

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE CHIMIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté par :

Aliouat Safia

Medjahed Nasrine

En vue de l'obtention du diplôme de Master en :

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie des matériaux

THEME

**Recherche de la présence des métaux lourds dans les boues biologique de différentes
stations d'épuration des eaux usées**

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

IGGUI Kahina	MCA	UAMOB	Présidente
BOUDAA Amrane	MCA	UAMOB	Examineur
SAOUDI Nacira	MCA	UAMOB	Co-encadreur
HALEM Zohra	MCA	UAMOB	Encadreur
MOUDIR Dalila	CH sénior	CRNA	Examinatrice

Remerciements

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

*Nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude envers notre promotrice, Mme **HALEM ZOHRRA** pour l'honneur qu'elle nous a fait en nous accompagnant, pour sa bienveillance, son soutien et le temps qu'elle nous a accordé.*

*Nous exprimons notre sincère et profonde gratitude envers Mme **IGGWI KAHINA** qui nous a fait l'honneur de présider le jury.*

*N'oublions pas de remercier également **Mr BOUDAA AMRANE** et **MOUDIR DALILA** pour son acceptation d'examiner notre travail.*

*Nos remerciements vont également : **Mr ALI IMESSOUDANE** et Mme **SAOUDI NACIRA** pour leurs conseils et leurs orientations.*

*Je tiens à exprimer notre gratitude envers **M. BALAIDI** pour son soutien et ses encouragements lors de la rédaction du mémoire.*

*Nous remercions **Mr Touri** l'ensemble des ingénieurs du laboratoire de chimie, tous les professeurs, le personnel administratif.*

Finalement, chacun avait participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

DEDICACES

Je ne parviens pas à trouver un mot ou une expression pour exprimer mes profonds sentiments de reconnaissance et de gratitude.

Ce travail modeste est dédié avec beaucoup d'amour et de fierté : en particulier à ma mère et à ma chère sœur NADJOUA, en signe d'amour profond, de reconnaissance et de tous les sacrifices qu'ils ont faits pour mon éducation et mon bonheur. Je vous aime énormément.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers tous les membres de la famille MEDJAHED et de la famille BITOUCHE et Amara ouardia, notamment mes oncles RACHIDE et SALAH, ainsi que mes chères frères ABD EL ALI, SAAD, ABD EL RAHMEN et YAZEN, qui m'ont tous soutenu et encouragé dans mes études. Je prie Dieu de vous accorder bonheur et de vous aider à concrétiser tous vos désirs.

Sans oublier évidemment les personnes chères qui nous ont quittés, mais qui demeurent toujours présentes dans nos souvenirs : Mon cher papa MOHAMED et mes oncles RABAH et KAMEL, qui nous ont quittés très tôt, Mes grands-parents SAAD, KHELIFI FATIMA et BITOUCHE HOUCINE, que Dieu les accueille dans son immense paradis. J'ai ressenti que vous êtes à mes côtés aujourd'hui, et voir votre petite NASRINE où elle est arrivée.

A tous mes enseignants tout au long de mes études. Avec tout, mon estime, affection et respect, je vous souhaite santé, bonheur et prospérité.

A tous mes amies : SAFIA, ZINEB, NADJET et AMEL... Avec qui j'ai partagé des moments merveilleux toute au long de mon cursus. Sans oublier mes collègues de travail : AMINA, ADEL, HALIM, MOHAMED, SALAH, BELKACEM, YUCEF et son père Mr HANICHE HOUCINE paix à son âme.

A ma chère binôme ALIOUAT SAFIA et sa famille pour son sérieux et sa compréhension toute au long de cette période de travail.

Enfin, à tous ceux ou celle que j'aurais oublié de citer mais qui sont chers et qui existent au fond de mon cœur et de ma pensée.

➤ Nasrine

DEDICACES

Grâce à l'intervention de Dieu tout-puissant, j'ai réussi à terminer ce projet que je dédie :

À **ma mère** très chère et douce, qui m'a donné la vie, l'amour, le courage, qui s'est tellement préoccupée de cette recherche et qui a tant pris soin de moi.

A **mon père** ; La personne la plus aimable, celle qui a tout donné pour que je puisse atteindre mon objectif. Qu'il reçoive ici mes plus sincères remerciements. Que dieu me les protéger.

Je souhaite exprimer ma gratitude envers tous les membres de la famille **Aliouat** et de la famille **Messaoudi**,

A mon cher frère **Fayssal**.

A mes précieuses sœurs **Salma**, **Soumia** et **Amani**.

À **ma grand-mère** adorée, source de sagesse et de douceur, avec tout mon amour éternel, sans oublier mon cher **grand- père** paix à son âme

Et ma tante **Fadila**

Je tiens à remercier ma chère binôme **Nasrine Medjahed** et sa famille, sa mère **tata Meriem** pour ses efforts inlassables dans la réalisation de ce travail.

Je dédie également ce travail à tous mes chères amies : **Nasrine**, **Zina**, **Randa**, **nadjoua** et avec lesquels je partage tous les souvenirs inoubliables

A Mohamed qui illumine chacun de mes jours de son éclat et de sa tendresse infinie.

A tous mes cousins et mes cousines et les membres de ma famille sans aucune exception.

A tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

➤ **Safia**

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique.....	02-30
I.1.Introduction	2
I.2.Les métaux lourds	2
I.2.1.Définition des métaux lourds	2
I.2.2.Les sources des métaux lourds dans l'environnement	3
I.2.3.La toxicité des métaux lourds	4
I.2.4.Effet des métaux lourds sur la santé humaine	6
I.3.Généralité sur les eaux usées	7
I.3.1.Nature et origine d'une eau usée	7
I.4.La station d'épuration (STEP)	9
I.4.1.Procédé de traitement des eaux usées dans une station d'épuration	9
I.4.1.1.Traitement primaire (décontation primaire)	9
I.4.1.2.Les traitements secondaires	11
I.4.1.3.Les traitement tertiares	12
I.5.Définition de la boue d'épuration	12
I.5.1.Classifications des boues	13
I.5.2.Consistance des boues	13
I.5.3.Qualité des boues et teneur en éléments-traces	13
I.5.4.Les origine des boues	13
I.5.4.1.La boue des eaux usées industriels	14
I.5.4.2.La boue des eaux usées domestiques	14
I.6.Les types de boues d'épuration	14

I.6.1.Les boues primaires..	14
I.6.2.Les boues secondaire	14
I.6.3.Les boues de traitement physico-chimique	15
I.6.4.Les boues biologiques (ou boues activées)	15
I.6.5.Les boues mixtes.....	15
I.6.6.Les boues d'aération prolongée	15
I.7.Traitement des boues de station d'épuration	15
I.7.1.Epaississement.....	16
I.7.1.1. Epaississement gravitaire	16
I.7.1.2. Epaississement dynamique	17
I.7.1.3.Déshydratation et conditionnement	18
I.7.1.3.1.Les filtre-presse	19
I.7.1.3.2.La centrifugeuse	20
I.7.1.3.3.Autres procédés	22
I.7.2. La stabilisation	22
I.7.2.1. Les voies biologiques.	23
I.7.2.1.1. Digestion aérobie : le compostage	23
I.7.2.1.2. Digestion anaérobie : la méthanisation	24
I.8. Les voies chimiques	25
I.8.1. Chaulage	25
I.8.2. Stabilisation aux sels de nitrite	26
I.9. Les voies physiques	26
I.9.1. Le Conditionnement	27
I.9.2. La déshydratation	27
I.9.3. Digesteurs	27

I.9.4. Séchage	27
I.9.4.1. Lit de séchage	27
I.9.4.2. Séchage solaire	28
I.9.4.3. Lit de sable	28
I.9.4.4. Lagune de séchage	29
I.9.4.5. Lit planté des macrophytes	29
I.9.4.6. Séchage thermique	30
Chapitre II: Matériel et méthodes.....	31-45
II.1. Les zones d'étude	31
II.1.1. Présentation de la station d'épuration de Sour El Ghozlane	31
II.1.2. Localisation de la station	31
II.1.3. Présentation de La STEP de Baraki	32
II .1.4. Localisation de la STEP de Baraki	33
II .1.5. Présentation de la station d'épuration OUED DHOUS	34
II .1.5.1. Définition de l'entreprise d'accueil	34
II .1.6. Localisation de station	35
II .2. Échantillonnage et prélèvement	35
II .2.1. Mode opératoire	36
II .2.2. Conditionnement des échantillons	36
II .2.3. Matériel d'étude	36
II .3. Préparation d'échantillon pour les analyses au laboratoire	37
II .3.1. Séchage	37
II .3.2. Broyage	38
II .4. Les analyse	38

II 4.1. Les analyses des caractérisations physico-chimiques	38
II 4.1.1. Le potentielle d'hydrogène (PH) et la conductivité électrique (CE)	39
II 4.1.2. La matière organique	40
II 4.2.1. La Minéralisation	41
II 4.2.2. Dosage des métaux lourds par SAA	42
II 4.2.3. Préparation des courbes d'étalonnage	43
Chapitre III: Résultats et discussion.....	46-50
III.1. Introduction :.....	46
III.2. Résultats et discussion.....	46
III.2.1. Paramètres physico-chimiques.....	46
III.2.1.1. Le PH.....	46
III.2.1.2. La CE.....	47
III.2.1.3. La matière organique.....	47
III 2.2. Composition de la boue en métaux lourds.....	48
III 2.2.1. Concentration de Plomb.....	48
III 2.2.2. Concentration de cadmium.....	49
III 2.2.3. Concentration du Ni.....	50
III.2.2.4. Concentration de Cr.....	51
Conclusion générale.....	52
Références bibliographiques.....	53

Liste d'abréviations

Pb: plomb.

Hg: Mercure.

Cd: Cadmium.

Ni: Nickel.

Cr: Chrome.

As : Arsenic.

AVC : accident vasculaire cérébraux.

PH : potentiel hydrique.

CE : Conductivité Electrique.

STEP : Station de traitement des eaux usées d'épuration.

ONA : Office National d'Assainissement.

V : volume.

Km : kilomètre.

MO : matière organique.

G : gramme.

% : pourcentage.

Cm : centimètre.

Ms : milli siemens.

Al : aluminium.

Fe : fer.

EH : équivalent habitant.

Bio : biologique.

SAA : Spectroscopie d'absorption atomique.

OMS : Organisation mondiale de la santé.

MES : matières en suspension.

C° : degré Celsius.

HNO₃ : acide nitrique.

KWh : kilowattheure.

KJ :kilojoule.

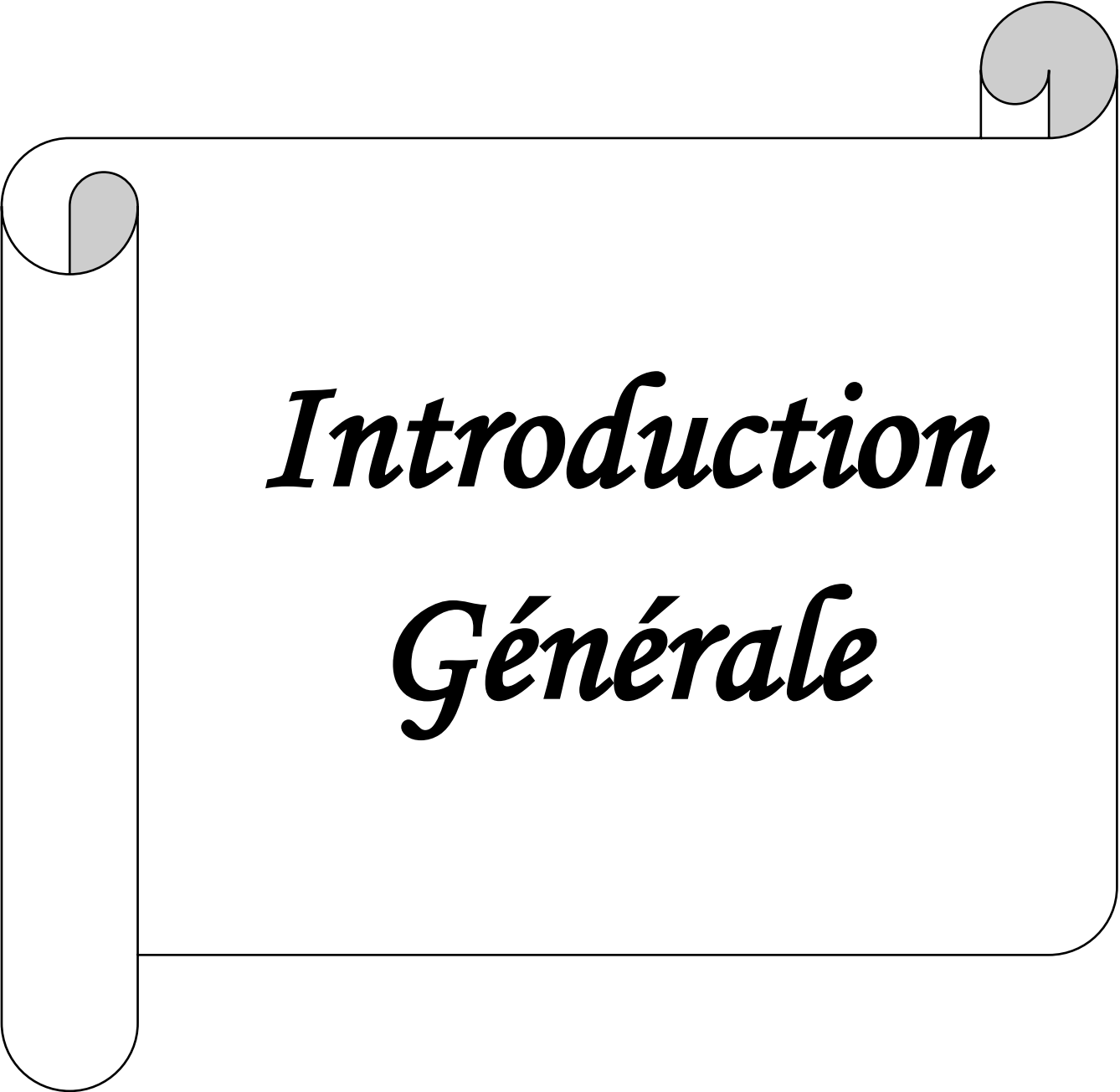
Liste des figures

Figure 1 : classification des métaux lourds dans le tableau périodique	3
Figure2 : les sources des métaux lourds dans l'environnement	4
Figure 3 : toxicité des métaux lourds.....	4
Figure 4 : Mécanismes d'intoxication humaine après exposition aux ML.....	6
Figure 5 : eaux usées domestiques.....	8
Figure 6 : eaux usées industrielles.....	8
Figure7 : eaux usées ruissellement.....	8
Figure 8 : schéma d'écoulement dans les stations d'épurations.....	9
Figure 9 : dégrillage.....	10
Figure 10 : dégraissage et déshuilage.....	10
Figure 11 : Bassin d'accumulation.....	10
Figure12 :cuve de décontation.....	11
Figure 13 : schéma de traitement des eaux usées.....	12
Figure 14 : Exemple de filtre – presse (Source : Warco Canada).....	19
Figure 15 : Schéma du fonctionnement d'une serre à séchage solaire.....	28
Figure 16 : Schéma de la composition principale du lit de sable.....	29
Figure 17 : La situation géographique de la zone d'étude.....	31
Figure 18 : prise de vue la situation géographique de la STEP de Sour El Ghoulane.....	32
Figure 19 : Lieu de rejet de l'eau usée traitée de la STEP de Baraki. (Image Maxar technologies, données cartographiques 2020).....	33
Figure 20 : localisation de la STEP de Baraki.....	33
Figure 21 : La STEP de Baraki (Source Google Earth).....	34
Figure 22 : La localisation de la station Oued DHOUS.....	35
Figure 23 : Image de la station par Google earth.....	35

Figure 24 : étuve de séchage.....	37
Figure 25 : Boue avant séchage.....	37
Figure 26 : Boue après séchage.....	37
Figure 27 : Los Angeles.....	38
Figure 28 : Boue après broyage et tamisage.....	38
Figure 29 : Le PH.....	39
Figure 30 : La conductivité.....	40
Figure 31 : Boue avant incinération.....	40
Figure 32 : Boue après incinération.....	41
Figure 33 : La minéralisation des 3 échantillons.....	41
Figure 34 : Les instruments de base pour la spectrométrie d'absorption atomique.....	43
Figure 35 : Spectromètre absorption atomique.....	45
Figure 36 : La variation des valeurs du PH.....	46
Figure 37 : Évolution de la conductivité électrique.....	47
Figure 38 : le taux de la matière organique.....	48
Figure 39 : concentration du Pb.....	49
Figure 40 : concentration du Cd.....	49
Figure 41 : Concentration du Ni.....	50
Figure 42 : concentration de Cr.....	51

Liste des tableaux

Tableau 1 compare certains paramètres des techniques d'épaississement.....	18
Tableau 2 : Avantages et inconvénients des différentes techniques de déshydratation par filtre-presse.....	20
Tableau 3 : Comparaison des différents types de déshydratation.....	21
Tableau 4 : liste de l'appareillage, matériel et réactif utilisés.....	36
Tableau 5 : Préparation de courbe d'étalonnage de Pb.....	44
Tableau 6 : Préparation de courbe d'étalonnage de Cd.....	44
Tableau 7 : Préparation de courbe d'étalonnage de Ni.....	44
Tableau 8 : Préparation de courbe d'étalonnage de Cr.....	45
Tableau 9 : Comparaison des concentrations des métaux lourds par la norme algérienne et la norme d'AFNOR.....	51

A decorative graphic of a scroll. It features a central rectangular area with rounded corners, outlined in black. On the left side, a vertical strip extends downwards, also with rounded ends. At the top right corner, a small scroll-like element is visible. The entire graphic is set against a white background.

Introduction

Générale

Introduction générale

Dans le cadre actuel de la situation agricole mondiale (concurrence croissante, demandes croissantes des consommateurs, principe de précaution), l'importance accordée à la qualité des produits agroalimentaires augmente, en particulier pour ce qui est des productions légumières.

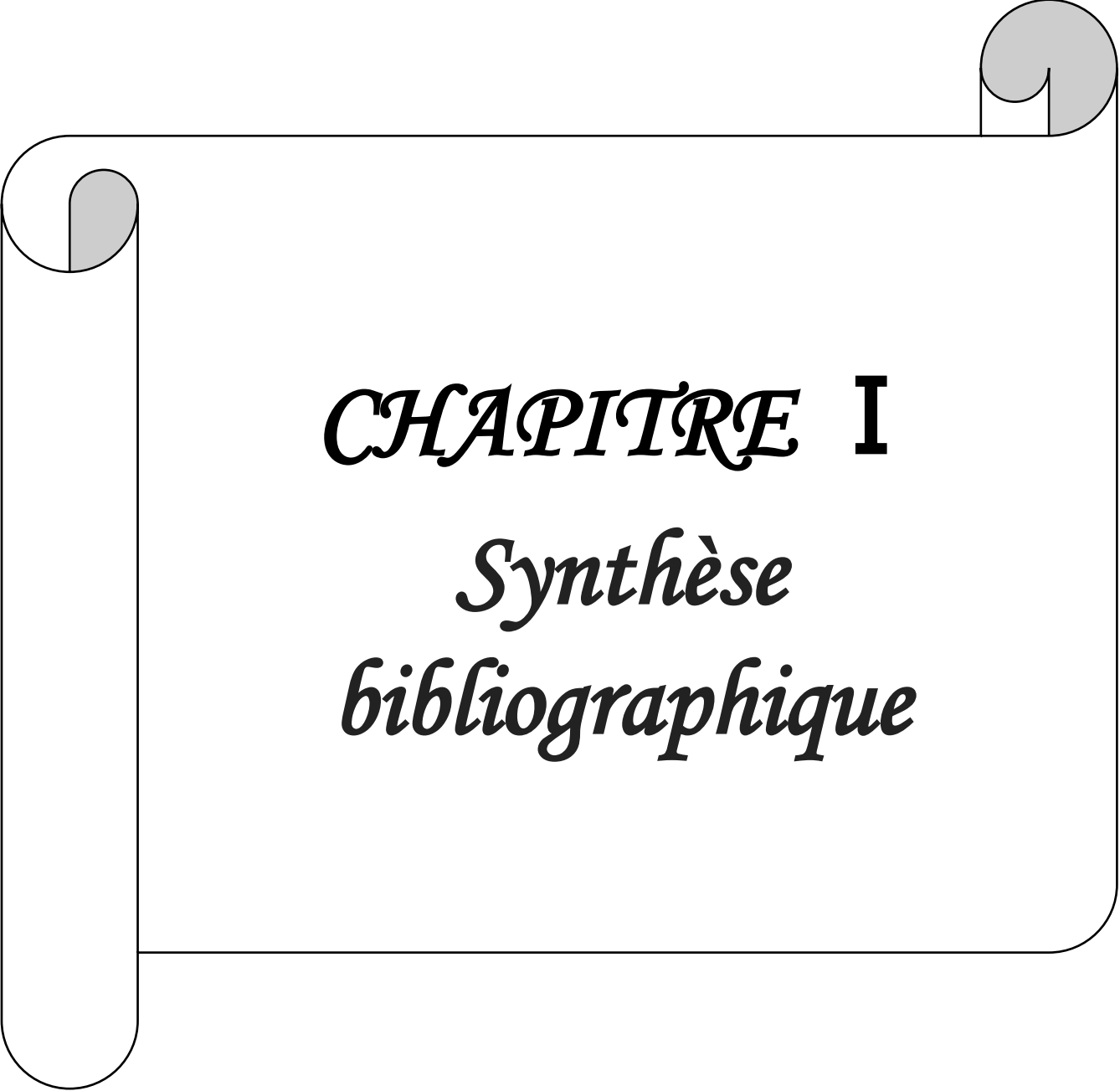
Parallèlement, en raison de la multiplication des stations d'épuration des eaux usées, les quantités de boues produites augmentent rapidement et leur épandage sur les terres agricoles est perçu comme la solution la plus facile et la plus efficace et moins onéreuse. Il est également possible que d'autres déchets de toutes sortes soient épandus sur les sols cultivés ou l'aient été par le passé (composts d'ordures ménagères, boues d'industries alimentaires, boues de papeteries, etc.). Les « éléments traces métalliques » (ETM) sont parmi les substances indésirables présentes dans ces différents déchets, souvent désignés sous le nom de « métaux lourds ».

Les eaux usées contiennent de plus en plus de substances difficiles à éliminer, ce qui a nécessité la mise en œuvre d'un système de traitement. Il est crucial pour assurer la sécurité de l'écosystème et il est même devenu le principal défi de la santé publique à l'échelle mondiale. La gestion des eaux usées nécessite différentes méthodes chimiques et biologiques.

Il est devenu indispensable de construire des stations d'épuration et de traitement afin de combattre la pollution, prévenir les maladies d'origine hydrique et préserver le milieu récepteur. Depuis le début des années 80, l'Algérie a mis en place un programme visant à construire des stations.

Les deux parties de ce mémoire sont composées d'une étude bibliographique qui examine les différents paramètres d'épuration des eaux usées (eau usée, métaux lourds et boue).

La deuxième partie est structurée en trois chapitres, avec une présentation des stations d'Oued dhous, Sour El Ghozlane et Beraki, des équipements et des méthodes utilisés, et une discussion sur les résultats des analyses. Nous concluons cette tâche en établissant une conclusion globale.

The background of the page is a stylized scroll. It features a central rectangular area with rounded corners, outlined in black. On the left side, a vertical strip represents the scroll's binding, with a small grey semi-circle at the top. On the right side, a grey semi-circle at the top represents the scroll's edge, with a vertical line extending downwards from its center.

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

I.1.Introduction

Le développement urbain et industriel ainsi que l'évolution des modes de consommation de l'eau ont entraîné une évolution significative de la quantité et de la qualité des rejets d'eaux usées.

Les eaux usées parmi les tissus biologiques qui peuvent accumuler des métaux lourds, ce qui peut avoir des conséquences néfastes à long terme, même à des niveaux d'exposition relativement faibles. Il est également possible que leur présence dans l'environnement perturbe les écosystèmes et la biodiversité. Pour cela, on considère que l'assainissement des eaux usées (urbaines ou industrielles) est une nécessité, tant pour la préservation de l'environnement que pour la préservation de l'eau en tant qu'écosystème.

L'épuration des eaux usées par différentes méthodes entraîne la formation d'une quantité considérable de boues dont il est nécessaire de se débarrasser.

I.2.Les métaux lourds

Les métaux lourds sont présents de manière naturelle dans notre milieu. Les activités humaines (industrie, agriculture, exploitation minière) ont provoqué une augmentation considérable des concentrations de métaux lourds dans l'environnement, y compris dans les écosystèmes terrestres et aquatiques. [1]

I.2.1.Définition des métaux lourds

Le terme métal lourd n'a pas de définition scientifique. [2] Ils sont généralement considérés comme des composés métalliques dont la masse volumique dépasse 5 g/cm³. Les traces de ces substances sont le plus souvent observées dans l'environnement : mercure, plomb, cadmium, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse, etc... [3]. La majorité d'entre eux sont présents dans la biosphère, en particulier dans l'eau, les sols et les roches. Et sont aussi déversés dans l'environnement grâce aux ressources humaines. Surtout dans le domaine commercial et industriel [4].

On connaît depuis des décennies les effets toxiques des métaux lourds. Toutefois, des recherches expérimentales récentes démontrent que certains métaux lourds jouent un rôle essentiel dans la vie de l'être humain et sont abondamment présents dans la nature par exemple nickel, cuivre, zinc [5].

La première convention internationale, la Convention sur la pollution atmosphérique à longue distance (LRTAP), a été mise en place pour surveiller la pollution métallique et mettre en place un protocole de réduction des émissions de métaux lourds. L'arsenic, le cadmium, le chrome, le cuivre, le manganèse, le mercure, le nickel, le plomb, le sélénium et le zinc sont déclarés par la France. Certains métaux font partie des métaux lourds, tandis que d'autres ne le sont pas. Le zinc ne peut donc pas être considéré comme un métal lourd. C'est l'un des métaux dont la toxicité est contrôlée. Le métal arsenic est un métalloïde (avec des propriétés métalliques et des propriétés opposées), considéré comme extrêmement toxique. [6]

Bloc S												Bloc p					
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg	Bloc d										Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Bloc f														
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
Transuraniens			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Cf	Bk	Es	Fm	Md	No	Lr	

Figure 1 : Classification des métaux lourds dans le tableau périodique

I.2.2. Les sources des métaux lourds dans l'environnement

La libération des métaux lourds dans les écosystèmes se fait principalement par deux voies : les ressources naturelles et différentes activités humaines (connues sous le nom d'activités anthropiques). Les catastrophes volcaniques, la dégradation des sols (comme l'érosion de surface) et la désintégration des roches sont des sources naturelles de libération de métaux lourds [7].

De nombreux processus de fabrication sont produits par les activités humaines : exploitation minière, fabrication de puces, revêtement métallique, fabrication de batteries, pigments, drainage, décharges d'ordures, activités agricoles, les activités agroalimentaires [8].

Par conséquent, les métaux lourds sont devenus l'un des éléments toxiques les plus abondants dans les environnements aquatiques et terrestres [9].

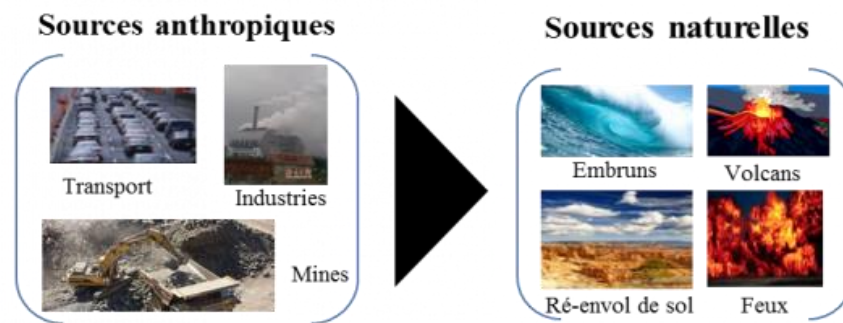


Figure2 : Les sources des métaux lourds dans l'environnement

I.2.3. La toxicité des métaux lourds



Figure 3 : Toxicité des métaux lourds

La présence de métaux lourds toxiques est un sujet inquiétant en raison de leurs conséquences néfastes sur la santé humaine et l'environnement. Voici certains des principaux métaux lourds et leurs effets toxiques :

- **Plomb (Pb) :** est un métal nocif qui tend à se fixer dans différents tissus, tels que le sang, les os et la majorité des organes du corps [10]. Diverses affections neurologiques ont été liées à l'exposition au Pb, notamment la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson, la sclérose latérale amyotrophique et le trouble déficitaire de l'attention/hyperactivité [11]. Différentes études ont examiné en détail l'impact du plomb sur les enfants, ce qui peut causer des retards de développement, des troubles du comportement, des lésions rénales et des conséquences sur le système cardiovasculaire. [12].
- **Mercure (Hg) :** est une substance dangereuse présente partout dans notre environnement. Il est capable de se méthyle, ce qui peut donner lieu à la formation de méthyl mercure (MeHg), qui peut se former dans la chaîne

alimentaire [13]. Plus spécifiquement, l'exposition prénatale au Hg a eu un effet défavorable sur la croissance des enfants, ce qui peut être expliqué par une réduction de la modulation parasympathique de la fonction autonome cardiaque chez les enfants [14]. Chez les adultes, il y a aussi une corrélation positive entre des niveaux élevés de Hg et la dyslipidémie [15]. Diverses recherches sur l'impact du Hg sur la fonction hépatique ont démontré que les enzymes hépatiques augmentaient de façon significative lorsque l'on était exposé au Hg [16].

- **Cadmium (Cd) :** est un métal lourd toxique qui a des conséquences préjudiciables sur la santé humaine [17]. Une étude a été réalisée par Vijayakumar et ses collègues [18] afin d'évaluer les effets biologiques du Cd sur la croissance et les métastases du cancer de la prostate ainsi que des tumeurs basales du sein. La réduction des défenses anti oxydantes des cellules tumorales du sein peut entraîner la formation de ROS lors de l'exposition au Cd [19].
- **Nickel (Ni) :** On le retrouve partout dans différents environnements tels que l'air, l'eau et le sol [20]. Ils ont examiné les conséquences néfastes du Ni sur l'homme, notamment dans le cadre de la grossesse. Les conclusions ont mis en évidence une corrélation favorable entre l'exposition au Ni chez les femmes enceintes et l'accouchement prématuré [21].
- **Chrome (Cr) :** Les conséquences potentielles de l'accumulation de chrome (Cr) dans les organes du corps humain sont connues [22]. Le Cr affecte les cellules épithéliales bronchiques de manière néfaste, peut-être en modulant de manière inadéquate les protéines associées à l'apoptose, les protéines du cytosquelette et les protéines liées au métabolisme énergétique [23]. On a examiné l'effet de la Cr sur la croissance du fœtus pendant la grossesse [24]. Selon les résultats de l'étude, il est possible que le Cr ait un impact néfaste sur la croissance fœtale. Le Cr est perçu comme une substance cancérigène qui a été liée à la progression du cancer du poumon [25]. La présence de pigmentation excessive sur la peau est due à l'exposition à des niveaux élevés de Cr [26].
- **Arsenic (As) :** est un métal très dangereux présent dans différentes formations géologiques, ainsi que dans l'eau et l'atmosphère. Chez l'homme, l'arsenic

possède des propriétés cancérogènes et est lié à différents effets néfastes sur la santé à court et à long terme [27].

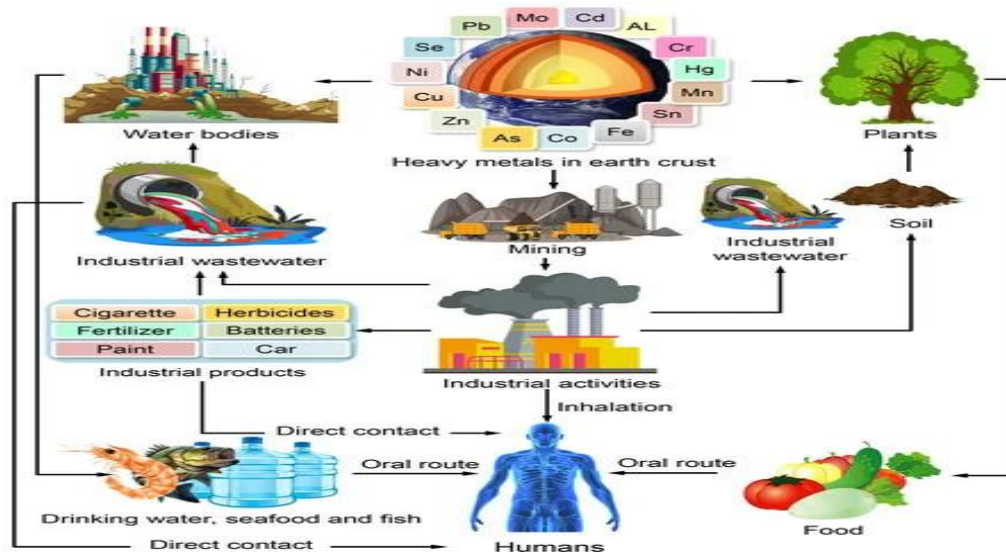


Figure 4 : Mécanismes d'intoxication humaine après exposition aux ML

I.2.4.Effet des métaux lourds sur la santé humaine

Le type de métal, la voie d'exposition (inhalation, ingestion ou contact cutané) et la durée de l'exposition peuvent influencer les effets néfastes des métaux lourds sur la santé humaine. Certains des effets les plus fréquents sur la santé humaine liés à l'exposition aux métaux lourds sont les suivants :

- **Problèmes neurologiques :** Certains métaux lourds, comme le plomb, le mercure et le manganèse, peuvent avoir un impact sur le système nerveux central et entraîner des symptômes tels que des problèmes de mémoire, des troubles du comportement, des maux de tête, des tremblements et même des lésions cérébrales permanentes.
- **Problèmes rénaux :** Les reins peuvent être affectés par le cadmium, le mercure et le plomb, ce qui peut causer des maladies rénales chroniques, des calculs rénaux et une insuffisance rénale.
- **Problèmes cardiovasculaires :** Certaines substances chimiques peuvent accroître le risque de maladies cardiovasculaires comme l'hypertension artérielle, les maladies cardiaques et les accidents vasculaires cérébraux (AVC).
- **Effets sur le développement :** Les métaux lourds tels que le plomb, le mercure et le cadmium peuvent avoir des conséquences néfastes sur le développement du cerveau et du système nerveux chez le nourrisson, ce qui peut entraîner des retards de

développement, des troubles du comportement et des déficits cognitifs chez les enfants.

- **Effet sur les systèmes respiratoire :** Différents métaux lourds, comme le cadmium et le nickel, peuvent entraîner des troubles respiratoires tels que l'asthme, la bronchite chronique et même des lésions graves des poumons.
- **Cancer :** Certains métaux lourds, tels que l'arsenic, le chrome hexa valent et le nickel, sont considérés comme cancérigènes pour l'être humain et sont liés à un risque accru de développer divers types de cancer, tels que le cancer du poumon, le cancer de la peau et le cancer de la vessie. [28]

I .3.Généralité sur les eaux usées

Les eaux usées correspondent aux eaux utilisées dans différents processus humains, tels que les activités domestiques, industrielles et agricoles, et qui ont été contaminées. Souvent, ces eaux renferment différents contaminants, tels que des substances organiques, des substances chimiques, des nutriments et des agents pathogènes. Il est crucial de les gérer de manière efficace afin de préserver la santé humaine et l'environnement [29]

D'après l'OMS, une mauvaise gestion des eaux usées peut causer des contaminations dans les sources d'eau potable, entraîner la propagation de maladies d'origine hydrique et entraîner une pollution de l'environnement. Selon les estimations de l'OMS, environ 80 % des eaux usées mondiales sont évacuées dans l'environnement sans être traitées correctement [30].

I.3.1.Nature et origine d'une eau usée

Les eaux usées renferment différentes substances polluantes, qu'elles soient domestiques ou industrielles, ce qui nécessite un type de station approprié pour traiter chaque type d'eau usée.

- **Les eaux usées domestiques :** Ces eaux provenant de l'exploitation de l'eau potable pour répondre à tous les besoins domestiques (les eaux de cuisine, les eaux de vannes provenant des sanitaires).



Figure 5 : Eaux usées domestiques.

- **Les eaux usées industrielles :** Il s'agit des eaux provenant des rejets industriels, des rejets provenant des activités artisanales ou commerciales telles que la blanchisserie, le restaurant, les laboratoires d'analyses médicales, etc...



Figure 6: Eaux usées industrielles

- **Les eaux usées ruissellement :** Les eaux de pluie peuvent également renfermer des métaux lourds tels que le plomb, le zinc et des hydrocarbures chargés de poussières, ainsi que des eaux de pluie parfois acides.

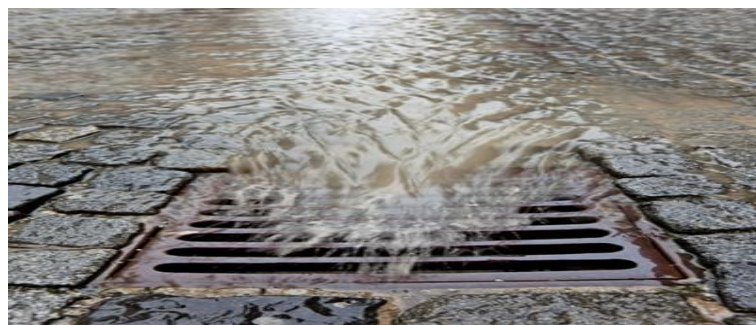


Figure7 : Eaux usées ruissellement

I.4. La station d'épuration (STEP)

La station d'épuration est composée de divers équipements et procédés spécifiques, chacun ayant pour fonction d'éliminer ou de réduire le niveau d'un polluant présent dans l'eau usée.

Un laboratoire d'analyse est inclus dans la station, dont l'objectif est de surveiller le rendement de la STEP et d'analyser les anomalies (si nécessaire). En général, il surveille le bon fonctionnement de la station.

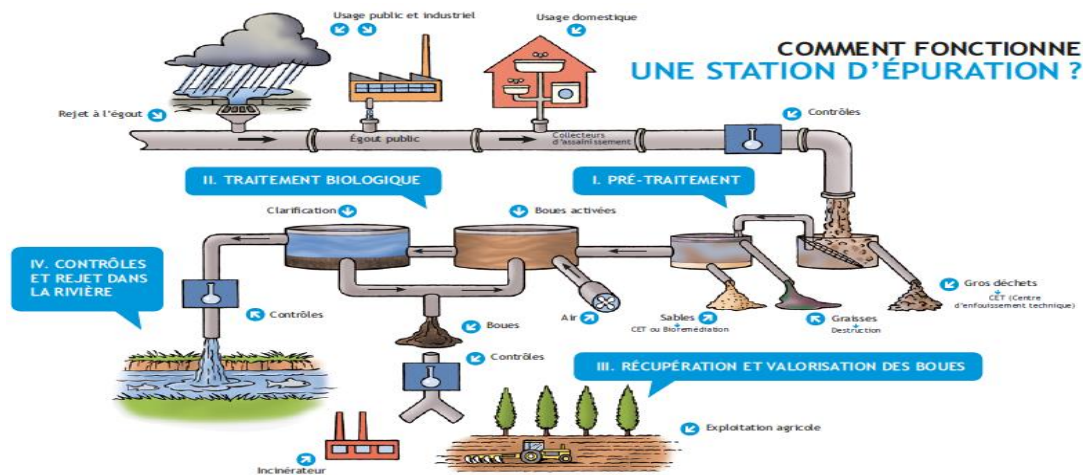


Figure 8 : Schéma d'écoulement dans les stations d'épurations

I.4.1. Procédé de traitement des eaux usées dans une station d'épuration

I.4.1.1. Traitement primaire (décontation primaire)

Le processus de traitement des eaux usées primaire implique différentes étapes :

- **Prétraitement** : Les déchets sont recueillis et transportés vers une station de pompage où ils sont soumis à un premier prétraitement. Ce traitement préliminaire permet de supprimer les débris solides, comme les branches, les feuilles, les plastiques, et ainsi de suite [31].
- **Le dégrillage** : facilite l'élimination des matières volumineuses (bouteilles, bois...) rejetées par les eaux brutes, ce qui pourrait entraîner l'obturation de diverses unités de l'installation et compromettre l'efficacité des traitements suivants, les grilles permettent le dégrillage en écartant les barreaux en fonction de la taille des objets à piéger [32].



Figure 9: Dégrillage

- **Dégraissage :** Des procédés biochimiques sont utilisés pour séparer les matières grasses de l'eau dans les bassins . Par la suite, les matières grasses sont recueillies et placées dans un récipient [33].



Figure 10 : Dégraissage et déshuilage

- **Accumulation :** Dans cette situation, les eaux d'usine sont dirigées vers le bassin d'accumulation afin d'équilibrer le pH ou l'acidité grâce au NaOH. Le pH lors de cette étape varie de 6,5 à 8,5 ($6.5 < \text{pH} < 8,5$) [34].



Figure 11 : Bassin d'accumulation.

- **Décantation** : Des cuves de décantation sont utilisées pour acheminer les eaux usées afin de séparer les matières solides plus fines. On recueille les boues qui se forment et on les jette dans un bac de décantation. Il existe des frottoirs dans ce décanteur (frottoir1 : il retient les matériaux flottants ; frottoir2 : il retient la boue et la dépose dans des tuyaux) [34].



Figure12 :Cuve de décontation

- **Filtration** : Les eaux usées dans la station d'épuration sont ensuite filtrées à travers des filtres à sable afin de retirer les particules fines et les micro-organismes[35]. .
- **Effluent** : Par la suite, les eaux sont conservées dans un réservoir où elles subissent un traitement biologique afin de supprimer les matières organiques (les boues). Par la suite, les déchets sont déversés dans la nature [35].

I.4.1.2.Les traitements secondaires

Les station d'épuration utilise généralement des micro-organismes pour procéder au traitement secondaire des eaux usées, qui consiste à décomposer les matières organiques présentes dans les eaux usées. On effectue ce processus dans des bacs ou des bassins de traitement où se trouvent des bactéries aérobies (qui nécessitent de l'oxygène pour vivre) et des bactéries anaérobies (qui se développent sans oxygène). Ces bassins contiennent les eaux usées, qui sont aérobies afin de favoriser le développement des bactéries aérobies et la décomposition des matières organiques en substances plus simples. Par la suite, les eaux sont déplacées vers des bassins anaérobies, où les bactéries anaérobies continuent leur

décomposition. À la fin du processus de traitement secondaire, les eaux sont purifiées à environ 90%, ce qui rend l'eau plus propre et plus sûre pour être rejetée dans l'environnement [36].

I.4.1.3. Les traitements tertiaires

Le traitement tertiaire, qui n'est pas systématique, est une opération d'affinage de l'effluent avant réintroduction de l'eau épurée dans le milieu naturel.

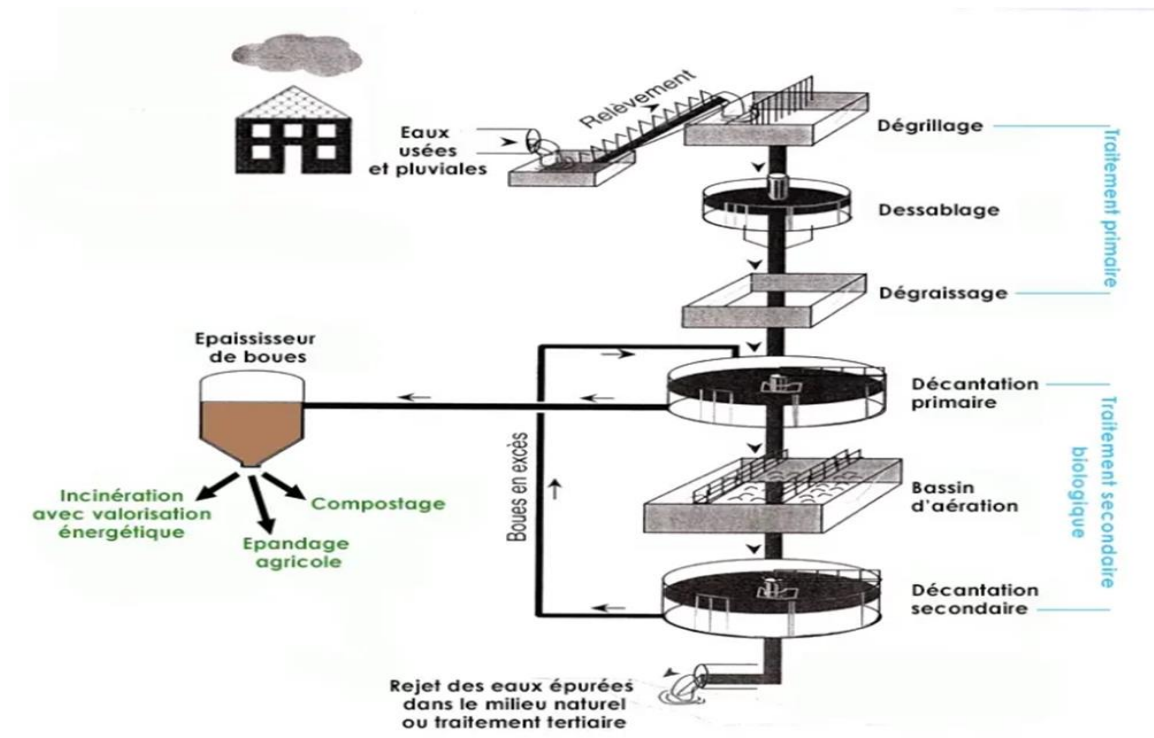


Figure 13 : Schéma de traitement des eaux usées

I .5.Définition de la boue d'épuration

Les boues d'épuration sont les résidus produits après que les stations d'épuration traitent les eaux usées liquides.

Ces boues sont composées de matières organiques et de minéraux.

Les boues d'épuration se caractérisent par leur teneur en matière sèche et en matière organique.

Ces deux paramètres dépendent de la méthode de traitement des eaux usées.

I.5.1. Classifications des boues

- **Boue Huileuses hydrophobes** : elles contiennent des oxydes mélangés à des huiles minérales.
- **Boue Minérales hydrophiles** : elles contiennent une forte proportion d'hydroxydes métalliques.
- **Boue Minérales hydrophobes** : elles contiennent une forte proportion de carbonates
- **Boue Fibreuses** : elles contiennent de 20 à 80 % de fibres. [37]

I.5.2. Consistance des boues

La consistance plusieurs boues dépend de leur teneur en matière sèche. Il existe 4 niveaux de cohérence :

- Les boues liquides : elles présentent une siccité de 0 à 10 %
- Les boues pâteuses : elles présentent une siccité de 10 à 25 %
- Les boues solides : elles présentent une siccité de 25 à 85 %
- Les boues sèches : elles présentent une siccité supérieure à 85 %. [38]

I.5.3. Qualité des boues et teneur en éléments-traces

La qualité des boues varie en fonction de la nature des eaux usées entrant dans la station d'épuration. Tant que la sécurité du réseau est collectée en amont, leurs propriétés à la sortie d'une même station sont relativement stables. Leur teneur en matière organique en fait une matière secondaire très fertile. En même temps, ils sont riches en substances potentiellement dangereuses composés organiques, métaux lourds, bactéries pathogènes.

Il est largement admis que les boues peuvent capter 90% des métaux lourds présents dans les eaux usées municipales.

Lorsqu'il s'agit d'augmenter sa valeur grâce à la distribution, cela ne va pas sans problèmes.

Lors de la crise de l'ESB, ils ont été analysés pour déterminer s'ils étaient impliqués dans la diffusion des résultats négatifs de l'Afssa.

I.5.4. Les origine des boues

Les boues des stations d'épuration sont des boues résiduelles générées par le traitement des eaux usées en aval. Ces boues peuvent provenir de différentes sources :

I.5.4.1. La boue des eaux usées industriels

Les eaux usées industrielles produisent différents types de boues, caractérisées par la présence de matières organiques (eaux usées d'abattoir ou de fermentation) ou inorganiques (industrie pharmaceutique ou métallurgique, etc.) pouvant contenir des composés toxiques tels que des métaux lourds. [39]

I.5.4.2. La boue des eaux usées domestiques

Les eaux usées domestiques produisent des boues décantées (boues de traitement primaire), qui se caractérisent par une odeur désagréable, une teneur en humidité de 94 à 98% et une teneur en matières solides de 0,5 à 2,5%.

Les boues sont produites par simple décantation des matières en suspension (MES) des eaux usées, de sorte que 70% de MES sont retenus.

En particulier, les boues secondaires contenant des films microbiens sont plus stables que les boues primaires ayant une teneur en matière sèche de 6 à 8 %. [40]

Au sein des stations d'épuration, les boues sont un sous-produit collecté lors de différentes étapes d'épuration de l'eau.

I.6. Les types de boues d'épuration

On distingue donc différents types de boues en fonction de la nature du traitement d'épuration

I.6.1. Les boues primaires

Les boues de traitement primaire des eaux sont produites dans des bassins par simple décantation des matières organiques et minérales en suspension (MES) contenues dans les eaux usées. Lors de cette étape de traitement des eaux usées, jusqu'à 70 % du MES est retenu et finit donc dans les boues. À mesure que les procédés de traitement des eaux usées se développent, le volume des boues tend à diminuer.)

I.6.2. Les boues secondaire

Les boues secondaires, également appelées boues biologiques, sont des boues produites par traitement biologique, que ce soit en culture libre (boues activées) ou en culture fixée (lits bactériens, plateaux biologiques, etc.). Ils sont issus du métabolisme des polluants organiques solubles et colloïdaux biodégradables lors de l'épuration.

I.6.3.Les boues de traitement physico-chimique

L'agrégation des matières organiques particulières ou colloïdales contenues dans les eaux usées est séparée par ajout de coagulants (sels de fer ou d'aluminium) puis par décantation. A cette étape du traitement des eaux usées, jusqu'à 90 % du MES est retenu et finit donc dans les boues. Ces boues contiennent une part importante de sels minéraux issus de l'eau brute et de coagulants. Elles proviennent principalement des stations d'épuration situées dans les zones touristiques, qui doivent adapter leur traitement aux fortes fluctuations de la population et du nombre d'équivalents habitants (EH), unité de base utilisée pour déterminer la taille du secteur de traitement.) [41]

I.6.4.Les boues biologiques (ou boues activées)

Est le résultat d'un traitement bactérien (appelé « bio »), qui implique une oxydation intense du milieu grâce à des aérateurs ou des inhibiteurs. Les boues sont principalement composées de déchets, de micro-organismes aérobies, et sont riches en matière organique. [42]

I.6.5.Les boues mixtes

Elle est constituée d'un mélange de boues primaires et de boues secondaires (boues physiques et chimiques).

I.6.6.Les boues d'aération prolongée

Contrairement aux boues biologiques qui subissent un traitement de sédimentation primaire, les boues d'aération longue durée ne subissent pas de traitement de sédimentation, mais proviennent directement de l'aération centralisée des polluants. Les boues d'aération longue durée sont très peu concentrées et contiennent moins de matières organiques que les boues biologiques. Ils sont donc moins susceptibles de produire des odeurs. [43]

I.7.Traitement des boues de station d'épuration

A la sortie d'un système de traitement d'eau, les boues contiennent environ 95 à 99 % d'eau. Cette dernière se présente généralement sous deux formes :

- Eau libre : mal absorbée, éliminée par déshydratation mécanique,
- Eau liée : contient des bactéries ou d'autres particules attachées qui peuvent être éliminées par séchage thermique ($>105^{\circ}\text{C}$). Le traitement des boues consiste donc dans un premier temps à réduire leur teneur en eau et à réduire efficacement leurs

polluants et leur charge fermentescible. Cela inclut leur préparation aux étapes finales de récupération ou d'élimination. Il existe quatre technologies principales qui peuvent se compléter : l'épaississement, la stabilisation (souvent associée à l'hygiène), la déshydratation et le séchage.

I .7.1.Epaississement

Le but de l'épaississement des boues est de concentrer les matières en suspension de la manière la plus économique, en éliminant de grandes quantités d'eau par décantation, flottation, centrifugation ou drainage. Il s'agit donc d'une étape intermédiaire dans la réduction de la quantité de boues produites par la station. [44]

L'épaississement constitue généralement la première étape du traitement des boues. C'est Le processus est simple et consomme moins d'énergie. Principalement utilisé pour réduire le volume Boues brutes et constituent l'étape préparatoire au traitement suivant. Taux de séchage Le MS obtenu peut atteindre 10 %. Quelle que soit la technologie utilisée, l'eau Le recyclage doit être faite à la gare. Il existe différentes méthodes pour épaissir les boues :

- ❖ Concentration gravitationnelle : décantation (ou précipitation)
- ❖ Epaississement dynamique :
 - ✓ La flottation,
 - ✓ Centrifuge
 - ✓ Système de drainage (grilles et égouttoirs)

I.7.1.1.Epaississement gravitaire

➤ La décantation (ou sédimentation)

Cette technologie est la plus couramment utilisée pour l'épaississement des boues. Très fréquent dans les grands sites (10 000-100 000 PE). Compte tenu de la capacité de stockage, il est recommandé que la hauteur du décanteur soit de 3,5 à 4 m pour faciliter le compactage des boues. La siccité des boues en sortie de procédé varie de 2 à 10 % selon la nature des boues à traiter.

Ce procédé est peu coûteux (la consommation énergétique est de l'ordre de 1 à 7 kWh/tMS) et simple à mettre en œuvre, mais est peu performant pour les boues biologiques (boues hautement fermentescibles) avec une siccité de seulement 1,5 à 2,5 %. De plus, la mise en place de la structure nécessite une surface et un volume très importants.

Le temps de séjour des boues dans l'épaississeur est d'environ 48 heures. Les performances varient selon la nature des boues : 40 à 80 kg MS/m²/jour pour les boues primaires et 25 kg MS/m²/jour pour les boues biologiques.

I.7.1.2.Epaississement dynamique

➤ Flottation

La flottation est bien adaptée aux boues biologiques. Par rapport à la sédimentation, la flottation présente les avantages d'un processus rapide et peut être réalisée dans des unités compactes, notamment pour les matières en suspension (MES) à faible décantation (teneur sèche 3,5-5%).

Le procédé est basé sur la séparation de phases provoquée par la remontée des boues à la surface sous l'action de fines bulles. Le principal inconvénient de cette technologie réside dans les coûts d'exploitation élevés dus à une forte consommation d'énergie (entre 60 et 100 kWh/tMS) et à son fonctionnement délicat. Ce procédé est donc principalement réservé aux grands sites (10 000 à 100 000 EH).

➤ Centrifugation

La technologie implique la séparation des phases liquide et solide en ajoutant une faible dose de polymère aux boues sous l'action de la force centrifuge, permettant ainsi d'obtenir un bon compactage (secte de 4 à 6 %). Il s'agit d'un procédé rapide (66 à 100 mètres cubes de boues par heure) et compact, mais très gourmand en énergie (150 à 300 kWh/tMS) et très sensible à la qualité des boues.

➤ Drainage

Les boues préalablement floculées par traitement physique et chimique sont épandues sur le porte-filtre, et le porte-filtre est gratté en continu par une lame en caoutchouc. Il existe différentes techniques. Les tables, grilles et tambours de drainage sont des technologies simples, efficaces et abordables, tandis que les caissons filtrants sont idéaux pour les petites stations et très simples à utiliser, mais sont plus coûteux et nécessitent une assistance technique importante.

Type d'épaississement	Énergie (kWh/t MS)	Conditionnement	Siccité (%)
Décantation	10 à 20	-	1,5 à 2,5
Flottation	60 à 100	-	3,5 à 5
Centrifugation	150 à 300	Polymère (5kg/tMS)	4 à 6
Drainage	30 à 60	Polymère (1,5kg/tMS)	4,5 à 6

Tableau 1 compare certains paramètres des techniques d'épaississement.

La concentration par drainage est donc la technologie la plus efficace, produisant des boues avec un degré de siccité relativement élevé tout en consommant moins d'énergie.

I.7.1.3.Déshydratation et conditionnement

La déshydratation est la deuxième étape permettant de réduire le volume des boues sur boues concentrées (stabilisées ou non) pour obtenir une siccité de boues élevée (en moyenne entre 20 % et 30 %, selon la nature des boues). La déshydratation présente plusieurs avantages : elle facilite le stockage et réduit ainsi les coûts de transport, améliore la stabilité (augmente le temps de séjour) et facilite l'utilisation en agriculture.

Les technologies de déshydratation mécanique comprennent les éléments suivants :

➤ **Filtres presses**

- Filtre à plateaux
- Filtre à plateaux membranes
- Filtre à bande
- Presse à vis

➤ **Centrifugeuse**

➤ **Autres procédés**

- Panier rotatif
- Pressoir Fournier
- Sacs filtrants

I .7.1.3.1.Les filtre-presse

Un filtre-presse (Figure 13) est une technologie de déshydratation qui exerce mécaniquement une forte pression sur les boues. Ce dernier libère l'eau interstitielle à travers le filtre. Les solides retenus sont ensuite utilisés pour former un « gâteau » plus ou moins sec.



Figure 14 : Exemple de filtre – presse (Source : Warco Canada)

Utiliser des réactifs de coagulation/floculation dont la fonction principale est d'augmenter l'agglomération des particules. Cela facilite le filtrage de ces particules. Le chlorure ferrique et la chaux sont les solutions les plus couramment choisies, mais des électrolytes polymères peuvent également être utilisés. L'utilisation de polymères et de tissus spécifiques facilite la mise en place du gâteau de filtration, étape critique de la déshydratation.

Ensuite, le tissu doit être lavé : plus la boue est « biologique », plus le lavage doit être intense. Ce lavage produit également d'importants volumes d'eau contenant des matières en suspension, qui sont réintroduites en amont du traitement. Pour déterminer la capacité de l'unité, il faut tenir compte de la dilution des boues qui en résulte.

Le système fonctionne généralement de manière discontinue selon des cycles (remplissage, filtration, sédimentation, lavage) dont la durée dépend plus ou moins de la nature de la suspension de boues, de l'efficacité de son alimentation et de son conditionnement. La qualité de la déshydratation est jugée par la facilité d'élimination du gâteau de filtration.

Cette technologie est très intéressante car elle s'adapte au type de boues traitées (nombre de cycles par jour, choix du polymère, taille des mailles, point d'injection, méthode de mélange). De plus, le volume du filtre-presse est réduit et peut être intégré au filtre-presse. Filtre-presse. Le coût d'investissement opérationnel du filtre est généralement raisonnable et l'opération est relativement simple. Il existe quatre technologies de filtre-presse différentes : les filtres à bandes, les filtres à plaques, les filtres à membrane et les filtres presses à vis (Tableau 4).

Traitement		Principe	Avantages	Inconvénients	Siccité obtenue	Type de station adaptée
filtre presse	à bande	Compression des boues entre deux bandes de toile. Une fois la toile débarrassée de la boue, il faut la laver pour qu'elle conserve sa porosité. Ce système nécessite l'addition de polymères dont la composition et la quantité doivent être constamment adaptées à la qualité des boues. Très utilisés dans le passé, les filtres à bande sont abandonnés au profit de technologies plus simples.	- lavage régulier - performante pour boues biologiques - grande productivité - fonctionnement en continu	- incapacité de traiter les boues fibreuses - technique quasi abandonnée	25%	petite et moyenne station
	à plateaux	Composé de chambres de filtration dans lesquelles la boue est comprimée par des vérins hydrauliques jusqu'à formation d'un gâteau compact. L'alimentation en boues est discontinue.	- entretien limité - tout type de boues (préalablement épaissies)	- inadapté pour les boues collantes - investissement élevé - automatisation impossible	>30%	grande station
	à membrane	Perfectionnement du filtre-presse. Il permet tout d'abord d'éviter l'effet négatif du débit de fuite sur les floes en fin de montée en pression.	- augmentation de siccité par rapport au filtre à plateaux - 40% de productivité de plus qu'un filtre à plateaux		>34%	peu répandu
	à vis	Après la phase d'essorage - compactage, grâce à une vis d'extrusion autour de laquelle se trouve une grille filtrante. Les grilles sont autonettoyantes et spécifiques à chaque type de boue.	- bien adapté aux boues fibreuses - fonctionnement en continu - peu d'entretien	- siccité limitée	20%	peu répandue

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des différentes techniques de déshydratation par filtre-presse.

I.7.1.3.2.La centrifugeuse

La centrifugeuse est l'équipement qui connaît la croissance la plus rapide ces dernières années, et ses performances sont proches, voire parfois égales, à celles du filtre-presse. Il s'agit de la séparation des phases liquide et solide, du fait de leur densité, accélérée par centrifugation dans un bol dans lequel tourne la vis. La vis racle et expulse la phase solide. Généralement, les conceptions de tarières sont personnalisées pour des types de boue spécifiques. La compacité de la technologie permet de développer des unités de déshydratation mobiles, assurant ainsi une certaine flexibilité dans le procédé.

Il présente de nombreux avantages par rapport aux filtres presses :

- Forte adaptabilité aux boues difficiles à traiter : pour les boues urbaines huileuses, la séparation des matières insolubles est quasiment complète.

- La déshydratation peut fonctionner en continu.
- L'ensemble du processus est entièrement automatisé.
- Le procédé est fermé et plus compact que le filtre-presse. Le principal avantage des centrifugeuses est qu'elles conviennent aux petites stations d'épuration, où les promoteurs de filtre-presse commencent à investir.

Il faut veiller à ce que les boues ne contiennent pas de sable, sinon la centrifugeuse risque de se détériorer rapidement. Une surveillance continue des propriétés des boues est donc nécessaire. Par ailleurs, les coûts d'investissement et d'exploitation (consommation importante de poly électrolytes et d'énergie) restent encore assez élevés. Malgré son amélioration significative des performances, la centrifugation ne permet d'atteindre qu'une siccité limitée entre 20 % et 25 %. Les centrifugeuses sont devenues plus économes en énergie, plus compactes et plus efficaces et constituent la technologie de déshydratation la plus courante.

Trois types de conditionnement peuvent être effectués avant déshydratation (Tableau 5) :

- Conditionnement minéral, à l'aide de chaux et de coagulants (chlore ou sulfate ferrique). Il peut améliorer considérablement la siccité et la stabilité des boues. Ce type de conditionnement est particulièrement adapté lorsque les boues traitées sont utilisées pour l'épandage agricole ou sont stockées dans un ISDND.
- Conditionnement organique avec des polymères. Elle peut être réalisée après ajout d'un éventuel coagulant.
 - ✓ Réglage de la chaleur pour que la sécheresse dépasse 50%. Il est utilisé avec les boues digérées dans les grandes installations.

Technique de déshydratation	Type de boues	Siccité obtenue	Conditionnement
centrifugation	biologique	16-20 %	polymère cationique 5-8kg/tMS
filtre à bande		14-17%	polymère cationique 6kg/tMS
filtre à plateaux		30-35%	28-30% de chaux 8-10% FeCl ₃

Tableau 3 : Comparaison des différents types de déshydratation

I.7.1.3.3. Autres procédés

➤ Panier rotatif

Le système s'inspire des centrifugeuses, fonctionnant avec des vis d'agitation et essentiellement une séparation par gravité. Les principaux avantages sont un gain de place accru et une meilleure étanchéité. Le panier rotatif peut faire partie de l'unité mobile.

➤ Le presse Fournier

La presse Fournier est constituée d'un système rotatif qui consomme moins d'énergie qu'une centrifugeuse et ne nécessite pas de pression élevée pour transporter les boues. Après injection, ils subissent un mouvement de rotation dans des canaux en périphérie de la roue. Ensuite, la force de compression centrifuge est appliquée. Les boues sont évacuées et l'eau est évacuée latéralement à travers le tamis. Selon les boues, la siccité peut atteindre 35 %.

➤ Les sacs filtrants

Ce procédé à base de sacs filtrants jetables est privilégié par les industriels, mais il peut également être adapté aux boues municipales. Les boues préalablement floculées sont introduites sous pression pour être évaporées. La siccité obtenue peut atteindre 25 %. Ce procédé convient principalement aux petites stations et nécessite des conditions de stockage strictes.

I.7.2. La stabilisation

Bien que la stabilisation et l'assainissement répondent chacun à des objectifs différents, ils peuvent être combinés en une seule étape conçue pour minimiser tous les risques biologiques pouvant découler des boues déshydratées. Les deux traitements sont généralement dispensés par le même procédé.

La stabilisation consiste à minimiser l'activité biologique de dégradation des boues, plus précisément leur fermentation. Il réduit considérablement les nuisances olfactives, les émissions de méthane, le risque de lessivage, le nombre de bactéries et la demande biologique en oxygène (DBO₅).

De son côté, l'assainissement vise à réduire la présence d'agents pathogènes dans les boues d'épuration afin d'éviter une éventuelle contamination lorsqu'elles sont utilisées pour valoriser les écosystèmes (par exemple propagation ou revégétalisation). Ces deux étapes peuvent être réalisées biologiquement, chimiquement ou physiquement.

I.7.2.1.Les voies biologiques

I.7.2.1.1.Digestion aérobie : le compostage

Le compostage est la dégradation aérobie des éléments organiques Boues fermentescibles.

Ce processus crée un produit appelé compost, Riche en substances humiques, il libère également du dioxyde de carbone. Ammoniac, eau, azote et chaleur. Il nécessite un apport d'oxygène, d'eau et de matières organiques, ainsi que de sources de carbone et d'azote pour assurer la croissance adéquate des bactéries aérobies. La matière organique se dégrade par étapes successives, ce qui permet de déterminer la maturité du produit. Le compostage présente deux avantages principaux : il est stable et il stérilise les « déchets » en un « produit » répondant à la norme NFU 44-095.5.

Nécessité d'un Co-compostage

Les boues d'épuration ne peuvent pas « s'auto-composter » car leur teneur en humidité est trop élevée (malgré un épaississement et une déshydratation préalables), elles manquent d'éléments structurels et leur rapport carbone/azote (C/N) est trop faible.

Il est donc nécessaire de mélanger les boues avec des supports structurels à base de carbone pour fournir des sources de carbone supplémentaires et favoriser l'aération. A cet effet, on utilise souvent des écorces, des copeaux, des déchets verts, des épis de maïs ou de la paille.

À la fin du cycle de compostage, les supports structurels sont souvent triés pour être recyclés, ce qui réduit l'offre. Par exemple, lors de l'utilisation d'écorces, le criblage peut être effectué après l'étape de fermentation du compost et avant l'étape de maturation. Cela permet une récupération du substrat grossier et un meilleur contrôle de la granulométrie du compost. La nature du support carboné et le rapport mélange boue/support varient sensiblement selon les plateformes. Le compostage nécessite donc une expertise spécifique de la part de chaque opérateur.

Processus de « fermentation » aérobie

L'efficacité de la réaction dépend de l'aération du substrat. Cela doit être fait dans un andain bien ventilé avec une humidité optimale. La technologie d'aération forcée (aspiration ou soufflage) a été développée pour accélérer encore le processus de dégradation et augmenter la productivité. De plus, une ventilation efficace permet de limiter les émissions de CH₄ et les odeurs. Les systèmes d'aération forcée sont supérieurs à l'aération inversée.

En effet, de par la nature des boues, leurs besoins en oxygène sont très élevés. Très fermentescible. De plus, les systèmes de ventilation rotatifs semblent souvent confrontés à des problèmes d'odeurs, nécessitant des solutions de ventilation précises.

Cependant, cette technologie assure une meilleure homogénéisation des boues et une hygiène globale du produit grâce à l'effet thermique. Il est donc idéal de combiner une ventilation forcée avec une ventilation détournée à un coût raisonnable.

La température moyenne des boues après compostage à haute température peut atteindre 65°C, la durée est de 10 à 67 jours et la période de réchauffement est de 1 à 8 jours.

Affinage du produit et maturation

En fonction des exigences du client et de la taille des particules du support carboné, un criblage final peut être effectué. Ensuite, la maturation, qui consiste à stocker le compost dans un hangar aéré ou en extérieur, met fin à sa production (très peu de plateformes ne le font pas). La durée de cette phase varie de 50 à 180 jours.

La fin de l'affinage dépend de l'aspect et de l'odeur du compost, d'une baisse de température ou de l'utilisation d'un respiromètre.

Qualité du compost

Quelle que soit la technologie utilisée, la plupart des composts obtenus sont de relativement bonne qualité : teneur en matière sèche comprise entre 35 et 70 %, charges en polluants organiques significativement réduites, pH neutre et qualité produit et agronomique stable.

Elles sont également plus faciles à transporter et à stocker que les boues vierges ou les boues chimiquement stabilisées. Le compostage stabilise et désinfecte efficacement les boues pour leur recyclage.

I.7.2.1.2.Digestion anaérobie : la méthanisation

Contrairement au compostage, la méthanisation est la fermentation de matières organiques présentes dans des boues en l'absence d'oxygène. Il existe trois types de fermentation liés à la température ambiante :

- ✓ Fermentation psychrophile (entre 15 et 20°C) : basse température et digestion lente (quelques semaines) mais pas de chauffage nécessaire.

- ✓ Fermentation mésophile (entre 30 et 35°C) : procédé basé sur l'activité des Enterobacteriaceae (bactéries intestinales).
- ✓ Fermentation à haute température (50-60°C) : seules les bactéries thermophiles et actinomycètes sont retenues. Le temps de séjour est court, mais l'opération est précise.

La digestion mésophile est la plus courante. La méthanisation relève donc essentiellement d'une technologie de stabilisation plutôt que d'une installation d'assainissement (les principaux micro-organismes pathogènes présents dans les boues sont des bactéries fécales et les températures atteintes n'ont aucun effet sur elles). Cette technologie peut réduire davantage le volume des boues (jusqu'à la moitié), rendant le stockage et le transport plus faciles et moins coûteux.

La digestion anaérobie produit, d'une part, du digestat utilisable en agriculture, et d'autre part, du biogaz, constitué principalement de méthane (environ 65 %) et de dioxyde de carbone (environ 35 %). Depuis des décennies, la digestion anaérobie est également considéré comme une voie de valorisation énergétique efficace, si le biogaz produit est récupéré et réutilisé. Le principal avantage de la méthanisations est donc la valorisation du biogaz produit, qui peut se faire de trois manières :

- ✓ Récupération de chaleur : valable s'il existe une sortie de chaleur régulière toute l'année, de longue durée, à proximité du site de production (industrie, réseau de chaleur) ou à l'intérieur (digesteur de boues). La mise en œuvre et le fonctionnement du dispositif sont parfaitement maîtrisés.
- ✓ Récupération d'électricité, cogénération de chaleur et d'électricité ou production alternative : cette voie offre actuellement les plus grandes garanties en termes de débouchés.
- ✓ Utilisation sous forme de biocarburant : Une filière encore marginale en raison des contraintes techniques et financières pour mettre le biogaz aux normes du Gaz Naturel Véhicule (GNV). Cette solution a été développée par la Communauté Urbaine de Lille pour les bus urbains (flotte propre).

I.8.Les voies chimiques

I.8.1.Chaulage

Comme le compostage et la méthanisation, la chaux stabilise les boues tout en les désinfectant. Le processus se produit après la déshydratation et consiste à verser de la chaux vive (CaO) ou de la chaux hydratée (Ca(OH)₂) sur les boues, déclenchant ainsi une réaction chimique exothermique. Cela peut également augmenter le pH des boues (supérieur à 12). La

chaux est une opération entièrement contrôlable avec des coûts d'investissement modérés. Cependant, elle n'est pas aussi efficace que d'autres techniques pour tuer les bactéries sporulées et les œufs de vers.

Selon les résultats d'une enquête réalisée par le service de l'eau et de l'assainissement de la ville d'Amiens⁶, le chaulage est très efficace pour réduire la contamination fécale et la croissance de micro-organismes pathogènes provenant des matières fécales présentes dans les boues. Il élimine également les odeurs (stabilisation), augmente encore la siccité des boues (25-35%) et améliore leur structure (plus granulaire) pour faciliter le transport et le stockage. Il s'agit de l'opération finale d'élimination des boues. Les boues de chaux peuvent ensuite être valorisées en agriculture ou envoyées en stockage (ISDND) mais sont rarement incinérées.

I.8.2.Stabilisation aux sels de nitrite

Techniquement et économiquement, le traitement des nitrites est bien adapté aux petites stations d'épuration. Il assure une stabilisation assez efficace en oxydant les composés malodorants, en inhibant l'activité fermentaire et en étant hygiénique (éliminant la plupart des bactéries fécales).

L'opération ne dure qu'environ deux heures. Le procédé améliore également la siccité des boues (de 2 à 5 %) et leur qualité fertilisante, ce qui est particulièrement intéressant à des fins agricoles. Cela peut être une solution alternative à la chaux. Contrairement à ces dernières, la stabilisation des nitrites s'effectue en phase liquide, avec des boues concentrées, sans augmenter la masse sèche à rejeter.

I.9.Les voies physiques

La stabilisation aérobie thermophile agit comme une prédigestion et un assainissement en amont de la digestion anaérobie sans aucune action extérieure.

Le but de cette technologie est de dégrader la matière organique (MO) partiellement oxydée adsorbée sur les floccs en présence d'oxygène.

La réaction d'oxydation est naturellement exothermique et génère de la chaleur par auto-échauffement. En utilisant un réacteur isolé et étanche alimenté en air sous pression, il est possible de maintenir des températures autour de 50-60°C, d'atteindre un taux de destruction de 50 % des matières organiques et d'éliminer significativement les odeurs désagréables. Pour obtenir une siccité d'au moins 25 % à 35 %, un temps de séjour minimum d'environ 6 jours est nécessaire, selon la nature des boues entrantes.

I.9.1.Le Conditionnement

Le fonctionnement de divers équipements de déshydratation nécessite d'abord la floculation des boues pour briser la stabilité colloïdale et augmenter artificiellement la taille des particules. Les emballages font appel à des procédés d'ordre physique (essentiellement thermique), mais le plus souvent d'ordre chimique (ajout de réactifs minéraux ou de polymères synthétiques). [45]

I.9.2.La déshydratation

La déshydratation consiste essentiellement en une augmentation substantielle de la siccité, dans le but de réduire le volume des boues (plus de 97% d'eau) et de changer l'état physique des boues d'un état liquide à un état pâteux ou solide. Le filtre-presse à bande assure la déshydratation des boues restantes. Les boues à traiter sont mélangées à la solution de polymère et versées sur une bande transporteuse perméable pour assurer la pression lors du passage des boues à travers la bande transporteuse, ce qui donne une boue beaucoup plus sèche. [46]

I.9.3.Digesteurs

Le digesteur de biogaz est le composant principal de l'installation de biogaz. Les processus de fermentation biochimique et microbienne se produisent dans les digesteurs de biogaz pour former du biogaz. [47]

I.9.4.Séchage

Le séchage est une opération unitaire du traitement des boues qui implique l'évaporation de l'eau libre et liée. Il existe plusieurs techniques de séchage possibles :

I.9.4.1.Lit de séchage

Les lits de séchage fonctionnent en répandant des boues liquides sur une grande surface à travers un lit de gravier et de sable. Elle peut être réalisée en plein air ou dans un bâtiment fermé et ventilé mécaniquement.

Les inconvénients de cette technologie sont la dépendance au climat, le temps de séchage long et les coûts de main-d'œuvre élevés. Il ne convient qu'aux grandes gares en raison de la surface nécessaire.

I.9.4.2. Séchage solaire

La profondeur des boues lors du remplissage peut varier de 10 cm à 50 cm selon la nature des boues. Le lit de séchage est situé dans une serre (Fig. 4), qui retient la chaleur, ce qui entraîne des températures plus élevées de l'air et des boues, et accélère également le séchage par les rayons solaires.

Afin de réduire le temps de séjour des boues et d'augmenter la sécheresse, des ventilateurs sont souvent installés dans les serres. De plus, la taille du lit doit tenir compte du climat, de l'équilibre hydrique et de la sécheresse des boues d'entrée.

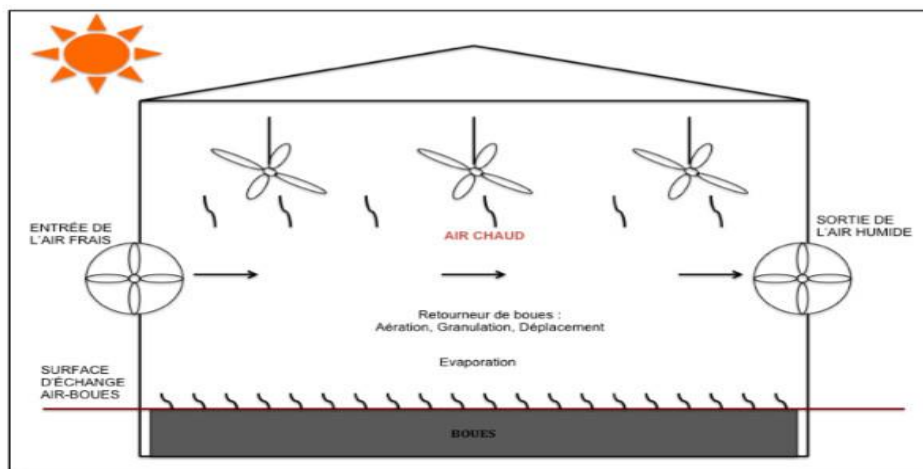


Figure 15 : Schéma du fonctionnement d'une serre à séchage solaire

Cette technologie est très avantageuse car elle utilise une énergie renouvelable : le soleil. Les boues séchées grâce à cette technologie ont une siccité de 60 à 80 % et peuvent être acceptées par différents services de valorisation énergétique ou d'élimination. De plus, les boues sont assainies par chauffage.

Cependant, cette technologie présente également des limites : ses performances dépendent fortement du climat, l'odeur dégagée n'est pas négligeable et une grande surface d'installation est nécessaire.

I.9.4.3. Lit de sable

Le procédé est basé sur les propriétés filtrantes simples du sable. Afin d'éviter toute contamination des sols, le lieu et le mode d'épandage des boues sur ces lits sont strictement surveillés.

Le procédé consiste à épandre des boues (environ 30 cm d'épaisseur) sur un lit de sable (couche sur une granulométrie plus importante comportant un réseau de drainage).

(Figure 16) Laissez le sable absorber l'eau interstitielle. Il se produit alors une évaporation augmentant la siccité des boues, qui peut atteindre 60 % dans les conditions les plus favorables.

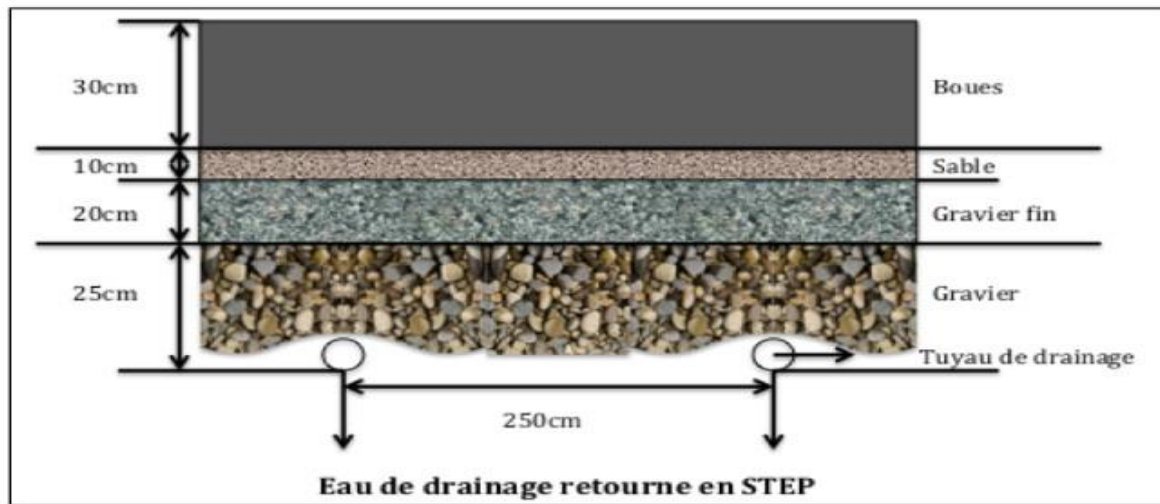


Figure 16 : Schéma de la composition principale du lit de sable

I.9.4.4.Lagune de séchage

Le principe de cette technologie est quasiment le même que celui du séchage sur lit de sable sans percolation. La boue, en revanche, est 3 à 4 fois plus profonde (0,7 à 1,4 m) et reste environ 1 à 3 ans avant d'être nettoyée. La qualité du sol doit être considérée avant d'installer une lagune pour éviter la contamination de la nappe phréatique. A noter que les boues préalablement digérées peuvent améliorer la siccité du produit en sortie.

I.9.4.5.Lit planté des macrophytes

Les plantes les plus couramment choisies sont les roseaux en raison de leur indice de surface foliaire élevé, qui favorise l'évapotranspiration, ainsi que de leur croissance rapide et de leurs besoins en eau importants. Ce sont des conditions très favorables au séchage des boues.

Les boues à traiter sont prélevées directement du bassin d'aération et déposées dans une cuve plantée de roseaux. Cela implique d'augmenter la taille des particules de la surface vers le fond et d'être expulsées.

La présence permanente d'anneaux libres autour de chaque tige de roseau assure le passage de l'eau interstitielle dans la boue activée, tandis que le MES reste en surface et s'accumule progressivement.

Le bon fonctionnement du procédé repose donc sur la croissance dense des roseaux afin que l'eau puisse s'écouler de tous les points du lit. Les parties aériennes du roseau poussent du printemps à l'automne et restent en place tout l'hiver. Durant cette période froide, les racines ont encore leur utilité.

Cependant, ce type de séchage nécessite une gestion délicate, tant au niveau de l'aération de la couche épandue que de l'apport des boues. Elle est souvent associée à un épandage agricole d'une partie des boues déposées sur le massif. Le procédé nécessite l'utilisation d'additifs qui permettent aux boues de conserver leurs propriétés fertilisantes et de réduire les odeurs.

I.9.4.6.Séchage thermique

Ce type de séchage repose sur deux méthodes :

- Séchage direct, c'est-à-dire que les boues sont en contact avec la source de chaleur et de l'air est directement injecté pour les brûler. L'air chargé de divers polluants nécessite alors un traitement particulier. En raison des risques d'incendie ou d'explosion, les séchoirs directs ne peuvent généralement pas produire de boues ayant une siccité supérieure à 70 %.
- Séchage indirect, c'est-à-dire séchage total. Les boues sont chauffées par un fluide caloporteur circulant dans des canalisations parfaitement isolées. Les séchoirs indirects peuvent former en toute sécurité des boues dont le taux de siccité est supérieur à 90 % et parfois même à 95 %. Cependant, tous les types de séchoirs nécessitent une surveillance constante et attentive par du personnel qualifié, car le durcissement des boues ayant une siccité supérieure à 60 % peut provoquer des dommages à l'équipement.

Il est fortement recommandé de réaliser une étude préalable la plus complète possible des différentes étapes par lesquelles les boues sont passées et de leur devenir, afin de pouvoir évaluer la pertinence du séchage thermique final.

A decorative graphic of a scroll with a light gray background and a black outline. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curled up. The text is centered on the unrolled portion.

CHAPITRE II

Matériel et méthodes

II.1. Les zone d'étude

II.1.1. Présentation de la station d'épuration de Sour El Ghozlane

La station de Sour El Ghozlane a été construite entre septembre 2005 et décembre 2005 pour traiter les eaux usées de la ville ; qui représentaient une source importante de pollution pour le barrage d'oued Lekhal d'Ain Bessame. Cette station, fonctionnelle depuis 2009, a une capacité d'épuration de 75000 Equivalents Habitants (EH), un volume journalier de 11367 m³/jour.

II.1.2. Localisation de la station

La station d'épuration de Sour El GHOZLANE se situe à la sortie Nord-Est de la ville.

La figure ci -au-dessus montre la situation de la ville de SEG ; elle est située au Sud-est d'Alger sur la route de Boussaâda à 150Km de chacune de ces deux villes et à 30 Km de Bouira, son chef-lieu de Wilaya. L'agglomération de SOUR EL GHOZLANE est limitée :

- Au Nord par les communes de RAOURAOUA et AIN-BESSEM.
- Au Sud par les communes de MAAMOURA et DIRAH.
- A l'Est par la commune d'El HACHIMIA et El HAKIMIA.
- A l'Ouest par la commune de DECHMIA.



Figure 17 : La situation géographique de la zone d'étude



Figure 18 : prise de vue la situation géographique de la STEP de Sour El Ghoulane

II.1.3. Présentation de La STEP de Baraki

La station d'épuration de Baraki est la principale station d'épuration d'Alger. Il s'agit de la deuxième plus grande installation de ce type en Algérie, couvrant une superficie de 10 kilomètres carrés.

La station reçoit les eaux usées urbaines (égouts), industrielles (Saidal, Sonalgaz) et domestiques des agglomérations communautaires d'El Harrach, Birtouta, Bab Ezzouar, Bab Ali, Oued Samar, Hussein Dey et Dar El Beida.

La station de Baraki dispose d'une capacité d'épuration de 900 000 Eq. Hab. et d'un débit moyen théorique de 147 000 m³/j. Elle appartient au type boues activées de charge moyenne. En 2013, l'usine a reçu en moyenne 63 400 mètres cubes de boues par jour, produisant 12 200 tonnes de boues avec une siccité de 23,9 %. Les performances du traitement peuvent garantir que le taux de conformité des émissions est supérieur à 99 % et que l'efficacité d'élimination de la pollution est supérieure à 95 % (SAAL, 2018).

Actuellement, la capacité de traitement de la station d'épuration de Baraki a été doublée pour atteindre 1,8 million Hab Eq avec la mise en service de la deuxième unité (900 000 Hab.Eq.). Par ailleurs, la troisième tranche de 900 000 Eq.Hab permettra à la Société d'Eau et d'Assainissement d'Alger (SEAAL) de traiter les eaux usées générées par les habitants d'une trentaine de communes, notamment la capitale. A noter que les eaux usées traitées de cette station d'épuration sont rejetées par Oued El Harrach au centre de la Baie d'Alger (Fig. n°18)



Figure 19 : Lieu de rejet de l'eau usée traitée de la STEP de Baraki. (Image Maxar technologies, données cartographiques 2020)

II.1.4. Localisation de la STEP de Baraki

La station d'épuration des eaux usées de Baraki est située dans la commune de Baraki (Figure). Cette dernière est située à quinze kilomètres au sud de la capitale Alger, à treize kilomètres de la mer Méditerranée et à quarante kilomètres à l'est de Blida. Il est limité :

- Au nord se trouve la commune d'El Harrach.
- A l'ouest se trouve la commune de Saoula.
- A l'est se trouve la commune des Eucalyptus.
- Au sud se trouve la commune de Sidi Moussa.

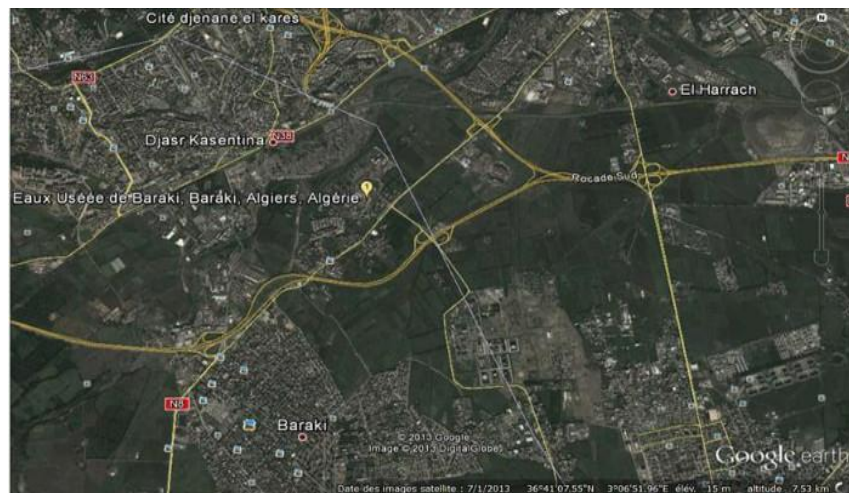


Figure 20 : localisation de la STEP de Baraki



Figure 21 : La STEP de Baraki (Source Google Earth)

II.1.5. Présentation de la station d'épuration OUED DHOUS

La station d'épuration des eaux usées de la ville de Bouira est construite en amont du barrage de Tilesdit sur la rivière Wadi Dhous et est située à la sortie est de la capitale de la province de Bouira.

Cette nouvelle station a une capacité nominale de 25 840 équivalents habitants en 2010 et collecte les eaux usées pluviales de la ville. La station a été construite pour traiter l'eau d'irrigation des terres agricoles du plateau d'Esnan et du plateau du Sahel, situés dans la région orientale de la province de Bouira, afin d'améliorer la qualité de l'eau potable des résidents locaux. Dans l'intérêt des habitants de la ville de Bouira, protéger l'environnement de la pollution et assurer le traitement de l'ammonium (NH_4), des nitrates (NO_3), des matières en suspension (MES), du phosphore et des charges organiques (DCO) et (DBO).

II.1.5.1. Définition de l'entreprise d'accueil

La station d'épuration de la ville de Bouira est une filiale de l'ONA (Agence Nationale de l'Assainissement). La station a été construite par la société allemande PASSAVANT RODIGER.

La nouvelle station d'épuration a une capacité nominale de 25 840 équivalents ménages (EH) et assure le traitement des pollutions carbonées, azotées et phosphorées.

Les eaux usées traitées par les stations d'épuration comprennent les eaux usées domestiques et les eaux usées industrielles. On estime que la population domestique représente 80 % de la charge de traitement de la station, les eaux usées industrielles représenteront donc 20 % de la charge totale.

II.1.6. Localisation de station

La capitale provinciale est située à 100 kilomètres à l'ouest de la capitale Alger. La province couvre une superficie de 4 454 kilomètres carrés.

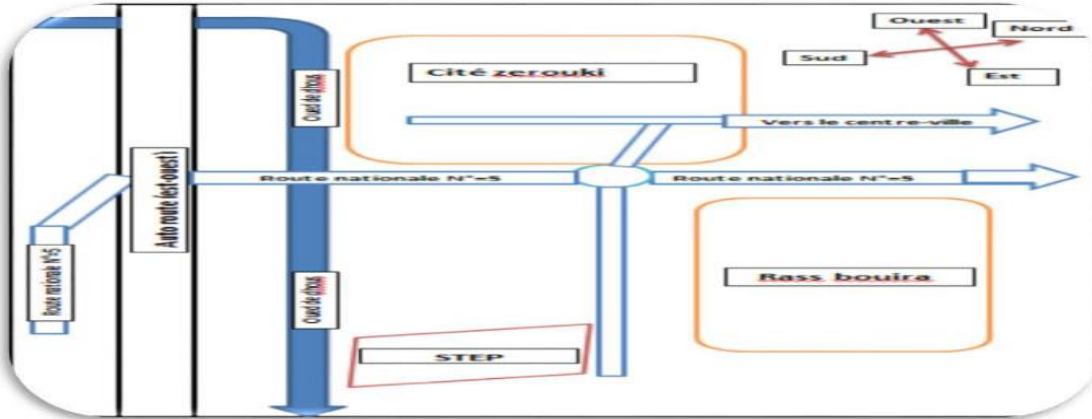


Figure 22 : La localisation de la station

La station d'épuration est située au sud-est de la capitale Bouira et à gauche de d'oued dhous. Il se trouve sur le côté gauche de l'autoroute si vous venez d'Alger et sur le côté droit si vous venez de Bejaia. Il faut donc marcher environ 2 kilomètres depuis la ville jusqu'à l'arriver à la station à partir de la ville.



Figure 23 : Image de la station par Google earth.

II.2. Échantillonnage et prélèvement

Pour des essais en laboratoire et l'évaluation des paramètres caractéristiques des matériaux, un prélèvement de ce dernier a été effectué afin que l'échantillon soit représentatif.

Le prélèvement s'est effectué en deux temps :

- Prélèvement au niveau de la STEP, à grande quantité et d'une façon aléatoire sur des lits de séchage
- Prélèvement au laboratoire, quantité suffisante pour l'essai.

Les deux échantillonnages doivent donner un prélèvement représentatif du matériau.

II.2.1. Mode opératoire

L'échantillon de boue séchée a été prélevé dans des flacons en polyéthylène à l'aide d'une pelle. Cette collecte a été effectuée à l'aide d'un procédé et d'un matériel spécifiques.

Étant donné que les échantillons étudiés (BOUIRA et SOUR EL GHEZLANE) ont été fabriqués depuis trois (3) ans, l'échantillon étudié (BERAKI) a été fabriqué le jour même.

II.2.2. Conditionnement des échantillons

Lorsque les échantillons sont stockés à l'air libre (pendant le transport, lors de leur arrivée au laboratoire et avant le début des analyses ou après le dosage pour d'éventuelles vérifications), il est essentiel de réduire au minimum toutes les pertes liées aux caractéristiques physico-chimiques des polluants recherchés.

II.2.3. Matériel d'étude

La réalisation du protocole expérimental a exigé la préparation préalable du matériel de laboratoire. Les réactifs ainsi que l'appareillage sont présentés dans le tableau n°4

Appareillage	Matériel	Réactif
Etuve	Creusets	Eau distillée
Four à moufle	Erlen Meyer	Acide Nitrique (HNO ₃)
Balance de précision	Eprouvette graduée	-
PH-mètre	Fioles de 100 ml	-
Conductimètre	Papier filtre	-
Chauffe ballon	Entonnoir	-
Pompe à vide	Barreaux magnétique	-
Spectromètre à adsorption atomique (SAA)	Ballon	-

Tableau 4 : liste de l'appareillage, matériel et réactif utilisés

II.3. Préparation d'échantillon pour les analyses au laboratoire

L'échantillon prélevé de la STEP a été transféré à celui requis pour l'essai en passant par le séchage après le broyage.

II.3.1. Séchage

Lorsque nous sommes arrivés au laboratoire, nous avons placé l'échantillon dans l'étuve à une température 90°C pendant 24h.



Figure 24 : étuve de séchage



Figure 25 : Boue avant séchage



Figure 26 : Boue après séchage

II.3.2. Broyage

Le broyage de la boue séchée dans un broyeur (Los Angeles), puis le Tamisage de la poudre afin d'éliminer les grosses particules avec le tamis de 0.5



Figure 27 : Los Angeles



Figure 28 : Boue après broyage et tamisage

II.4. Les analyses

II.4.1. Les analyses des caractérisations physico-chimiques

Les équipements de mesure utilisée sont de type portatif à savoir : pH Mètre, Conductimètre, dessiccateur.



PH-Mètre



conductimètre



dessiccateur

II.4.1.1. Le potentielle d'hydrogène (PH) et la conductivité électrique (CE)

➤ Pour le PH :

On a mesuré le pH des boues en utilisant des extraits de boues (1 :10 solide/eau distillée) en utilisant un pH-mètre numérique. [48]

Mettre 5g de boue brute à peser et verser dans un bécher de 100ml. Il faut ajouter 50 ml d'eau distillée et agiter le mélange.

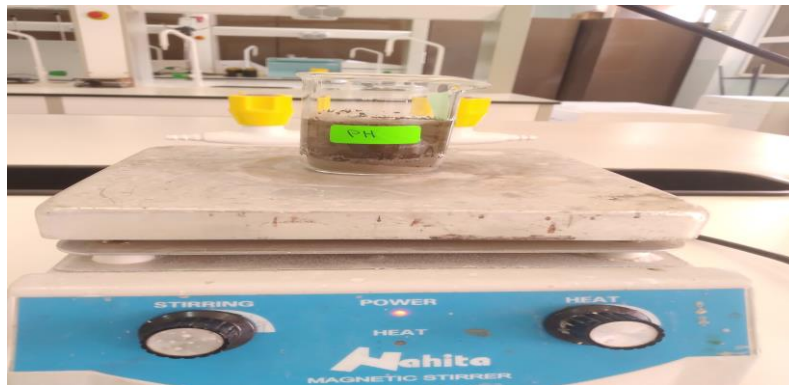


Figure 29 : Le PH

➤ Pour la CE

On a pesé 5g de boue et on l'a versée dans un bécher de 100ml pour évaluer la conductivité électrique. Ensuite, nous avons utilisé 25ml d'eau distillée (1 : 5 solide/eau distillée) pour aider et agiter le mélange. [48]



Figure 30 : La conductivité

II.4.1.2. La matière organique

Chaque échantillon a été pesé à 15 g et placé dans un dessiccateur pour éliminer l'humidité pendant 24 h en utilisant un agent dessiccant comme le gel de silice. Ensuite on a étudié la teneur en matière organique (MO) des boues en les brûlant à une température de 550 °C dans un moufle pendant une heure. [48]

Lorsqu'ils sont sortis, les échantillons ont été à nouveau pesés. Le pourcentage exprimé en (MO) correspond à la proportion qui a été entièrement incinérée. Ainsi, nous avons obtenu ce taux en utilisant la formule suivante. [49]

$$(M1-M2) * 100 / M1$$

Où :

M1 : pois initial de la boue

M2 : pois de la boue après incinération



Figure 31 : Boue avant incinération

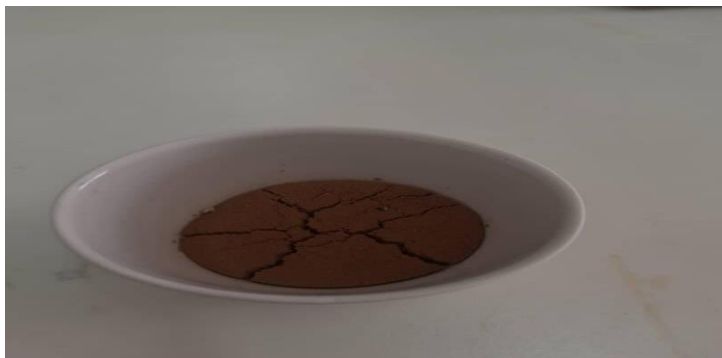


Figure 32 : Boue après incinération

II.4.2.1. La Minéralisation

La minéralisation a été réalisée en utilisant la méthode humide. Son principe est d'attaquer la matière organique à chaud avec un ou plusieurs acides forts afin de rendre les métaux lourds, qui sont associés à la matière organique, solubles en solution. [50].

Dans notre expérience, les échantillons ont été minorisés après avoir ajouté un mélange de 2 g de boue d'épuration déjà broyée dans un ballon conique contenant 20 ml de HNO_3 (55 %). Ce mélange a été chauffé à 90 °C pendant 45 minutes. Ensuite, la température a été augmentée à 150 °C et maintenue pendant 10 minutes. Ensuite, on a ajouté périodiquement 10 ml de HNO_3 (55 %) à 3 reprises, afin d'éviter qu'il ne se dessèche. [51]

Le mélange a été laissé refroidir à température ambiante, puis filtré sur du papier filtre. On a ensuite transféré le digest de l'échantillon dans un ballon étalon de 100 ml et on l'a complété au besoin avec de l'eau distillée.

L'échantillon obtenu est stocké dans des tubes à essai étiquetés jusqu'à ce que le dosage des métaux lourds par SAA soit effectué.

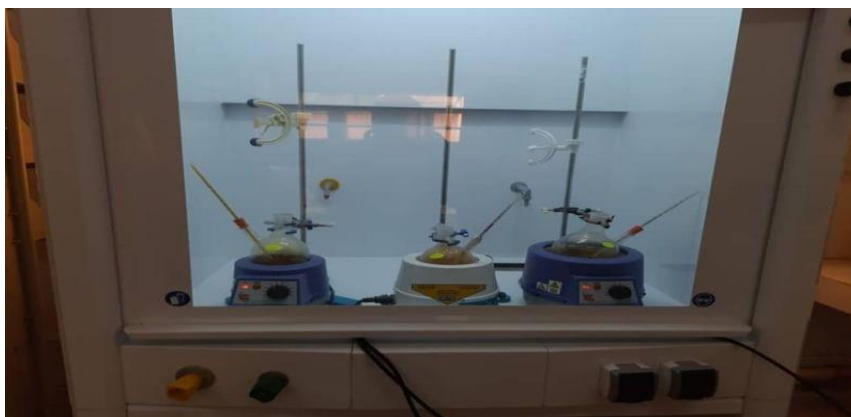


Figure 33 : La minéralisation des 3 échantillons

II.4.2.2. Dosage des métaux lourds par SAA

➤ **Définition :**

La spectrométrie d'absorption atomique (SAA) est une technique d'analyse quantitative principalement utilisée pour analyser les métaux lourds. Elle repose sur les caractéristiques des atomes, de l'élément à doser, qui ont la capacité d'absorber des radiations de longueurs d'onde spécifiques.

La solution de l'élément à étudier est exposée à une flamme, ce qui entraîne successivement l'évaporation du solvant, la vaporisation de l'élément sous forme de combinaisons chimiques, et enfin la dissociation de ces combinaisons avec la production d'atomes libres à l'état fondamental. [52]

➤ **Principe :**

On utilise cette méthode d'analyse appelée élémentaire pour mesurer la quantité d'éléments chimiques à l'état de traces (en très faible quantité : quelques ppm) présents dans une solution. L'absorption spectrométrique repose sur la théorie de la mesure de l'énergie atomique. Effectivement, lorsqu'un atome transforme son état (d'énergie) fondamental en un état excité quelconque, il absorbe un ou plusieurs photons. [53]

Le phénomène d'absorption est lié à un spectre d'absorption. Étant donné les photons absorbés qui sont propres aux éléments absorbants et dont la quantité est proportionnelle au nombre d'atomes de l'élément absorbant, l'absorption permet de mesurer les concentrations des éléments que l'on a choisi de doser. [53]

➤ **Avantage :**

La spectrométrie par émission présente deux principaux atouts par rapport à l'absorption atomique :

- ✓ Certaines caractéristiques peuvent être examinées avec une plus grande précision et avec moins de perturbations chimiques.
- ✓ L'émission atomique offre la possibilité de réaliser des analyses de qualité. Effectivement, la source de lumière dans la spectrométrie d'émission est l'échantillon lui-même. De cette façon, plusieurs éléments peuvent être mesurés simultanément.

➤ **Limites de la méthode :**

La quantité demeure très importante et ne permet pas toujours de déterminer les éléments présents dans l'échantillon. En outre, elle requiert une calibration à chaque nouvelle manipulation, ce qui demande beaucoup de temps. [53]

➤ **Appareillage :**

Les principaux instruments de spectrométrie d'absorption atomique se composent de 4 éléments essentiels :

Le rayon lumineux provenant de la source (1) passe à travers la chambre d'absorption. L'élément est porté à l'état atomique dans une flamme ou un four (2), puis focalisé sur la fente d'entrée d'un monochromateur (3) qui choisit un intervalle de longueurs d'onde très restreint. Le parcours optique se conclut par la fenêtre d'entrée du détecteur (4).

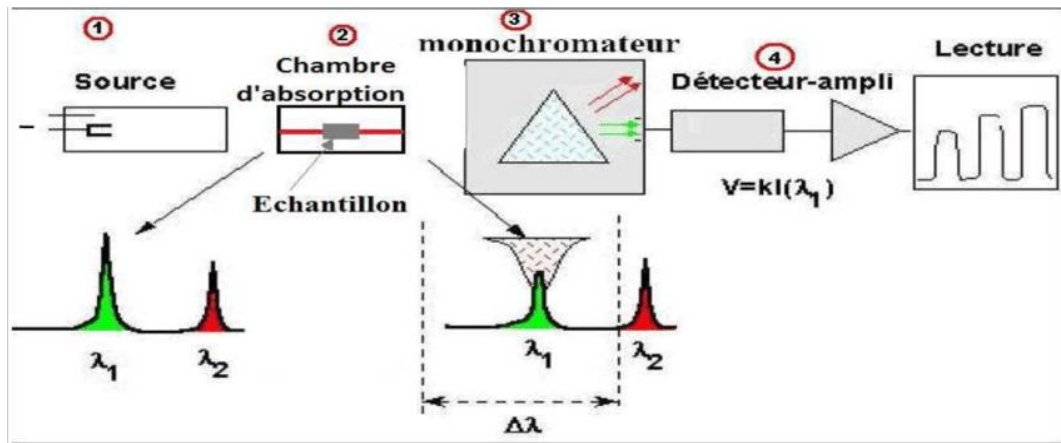


Figure 34 : Les instruments de base pour la spectrométrie d'absorption atomique.

II.4.2.3. Préparation des courbes d'étalonnage

Les échantillons ont été préparés à partir des solutions mères pour chaque métal à analyser, et leur étalonnage a été effectué avec une plage de concentration [0-5]. Les concentrations des échantillons doivent être prises en compte dans l'intervalle de concentration de nos échantillons a été tracée à partir des solutions standards (mères), afin de pouvoir faire une lecture précise de nos dosages au SAA.

- **Le plomb (Pb)**

Sel à utiliser : PbSO_4 ;

Solution mère de concentration en Pb : 20mg/L ; volume 500ml, $m = 14,636\text{mg} = 0,014636\text{g}$ du sel

N° étalon	Blanc	1	2	3
Concentration en (mg/L)	0	1	2	3
Volume (ml) à prélever	0	2.5	5	10
Volume total (ml) de la solution	-	50	50	50

Tableau 5 : Préparation de courbe d'étalonnage de Pb

- **Le cadmium (Cd) :**

Sel à utiliser : $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$;

Solution mère de concentration en Cd : 100mg/l ; volume 100ml ;
 $m = 22,82\text{mg} = 0.02282\text{g}$

N° étalon	Blanc	1	2	3
Concentration en (mg/l)	0	1	2	3
Volume (ml) à prélever	0	0.1	0.2	0.4
Volume total (ml) de la solution	-	50	50	50

Tableau 6 : Préparation de courbe d'étalonnage de Cd

- **Le Nickel(Ni) :**

Sel à utiliser : $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;

Solution mère de concentration : 100mg/l ; volume 100ml ; $m = 40,497 = 0.040497\text{g}$

N° étalon	Blanc	1	2	3
Concentration en (mg/l)	0	1	2	3
Volume (ml) à prélever	0	0,5	1	2
Volume total (ml) de la solution	-	50	50	50

Tableau 7 : Préparation de courbe d'étalonnage de Ni

- **Le Chrome (Cr) :**

Sel à utiliser : $\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;

Solution mère de concentration en Cr : 100mg/l ; volume 100ml ;
 $m = 51,24\text{mg} = 0,05124\text{g}$

N° étalon	Blanc	1	2	3
Concentration en (mg/l)	0	1	2	3
Volume (ml) à prélever	0	0,5	1	2
Volume (ml) total de la solution	-	50	50	50

Tableau 8: Préparation de courbe d'étalonnage de Cr

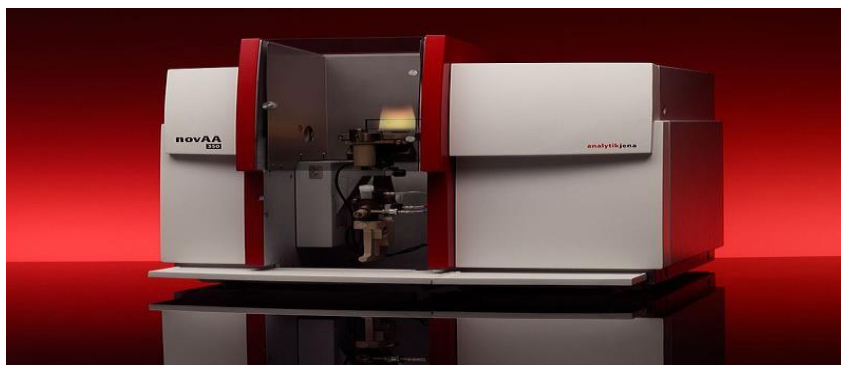


Figure 35 : Spectromètre absorption atomique

A decorative border resembling a scroll, with a light gray fill and a black outline. It features three rolled-up corners: the top-right, top-left, and bottom-left. The text is centered within the white rectangular area of the scroll.

CHAPITRE III

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous exposons les conclusions des techniques de caractérisation physico-chimiques et minéralogiques utilisées pour les boues provenant de diverses stations d'épuration des eaux usées (OUED DHOUS, BERAKI et SOURELGHOZLANE). On interprétera et comparera les concentrations de métaux lourds obtenues grâce à l'analyse par SAA avec les normes algériennes.

D'après JARDE (2002), pour évaluer la valeur agronomique des boues, il est toujours important de prendre en considération les caractéristiques physiques et chimiques.

III.2. Résultats et discussion

III.2.1. Paramètres physico-chimiques

III.2.1.1. Le PH

. Les échantillons de BERAKI, SOURELGHOZALNE et OUED DHOUS ont un pH de 7,27, 7,13 et 7,62 respectivement, ce qui correspond à un pH neutre.

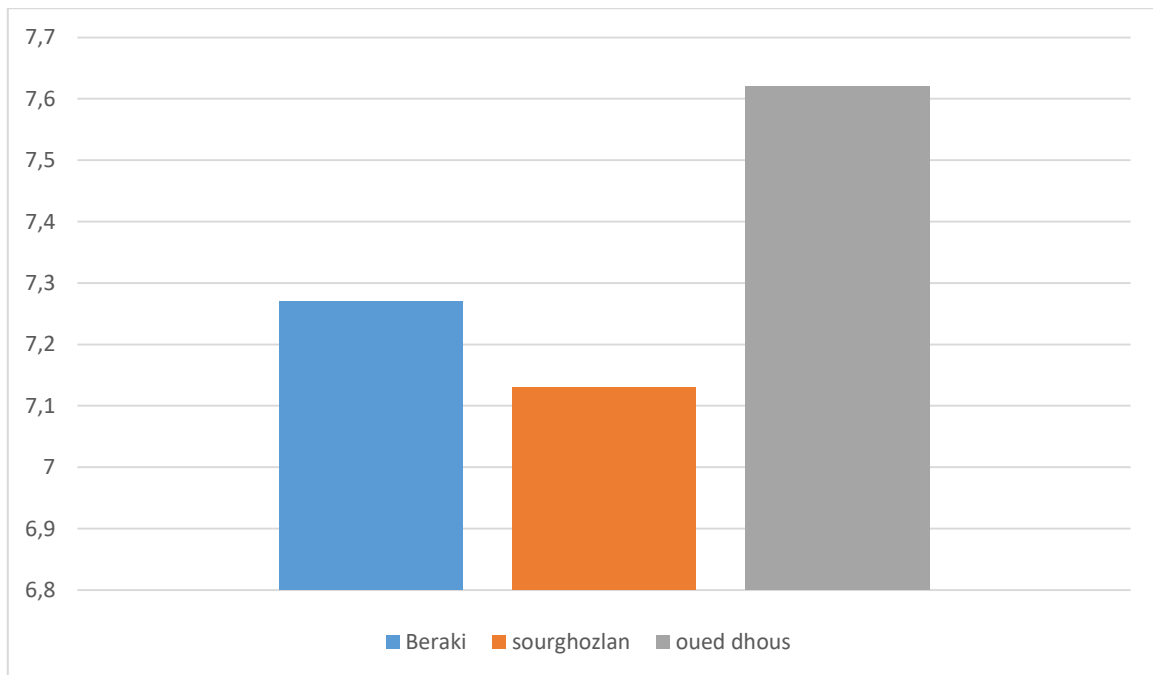


Figure 36 : La variation des valeurs du PH

➤ Interprétation :

En règle générale, le pH des boues résiduares varie de 6 à 8, et est généralement neutre ou légèrement alcalin. [RAMDANI, 2007 ; SOUDANI, 2017]

Nos résultats concordent avec la plupart des résultats obtenus dans le cadre de travaux réalisés dans ce domaine, en particulier ceux de (GUERFI, 2012 ; SOUDANI, 2017).

III.2.1.2. La CE

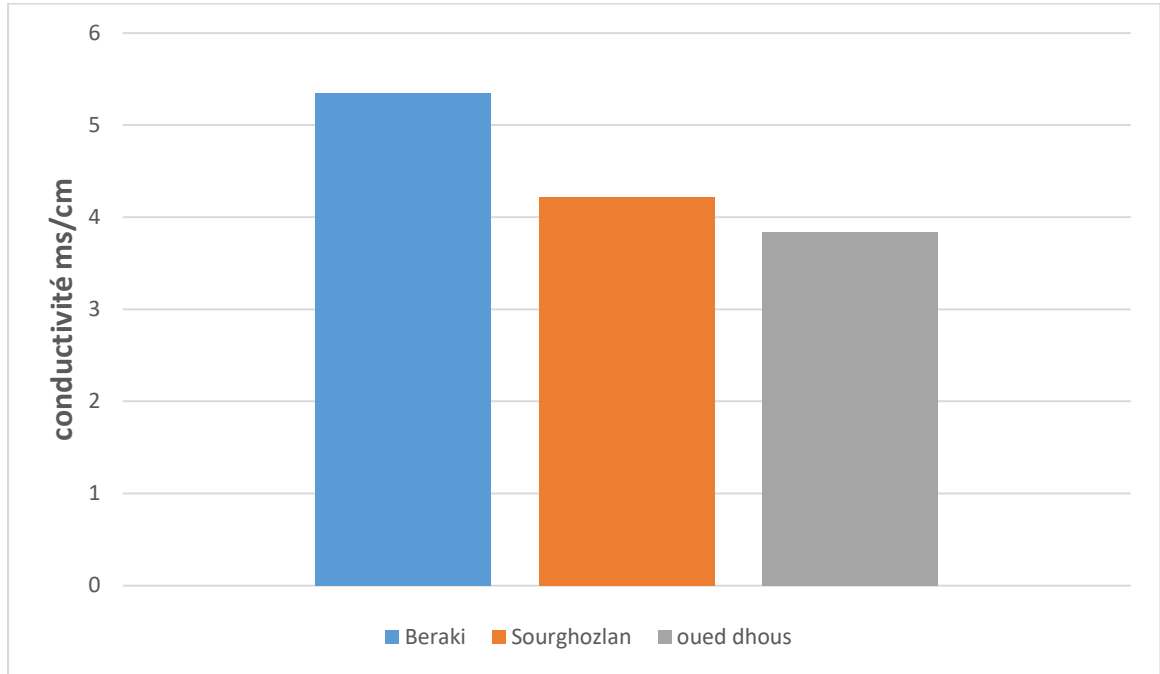


Figure 37 : Évolution de la conductivité électrique

➤ Interprétation :

La boue de BERAKI a une CE de 5,35 ms/cm, ce qui est supérieur à celle de SOURELGHOZLANE qui est d'environ 4,22 ms/cm et OUED DHOUS qui est d'ordre 3,84 ms/cm. (Figure 37).

Les résultats indiquent que la boue de BERAKI est moyennement salée, tandis que celle de SOUR EL GHOZLANE et OUED DHOUS est faiblement salée.

La conductivité de la boue augmente en raison de la libération de sels minéraux au fil du temps, ce qui entraîne une corrélation directe entre la conductivité électrique et la salinité.

III.2.1.3. La matière organique

Après cette relation $(M1-M2)*100/M1$ on a trouvé le taux de MO comme suit :

- **BERAKI** : 41,46%
- **SOUR EL GHOZLANE** : 30,53%
- **OUED DHOUS** : 35,2%

D'où M1 masse de boue avant combustion= 15g et M2 masse de boue après combustion =8,78 ; 10,42 ; 9,72 respectivement.

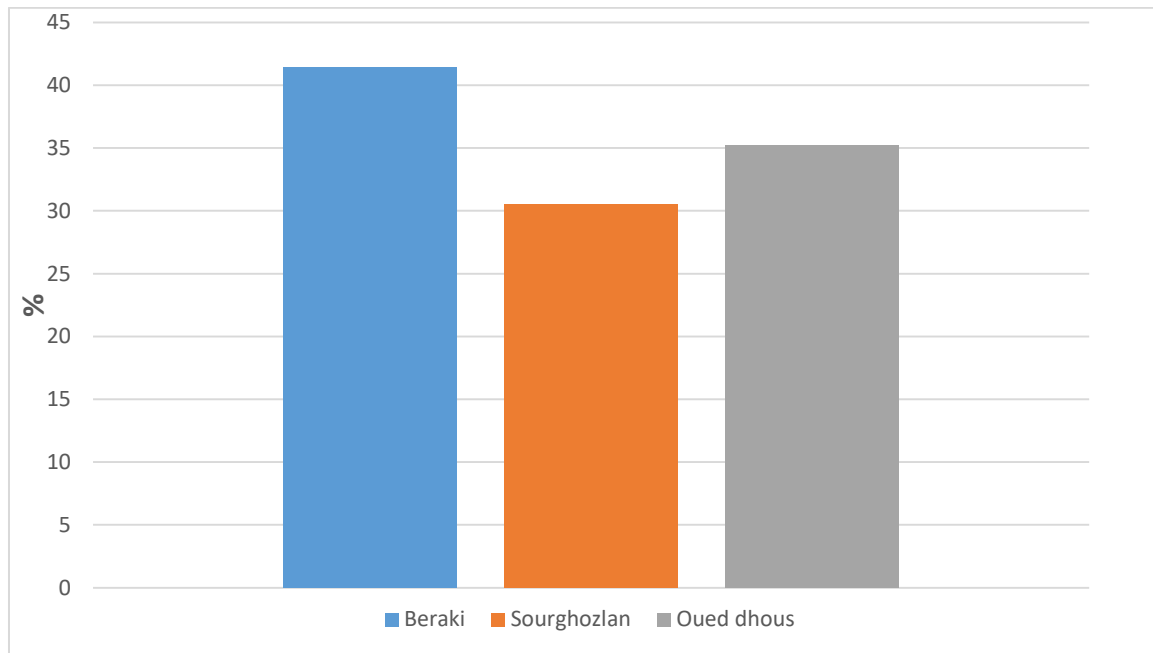


Figure 38 : le taux de la matière organique

➤ **Interprétation :**

La présence de moins de 50% de masse organique peut avoir des conséquences sur la gestion des boues d'épuration. Par exemple, une faible proportion de matière organique peut entraîner une baisse de l'efficacité des boues en tant qu'engrais ou amendement organique dans l'agriculture, car elles renferment moins de nutriments organiques indispensables aux plantes. En contrepartie, elles peuvent être plus adaptées à d'autres usages, comme la production de biogaz, si elles sont digérées de manière anaérobie.

Peu importe la technologie employée, la majorité des composts produits sont de qualité assez élevée : La quantité de matière sèche varie de 35 à 70 %, tandis que les niveaux de polluants organiques sont considérablement diminués.

III 2.2. Composition de la boue en métaux lourds

III 2.2.1. Concentration de Plomb

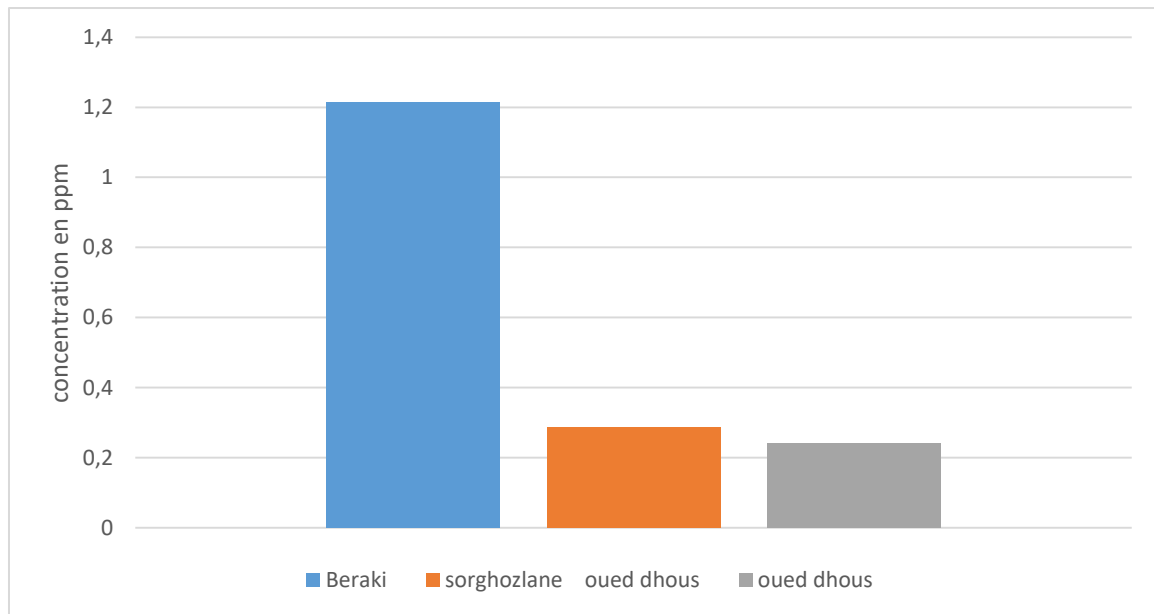


Figure 39 : concentration du Pb

➤ **Interprétation :**

Lorsque nous avons examiné les résultats obtenus, nous avons constaté que seul l'échantillon de boue de BERAKI présente une concentration de plomb de 1,2149ppm. En revanche, il y a eu des traces de concentration de 0,2860 et 0,2410 ppm respectivement pour les boues de SOUR EL GHOZLANE et OUED DHOUS.

III 2.2.2. Concentration de cadmium

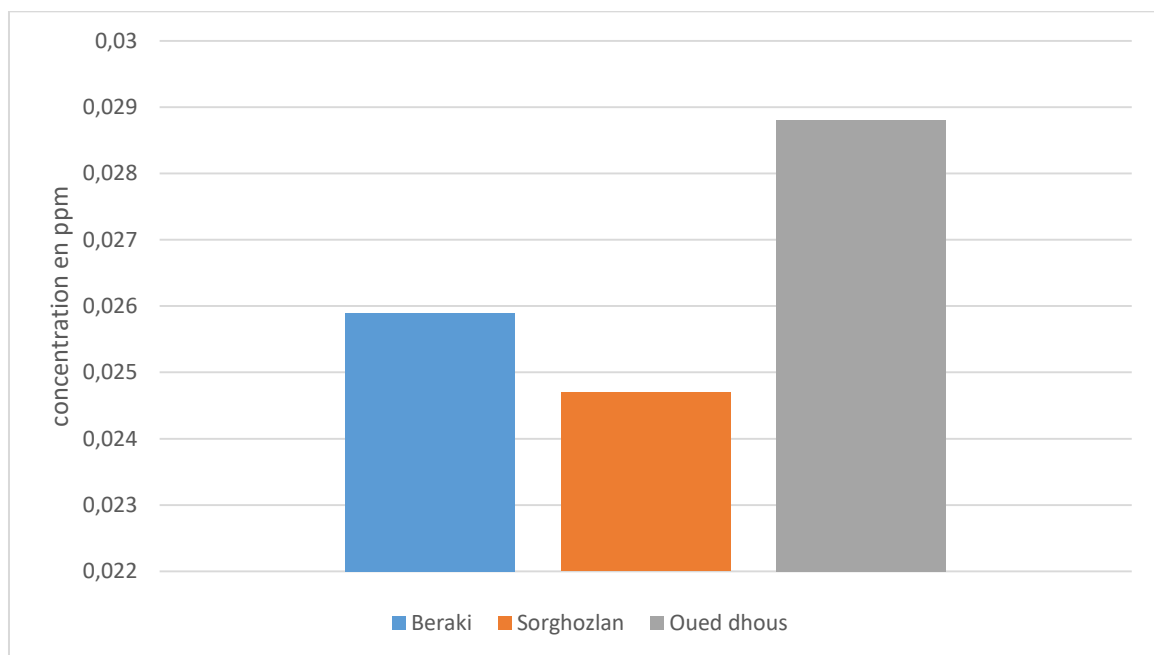


Figure 40 : concentration du Cd

➤ **Interprétation :**

Les résultats indiqués montrent que la concentration en Cd apparaît au niveau de ces 3 STEP s sont très basses.

III 2.2.3. Concentration du Ni

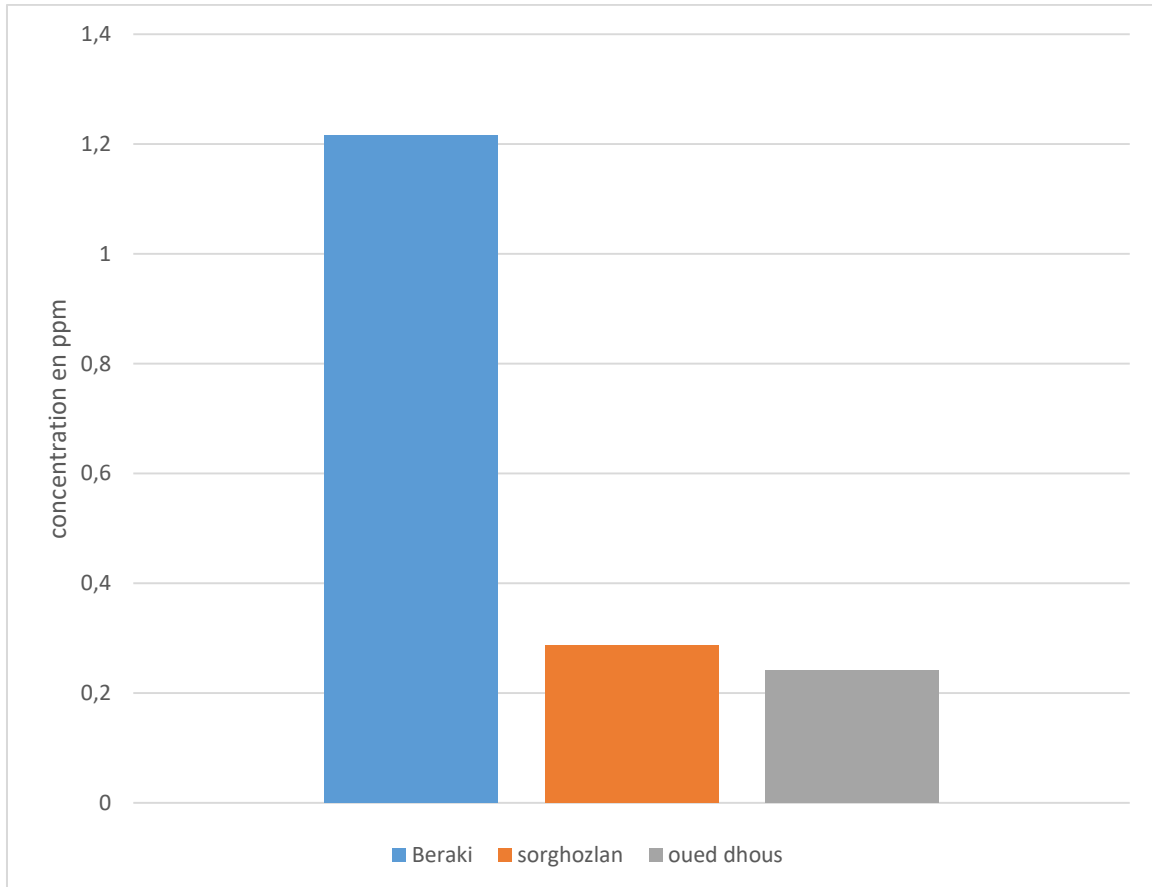


Figure 41 : Concentration du Ni

➤ **Interprétation :**

D'après les données présentées dans la figure 41, il est observé que la concentration la plus élevée en nickel se trouve dans la STEP de BERAKEI, atteignant 1,2149 ppm. Toutefois, les valeurs sont plus faibles dans la STEP SOUR EL GHOZLANE et OUED DHOUS, avec respectivement 0,2860 ppm et 0,2410 ppm.

III.2.2.4. Concentration de Cr

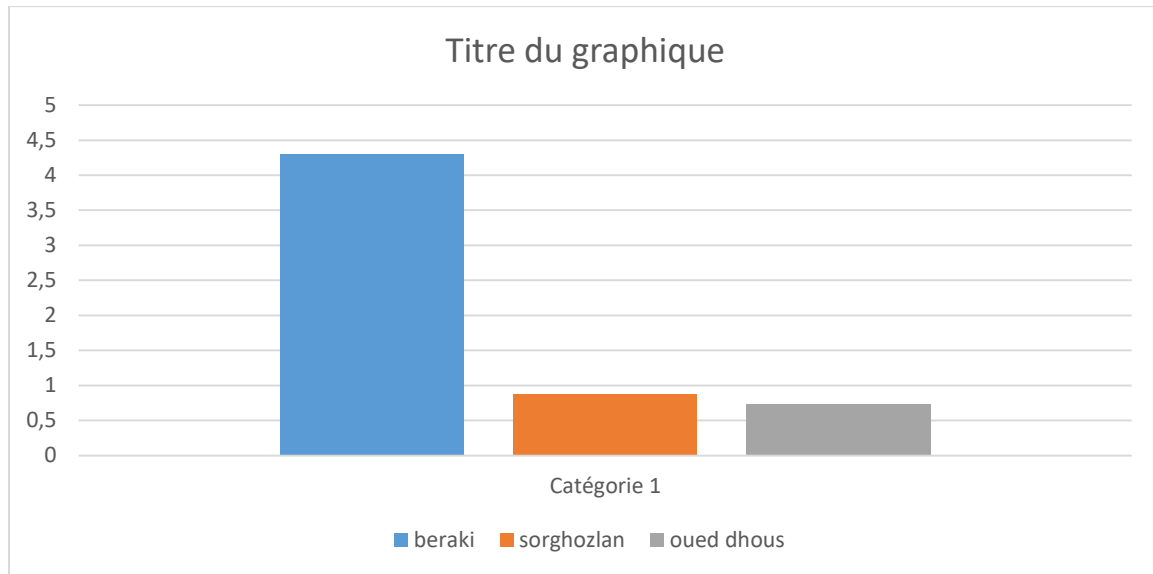


Figure 42 : concentration de Cr

➤ **Interprétation :**

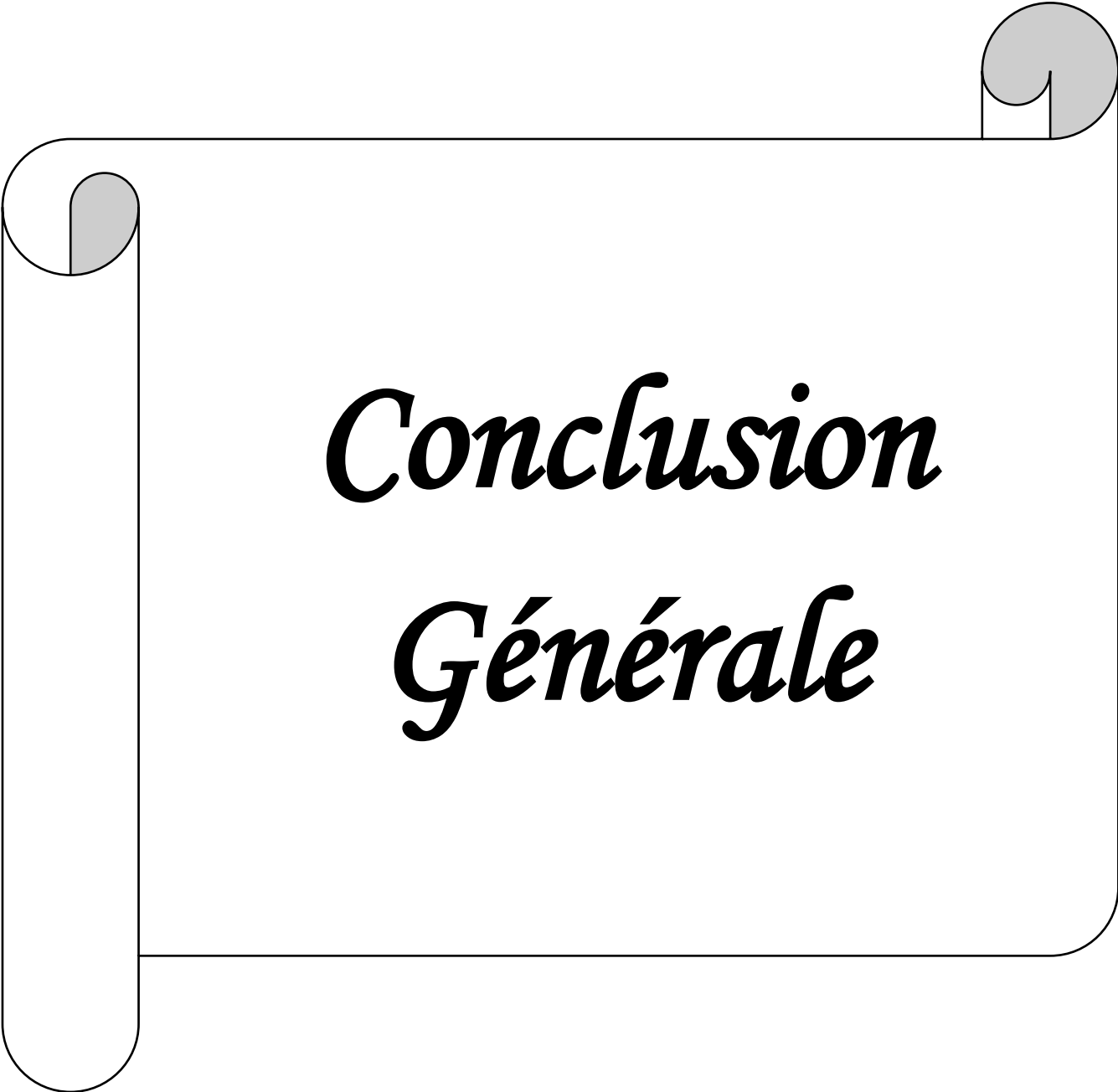
Nous avons observé que l'échantillon de boue de BERAKE a une concentration de chrome de 1,2303ppm supérieure à celle de SOUR EL GHOUZLANE et OUED DHOUS lors de l'analyse des résultats.

Des modèles différents sont observés dans l'ordre des teneurs en métaux étudiés, ce qui reflète la nature et les apports des rejets dans chaque station.

Les niveaux moyens d'éléments traces métalliques dans notre étude sont nettement inférieurs aux normes et ne dépassent pas les niveaux autorisés, comme le montrent les résultats de (JEMALI et al, 1998 ; GUERFI, 2012 ; SOUDANI, 2017).

Element (ppm)	BERAKI	SOUR EL GHOUZLANE	OUED DHOUS	Norme Algérienne	Norme AFNOR
Pb	1,8443	1,4578	1,2998	800	800
Ni	1,2149	0,2860	0,2410	200	200
Cd	0,0259	0,0247	0,0288	20	20
Cr	1,2303	0,8773	0,7275	1000	1000

Tableau 9: Comparaison des concentrations des métaux lourds par la norme algérienne et la norme d'AFNOR .



Conclusion Générale

Conclusion générale

De plus en plus de matières difficiles à éliminer sont présentes dans les eaux usées, ce qui peut entraîner des risques pour la santé et l'environnement. C'est pourquoi il a été nécessaire de mettre en œuvre un système de traitement.

L'eau joue un rôle essentiel dans le monde minéral et biologique. L'objectif principal de notre étude était de vérifier la possibilité de mettre en valeur les boues produites à BERAKE, SOUR EL GHOZLANE et à OUED DHOUS dans le domaine de l'agriculture.

Les résultats de nos études ont démontré que les boues de station d'épuration examinées ne sont pas toxiques en ce qui concerne les métaux lourds. Effectivement, nos échantillons étaient dépourvus des substances suivantes : nickel, cobalt, cadmium et chrome, plomb respectaient les normes AFNOR (1985).

En ce qui concerne la qualité physicochimique des boues, elle est satisfaisante.

Au terme de cette étude, nous concluons que les produites dans les trois stations peuvent être valorisées dans le domaine de l'agriculture par exemple et réintégrées dans l'écosystème sans présenter pour autant un risque écologique.

Références

bibliographique

- [1] : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352007823000343>
- [2] : **Seigneur, 2018 - Seigneur Ch.** - Pollution atmosphérique. Concepts, théorie et applications - Edition Belin 2018
- [3] : **Seigneur, 2018 - Seigneur Ch.** - Pollution atmosphérique. Concepts, théorie et applications - Edition Belin 2018
- [4] : <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>
- [5] : <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>
- [6] : **AARHUS 2012.** Protocole à la Convention sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance, de 1979, relatif aux métaux lourds.
- [7] : **Kucheroval, A.E., Agarwal, S., Tkachev, A.G., Gupta, V.K. 2018.** Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. *Ecotoxicology* and *Environmental Safety*, 148, 702–712. CPDewaGM8oUDFQAAAAAdAAAAABAk et **Singh, S., Kapoor, D., Khasnabis, S., Singh, J., Ramamurthy, P.C. 2021.** Mechanism and kinetics of adsorption and removal of heavy metals from wastewater using nanomaterials. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2351–2381.
- [8]: **Reed, B.E., Arunachalam, S., Thomas, B. 1994.**
Removal of lead and cadmium from aqueous waste streams using granular activated carbon (GAC) Columns. *Environmental Progress*, 13(1), 60–64 et **Krishnani, K.K., Parimala, V., Meng, X. 2004.**
Detoxification of chromium (VI) in coastal water using lignocellulosic agricultural waste. *Water SA*, 30(4), 541–545.
- [9]: **Mohammed, A.S., Kapri, A., Goel, R. 2011.** Heavy metal pollution: source, impact, and remedies. *Bio management of Metal-Contaminated soils*, 1–28 et **Salem, H.M., Eweida, E.A., Farag, A. 2000.** Heavy metals in drinking water and their environmental impact on

human health. In Int Conference on the Environ Hazards Mitigation, Cairo Univ Egypt, 542–56

[10]: **Charkiewicz, A.E.; Backstrand, J.R.** Lead Toxicity and Pollution in Poland. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 4385. [Google Scholar] [CrossRef]

[11]: **Wang, T.; Zhang, J.; Xu, Y.** Epigenetic Basis of Lead-Induced Neurological Disorders. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 4878. [Google Scholar] [CrossRef]

[12]: **Zhou, C.-C.; He, Y.-Q.; Gao, Z.-Y.; Wu, M.-Q.; Yan, C.-H.** Sex Differences in the Effects of Lead Exposure on Growth and Development in Young Children. *Chemosphere* 2020, 250, 126294. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

[13]: **Sundseth, K.; Pacyna, J.; Pacyna, E.; Pirrone, N.; Thorne, R.** Global Sources and Pathways of Mercury in the Context of Human Health. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2017, 14, 105. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed] [Green Version]

[14]: **Papadopoulou, E.; Botton, J.; Caspersen, I.H.; Alexander, J.; Eggesbø, M.; Haugen, M.; Iszatt, N.; Jacobsson, B.; Knutsen, H.K.; Meltzer, H.M.; et al.** Maternal **Seafood** Intake during Pregnancy, Prenatal Mercury Exposure and Child Body Mass Index Trajectories up to 8 Years. *Int. J. Epidemiol.* 2021, 50, 1134–1146. [Google Scholar] [CrossRef]

[15]: **Kang, P.; Shin, H.Y.; Kim, K.Y.** Association between Dyslipidemia and Mercury Exposure in Adults. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 775. [Google Scholar] [CrossRef]

[16]: **Lee, S.; Cho, S.-R.; Jeong, I.; Park, J.B.; Shin, M.-Y.; Kim, S.; Kim, J.H.** Mercury Exposure and Associations with Hyperlipidemia and Elevated Liver Enzymes: A Nationwide Cross-Sectional Survey. *Toxics* 2020, 8, 47. [Google Scholar] [CrossRef]

[17]: **Genchi, G.; Carocci, A.; Lauria, G.; Sinicropi, M.S.; Catalano, A. Nickel:** Human Health and Environmental Toxicology. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 679. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed] [Green Version]

[18]: **Vijayakumar, V.; Abern, M.R.; Jagai, J.S.; Kajdacsy-Balla, A.** Observational Study of the Association between Air Cadmium Exposure and Prostate Cancer Aggressiveness at Diagnosis among a Nationwide Retrospective Cohort of 230,540 Patients in the United States. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 8333. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]

- [19]: **Amadou, A.; Praud, D.; Coudon, T.; Danjou, A.M.N.; Faure, E.; Deygas, F.; Grassot, L.; Leffondré, K.; Severi, G.; Salizzoni, P.; et al.** Exposure to Airborne Cadmium and Breast Cancer Stage, Grade and Histology at Diagnosis: Findings from the E3N Cohort Study. *Sci. Rep.* 2021, 11, 23088. [Google Scholar] [CrossRef]
- [20]: **Genchi, G.; Carocci, A.; Lauria, G.; Sinicropi, M.S.; Catalano, A.** Nickel: Human Health and Environmental Toxicology. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 679. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed] [Green Version]
- [21]: **Chen, X.; Li, Y.; Zhang, B.; Zhou, A.; Zheng, T.; Huang, Z.; Pan, X.; Liu, W.; Liu, H.; Jiang, Y.; et al.** Maternal Exposure to Nickel in Relation to Preterm Delivery. *Chemosphere* 2018, 193, 1157–1163. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- [22]: **Chakraborty, R.; Renu, K.; Eladl, M.A.; El-Sherbiny, M.; Elsherbini, D.M.A.; Mirza, A.K.; Vellingiri, B.; Iyer, M.; Dey, A.; Valsala Gopalakrishnan, A.** Mechanism of Chromium-Induced Toxicity in Lungs, Liver, and Kidney and Their Ameliorative Agents. *Biomed. Pharmacother.* 2022, 151, 113119. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- [23]: **Xia, B.; Yuan, J.; Pang, L.; He, K.** Chromium [Cr (VI)] Exposure Causes Cytotoxicity of Human Bronchial Epithelial Cells (16-HBE) and Proteomic Alterations. *Int. J. Toxicol.* 2022, 41, 225–233. [Google Scholar] [CrossRef]
- [24]: **Peng, Y.; Hu, J.; Li, Y.; Zhang, B.; Liu, W.; Li, H.; Zhang, H.; Hu, C.; Chen, X.; Xia, W.; et al.** Exposure to Chromium during Pregnancy and Longitudinally Assessed Fetal Growth: Findings from a Prospective Cohort. *Environ. Int.* 2018, 121, 375–382. [Google Scholar] [CrossRef]
- [25]: **Baszuk, P.; Janasik, B.; Pietrzak, S.; Marciniak, W.; Reszka, E.; Białkowska, K.; Jabłońska, E.; Muszyńska, M.; Lesicka, M.; Derkacz, R.; et al.** Lung Cancer Occurrence-Correlation with Serum Chromium Levels and Genotypes. *Biol. Trace Elem. Res.* 2021, 199, 1228–1236. [Google Scholar] [CrossRef]
- [26]: **Al Hossain, M.M.A.; Yajima, I.; Tazaki, A.; Xu, H.; Saheduzzaman, M.; Ohgami, N.; Ahsan, N.; Akhand, A.A.; Kato, M.** Chromium-Mediated Hyperpigmentation of Skin in Male Tannery Workers in Bangladesh. *Chemosphere* 2019, 229, 611–617. [Google Scholar] [CrossRef]
- [27]: **Negahdari, S.; Sabaghan, M.; Pirhadi, M.; Alikord, M.; Sadighara, P.; Darvishi, M.; Nazer, M.** Potential Harmful Effects of Heavy Metals as a Toxic and Carcinogenic Agent

in Marine Food-An Overview. Egypt. J. Vet. Sci. 2021, 52, 379–385. [Google Scholar]
[CrossRef]

[28] :<https://doi.org/10.3390/toxics11070580>.....et
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>

[29] : **B.Hassen et B.Makhlouf**, évaluation de la qualité des boues de stations d'épuration des Eaux usées urbaines, en vue de leur revalorisation, mémoire de master, université de bejaia. 2015.

[30] : Organisation mondiale de la santé (OMS). (2019). Eaux usées, assainissement et hygiène. Récupéré sur <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/water-sanitation-hygiene-and-health>

[31] : **zizi.d.r**, (2015) mise en évidence traces métalliques dans les eaux et sédiments de la Seybouse, mémoire pour l'obtention de diplôme master 2, univ Guelma

[32] : **ms. mtahri** « élimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées

Traitées, par des procédés mixtes. Cas de step est de la ville de tizi ousou. ». Thèse de Doctorat. Université de mouloud Mammeri de tizi Ouzou (Algérie) ,2012

[33] : **station d'épuration de Guelma 2010 (fiche technique)**

[34] : **boualla n., hadj hassan b., benziane a., derrick z.** (2011).l'expérience algérienne en Matière d'épuration des eaux usées. Science lib edition mersenne : volume 3, issue 111115, 8p

[35] : **zizi.d.r**, (2015) mise en évidence traces métalliques dans les eaux et sédiments de la Seybouse, mémoire pour l'obtention de diplôme master 2, univ Guelma

[36] : **f.z.khadjadja** « evaluation de la qualité des effluents du step de la ville de Guelma pour une utilisation en agriculture». Mémoire de master .université de Guelma(Algérie), 2013.

[37] : **Gueblin E**, lutte contre la pollution des eaux, classification des boues d'épuration, TEC-ING, 1999

[38] : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/tout-savoir-boues-epuration/>

[39] : **A Karima S Dounia**. Assainissement liquide de Marrakech, valorisation agricole et énergétique des boues issues de l'épuration des eaux usées de la ville, mémoire de la licence, université cadi Ayyad 2009

[40] : **A Marouane A Omar**, valorisation des boues de la station d'épuration de la ville de Marrakech, mémoire de la licence, université cadi Ayyad 2012.

[41] : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/tout-savoir-boues-epuration/>

[42] : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/tout-savoir-boues-epuration/>

[43] : <https://www.cieau.com/le-metier-de-leau/ressource-en-eau-eau-potable-eaux-usees/tout-savoir-boues-epuration/>

[44] : **Silman Sy, Papa Sidy Tall**, étude de réhabilitation de la station d'épuration de Saly portudal, Sénégal, mémoire d'ingénieur de conception, Université de Dakar 2002/2003.

[45] : **Silman Sy, Papa Sidy Tall**, étude de réhabilitation de la station d'épuration de Saly portudal, Sénégal, mémoire d'ingénieur de conception, Université de Dakar 2002/2003.

[46] : **A.Saad Nouh**, conception de la station 'épuration d'el Bayadh (W.El Bayadh),mémoire de master, Ecole Nationale Supérieure De L'hydraulique (Arbaoui Abdellah), 2002

[47] : **Mémento**, technique de l'eau, tome 2, degremont mai 2005.

[48] : **HUANG H J, YUAN X Z, LI B T, XIAO Y D, ZENG G M.**

Thermochemical liquefaction characteristics of sewage sludge in

different organic solvents [J]. Journal of Analytical and Applied

Pyrolysis, 2014, 109: 176–184 et VARDON D R, SHARMA B K, SCOTT J, YU G, WANG Z,

SCHIDEMAN L, ZHANG Y, STRATHMANN T J. Chemical

properties of biocrude oil from the hydrothermal liquefaction of
Spirulina algae, swine manure, and digested anaerobic sludge [J].

Bioresource Technologie, 2011, 102: 8295–8303

[49] : **BENSLAMA, M., ZANACHE H.(1998)** ,Contribution à l'étude de la diversité

Des microorganismes (champignons saprophytes des sols du complexe humide

D'El-Kala, Nord Algérien). « Cas des stations d'El-Khoubzi, Righia et Lac Noir »

[50] : **BERNHARD, M. (1977)**, Manuel des méthodes de recherche sur

L'environnement aquatique : 3ème partie échantillonnage et analyse du matériel

Biologique, FAO. Document technique sur les pêches N158 ; 1397.

[51]: **Kasselman, G.** An Evaluation of Predictive Environmental Test Procedures for Sewage
Sludge. Master's

Thesis, University of Pretoria/Universiteit van Pretoria, Pretoria, South Africa, 2006.

[52] : **RODIER J., BAZIN C., BOURTIN J.P., CHAMBON P., CHAMPSAUR H.,**

RODI L. (2005), L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de

mer. Ed. Dunod, Paris.8ème

Édition, 1383p.

[53] : **FOLKO ET AL.1999.**