développé un processus permettant de concentrer les polypeptides par ultrafiltration après leur extraction à l'eau et à l'alcool.

Cette forme post-concentrée élimine 80 % du poids total tout en conservant les caractéristiques physico-chimiques utiles du produit. La forme préconcentrée présente d'autre part un goût amer qui doit être éliminé avant incorporation dans des produits alimentaires.

En résumé la figure 1 ci-dessus illustre d'une manière simpliste les différents usages du *Moringa*.

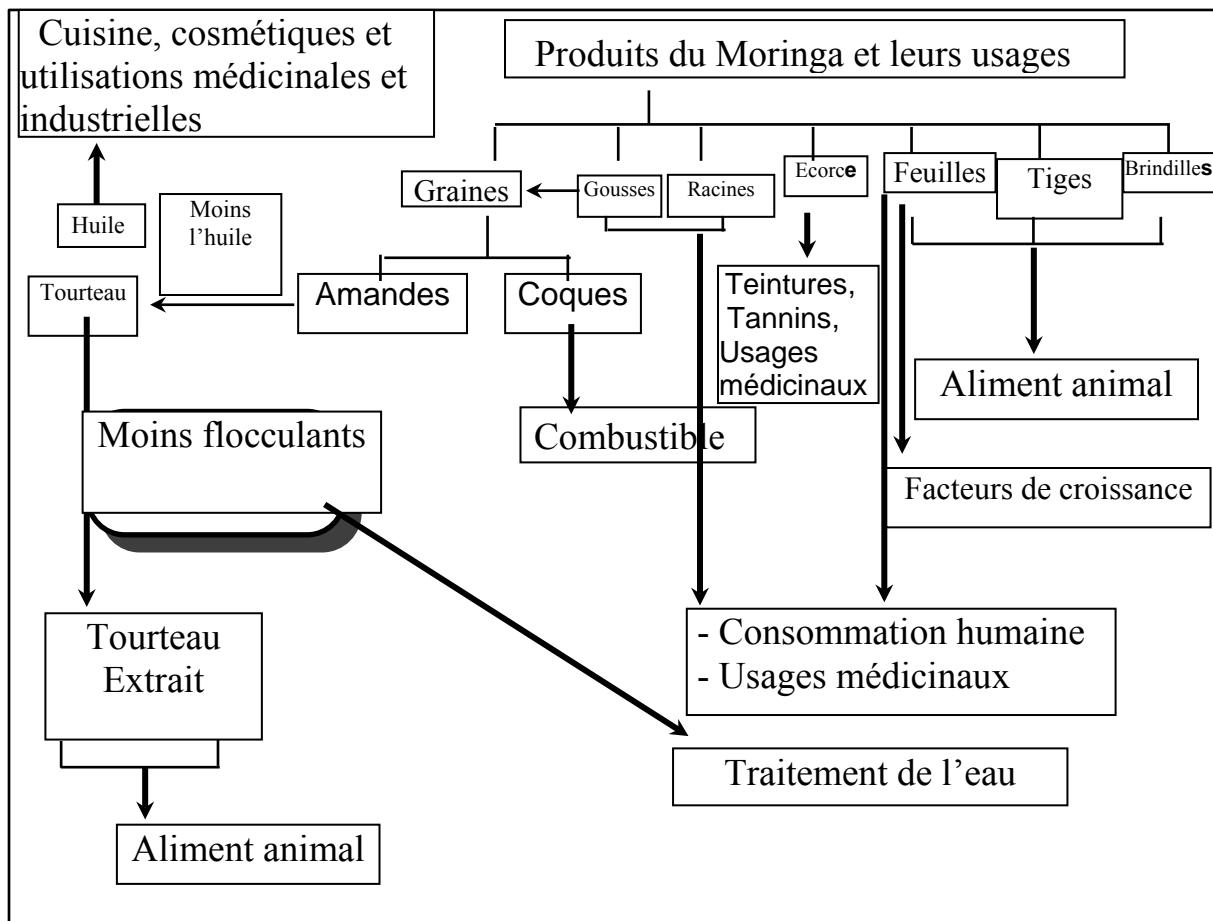


Figure 1 : Utilisations des différents organes de *Moringa*.

Source : (FOIDL *et al.*, 2001)

3-2) EPURATION NATURELLE (VEGETALE) DES EAUX

Le *Moringa oleifera*, comme les autres floculants chimiques (alun, phosphate d'alumine...) est un floculant primaire très efficace dans le traitement de l'eau.

Cependant, il est plus utilisé dans le traitement de l'eau potable que dans le traitement des eaux usées et son utilisation est plus accentuée au niveau des zones rurales.

3-2-1) DIFFERENTES FORMES DU FLOCULANT

La graine de *Moringa* peut s'utiliser comme floculant telle quelle ou transformée.

3-2-1-1) POUDRE BRUTE

Les graines sont réduites en poudre sans autre transformation. Elles contiennent, en plus du principe actif, de l'huile et des matières organiques. La matière organique apportée par les graines favorise la croissance bactérienne dans l'eau, ce qui est un handicap. Il semblerait que l'huile freine l'activité floculante et que les montmorillonites facilitent la coagulation mais les données ne sont pas très précises sur ces deux points. (**JAHN et AL AZHARIA, 1988**).

3-2-1-2) TOURTEAU

Les interactions potentielles entre les protéines et l'huile laissent penser qu'un tourteau obtenu après extraction de l'huile serait plus efficace pour des traitements à grande échelle (ce qui ne semble pas poser de problème pour l'échelle domestique). Cependant, il faut noter que la qualité protéique, donc l'efficacité floculante, peut varier en fonction des techniques d'extraction de l'huile (**FOLKARD, 1997**).

3-2-1-3) PROTEINE PURIFIEE

En 1995, Gassenschmidt et ses collaborateurs ont isolé une molécule issue des graines de *Moringa* qui présentaient des propriétés floculantes. Cette molécule, dénommée MO2.1, est une protéine qui a été purifiée et dont la séquence en acides aminés a pu être déterminée. Afin d'obtenir un floculant naturel efficace, la protéine MO2.1 peut être extraite à partir des graines de *Moringa sp*, ou produite par un organisme génétiquement modifié tel que la levure ou la bactérie *Escherichia coli*. Dans les deux cas, les coûts et la technicité requise sont élevés. (**SAINT SAUVEUR et al., 2001**). L'extrait brut protéique non fractionné est moins actif que les fractions obtenues après échange cationique. Des interactions protéiques sont sans doute la cause de cette baisse d'activité floculante (**FOLKARD, 1997**).

3-2-1-4) PHYTOFLOC™

La société Optima Environnement S.A. a mis au point un floculant à base de protéines actives de *Moringa oleifera*. Le floculant obtenu par cette entreprise s'appelle le Phytofloc™ et est destiné à être utilisé à l'échelle industrielle dans les stations de traitement de l'eau classiques. Phytofloc™ est un dérivé extrait du *Moringa oleifera*. C'est un produit naturel qui se substitue aux produits chimiques. Ce produit n'a subi aucune modification génétique. Phytofloc™ se compose en grande partie de protéine à faible densité moléculaire qui permettent d'éliminer des particules en suspensions comme le feraient des poly électrolytes cationiques synthétiques (**CHANTREL E et SAINT SAUVEUR, 2002**).

3-2-2) BACTERIOLOGIE

Les graines de Moringa sont souvent qualifiées de « purifiantes », ce qui laisse entendre qu’elles tuent les germes présents dans l’eau. Ce n’est pas le cas, en tout cas aux doses utilisées pour la flocculation.

En réalité, le principe même de la flocculation diminue fortement le taux de germes, car une grande majorité est éliminée avec les matières en suspension, lorsque celles-ci précipitent et sont séparées de l’eau claire. La baisse de turbidité constitue donc une purification partielle.

Cependant, en l’absence de traitement ultérieur (chloration, traitement à l’ozone ou aux UV par exemple), les germes restants dans l’eau se multiplient rapidement et l’eau n’est pas potable. Même consommée immédiatement, on ne peut qualifier l’eau traitée par flocculation de stérile.

L’intérêt des graines de Moringa est donc de constituer un flocculant alternatif aux produits chimiques actuellement utilisés, mais pas de remplacer l’ensemble de la filière de traitement.

L’ambiguïté réside dans le fait que les graines de Moringa (comme d’autres parties de l’arbre) contiennent des composants bactéricides et fongicides. Le bactéricide fongicide 4(α -L-rhamnosyloxy benzyl isothiocyanate) est relâché par hydrolyse lors du broyage des graines. Le *M. stenopetala* en contient d’ailleurs davantage que le *M. oleifera*. Cependant, la désinfection demande des dosages très élevés de 200 grammes par litre (1/10 pour avoir un effet germicide avec *M. oleifera*). La dose utile à la flocculation est 500 à 2000 fois trop faible pour observer un effet antibiotique (**JAHN et AL AZHARIA, 1988**).

Les doses requises pour observer un effet stérilisant ne sont pas现实的 dans le cadre du traitement de l’eau, car elles impliquent un appport beaucoup trop important de matières organiques (la poudre de graines) qui souillent l’eau. Il faudrait donc isoler et purifier la molécule bactéricide et l’utiliser seule, ce qui ne serait pas rentable par rapport aux autres traitements existants.

En réalité, les graines de Moringa sont beaucoup plus intéressantes comme flocculant que comme désinfectant, et les deux fonctions ne peuvent être obtenues en même temps. (**CHANTREL et SAINT SAUVEUR, 2002**)

3-2-3) TOXICITE ET BIODEGRADABILITE

Les possibles effets néfastes ont été testés sur des colonies de *Salmonella* qui ne présentent aucune réaction mutagène avec 1000mg/l de *Moringa*

oleifera et sur les rats sur lesquels des doses de 50 à 500mg/kg ne montrent aucune toxicité (**JAHN et AL AZHARIA, 1988**). En plus elle est biodégradable contrairement aux autres coagulants chimiques.



DEUXIEME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 1: MATERIEL ET METHODES

1-1) CADRE DES ANALYSES

Les analyses se sont déroulées au laboratoire de la station d'épuration de Cambéréne et à celui du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) plus précisément au niveau du Groupe de Laboratoire d'Analyse (G.L.A).

1-2) PRODUITS UTILISES

Nous avons utilisé comme produits, des échantillons d'eaux usées « clarifiées » de la station d'épuration de Cambéréne, de la poudre de *Moringa oleifera Lam* et des produits de laboratoire.

1-3) MATERIEL DE PRELEVEMENT :

Nous avons utilisé des bouteilles de 2 litres pour les prélèvements au niveau de la station et une bouteille de 10 litres pour le transport des eaux clarifiées du laboratoire de la station à celui de BRGM.

1-4) MATERIEL ET PRODUITS DE LABORATOIRE

1-4-1) MATERIEL

Comme matériel de laboratoire nous avons utilisé :

- Béchers de 1 litre, flacons et éprouvettes de 2 l
- Burettes de 50 ml, de 100 ml et 150 ml
- Erlenmeyers de 50 ml, de 100 ml, de 110 ml
- Pipettes de 5, 10, 20, 25, 50, 100 ml
- Entonnoirs, Papiers filtres rapides, filtres sans cendre
- DCO- mètre, DBO- mètre, Conductimètre, pH-mètre
- Etuve à 105°C, Etuve à 110°C, Etuve à 150°C
- Plaque chauffante

- Balance « SARTORIUS » de précision
- Réfrigérateur
- Spectrocolorimetre, Photomètre de Flamme
- Centrifugeuse

1-4-2) PRODUITS DE LABORATOIRE

- Eau distillée
- Sel di-sodique de l'acide éthylène- diamine tétracétique (EDTA)
- Acide sulfurique (H_2SO_4)
- Acide chlorhydrique (HCl)
- Ammoniaque
- Réactif mixte du fer (O- phénantroline)
- Réactif de Grandval et Lajoux
- Solution d'alizarine
- Chlorure de Baryum ($Ba Cl_2$)
- Indicateurs colorés : Hélianthine, Phénophtaléine.

1-5) METHODES

1-5-1) ECHANTILLONNAGE

Les prélèvements sont effectués juste à la sortie du bassin de clarification appelé clarificateur.

Une eau usée clarifiée est une eau usée qui a subi par ordre les traitements suivants : un prétraitement, une décantation primaire, un bassin d'aération et une décantation secondaire ou clarification.

Le prétraitement consiste à éliminer les matières grossières ou visqueuses capables de nuire au bon fonctionnement du système : il s'agit de dégrillage (élimination des particules grossières) de dessablage, de déshuilage et de dégraissage.

La décantation primaire permet de séparer l'eau des boues primaires par contre le bassin d'aération est une étape typiquement biologique où se fait l'ingestion de boues chargées de bactéries permettant de dégrader la matière organique et enfin la clarification permet de séparer par décantation l'eau épurée des boues « secondaires » issues du traitement biologique. Cette décantation se fait dans les ouvrages spéciaux, le plus souvent circulaires appelés clarificateurs ou décanteurs secondaires.

1-5-2) ANALYSES PRELIMINAIRES

Ces analyses se sont déroulées au laboratoire de la station d'épuration de Cambéréne et ont porté sur les eaux clarifiées. Pour rendre ce document moins volumineux, nous avons jugé nécessaire de développer que quelques unes ici.

1-5-2-1) Température, pH, Conductivité, Salinité.

C'est la méthode électrochimique qui est appliquée pour mesurer ces paramètres.

En effet, lorsque le pH mètre multifonctions (Multiline P4) est étalonné, ses deux électrodes sont plongées dans l'échantillon à analyser.

De ce fait, l'appareil affiche directement le pH de la solution, sa température en degré celcius ($^{\circ}\text{C}$), sa conductivité en micro siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et sa salinité en gramme par litre (g/l).

1-5-2-2) LES MES : Méthode par pesée différentielle (NFT 90-105).

Après avoir imbibé d'eau distillée un pa pier sans cendre, puis séché à l'étuve à 105°C pendant 2 heures, il est refroidi pendant 15 minutes dans un dessiccateur et pesé (poids P_0). Ensuite, on procède à la filtration d'un volume V connu d'un échantillon de 100 ml. Après que la filtration soit terminée, le filtre est remis à l'étuve à 105°C pendant 3 heures, refroidi pendant 15 minutes dans un dessiccateur et pesé à nouveau (poids P_1).

Ainsi, la teneur en MES de l'échantillon exprimé en mg/l est donnée par la relation suivante : $[(P_1 - P_0)/V] \times 1000$.

1-5-2-3) LA DCO : méthode HACH (NFT 90-101)

Dans un tube contenant le réactif approprié (solution commerciale composée de HgSO_4 , H_2SO_4 , Ag_2SO_4), on fait introduire 2 ml d'échantillon. Le tout est chauffé à 150°C dans un four à DCO pendant 2 heures. Ensuite, après refroidissement, la lecture est effectuée au spectrophotomètre (DR 2000 HACH) à 620 nm. La DCO s'exprime en mg O_2/l .

1-5-2-4) LA DBO5 : méthode manométrique (NFT 90-103)

La méthode manométrique ou méthode instrumentale du système de Warburg, consiste à introduire un volume V connu d'échantillon de 43,5 ml

d'eau usée brute ou 250 ml d'eau clarifiée dans une bouteille à DBO renfermant un agitateur mécanique.

Pour absorber le CO₂ provenant de la respiration des micro-organismes, on verse 0,5 à 1 ml d'hydroxyde de potassium (KOH) 20 % à 40% dans le capuchon bouchant la bouteille. Ainsi, la fermeture du flacon permet d'établir le raccordement avec le tube manométrique gradué contenant du mercure.

Ensuite le flacon est déposé dans le DBO mètre pendant 30 minutes (durée nécessaire pour stabiliser la température du système à 20°C), on serre le bouchon, support du manomètre et on ajuste au zéro.

A l'aide du déplacement du mercure, on mesure la dépression causée par la consommation d'oxygène. La lecture est faite tous les jours jusqu'au cinquième, on obtient alors la DBO5 exprimée en mg O₂/l.

1-5-3) PREPARATION DE LA POUDRE DE M ORINGA OU AMANDE

Les gousses de *Moringa oleifera* sont récoltées après qu'elles soient devenues matures en séchant naturellement sur l'arbre jusqu'à ce qu'elles soient de couleur brune.

Une fois les gousses récoltées, les graines sont retirées, puis décortiquées (les ailes et l'enveloppe autour de l'amande sont retirées pour permettre une meilleure efficacité du produit), seules les graines blanches ou jaunâtres sans signe de ramollissement, de décoloration ou d'extrême dessèchement sont utilisées (**JAHN, 1988**)

La graine (l'amande) est broyée et tamisée (**FOLKARD et al, 2002**), avec des trous de 0,8 mm ou équivalents. La technique traditionnelle du pilon/mortier, utilisée pour fabriquer la farine de maïs a été considérée comme acceptable pour broyer les graines de *Moringa oleifera* (**FOLKARD et al, 2002**). Ainsi, après broyage et tamisage, la poudre ou amande est mise dans un sachet en plastique. Il faut signaler que la présence d'air dans le sachet peut favoriser le colmatage de la poudre.

1-5-4) PREPARATION ET DESCRIPTION DE LA SOLUTION MERE

La poudre fine de *Moringa oleifera* est mélangée avec de l'eau distillée. Ainsi la masse de poudre et le volume d'eau distillée étant connus. On brasse vigoureusement la solution pendant cinq (5) minutes pour permettre la dissolution de l'amande et par voie de conséquence l'extraction de la molécule polyélectrolyte cationique. Après décantation on procède à la

filtration, ainsi le filtrat est appelé solution mère de *Moringa oleifera* et est utilisé pour la « purification » des eaux

Cependant il faut noter le fait que les solutions mères ne peuvent pas être conservées pendant longtemps surtout lorsqu'on est dans un climat chaud.

1-5-5) PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le protocole expérimental est synthétisé en deux phases essentielles : une première phase où on a utilisé la poudre de *Moringa* ou amande et une seconde phase où on a utilisé la solution mère de *Moringa*

1-5-5-1) POUDRE DE *Moringa Oleifera* OU AMANDE

Après avoir filtré l'échantillon d'eau usée clarifiée venu de la station d'épuration de Cambéréne, celui-ci est prélevé dans des bêchers de capacité 1 litre remplis jusqu'à la moitié c'est-à-dire 500 ml ; comme l'indique la figure 2 ci-dessous .

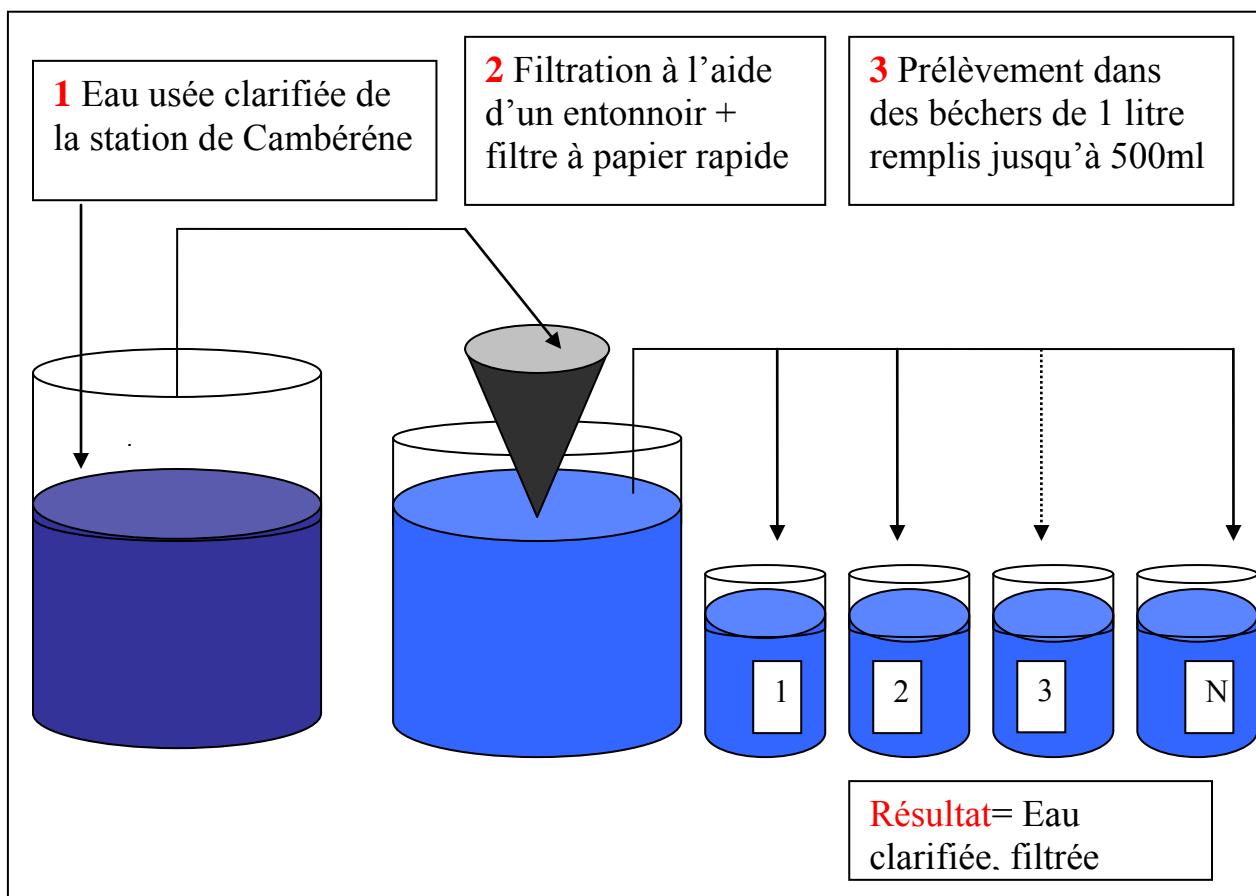
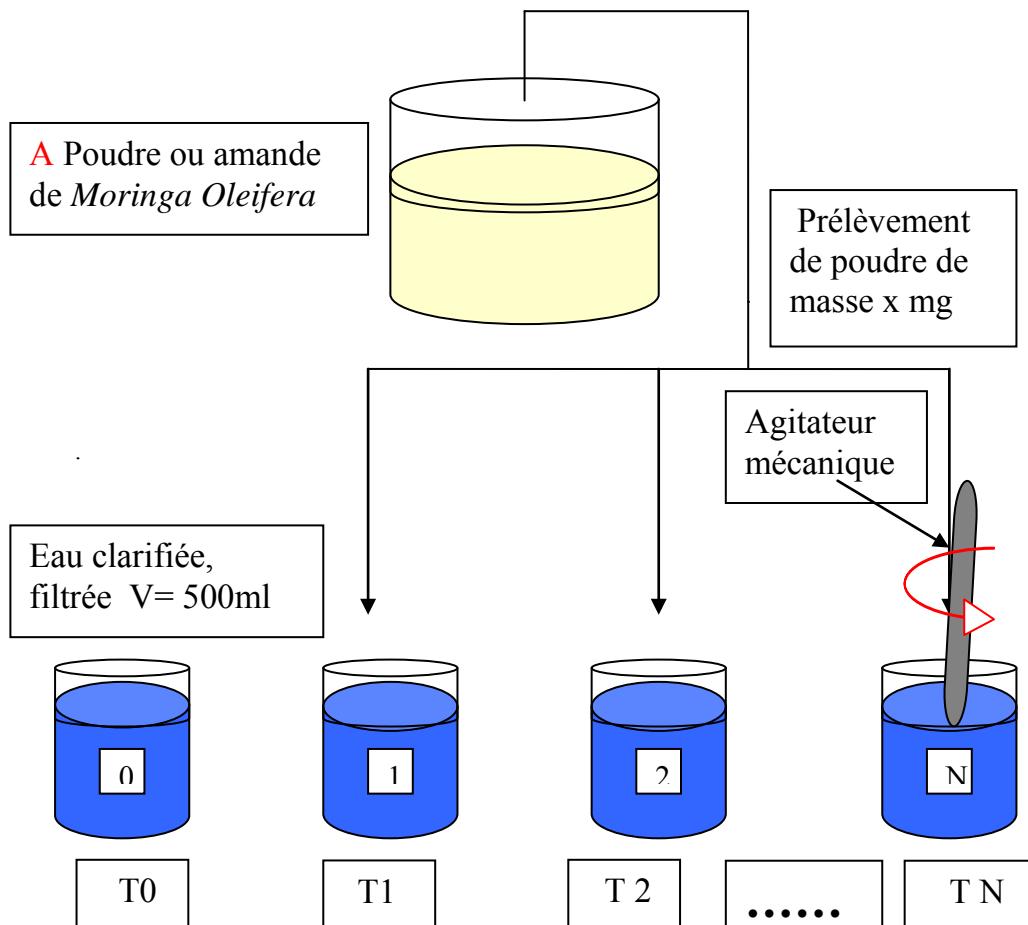


Figure 2 : Filtration des eau usées clarifiées au laboratoire

Le schéma de principe de purification des eaux usées clarifiées par la poudre de Moringa oleifera est très simple.

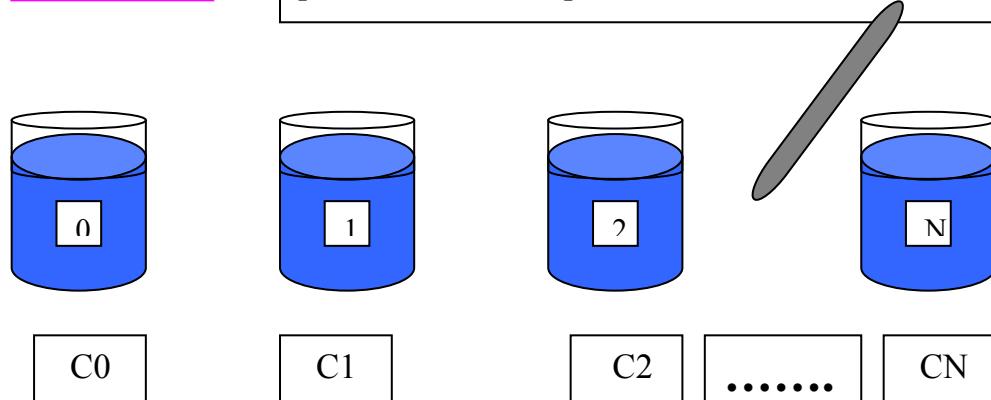
En effet, on prélève une masse m de poudre (amande) que l'on verse directement dans l'échantillon d'eau clarifiée à traiter tout en connaissant son volume, dans le cas de notre expérience, nous avons fixé ce volume à 500 ml pour que toutes les analyses soient faites sans qu'il y ait déficit d'eau.

TRAITEMENT DES EAUX USEES CLARIFIEES FILTREES PAR LA POUDRE DE *Moringa Oleifera Lam*



ETAPE 1

1 Variation du temps de réaction de T₀ jusqu'à T_N pour une masse de poudre constante



ETAPE 2

2 Variation de la masse de poudre de Moringa en mg pour un temps de réaction constant

Figure 3 : Traitement des eaux usées clarifiées et filtrées par la poudre de *Moringa*

Après avoir versé la poudre dans l'eau, on brasse vigoureusement la solution à l'aide d'un agitateur mécanique (bâton de verre) au bout de 5 minutes pour que toutes les matières soient solubles dans l'eau et on laisse reposer la solution tout le restant du temps de traitement.

Ainsi, on peut procéder selon 2 étapes :

- la première consiste à fixer la masse de poudre de *Moringa*, tout en variant le temps (*t*) de réaction ou de traitement. Concernant nos travaux nous avons pris les intervalles de temps suivants : 0 ; 30 ; 60 ; 120 ; 180 ; 240 en minutes.
- La deuxième consiste à fixer le temps de traitement à une durée maximale, tout en variant la masse de poudre de *Moringa*. En ce qui nous concerne nous avons varié la masse de poudre de 0 mg à 150 mg c'est-à-dire de 0 g à 0,15 g.

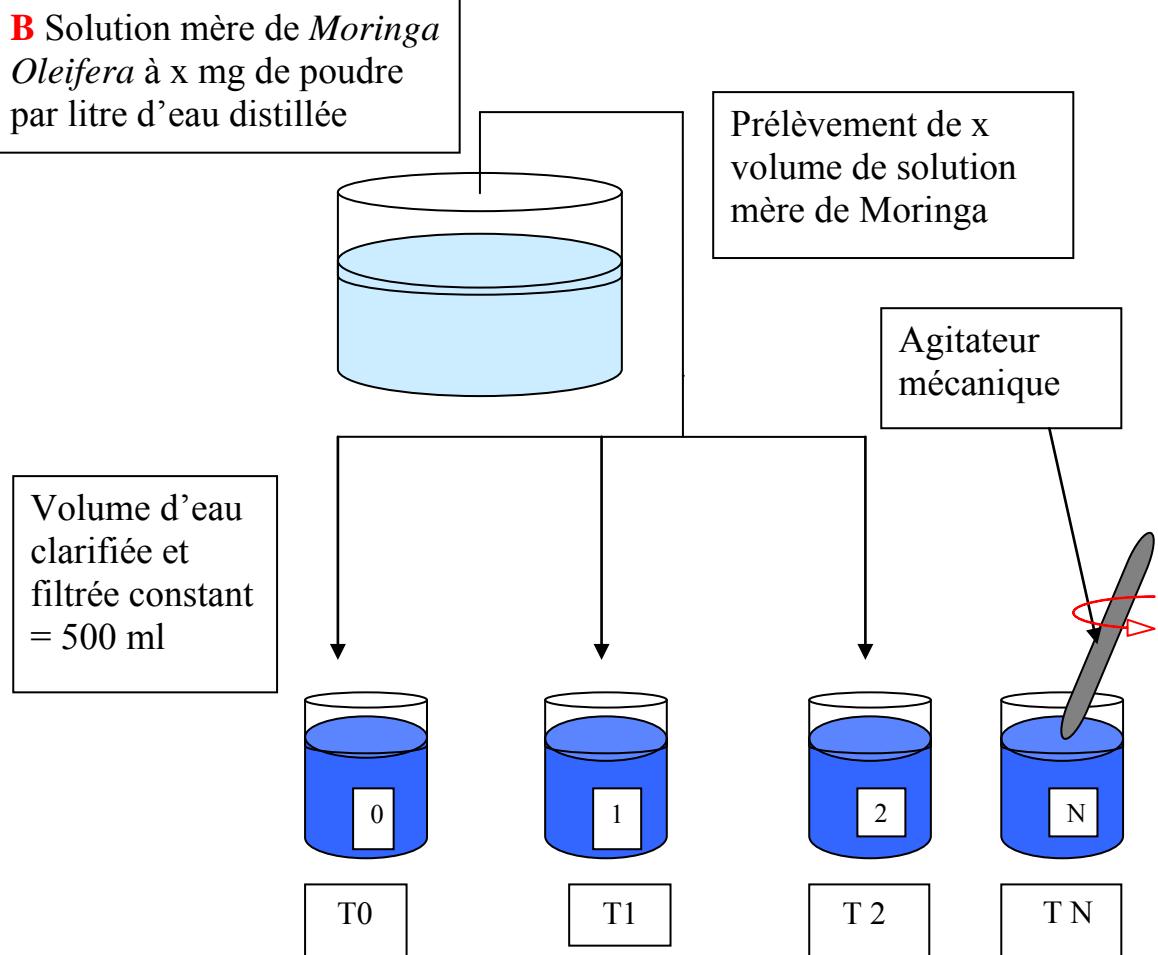
Il faut signaler que durant tous nos travaux nous avons choisi un volume V constant de 500 ml d'eau usée clarifiée pour chaque échantillon.

1-5-5-2) SOLUTION MERE DE MORINGA

Pour ce qui est de cette phase, après avoir filtré les eaux usées clarifiées et les versé dans des bêchers remplis jusqu'à 500 ml, on prélève un volume de *x* ml de la solution mère que l'on verse dans les bêchers contenant les échantillons d'eau. Ensuite on brasse les solutions pendant une durée de 5 mn pour permettre une dissolution totale du produit dans l'eau à traiter. Ainsi, nous avons le choix de procéder en 2 étapes :

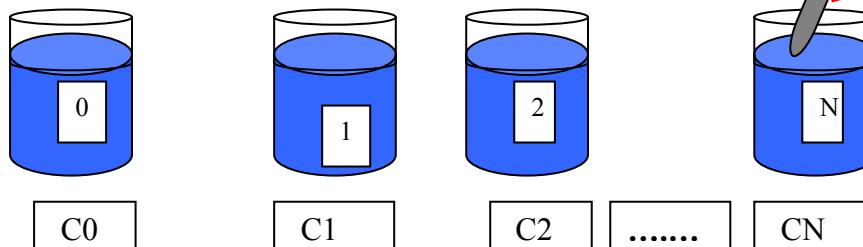
- la première étape consiste à fixer le temps de traitement (par exemple à 3 heures), tout en faisant varier la concentration de la solution mère de *Moringa* (par exemple de 0% à 25% en passant par les valeurs intermédiaires). Et ceci dans le but de déterminer la concentration la plus appropriée.
Une concentration mère de 25 % veut dire que dans 100 mg d'eau distillée on ajoute 25 mg de poudre de *Moringa oleifera*.
- la deuxième étape consiste à fixer la concentration de la solution mère de *Moringa* (par exemple à 10% comme nous l'avons fait dans nos travaux), tout en faisant varier le temps de traitement de 0 ; 30 ; 60 ; 120 ; 180 ; 240 minutes

**TRAITEMENT DES EAUX USEES CLARIFIEES FILTREES
AVEC LA SOLUTON MERE DE *Moringa Oleifera***



ETAPE 1

1 Variation de la concentration de la solution mère de *Moringa* pour un temps de traitement constant



ETAPE 2

2 Variation du temps de traitement (réaction) de T₀ jusqu'à T_N pour une concentration constante

Figure 4 : Traitement des eaux usées clarifiées et filtrées avec la solution mère de *Moringa*.

CHAPITRE 2 : RESULTATS

Les variations des paramètres des échantillons d'eaux usées clarifiées sous l'action du produit sont représentées sous formes de tableaux, de graphiques et de photographies (voir annexe n°2).

Pour chaque étape nous avons travaillé sur des échantillons différents d'eaux usées clarifiées filtrées et ce-ci dans le but de diversifier nos expériences pour mieux appréhender l'effet du *Moringa* sur les eaux usées clarifiées.

2-1-1) PHASE I : POUDRE DE *MORINGA*

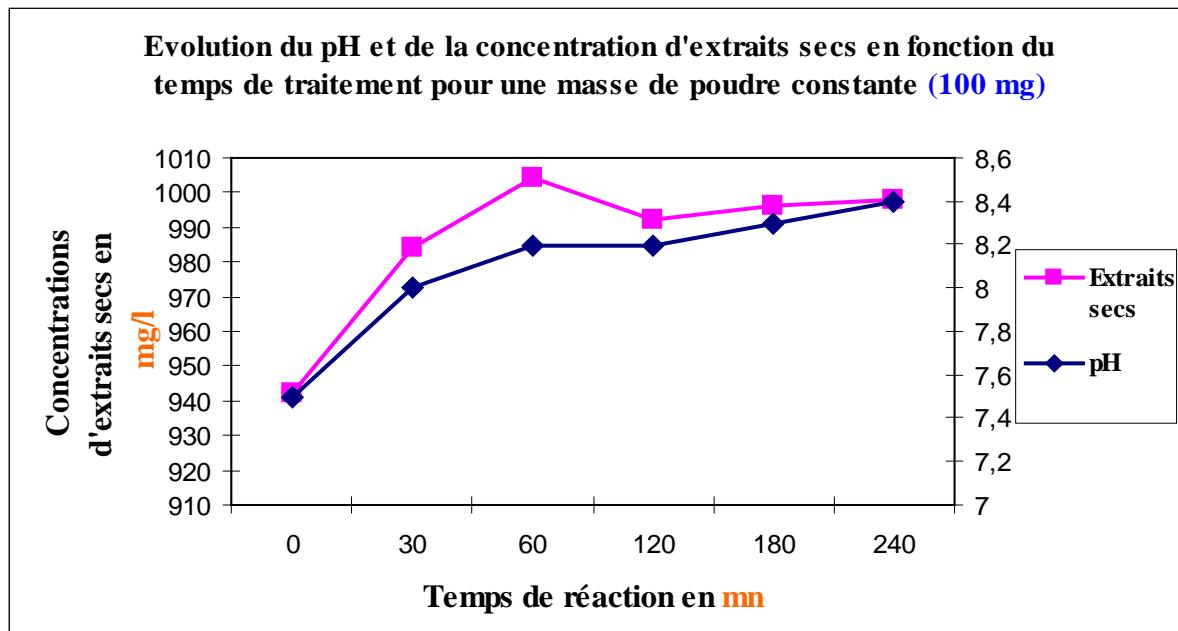
Au cours de cette phase, nous avons utilisé la poudre en faisant varier sa masse mais aussi le temps de traitement.

2-1-1-1) ETAPE 1 : Variation du temps de traitement pour une masse de poudre constante.

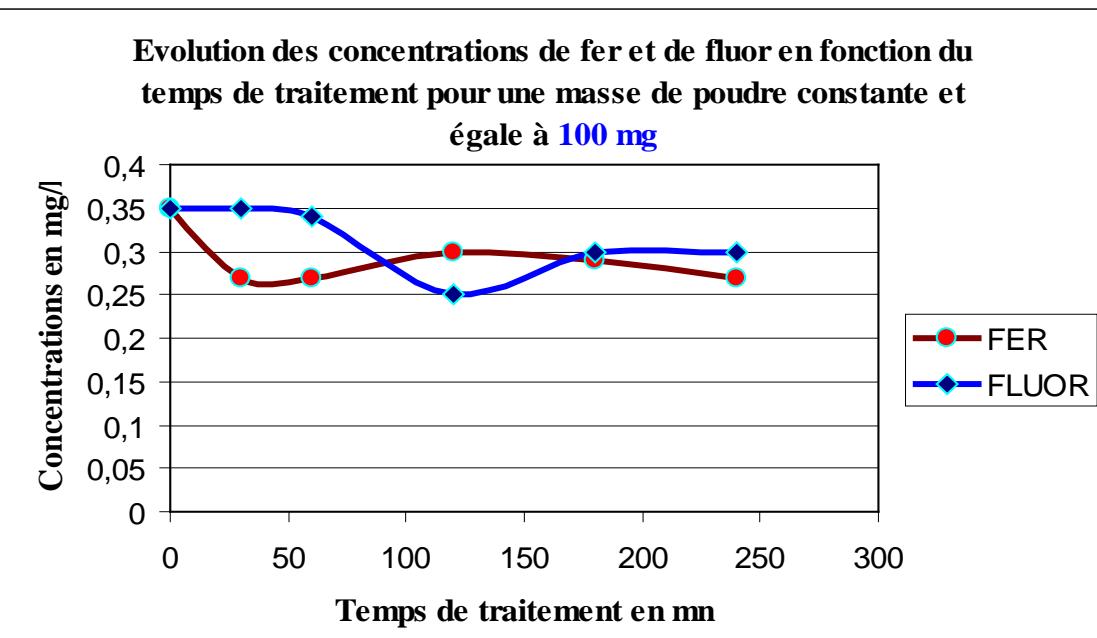
Tableau N° 8 : Evolution des paramètres en fonction du temps de traitement pour une masse de poudre constante et égale à 100 mg

Echantillons	Eau clarifiée non traitée 0 minute	Eau clarifiée traitée/ 30 minutes	Eau clarifiée traitée/ 60 minutes	Eau clarifiée traitée/ 120 minutes	Eau clarifiée traitée/ 180 minutes	Eau clarifiée traitée/ 240 minutes
pH	7,5	8	8,2	8,2	8,3	8,4
Cl ⁻ (mg/l)	238	252	245	252	255,5	255,5
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	9,6	38,4	100,8	124,8	81,6	33,6
CO ₃ H ⁻ (mg/l)	37,2	6,2	0	0	0	0
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0	12,4	18,6	24,8	24,8	31
NO ₃ ⁻ (mg/l)	18,99	17,62	10,84	22,29	28,09	29,12
F⁻ (mg/l)	0,35	0,35	0,34	0,25	0,3	0,3

Total Anions en meq/l	7,93	8,8	9,89	10,97	10,27	10,49
Ca ⁺⁺ (mg/l)	68,14	44,09	68,14	66,13	64,13	66,13
Mg ⁺⁺ (mg/l)	25,51	49,81	23,08	24,3	26,73	23,08
Na ⁺ (mg/l)	137,6	131,9	133,5	137,4	138,5	138,5
K ⁺ (mg/l)	45,5	46	46,7	47,6	46,8	46,7
Fe (mg/l)	0,35	0,27	0,27	0,3	0,29	0,27
Total Cations en meq/l	12,64	13,21	12,3	13,77	12,62	12,4
Extraits Secs (mg/l)	942	984	1004	992	996	998



Courbe n° 1 : Evolution du pH et de la concentration d'extraits secs en fonction du temps.



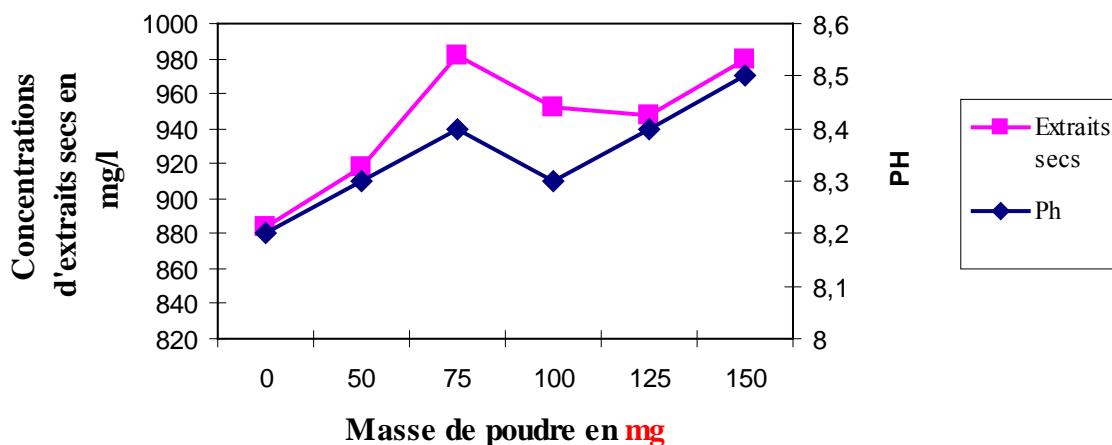
Courbe n° 2 : Evolution des concentrations de fer et de fluor en fonction du temps

2-1-1-2) ETAPE 2 : Variation de la masse de poudre en fonction du temps.

Tableau n° 9 : Evolution des paramètres en fonction de la masse de poudre de Moringa pour un temps de traitement constante et égale à 4 heures.

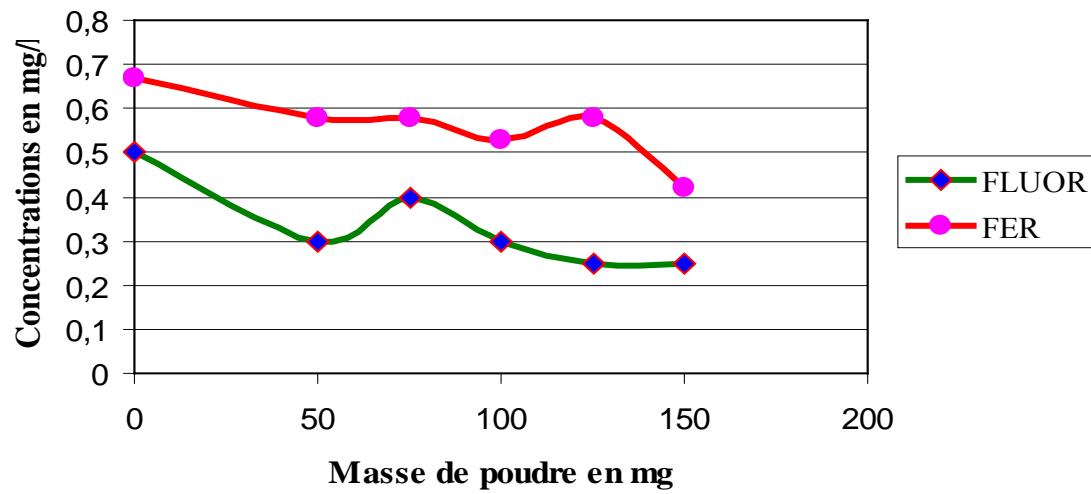
Echantillons	Eau clarifiée non traitée / 0 mg de poudre	Eau clarifiée traitée/ 50 mg de poudre	Eau clarifiée traitée/ 75 mg de poudre	Eau clarifiée traitée/ 100 mg de poudre	Eau clarifiée traitée/ 125 mg de poudre	Eau clarifiée traitée/ 150 mg de poudre
pH	8,2	8,3	8,4	8,3	8,4	8,5
F ⁻ (mg/l)	0,5	0,30	0,40	0,30	0,25	0,25
Fer (mg/l)	0,67	0,58	0,58	0,53	0,58	0,42
Extraits Secs (mg/l)	884	918	982	952	948	980

Evolution du pH et de la concentration d'extraits secs en fonction de la masse de poudre



Courbe n° 3 : Evolution du pH et la concentration d'extraits secs en fonction de la masse de poudre

Evolution des concentrations de fer et de fluor en fonction de la masse de poudre de Moringa



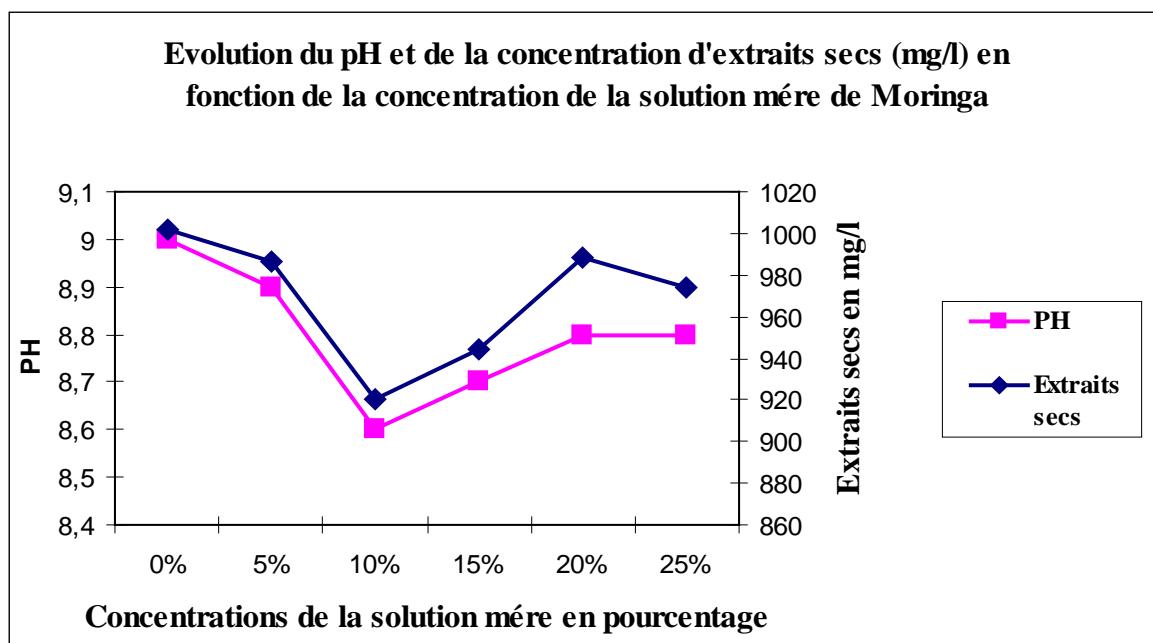
Courbe n° 4 : Evolution des concentrations de fer et de fluor en fonction de la masse de poudre.

2-1-2) PHASE II : SOLUTION MERE

2-1-2-1) ETAPE 1 : Variation de la concentration de la Solution mère pour un temps de traitement constant.

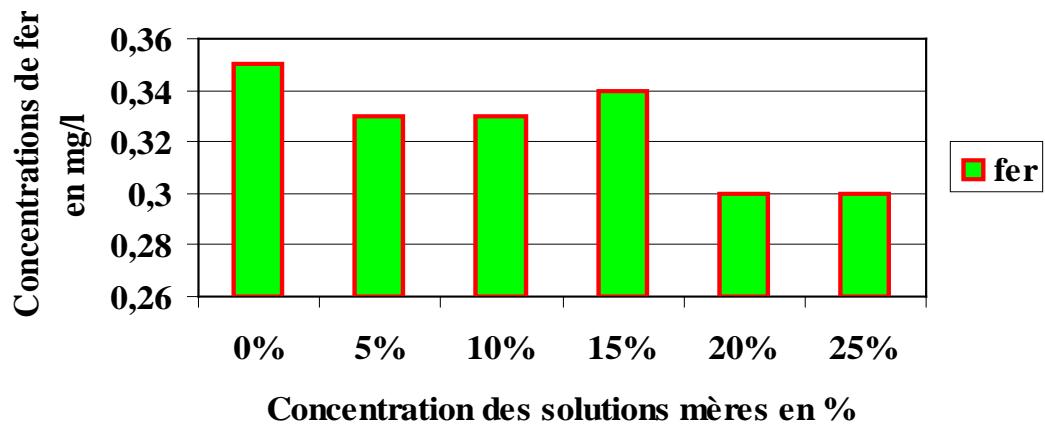
Tableau n° 10 : Evolution des paramètres en fonction de la concentration de la solution mère de Moringa pour un temps de traitement constant et égal à 3 heures

Echantillons	Eau clarifiée non traitée 0%	Eau clarifiée traitée/ C1=5%	Eau clarifiée traitée/ C2= 10%	Eau clarifiée traitée/ 15%	Eau clarifiée traitée/ 20 %	Eau clarifiée traitée/ 25%
pH	9	8,9	8,6	8,7	8,8	8,8
F ⁻ (mg/l)	0,55	0,35	0,25	0,15	0,15	0,15
Fer (mg/10l)	0,35	0,33	0,33	0,34	0,3	0,3
Extraits Secs (mg/l)	1002	986	920	944	988	974



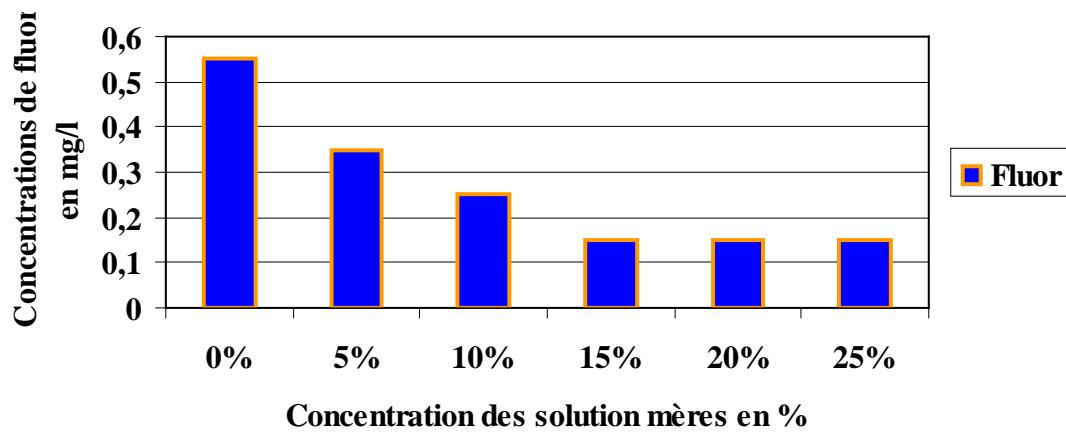
Courbe n° 5 : Evolution du pH et de la concentration d'extraits secs en fonction de la concentration de la solution mère.

Evolution de la concentration de fer en fonction de la concentration de la solution mère de Moringa



Courbe n° 6 : Evolution de la concentration de fer en fonction de la concentration de la solution mère.

Evolution de la concentration de fluor en fonction de la concentration de la solution mère de Moringa en %

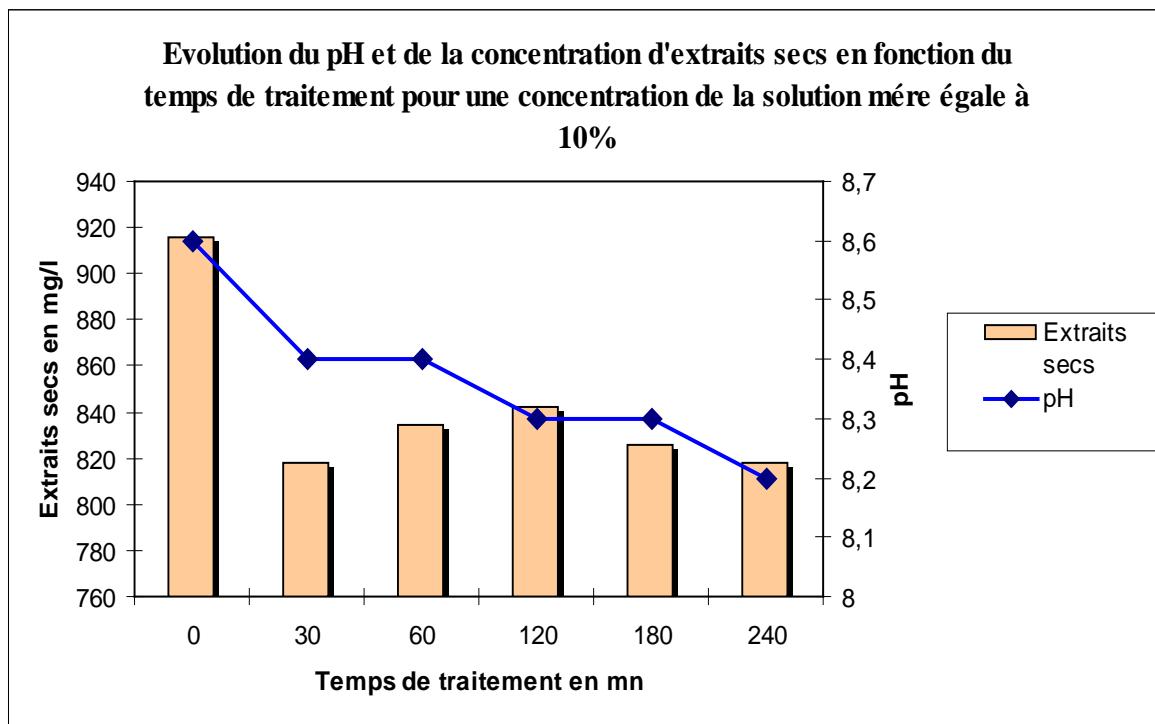


Courbe n° 7 : Evolution de la concentration de fluor en fonction de la concentration de la solution mère

2-1-2-2) ETAPE 2 : Variation du temps pour une concentration de la solution mère constante.

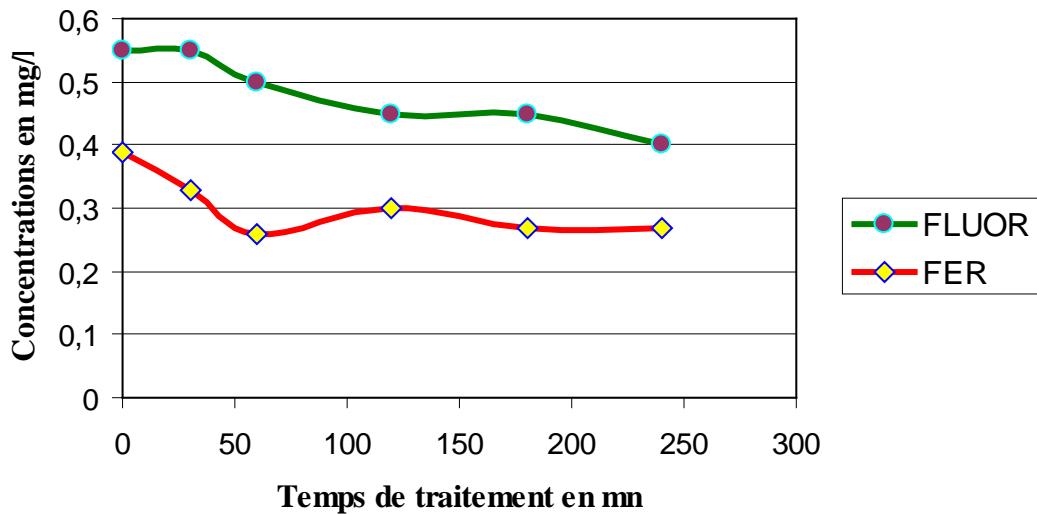
Tableau n° 11 : Evolution des paramètres en fonction du temps pour une concentration de la solution mère constante et égale à 10%.

Echantillons	Eau clarifiée non traitée	Eau clarifiée traitée/ 30 mn	Eau clarifiée traitée/ 60 mn	Eau clarifiée traitée/ 120 mn	Eau clarifiée traitée/ 180 mn	Eau clarifiée traitée/ 240 mn
pH	8,6	8,4	8,4	8,3	8,3	8,2
F ⁻ (mg/l)	0,55	0,55	0,50	0,45	0,45	0,40
Fer (mg/l)	0,39	0,33	0,26	0,30	0,27	0,27
Extraits Secs (mg/l)	916	818	834	842	826	818



Courbe n° 8 : Evolution du pH et de la concentration d'extraits secs en fonction du temps pour une concentration de la solution mère constante et égale à 10%

**Evolution des concentration de fer et de fluor en fonction du temps
de traitement pour une concentration de la solution mère constante
et égale à 10%**



Courbe 9 : Evolution des concentrations de fer et de fluor en fonction du temps

CHAPITRE 3 : INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS

3-1) INTERPRETATIONS

Sur l'ensemble des essais qui se sont déroulés au laboratoire, nous avons remarqué que parmi tous les paramètres que nous avions ciblés au début, seuls le pH, la turbidité, les extraits secs (TDS), le fer, le fluor et très probablement les coliformes fécaux présentent des variations régulières. Ce qui nous a poussé à simplifier les tableaux n° 9, n° 10 et n° 11 c'est-à-dire à éliminer les paramètres qui ne présentent pas de variations régulières.

3-1-1)Les Coliformes fécaux.

Pour ce qui est des coliformes fécaux, nous n'avons pas fait d'analyses par faute de matériel, mais il est évident que ces derniers augmentent dans la solution après quelques heures du traitement, car la matière organique apportée par la poudre ou la solution mère de *Moringa oleifera* constitue un milieu favorable pour la prolifération bactérienne. D'ailleurs c'est à ce niveau où se situe le problème majeur de ce produit végétal. Nombre de chercheurs ont fait leurs recherches sur ce produit mais leurs problématiques résidaient sur comment réduire l'apport de matière organique apporté par le *Moringa*.

3-1-2)La Turbidité

En ce qui concerne la turbidité, les prises de photos nous édifient sur sa baisse lors des traitements, que ce soit avec la poudre ou avec la solution mère.

De la photo n° 1 à la photo n° 6 (voir annexe 2), l'abattement de la turbidité est net. Cette situation est due au mécanisme de coagulation-flocculation et sédimentation provoqué par le *Moringa*. Ainsi les particules ou agrégats sédimentent au fond du bêcher laissant en surface l'eau claire (annexe 2, photo n° 4).

Après filtration à l'aide de filtres rapides, les résultats obtenus sont présentés à la photo n° 6 (annexe 2). Celle-ci nous montre un gradient de turbidité qui décroît de la solution non traitée (témoin) aux solutions traitées que ce soit avec la poudre ou avec la solution mère de Moringa et en fonction du temps de réaction

3-1-3)Le pH

Nous avons constaté que le pH évolue en fonction de la concentration du produit dans l'eau et de la durée du traitement.

Plus la concentration du produit et/ou la durée du traitement sont élevées, plus le pH augmente.

Donc on peut dire que l'augmentation du pH est due à l'apport massif de matière organique occasionnée par la dissolution du produit végétal (elle-même fonction du temps de traitement) et par conséquent à l'augmentation de la concentration d'extraits secs présente dans l'eau. Mais lorsque la concentration du produit est faible, par exemple avec 10 % de solution mère, celui-ci a tendance à diminuer. (Cf. courbe n° 8)

3-1-4)Les extraits secs

Pour ce qui est des extraits secs ou TDS (Total de Sels Dissous), on a constaté que la concentration d'extraits secs évolue aussi en fonction de la concentration du produit dans l'eau et de la durée du traitement. L'augmentation de la concentration de TDS s'explique par la dissolution de la matière organique venue de la poudre sous forme de petites particules fines (inférieures ou égales à 0,45 µm) pouvant passer entre les mailles du filtre.

L'augmentation de la concentration de TDS entraîne directement celle du pH de l'eau. Ce qui veut dire que la matière organique a un pH basique puisque son augmentation favorise celle du pH.

Donc l'utilisation de la solution mère à une concentration optimale (par exemple à 10 %) est plus bénéfique pour les exploitants que celle de la poudre. Car en plus de la diminution de la matière organique qui influe directement sur la concentration d'extraits secs et sur le pH, elle occasionne une baisse des concentrations de fer et de fluor dans l'eau. (Cf. courbes n° 8 et n° 9)

3-1-5)Le Fer

Concernant le fer, nous avons remarqué que les résultats confirment une baisse significative de la concentration en fer des eaux traitées par le Moringa par rapport aux échantillons témoins. Cette baisse s'accentue avec le temps de traitement mais aussi avec la concentration du produit dans l'eau.

De ce fait on a pu conclure que le *Moringa oleifera* est agent floculant qui favorise une baisse de la concentration en fer dans l'eau.

Seulement il est important de signaler qu'en cas d'erreurs de manipulation (agitation au moment de la formation des agrégats par la protéine

polyélectrolyte cationique, surdosage ou des dosages faibles) les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants.

3-1-6)Le fluor

Sur l'ensemble de nos essais, c'est le paramètre qui a le plus attiré notre attention. Car, que ce soit avec l'action de la poudre ou celle de la solution mère de *Moringa*, la concentration en fluor de l'eau traitée décroît toujours par rapport à celle des échantillons témoins.

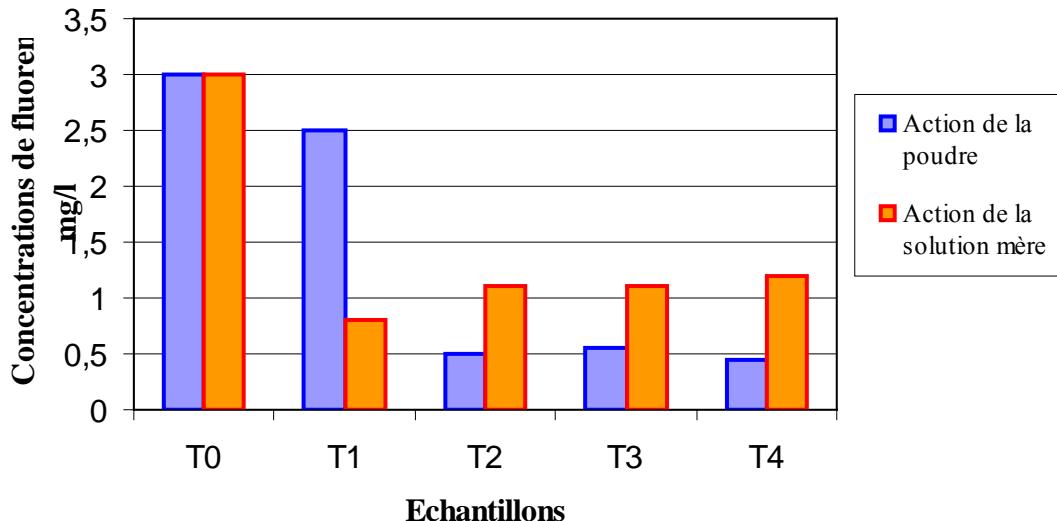
D'ailleurs c'est ce qui nous a poussé à expérimenter davantage ce produit sur des eaux potables fortement fluorées avec des doses allant jusqu'à 6 mg/l dans la région de Fatick, plus précisément dans les localités de Ngohé Poffine, de Boyard et de Ndiangamba toutes réfutées par leurs eaux fortement fluorées.

Les résultats obtenus lors de cette mission de terrain sont les suivants :

Tableau n° 12 : Comparaison de l'action de la poudre de *Moringa* et de celle de la solution mère en fonction de la concentration de fluor.

Echantillons	Phase1/Action de la poudre de <i>Moringa oleifera</i>	Phase 2/ Action de la solution mère de <i>Moringa oleifera</i>		
	Masse de poudre en mg ajoutée dans 500 ml d'eau à traiter	Concentration de Fluor en mg/l	Concentration de la solution mère (en mg/100ml) ajoutée dans 500ml d'eau à traiter	Concentration de Fluor en mg/l
T0	0	3	0	3
T1	100	2,5	120	0,8
T2	150	0,5	180	1,1
T3	200	0,55	240	1,1
T4	250	0,45	300	1,2

Comparaison entre l'action de la poudre de Moringa et de celle de sa solution mère en fonction de la concentration de fluor en mg/l

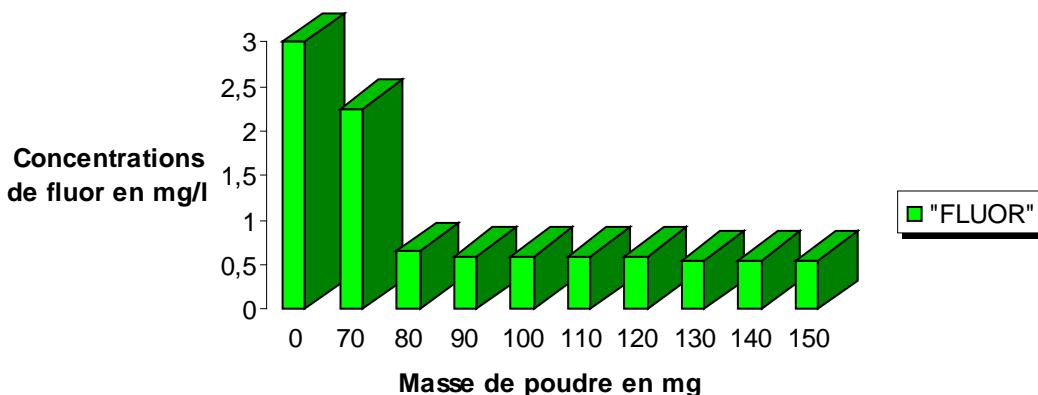


Courbe n° 10 : Comparaison entre l'action de la poudre de *Moringa* et de celle de sa solution mère.

Tableau n° 13 : Variation de la concentration de fluor de l'eau à Ngohé Poffine en fonction de la masse de poudre de *Moringa oleifera*.

Masse de poudre en mg ajoutée dans 500 ml d'eau à traiter	Concentrations de fluor en mg/l prises dans différents intervalles
0	3 entre [2 ; 4]
70	2,25 entre [2 ; 2,5]
80	0,65 entre [0,6 ; 0,7]
90	0,6 entre [0,5 ; 0,7]
100	0,6 entre [0,5 ; 0,7]
110	0,6 entre [0,5 ; 0,7]
120	0,6 entre [0,5 ; 0,7]
130	0,55 entre [0,5 ; 0,6]
140	0,55 entre [0,5 ; 0,6]
150	0,55 entre [0,5 ; 0,6]

Histogramme en relief d'évolution de la concentration de fluor de l'eau à Ngohé Poffine en fonction de la masse de poudre de Moringa

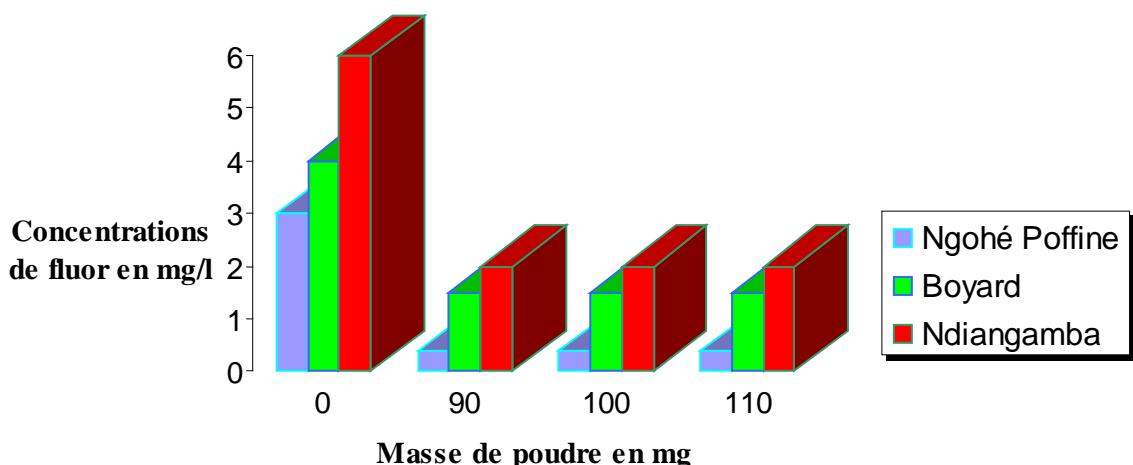


Courbe n° 11 : Evolution de la concentration de fluor de l'eau à Ngohé Poffine en fonction de la masse de poudre.

Tableau n°14 : Comparaison de la concentration de fluor en fonction de la masse de poudre de Moringa selon 3 milieux différents et.

	Ngohé Poffine	Boyard	Ndiangamba
Masse de poudre en mg/500ml	Concentration de Fluor en mg/l	Concentration de Fluor en mg/l	Concentration de Fluor en mg/l
0	3 prise entre [2 ; 4]	4 prise entre [3; 5]	6 prise entre [5; 7]
90	0,4 prise entre [0 ; 0,8]	1,5 prise entre [1; 2]	2 prise entre [1; 3]
100	0,4 prise entre [0 ; 0,8]	1,5 prise entre [1; 2]	2 prise entre [1; 3]
110	0,4 prise entre [0 ; 0,8]	1,5 prise entre [1; 2]	2 prise entre [1; 3]

Histogramme en relief des concentrations de fluor en fonction de la masse de poudre de Moringa selon 3 milieux différents.



Courbe n° 12 : Evolution de la concentration de fluor en fonction de la masse de poudre selon 3 milieux différents.

Ainsi, comme nous venons de le montrer, ces résultats confirment sans l'ombre d'aucun doute que le *Moringa oleifera Lam* est un flocculant naturel (végétal) qui « défluore » les eaux surtout lorsqu'elles le sont fortement.

Ce-ci est une découverte nouvelle, car jusqu'ici, à notre connaissance personne n'a découvert que le *Moringa oleifera* est un agent « défluorant ». Le Moringa a une action plus poussée sur le fluor que sur tout autre paramètre ; même pour ce qui est du fer, ses variations ne sont pas aussi nettes que celles du fluor. (Cf. courbes n°6 et n° 7)

Avec la poudre de Moringa, la concentration de fluor de l'eau à traiter (celle de Ngohé Poffine) diminue de 6 fois, c'est-à-dire 6 fois plus faible que celui de la solution témoin. (Cf. courbe n° 11).

Pour des localités différentes situées dans la même région de Fatick, on a aussi observé des variations régulières et très nettes de la concentration de fluor des eaux ; avec un abattement de 2,6 mg/l à Ngohé Poffine, de 2,5 mg/l à Boyard et 4 mg/l à Ndiangamba. (Cf. tableau n° 12).

Nous avons aussi constaté que l'action du *Moringa oleifera* sur la « défluoration » des eaux potables est plus remarquable que celle sur les eaux usées clarifiées. Cette différence pourrait être expliquée par le fait que les eaux usées clarifiées sont d'une composition très complexe et d'origines diverses ; ce qui fait qu'il y'a toujours un facteur inconnu limitant l'action du *Moringa*.

3-2) DISCUSSIONS :

D'abord pour ce qui est des coliformes fécaux, leur nombre augmente quelques heures après le traitement car la matière organique apportée par le *Moringa* est un milieu favorable pour la prolifération des bactéries. Ceci est appuyé par nombres de chercheurs dont CHANTREL.E et SAINT SAUVEUR. (2002) qui, selon eux, les graines de *Moringa* mises en solution relarguent de la matière organique, ce qui facilite la croissance bactérienne.

Nos résultats sur le pH ne sont pas conformes avec ceux de FOLKARD, 1997 qui selon lui, le *Moringa oleifera* n'influence pas le pH de l'eau à traiter. Contrairement à nos résultats qui confirment nettement que le pH varie en fonction de la concentration du produit dans l'eau et de la durée de traitement.

Cette différence pourrait être expliquée par le fait que FOLKARD ait travaillé sur des eaux potables qui ont des origines moins variées et des compositions moins complexes que les eaux usées clarifiées.

S'agissant de la turbidité, nos résultats confirment les travaux de (Folkard G., Sutherland J., 1992) cités par (CHANTREL E et SAINT SAUVEUR., 2002) car occasionnant une baisse significative de la turbidité qui décroît de l'échantillon témoin aux autres échantillons c'est-à-dire en fonction de la masse de poudre, de la concentration de la solution mère et de la durée de traitement.

Selon (FOLKARD, 1997), le *Moringa* favorise une diminution de la teneur en fer de l'eau à traiter. Ces résultats viennent confirmer les nôtres, car que ce soit avec l'action de la poudre ou celle de la solution mère de *Moringa*, on assiste toujours à une baisse de la concentration en fer de l'eau à traiter par rapport aux échantillons témoins.

Pour ce qui est du fluor, il n'y a pas de discussion à mener sur ce sujet car jusque là aucune découverte n'a été faite sur l'action du Moringa sur le fluor et à plus forte raison sur la diminution de la teneur en fluor dans l'eau grâce à l'action de ce dernier.

CONCLUSION

Au terme de ce travail, nous pouvons conclure que le *Moringa oleifera Lam* (produit végétal) a une action très positive sur la purification des eaux usées clarifiées de la station d'épuration de Cambéréne. Car, en plus de son caractère non toxique, contrairement aux autres floculants primaires chimiques comme le phosphate d'alumine, il entraîne une baisse significative de la turbidité par le mécanisme de coagulation-flocculation et sédimentation, une diminution du taux de fer dans l'eau que ce soit avec l'action de la poudre ou avec celle de la solution mère et de manière plus efficace une diminution du taux de fluor aussi bien dans les eaux usées clarifiées que dans les eaux potables surtout lorsqu'elles sont fortement fluorées.

Cependant, même si l'action du *Moringa oleifera* s'avère très efficace dans le traitement des eaux, cela n'empêche pas qu'elle puisse présenter quelques désavantages si les dosages sont élevés, car l'apport massif de matière organique dans l'eau favorise une élévation du pH , une augmentation de la quantité d'extraits secs et une prolifération bactérienne dans l'eau si leur présence est justifiée au paravent. D'où l'utilisation de la solution mère est plus bénéfique que celle de la poudre, car elle contribue à diminuer l'apport de matière organique qui est un facteur limitant le bon fonctionnement de ce type de traitement.

Ainsi, bien que cette eau soit inapte à la consommation humaine, il nous semble plus judicieux d'ajouter des produits chlorés comme par exemple l'eau de javel ou de bouillir l'eau tout juste après le traitement pour tuer les micro-organismes qui résistent au traitement afin de parer à toute possibilité de contamination bactérienne lors de l'utilisation de cette dernière à des travaux comme les BTP, l'irrigation, l'aquaculture, etc.

RECOMMANDATIONS :

Dans le but de mieux promouvoir les résultats de notre recherche et de faire bénéficier le public ainsi que toute la communauté scientifique, nous avons établi les recommandations suivantes :

- ✓ Utilisation industrielle du *Moringa* pour le traitement de l'eau potable et des eaux usées au Sénégal ;
- ✓ Extraire le composant actif pour diminuer la quantité de matière organique susceptible de nuire au bon fonctionnement du traitement ;
- ✓ Déterminer les conditions dans lesquelles le *Moringa* est économiquement compétitif : le floculant doit être suffisamment bon marché pour les utilisateurs d'eau mais aussi rentable à produire pour l'agriculteur ;
- ✓ Créer des réseaux de commercialisation ;
- ✓ Améliorer la technologie de transformation des graines, de conservation de la poudre ;
- ✓ Créer un système de traitement à grande échelle en passant par la mise en place des stations pilotes;
- ✓ Standardiser le produit ;
- ✓ Stériliser le produit et l'eau déjà traitée afin d'éviter toute contamination bactérienne ;
- ✓ Pousser les recherches qui sont relatives à la « défluoration » des eaux potables ;
- ✓ Améliorer la diffusion et la qualité de l'information sur le traitement de l'eau avec *Moringa*.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1- AKPO Y. (2006). Evaluation de la pollution des eaux usées domestiques collectées et traitées à la station d'épuration de Cambéréne (Dakar). *Mémoire de DEA de Production Animale*, EISMV, UCAD, 30p.

2- ASANO T. (1998). Wastewater reclamation and reuse. *Water quality management library*, 1475 p.

3- ASSELIN M. (2006). Application de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux usées industrielles. In *Journée des sciences de la terre*, 9p ; disponible sur le site : <http://www.inrs-ete.uquebec.ca/doc/Rapport>

4- BAUMONT S., CAMARD J-P., LEFRANC A., FRANCONI A. (2005). Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Ile-de-France, *Guidelines*, 176p

5- BRAHY V. (2006). L'eutrophisation et l'enrichissement en nutriments. 395 p
<http://www.environnement-wallonie.be>

6- BRYAN D., CHAMBERS B., COOPER P. (1995). Wastewater and sludge treatment processes. *WRc publications*, Marlow Bucks, 190 p

7- CAUCHI., HYVRARD., NAKACHE., SCHWARTZBROD., ZAGURY., BARON., CARRE., COURTOIS., DENIS., DERNAT., LARBAIGT., DERANGERE., MARTIGNE., SEGURET. (1996). Dossier : la réutilisation des eaux usées après épuration. *Techniques, Sciences et Méthodes*, 2 : 81-118.

8- Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (C.E.A.E.Q). (2007). Détermination de la turbidité dans l'eau : méthode néphélémétrique. MA. 103- Tur. 1.0, Rév.3, Ministère du Développement durable, de l'Environnement des Parcs du Québec, 10 p

9- CHANTREL E et SAINT SAUVEUR. (2002). Caractéristique du Moringa pour le traitement des eaux, PROPAGE (Association pour la promotion et la propagation du patrimoine végétal des régions arides et semi-arides), *Article*, 4 p

10- Comité fédéral-provincial-territorial de l’Hygiène du Milieu et du Travail (C.H.M.T). (2007). *Guide canadien d’évaluation des incidences sur la santé*- Volume 4 : Impacts sur la santé par secteur industriel
<http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/eval>

11- DIAZ J P. (2001). Application des membranes au traitement des eaux usées. *Synthèse technique*, ENGREF centre de Montpellier, France, 9p

12- DIGNAC M. et SCRIBE P. (1998). Caractérisation chimique de la matière organique au cours du traitement des eaux usées par boues activées.

www.biologie.ens.fr/bioemco/matieres_organiques/dignac

13- FABY J.A. et BRISAUD F. (1997). L’utilisation des eaux usées épurées en irrigation. Office International de l’Eau, 76 pages.

14- FOIDL N., MAKKAR H.P.S. et BECKER K. (2001). Potentiel de *Moringa oleifera* en agriculture et dans l’industrie, 29 pages /
http://www.moringanews.org/foidl_fr.doc

15- FOLKARD G., SUTHERLAND J. et AL-KHALILI R.S. (2002) . La clarification de l’eau par coagulation en utilisant les graines du *Moringa oleifera*. *L’arbre de la vie, les multiples usages du Moringa*. CWS/CTA, Dakar, Sénégal, pp 79-82

16- FOLKARD G. (1997) .The development of the *Moringa oleifera* and *stenopetala* tree to provide valuable products: coagulant for water/wastewater treatment and vegetable oil. *Rapport à la Commission Européenne*, DG 12, projet de recherche n° TS3*CT94-0309, période 1995-1997.

17- GAYE M. et NIANG S. (2002). Epuration des eaux usées et l’agriculture urbaine. *Série Etudes et Recherches*, Dakar : Enda-tiers monde ,354p

18- Groupe Scientifique sur l'Eau. (2003). Coliformes fécaux, Dans *Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine*, Institut nationale de la santé publique du Québec, 3 pages.

19- Institut Sénégalais de Normalisation (ISN). (2001). EAUX USEES : NORMES DE REJET. *Normes Sénégalaises*, 27p

JAHN et SAMIA AL AZHARIA. (1989). Différents rôles des coagulants naturels dans la clarification de l'eau, dans les technologies appropriées à usage domestique et dans les installations communales d'épuration. In: *Proceedings of international seminar on the use of natural coagulants for water treatment*, Yogyakarta, 2-7 October 1989, Indonesia, 11pp.

20- JAHN et SAMIA AL AZHARIA. (1988). Using *Moringa* seeds as coagulants in developing countries, 1988. *Journal AWWA*, June 1988, pp. 43-50.

21- LAZAROVA V., GAID A., RODRIGUEZ-GONZALES J., ALDAY ANSOLA J. (2003). L'intérêt de la réutilisation des eaux usées : analyses d'exemples mondiaux. *Techniques, Sciences et Méthodes*, 2003, 9 : 64-85.

22- LENNTECH. (2004). Traitement biologique de l'eau et de l'air. http://www.lenntech.com/français/feedbackfr.htm*

23- MAKKAR H.P.S et BECKER K. (1997). Nutrients and antiquity factors in different morphological parts of the *Moringa oleifera* tree. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge 128, 311-322.

24- MIQUEL G. (2003). La qualité de l'eau et de l'assainissement en France. *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, tome I, 198 pages.

25- RADOUX M. (1995). Qualité et traitement des eaux. Fondation universitaire luxembourgeoise, Station expérimentale de Viville. Bruxelles : FUL.-153 p

26- RAJANGAM J., AZAHAKIA MANAVALAN RS., THANGARAJ T., VIJAYAKUMAR A., MUTHUKRISHAN N. (2001). Production et utilisation du Moringa en Inde du sud : La situation actuelle. *Actes de l'atelier international de Dar es Salaam*, 9p

27- SAINT-LAURENT L. (2003). Gestion des systèmes de traitement des eaux usées. *Lignes directives environnementales du Canada.*, 9 pages.

28- SAINT SAUVEUR. (2001). L'exploitation du *Moringa oleifera* dans le monde : Etat des connaissances et défis à relever. *Actes de l'atelier international de Dar es Salaam*, 18 pages.

29- SAINT SAUVEUR., APPORA., BESSE., FUGLIE. (2001). Potentiel de développement pour les produits du *Moringa*. *Actes de l'atelier international de Dar es Salaam*, 29 octobre-2 novembre 2001, CIRAD/PROPAGE/SILVA, Montpellier, France (disponible aussi dans L. Fuglie, 2002. « L'arbre de la vie », CWS/CTA, Dakar, Sénégal)

30- SALGHI R. (2000). Différentes filières de traitement des eaux. Université Ibn ZOHR- Ecole Nationale des Sciences Appliquées d'Agadir (ENSA) ,22p.

<http://www.ensa-agadir.ac.ma/gpee/download/pollution%20GPEE%205>

31- SUTHERLAND J.P., .FOLKARD G.K., POIRIER Y.L. (2001). *Moringa oleifera – Quelles contraintes pour la commercialisation ?* *Actes de l'atelier international de Dar es Salaam*, 8 pages

32- Travaux Publics et Services Gouvernementaux du Canada (T.P.S.G.C). (2006). Réseaux communautaires d'eaux usées. *Document d'information technique.*

http://www.tpsgc.gc.ca/rps/inac/docs_

33- UNESCO. (1997). Qualité de l'eau de la nappe phréatique à Yeumbeul, Sénégal. *Étude sur le terrain, CSI info N° 3*, UNESCO, Paris, 27 pp

34- WIKIPEDIA. (2007). *Moringa oleifera Lam* : un arbre à usages multiples. *L'encyclopédie libre.*

http://fr.wikipedia.org/wiki/Moringa_oleifera

ANNEXES

ANNEXE 1 : Méthode de détermination de la teneur en fluor dans les eaux traitées par le *Moringa* : Spectrocolorimétrie visuelle/ Coloration du fluor par l'alizarine en milieu neutre.

Tableau explicatif

Echantillons	Aliquote ou dilution	Lecture par spectrocolorimétrie visuelle.	Concentrations de fluor en mg/l prises dans différents intervalles.
1-PHASE POUDRE DE <i>Moringa</i>			
E0	10ml ou 1/10	0,3 comparée avec la gamme 0,3 mg/l	3 prise entre [2 ; 4]
E1	25ml ou 1/5	0,5 comparée avec la gamme 0,5 mg/l	2,5 prise entre [2 ; 3]
E2	100ml ou 1/1	0,5 comparée avec la gamme 0,5 mg/l	0,5 prise entre [0,4 ; 0,6]
E3	100ml ou 1/1	0,55 encadrée avec les gammes 0,5 et 0,6 mg/l	0,55 prise entre [0,5 ; 0,6]
E4	100ml ou 1/1	0,45 encadrée avec les gammes 0,4 et 0,5 mg/l	0,45 prise entre [0,4 ; 0,5]
2- PHASE SOLUTION MERÉ de <i>Moringa</i>			
E5	50ml ou 1/2	0,4 comparée avec la gamme 0,4 mg/l	0,8 prise entre [0,6 ; 1]
E6	50ml ou 1/2	0,55 encadrée avec les gammes 0,5 et 0,6 mg/l	1,1 prise entre [1 ; 1,2]
E7	50ml ou 1/2	0,55 encadrée avec les gammes 0,5 et 0,6 mg/l	1,1 prise entre [1 ; 1,2]
E8	50ml ou 1/2	0,6 comparée avec la gamme 0,6 mg/l	1,2 prise entre [1 ; 1,4]

C'est une technique de comparaison visuelle des colorations des échantillons avec celles des solutions gammes de concentrations connues.

Chaque lecture est encadrée par 2 valeurs avec des concentrations connues. En effet, on a établi une gamme de concentration de fluor avec des concentrations variant de 0 mg/l à 1 mg/l en passant par 0,1 mg/l ; 0,2 mg/l ; 0,3 mg/l ..Jusqu'à 1 mg/l.

Si la concentration en fluor de l'échantillon dépasse 0,5 mg/l, on effectue une dilution et ainsi de suite jusqu'à obtenir une concentration qui est inférieure à 0,6mg/l.

Enfin pour déterminer la concentration de l'échantillon, on divise la valeur lue par le coefficient de dilution.

Par exemple pour l'échantillon E8 on a une dilution de 1/2 et la lecture par spectrocolorimétrie visuelle donne 0,6 mg de fluor, or on a une dilution de 1/2. Donc pour connaître la vraie valeur de la concentration, on multiplie la valeur lue par le coefficient de dilution $\frac{1}{2}$; ce qui revient à le multiplier par 2. De ce fait on a 1,2mg/l de fluor comme résultat final.

ANNEXE 2 : Photographie des étapes essentielles du traitement des eaux clarifiées

1



2



1 Eau usée clarifiée venue de la station

2 Eau usée clarifiée et filtrée non traitée

3



4



3 Gradient de floculation en fonction du temps ou de la quantité de Moringa

4 Mise en évidence de la floculation et de la sédimentation

5



6



5 Comparaison entre une eau traitée et non traitée par le Moringa

6 Gradient de turbidité en fonction de la quantité de Moringa et du temps de réaction

