

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل

Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Hydrobiologie Marine et Continentale

Spécialité : Biotechnologie Marine

Thème:

**Caractérisation Physico-Chimique Et Microbiologique Des Boues De
La STEP De Baraki En Vue De Leur Réutilisation**

Présenté par :

Merabet Nahida

Zeroual Ibtihal

Soutenu le 03/07/2025, devant le jury composé de :

Mme KHELASSI Amina	MCB	ENSSMAL	Présidente
Mme AMROUCHE Lynda	MAA	ENSSMAL	Examinatrice
Mme GHEZALI Katia	MCB	ENSSMAL	Promotrice

Année universitaire : 2024-2025

Dédicaces

Louange à Dieu, le Clément, le Miséricordieux, pour Sa guidance, Sa force et Sa lumière dans les moments de doute comme dans ceux de joie. Rien de tout cela n'aurait été possible sans Sa miséricorde.

Je dédie ce mémoire **à la mémoire de mon père Abdelkader**, que Dieu entoure de Sa paix éternelle. Son absence est une douleur silencieuse, mais son amour, ses principes et sa force continuent de vivre en moi à chaque pas.

à la mémoire de ma grand-mère **Sati Ounissa**, Qu'elle repose en paix.

À ma chère maman Hadjara Khoukha, femme exceptionnelle, source d'amour, de prière et de courage. Merci pour tout ce que tu es.

À mes frères adorés : Yassine, Yanis, Walisse, Fazil, Sannel et Djalel, pour leur soutien indéfectible, leur affection sincère et leur présence constante dans ma vie.

À mes neveux Yohan, Massyl et Youcef, petits trésors qui font briller chaque journée.

À mes belles-sœurs Kenza et Hassiba, pour leur bienveillance et leur place précieuse au sein de notre famille.

À mes nièces Darine, Mélina et Amélia, adorables princesses qui embellissent nos vies par leur innocence et leur joie.

À mes amies de cœur : Noussa, Meliha , Chaima, Sara, Hanane, Anaïs, Fatma et Fedwa, pour les fous rires, les confidences, l'entraide et l'amour sincère qui m'ont portée tout au long de ce parcours.

À Ibtihal, mon binôme de toujours. Merci pour ton professionnalisme.

Nahida

Dédicaces

A celui qui m'a vraiment aimé et cru en moi dès le premier instant,

À mes parents, mes héros silencieux,

Ma mère *Meriem*, ton amour inconditionnel et tes prières ont été mon bouclier.

Papa *Azzeddine*, tes sacrifices et tes conseils m'ont appris la persévérance.

Merci d'avoir cru en moi, même quand je doutais de moi-même.

À mes frères et sœurs, *Rimesse, Rostom, Taki et Alaa*.

Votre rire, votre soutien et même vos petites taquineries ont rendu ce parcours moins lourd. Merci d'avoir été là, dans les bons comme dans les moments difficiles.

A ma chère amie *Wafa, (my wafa) ma sœur d'âme mon soutien inébranlable*, qui a été avec moi pendant mes moments difficiles, les moments de doute, et qui a été la raison de mon rire et de l'essuyage des larmes de mes yeux.

Merci d'être et de rester à mes côtés et d'être mon soutien qui ne penche jamais et ne s'ennuie pas, merci d'avoir toujours cru en moi, merci d'être mon amie et ma sœur.

À *Houria, (Houhou)*,

Ton amitié sincère et ta joie de vivre ont illuminé mes journées.

Merci pour ta positivité, tes conseils avisés et ces moments de complicité qui ont égayé mon quotidien.

À *Boutheina*,

Ton courage et ta bienveillance m'ont souvent redonné force.

Merci pour ton écoute, ta franchise et ta présence réconfortante dans les moments les plus intenses.

À Assia, mon amie d'éternité,

Bien que tu aies rejoint le jardin du Paradis, ton souvenir vit dans mon cœur. Tes rires, tes conseils et ton amour pur continuent de m'inspirer chaque jour. Ce mémoire porte aussi tes couleurs, chère amie. Qu'Allah t'accorde la plus belle demeure.

À mes amies de la cité universitaire, *Soundous, Sakina, Fatima, Doudou, Mina, Assala, Chichi, Asma, Oumnia, Manel, Roro,*

Vous avez transformé l'exil en une deuxième maison. Merci pour les révisions tardives, les repas partagés et les souvenirs qui resteront à jamais gravés dans mon cœur.

À mon binôme de PFE, (*Nahida*),

Ce mémoire porte aussi ton empreinte. Merci pour ta collaboration, ta patience et tous ces moments de réflexion partagés. Ensemble, nous avons surmonté les défis et transformé les obstacles en réussites.

À mon groupe de classe, (*Imene, Nesserine, Souaad, Fatma, Rania, Amira, Lobna, Bouchra, Sihem, et Ines*)

Vous avez rendu cette aventure académique mémorable. Merci pour l'entraide, les rires et les souvenirs inoubliables.

Ibtihel

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à Madame ***Ghezali Katia***, promotrice de ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et son accompagnement constant tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nous remercions également les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous remercions également Madame ***Amrouche Lynda*** pour son accompagnement rigoureux, sa générosité dans le partage de ses connaissances et son attention constante. Nos remerciements vont aussi aux ingénieurs du laboratoire (***Monsieur Noureddine, Monsieur Yassine, Madame Houda***) ainsi que ***Monsieur Mustapha*** et ***Monsieur Ahmed***, pour leur aide technique, leur disponibilité et leur professionnalisme tout au long de nos travaux pratiques.

Nous tenons également à remercier sincèrement tout le personnel de la station d'épuration de Baraki, ainsi que toutes les personnes qui nous ont aidées de près ou de loin, pour leur accueil, leur collaboration et leur précieuse contribution à la réalisation de ce projet

ملخص

عرض هذا العمل نتائج التحليل الفيزيائي والكيميائي والبيولوجي للحمأة المستخرجة من محطة معالجة مياه الصرف الصحي ، التوصيلية (pH) بيراقى. وقد ركزت الدراسة على عدد من المعايير الأساسية، من بينها نسبة الجفاف، الأس الهيدروجيني كما شملت التحاليل (C/N) الكهربائية، النسبة المئوية للمادة العضوية، إجمالي النيتروجين ونسبة الكربون إلى النيتروجين الكشف عن وجود المعادن الثقيلة مثل الكاديوم والزنك، بالإضافة إلى الكائنات الدقيقة الممرضة مثل السالمونيلا، وبيض الطفيليات والديدان الطفيلية

تُتيح هذه النتائج إمكانية تقييم جودة الحمأة ومدى قابليتها للتأمين أو إعادة الاستخدام، كما تبرز أهمية الالتزام بالمعايير البيئية والصحية لضمان إدارة مستدامة وآمنة لهذه المخلفات

Abstract:

This work presents the physico-chemical and biological analysis of sludge from the Baraki Baraki wastewater treatment plant. The study focused on key criteria such as dryness, pH, conductivity, percentage of organic matter total nitrogen, C/N ratio, well as heavy metals such as cadmium and mercury, and pathogenic micro-organisms such as salmonella and helminth eggs.

These results make it possible to assess the quality of the sludge and its potential for potential, while highlighting the importance of complying with environmental and health environmental and health standards for the sustainable management of these residues.

Résumé:

Ce travail présente des analyse physico-chimiques et microbiologiques des boues provenant de la station d'épuration de Baraki. L'étude s'est concentrée sur des critères clés tels que la siccité, le pH, la conductivité le pourcentage de matière organique ; l'azote total, le rapport C/N, que les métaux lourds tels que cadmium et mercure les micro-organismes pathogènes tels que les salmonelles et les œufs d'helminthes.

Ces résultats offrent la possibilité d'évaluer la qualité des boues et leur potentiel de valorisation, tout en mettant l'accent sur l'importance de suivre les normes environnementales et sanitaires pour une gestion durable de ces résidus.

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux

Liste des figures

Abréviations

Table des matières

Introduction	16
Chapitre 1. Généralités sur les Eaux Usées et les Différents Procédés de Traitement	17
1.1. Généralité sur les eaux usées	17
1.1.1. Les eaux usées domestiques	17
1.1.2. Les eaux résiduaires industrielles	17
1.2. Les procédés d'épuration des eaux usées	18
1.2.1. Les prétraitements	18
1.2.2. Le traitement primaire.....	19
1.2.3. Le traitement secondaire.....	19
Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues	6
2.1. Définition des Boues.....	6
2.2. Types de Boues:	6
2.3. L'Épaississement	6
2.3.1. Épaississement gravitaire.....	7
2.3.2. Épaississement dynamique	8
2.4. Stabilisation des boues	8
2.4.1. Digestion aérobie.....	8
2.4.2. Digestion anaérobie	9
2.4.3. Stabilisation chimique	9
2.5. Le conditionnement.....	9
2.6. Déshydratation	9
2.6.1. Déshydratation mécanique.....	10
2.6.2. Déshydratation naturelle (Lit de séchage)	11
2.7. Élimination et Valorisation des boues résiduaires	11
2.7.1. L'incinération	11
2.7.2. Valorisation agronomique	12

2.7.3. Valorisation énergétique.....	12
Chapitre 3 : Impact Environnemental et le Risque Sanitaire des Boues	13
3.1. L'impact sur l'environnement.....	13
3.2. Risque sanitaire	13
3.2.1. Les éléments traces inorganiques.....	13
3.2.2. Les éléments traces organiques	15
3.2.3. Eléments biologiques.....	16
3.2.3. Présence et diversité des parasites.....	17
3.3. Impact sur la vie marine.....	17
3.3.1. Contamination des écosystèmes.....	17
3.3.2. Conséquence écologique et sanitaire	17
4. Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki.....	19
4.1. Présentation de la Zone de BARAKI	19
4.2 . Localisation de la Station d'Épuration de BARAKI.....	20
4.3 . Présentation de la station d'épuration de Baraki.....	20
A- Filière eau.....	21
4.3.1. Poste de relevage PR1.....	22
4.3.2. Poste de relevage PR2.....	22
4.3.3. Les prétraitements.....	23
- Mesure de pH : seuil pH bas =6,0 ; seuil pH haut = 9,0	23
4.3.4. Préleveur d'échantillons.....	24
4.3.5. Classificateur à sables.....	24
4.3.6. Décanteur Primaire:.....	25
4.3.7. Traitement biologique (bassin d'aération).....	26
4.3.8. Clarificateur (Décanteur secondaire).....	27
4.3.9. Traitement Tertiaire	27
B) - Filière boue.....	28
4.3.10. L'épaississement des boues	28
4.3.11. Epaissement statique (Boue Primaire).....	28
4.3.12. Epaissement dynamique (Boue Biologique).....	29
4.3.13. Digestion anaérobique.....	30
4.3.15.1. Alimentation en boue du digesteur	31
4.3.15.3. Agitation des boues	32

4.3.15.4. Récupération du biogaz.....	32
4.3.14. Conditionnement des Boues.....	32
4.3.15. La Déshydratation des Boues	33
5. Matériels et Méthodes	35
5.1. Introduction	35
5.2. Objectif de la Caractérisation Des Boues	35
5.3. Échantillonnage	35
5.4. Caractéristiques physico-chimiques.....	35
5.4.1. Humidité.....	35
5.4.2. Matières sèches (MS) (siccité).....	36
5.4.3. Matière volatile sèche « MVS » et la matière minérale.....	36
5.4.4. Détermination du potentiel d'hydrogène (pH).....	37
5.4.5. Conductivité électrique.....	38
5.4.6. Dosage de l'azote Total (Méthode Kjeldahl).....	38
5.4.7. Dosage du phosphore (P, Méthode Colorimétrique).....	41
5.4.8. Le rapport C/N.....	42
5.4.9. Caractérisation Granulométrique des Échantillons	43
5.4.10. Analyses bactériologiques	46
6. Résultats et Discussion	61
6.1. Introduction	61
6.2. Analyses physico-chimiques.....	61
6.3. Interprétation des résultats des analyses de la boue.....	61
6.3.1. Humidité.....	61
6.3.2. Matières sèches (MS) (siccité).....	61
6.3.3. Matière volatile sèche (MVS).....	62
6.3.4. Détermination du potentiel d'hydrogène (pH).....	62
6.3.5. Conductivité électrique	62
6.3.6. Dosage de l'azote (Méthode Kjeldahl)	62
6.3.7. Rapport C/N.....	63
6.3.8. Dosage du phosphore	64
6.3.9. Teneur en Eléments Traces Métalliques.....	64
6.3.10. Analyse granulométrique	66
6.4. Analyses bactériologiques	70

6.4.1. Les indicateurs de contamination fécale	70
6.4.2. Les spores anaérobies sulfitoréductrices	73
6.5. Les Œufs d’helminthes	76
6.6. Voies de valorisation de la boue selon les résultats	77
6.6.1. Valorisation agricole	77
6.6.2. Valorisation énergétique	78
Conclusion Générale	80
Bibliographie	81

Liste des Tableaux

Tableau 1. Valeurs toxicologiques proposés par OMS de quelques métaux.....	14
Tableau 2.Valeurs toxicologiques proposés par OMS des quelques hydrocarbures qui peuvent être cancérogènes	16
Tableau 3.Élément compris dans la section (T1 et T2).....	21
Tableau 4. Les valeurs physico-chimiques de la boue déshydratée.....	61
Tableau 5: Echelle de la salinité en fonction de la conductivité électrique.....	62
Tableau 6 : Les Analyse des métaux lourds de la boue de la station de Baraki	65
Tableau 7: Résultats des germes indicateurs de la contamination fécale	722
Tableau 8: Résultats de dénombrement des spores anaérobies sulfitoréductrices	744
Tableau 9.Résultats des analyses bactériologique de la boue	755

Liste des figures

Figure 1.Coupe épaisseur statique	7
Figure 2.Schéma de principe de fonctionnement d'un filtre à bande.	10
Figure 3.Schéma de principe de fonctionnement d'un filtre à presse	11
Figure 4: Situation géographique de la commune de Baraki.....	19
Figure 5: Localisation de la station d'épuration Baraki Alger	20
Figure 6.Schéma de la filière traitement de l'eau	21
Figure 7.poste de relevage PR1 (photo prise sur terrain 17 avril 2025).....	22
Figure 8.Poste de relevage PR2 (photo prise sur terrain 17 avril 2025)	22
Figure 9.Mesure de PH, la Température, la conductivité, et la teneur en hydrocarbures (photo prise sur terrain 17 avril 2025)	23
Figure 10.Dégrilleurs mécanique fin et grossier	24
Figure 11.Préleveur d'échantillons automatique à l'entrée (photo prise avril 2025)	24
Figure 12: Classificateur à sables.....	25
Figure 13.Dessableur-Déshuileur (photo prise sur terrain 17 avril 2025).....	25
Figure 14.Décantation primaire (photo prise sur terrain 17 avril 2025)	26
Figure 15.Bassin d'aération (photo prise sur terrain 17avril 2025).....	26
Figure 16: Clarificateur	27
Figure 17.Flocs de boues.....	27
Figure 18.Filtre à sable (filtration par filtres Aquazur®).....	28
Figure 19.Epaisseurs statiques (photo prise sur terrain avril 2025).....	29
Figure 20.le pré-épaisseur (photo prise sur terrain avril 2025).....	30
Figure 21.Le Digesteur (photos prises sur terrain avril 2025).....	30
Figure 22.panneau explicatif sur la digestion (photo prise sur terrain avril 2025).....	31
Figure 23Echangeur de chaleur de la STEP (Photo prise sur terrain avril 2025).....	31
Figure 24.Gazomètres à basse pression (prise sur terrain avril 2025)	32
Figure 25. l'incorporation de polymère (photo prise sur terrain avril 2025).....	33

Figure 26.le polymère (prise sur terrain avril 2025).....	33
Figure 27.Le filtre a bande de la STEP de Baraki (prise sur terrain 2025).....	34
Figure 28.creuset avec boue séchée.....	36
Figure 29.Creuset vide.....	36
Figure 30.Four à moufle.....	37
Figure 31.Lecture avec le Ph mètre.....	37
Figure 32.Conductimètre.....	38
Figure33.Balance Figure 34.Appareil INKJEL.....	40
Figure 35.Burette pour le dosage	Figure 36.Distillateur.....
Figure 37.Résultat finale.....	41
Figure 38.Le dispositif de tamisage des sédiments (Tamiseuse électrique).....	44
Figure 39.Fractions granulométriques de sédiments retenues sur les différents tamis après tamisage	44
Figure 40.Protocol de dénombrement des Coliformes Totaux et Coliformes Fécaux.....	51
Figure 41.Protocol de dénombrement des Streptocoques Fécaux.....	52
Figure 42.Recherche et dénombrement des germes anaérobies sulfito- réducteurs.....	54
Figure 43: Recherche des Staphylocoques.....	55
Figure 44.Recherche des Salmonelles et Shigellas.....	57
Figure 45.étapes d'examen parasitologies des boues.....	59
Figure 46.courbe d'étalonnage du phosphore.....	64
Figure 47.Courbe granulométrique de la boue.....	67
Figure 48.Composition granulométrique de la boue.....	68
Figure 49.Représentation graphique des indicateurs de contamination fécale.....	72
Figure 50.les spores anaérobies sulfitoréductrices.....	73

Liste des abréviations :

STEP : Station d'épuration

OMS : Organisation mondiale de la santé

ETI : Les éléments traces inorganiques

ETM : Les éléments traces métalliques

ETO : Les éléments traces organiques

MES : Matières en suspension

MO : Matière organique

MS : Matière sèche

MVS : Matière volatile sèche

MM : Matière minérale

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

pH : Potentiel Hydrogène

C : Carbone

N : Azote

CO : Carbone Organique

FTAM : Flores Aérobie Mésophile Totale

CT : Coliformes Totaux

CF : Coliformes Fécaux

MF : Module de Finesse

AFNOR : Association Française de Normalisation

ASR : Anaérobies Sulfito-Réducteurs

DM : Dilution Mère

EDS : Eau Distillée Stérile

ISO : International Standard Organizations

SF : Streptocoques Fécaux

Staph : Staphylocoques

BCPL : Bouillon lactosé au pourpre de bromocrésol.

BLBVB : bouillon lactosé bilié au vert brillant

EPA : Eau peptonée alcaline.

E. COLI : Escherichia coli.

Evaletsky : Bouillon à l'éthyle violet et aide de sodium.

GN : Gélose nutritive.

NPP : Nombre le plus probable

EPI : Eau peptoné exemple d'indole

SS : Gélose salmonelles Shigelles

TCBS : Thiosulfate-Citrate-Bile-Saccharose

UFC : unité formant colonie

Introduction

Chapitre 1. Généralités sur les Eaux Usées et les Différents Procédés de Traitement

Introduction :

La gestion des boues issues des stations d'épuration constitue un enjeu majeur pour la protection de l'environnement et la santé publique. Ces résidus du traitement des eaux usées, riches en matières organiques et éléments nutritifs, peuvent néanmoins contenir des contaminants chimiques et microbiologiques. Leur valorisation ou élimination nécessite donc une caractérisation approfondie de leurs propriétés physico-chimiques et microbiologiques pour garantir un traitement adapté et une utilisation sécurisée, notamment en agriculture ou pour la valorisation énergétique.

Dans le contexte du développement durable, l'évaluation de ces déchets est primordiale. Elle implique l'analyse de leur composition, stabilité, potentiel de valorisation, et des risques associés à leur utilisation ou élimination. D'une part, les analyses physico-chimiques déterminent des paramètres essentiels tels que l'humidité, le pH, la conductivité électrique, la teneur en matières organiques et sèches, le dosage de l'azote et phosphore ainsi que le rapport C/N. D'autre part, les analyses microbiologiques identifient la présence de microorganismes, pathogènes ou bénéfiques (bactéries, champignons, levures), ainsi que des parasites tels que les nématodes et les œufs d'helminthes.

L'enjeu principal consiste donc à trouver une solution d'élimination économiquement viable, tout en respectant les contraintes environnementales et d'hygiène publique.

Cette étude vise à :

Caractériser les propriétés physico-chimiques et microbiologiques des boues en identifiant la diversité et la concentration des microorganismes présents ; Évaluer les risques liés aux contaminants ; Proposer des recommandations pour la valorisation ou l'élimination ; Rédiger un rapport synthétique présentant les résultats et leur interprétation en vue d'applications pratiques pour la gestion des boues.

La structure du travail s'articule en trois parties

La première partie : présente des Généralités sur les eaux usées, les procédés de traitement des boues, leurs impacts environnementaux et sanitaires, ainsi qu'une présentation de la station d'épuration de Baraki ; La deuxième partie apporte une vue générale sur les différents matériels et méthodes d'analyse. La troisième partie englobe une présentation et une interprétation de tous les résultats obtenus, à partir des analyses physicochimiques et microbiologiques ainsi qu'une conclusion.

Chapitre 1. Généralités sur les Eaux Usées et les Différents Procédés de Traitement

Chapitre 1. Généralités sur les Eaux Usées et les Différents Procédés de Traitement

1.1. Généralité sur les eaux usées :

Les eaux usées sont des eaux contenant des polluants, qu'ils soient solubles ou non, provenant principalement des activités humaines, industrielles ou agricoles. Il est nécessaire de les traiter avant de les rejeter dans le milieu naturel afin d'éviter toute contamination des sources hydriques [1]. On peut généralement diviser les eaux usées en deux types principaux : **domestiques** et **industrielles** :

1.1.1. Les eaux usées domestiques :

Il s'agit de l'eau que nous consommons pour nos divers besoins quotidiens, et elle est généralement classée en deux catégories [2] :

- **Les eaux de vannes** : Il s'agit des eaux de toilettes, chargées de diverses matières organiques azotées et de germes fécaux.
- **Les eaux grises** : Celles-ci correspondent à toutes les autres utilisations domestiques, comme les eaux de lave-linge, de vaisselle ou de douche.

1.1.2. Les eaux résiduaires industrielles :

La qualité et le niveau de pollution de ces eaux usées sont principalement influencés par les déchets et les rejets industriels. Les entreprises industrielles consomment d'importantes quantités d'eau qui, bien qu'essentielles à leur fonctionnement, ne sont en réalité consommées qu'en très faible proportion ; le reste est rejeté.

Les principaux rejets industriels peuvent être classés en fonction des nuisances qu'ils génèrent :

- **Pollution due aux matières en suspension minérales** : Provenant du lavage du charbon, des carrières, du tamisage du sable et du gravier, ou des industries productrices d'engrais phosphatés.

Chapitre 1. Généralités sur les Eaux Usées et les Différents Procédés de Traitement

- Pollution due aux matières en solution minérales : Typiquement issues des usines de décapage et de galvanisation.
- Pollution due aux matières organiques et graisses : Courante dans les industries agroalimentaires, les équarrissages et la fabrication de pâte à papier.
- Pollution due aux rejets hydrocarbonés et chimiques divers : Observée dans les raffineries de pétrole et les industries pharmaceutiques.
- Pollution due aux rejets toxiques : Incluant les déchets radioactifs non traités et les effluents radioactifs des industries nucléaires.

Les eaux résiduaires d'origine industrielle possèdent généralement une composition plus spécifique, directement liée au type d'industrie concernée. Indépendamment de leur charge de pollution organique ou minérale, ou de leur caractère putrescible ou non, elles peuvent présenter des caractéristiques de toxicité propres liées aux produits chimiques transportés [3]. Elles peuvent également contenir des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des micropolluants organiques et des hydrocarbures [4].

1.2. Les procédés d'épuration des eaux usées :

1.2.1. Les prétraitements :

L'objectif des prétraitements est de séparer les éléments les plus grossiers et ceux qui pourraient entraver les étapes ultérieures du processus de traitement. Cette phase comprend le dégrillage pour capturer les déchets de grande taille, le dessablage pour une décantation plus efficace, ainsi que le dégraissage et le déshuilage pour prévenir l'obstruction des installations par des substances grasses [5].

1.2.1.1. Dégrillage :

Les eaux résiduaires urbaines qui parviennent à la station d'épuration sont d'abord acheminées à travers des grilles à barres espacées ou des tamis tournants. Ce processus retient les composants les plus volumineux, protégeant ainsi les installations contre l'intrusion d'objets susceptibles de provoquer des obstructions dans les diverses unités de l'équipement [5].

Chapitre 1. Généralités sur les Eaux Usées et les Différents Procédés de Traitement

1.2.1.2. Dessablage :

Le dessablage vise à éliminer les graviers, le sable et les particules minérales de diverses tailles présentes dans les eaux brutes. Cette étape prévient leur accumulation dans les canaux et conduites, et protège les installations de l'usure par abrasion [6].

1.2.1.3. Dégraissage – déshuilage :

Les huiles et les graisses, dont la densité est légèrement inférieure à celle de l'eau, proviennent non seulement des domiciles mais aussi des restaurants, garages, routes, usines et abattoirs. L'objectif du dégraissage est de réduire la quantité de graisses contenues dans les eaux résiduaires, car elles peuvent nuire à l'efficacité des traitements biologiques ultérieurs. La flottation est couramment utilisée pour le dégraissage : l'insufflation d'air au fond du récipient favorise la remontée des matières grasses à la surface. Ces graisses sont ensuite raclées en surface, stockées, puis éliminées [7].

1.2.2. Le traitement primaire :

Le traitement primaire complète les prétraitements en visant à récupérer les particules fines en suspension par décantation. Cette opération de séparation, réalisée dans un décanteur, permet d'arrêter entre 50 et 70% des matières en suspension (MES) présentes dans l'effluent à traiter. Les MES s'accumulent au fond du bassin de décantation, d'où elles sont régulièrement extraites [8].

L'élimination des matières en suspension (MES) peut également s'effectuer par flottation, qu'elle résulte d'un phénomène naturel (pour les particules naturellement flottantes) ou d'un procédé provoqué. Dans cette seconde configuration, l'injection de microbulles d'air adhérent aux particules en réduit la masse volumique apparente. Cette technique est principalement utilisée dans les filières de traitement des effluents industriels, notamment pour extraire les MES des rejets fortement fermentescibles de l'agroalimentaire, dans le déshuilage en phase de prétraitement, ou pour concentrer les boues d'origine biologique [3].

1.2.3. Le traitement secondaire :

Le procédé de traitement biologique des eaux usées consiste à décomposer les polluants grâce à l'intervention de micro-organismes. Ce phénomène, similaire à ce qui se produit

Chapitre 1. Généralités sur les Eaux Usées et les Différents Procédés de Traitement

naturellement dans des environnements bien oxygénés comme les eaux de surface, implique un grand nombre d'organismes à travers divers cycles de transformation. Parmi ces organismes, on trouve fréquemment des bactéries, des algues, des champignons et des protozoaires. Ces micro-organismes épurateurs forment des floccs et se nourrissent de la pollution pour produire l'énergie nécessaire à leur survie et à la formation de nouvelles cellules vivantes [9].

1.2.4 Le traitement tertiaire :

Ce processus facilite la séparation de l'eau purifiée et des boues ou résidus secondaires provenant de la décomposition des matières organiques par décantation. Cette clarification s'effectue dans des bassins dédiés, appelés « clarificateurs ».

Dans la majorité des situations, l'eau peut être restituée à son environnement naturel, que ce soit dans une rivière, en mer ou dans l'océan. Selon les exigences de qualité du milieu naturel où sont déversées les eaux, des traitements supplémentaires (traitements tertiaires) visant à retirer l'azote et le phosphore peuvent être mis en œuvre. Il est parfois indispensable de procéder à une phase d'affinage pour atteindre un niveau de dépollution encore plus avancé [1]

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

2.1. Définition des Boues

Les boues résiduairees sont définies comme une combinaison d'eau et de substances solides, séparées des différents types d'eaux par des procédés naturels ou artificiels. Elles se composent à la fois de matières minérales inertes (comme le micro-sable et les particules de terre) et de matières fermentescibles [10].

2.2. Types de Boues:

On distingue principalement plusieurs types de boues en fonction de leur origine et de leur composition :

- **Les boues primaires** : Également appelées boues fraîches, elles résultent du traitement primaire des eaux usées. Elles sont produites par simple décantation des matières en suspension (MES) présentes dans les effluents bruts au niveau du décanteur primaire. [11]
- **Les boues secondaires** : Connues sous le nom de boues biologiques, elles sont les résidus du traitement biologique des eaux usées. Elles proviennent de la transformation des polluants, que ce soit par culture libre (comme les boues activées) ou par culture fixée (tels que les lits bactériens ou les disques biologiques) [7].
- **Les boues de traitement physico-chimique** : Ces boues sont générées par l'agglomération des particules ou colloïdes organiques présents dans les eaux usées, grâce à l'ajout d'un agent coagulant (généralement des sels de fer ou d'aluminium). Ce procédé permet de détecter et d'isoler jusqu'à 90 % de MES par décantation. Les boues ainsi récupérées contiennent une proportion significative de minéraux dérivés des eaux brutes et de l'agent de coagulation. [11]
- **Les boues mixtes** : Il s'agit d'une combinaison de boues primaires et secondaires. Cette combinaison est généralement effectuée avant l'étape de stabilisation des boues [5].

2.3. L'Épaississement :

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

Avant leur élimination finale, les boues sont soumises à un processus spécifique adapté à leur composition et à leur destination. L'objectif principal est de diminuer leur masse en supprimant une partie de l'eau qu'elles contiennent, étant donné qu'elles sont initialement récupérées sous forme liquide du système d'épuration des eaux [12].

L'épaississement des boues vise à concentrer les matières en suspension de la manière la plus économique possible. Ce processus réduit le volume des boues en éliminant une masse d'eau par décantation, flottation, centrifugation ou égouttage. Il représente une phase transitoire essentielle pour la réduction de la quantité de boues générées par une installation de traitement [11]. On distingue deux grandes familles de procédés d'épaississement : gravitaire et dynamique.

2.3.1. Epaississement gravitaire :

Les épaisseurs gravitaires ont une configuration comparable à celle des bassins de décantation. Typiquement circulaires, ils sont alimentés par le centre et évacuent les boues par le bas tout en récoltant le surnageant sur leur périphérie. Il implique le stockage des boues dans des structures cylindro-coniques pouvant atteindre jusqu'à 5 mètres de diamètre, avec des parois inclinées (45 à 70° par rapport à l'horizontale). Un système de raclage et d'agitation douce est mis en place pour faciliter le mouvement des boues vers la fosse centrale, d'où elles sont ensuite extraites [13]. Les boues épaissies sont ensuite dirigées vers l'étape subséquente (habituellement la digestion), tandis que le surnageant est renvoyé à l'installation de traitement des eaux usées [14].

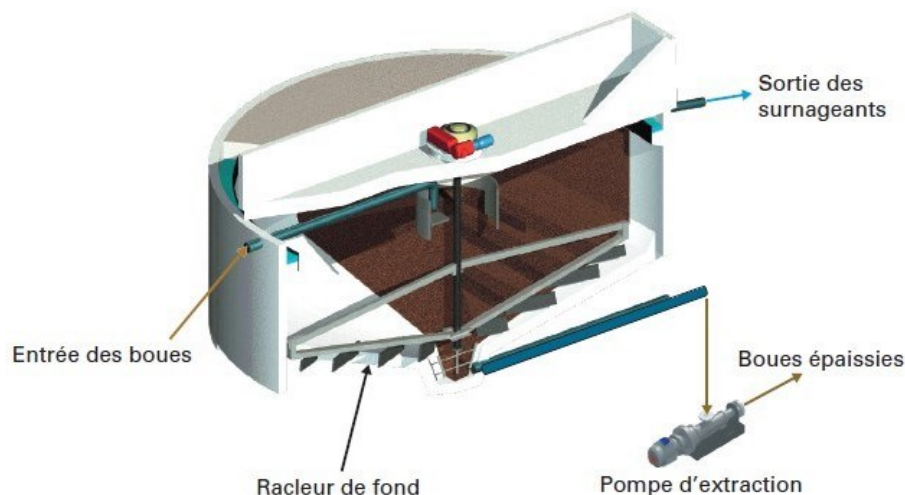


Figure 1. Coupe Épaisseur Statique

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

2.3.2. Epaissement dynamique

Parmi les techniques utilisées, on distingue :

2.3.2.1. Epaissement par flottation :

La méthode d'aérofottation est fréquemment utilisée dans le traitement des boues. Dans ce processus de flottation à l'air dissous, l'air est forcé de pénétrer une solution maintenue sous haute pression. Lors de la dépressurisation, l'air dissous est libéré, créant de petites bulles. Ces bulles, en remontant, entraînent les particules de boue vers la surface, où elles sont ensuite écumées[14].

2.3.2.2. Epaissement centrifuge :

La centrifugation est un processus de séparation physique basé sur l'effet de la force centrifuge, impliquant deux ou trois phases en mouvement de rotation. Dans ce type d'épaissement, l'incorporation d'une petite quantité de poly-électrolyte est essentielle pour optimiser la séparation [13].

2.4. Stabilisation des boues :

La stabilisation des boues vise à réduire leur fermentescibilité et à minimiser les nuisances olfactives engendrées par la prolifération microbienne. Ce traitement assure la stabilité des boues en diminuant leur activité fermentaire [15]. On distingue plusieurs méthodes de stabilisation :

➤ **Biologique** : Cette approche utilise des procédés aérobies (nécessitant de l'oxygène) ou anaérobies (sans oxygène, comme la méthanisation). L'avantage de la stabilisation biologique est qu'elle modifie moins la composition des boues après traitement.

➤ **Chimique** : Elle implique l'ajout de substances chimiques, telles que le chaulage [7].

2.4.1. Digestion aérobie :

La digestion aérobie repose sur une aération prolongée des boues. Ce processus stimule la croissance des micro-organismes au-delà de la phase de synthèse cellulaire, entraînant l'épuisement du substrat. La température et le temps de séjour des boues en aération influencent

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

considérablement l'efficacité de cette stabilisation. On observe généralement une réduction des matières organiques de l'ordre de 20 à 35 %.

2.4.2. Digestion anaérobie :

La digestion anaérobie, ou fermentation méthanique, se déroule en l'absence d'air, dans des réservoirs étanches appelés digesteurs. Ce procédé permet d'atteindre des réductions de matières organiques plus importantes, allant de 45 à 50 % [9].

2.4.3. Stabilisation chimique :

Le traitement par voie chimique est basé sur la modification du pH des boues à l'aide de substances chimiques (comme la chaux ou l'acide nitrique). Le pH extrême (très acide ou très basique) de ces substances bloque l'activation des germes pathogènes. Cette technique économique réduit temporairement la capacité fermentescible des boues par incorporation de chaux à des quantités bactériostatiques. Un mélange intime de la chaux et des boues est essentiel pour garantir une stabilisation chimique efficace [16].

2.5. Le conditionnement :

Avant les opérations de déshydratation, le **conditionnement** des boues est une étape essentielle. Son but est de rompre la stabilité colloïdale des boues et d'augmenter artificiellement la taille des particules par **floculation**. [7]

Le conditionnement peut être réalisé par des techniques principalement physiques (thermiques) ou, plus couramment, par des méthodes chimiques, impliquant l'ajout de réactifs minéraux ou de polymères synthétiques [14].

2.6. Déshydratation :

La déshydratation est une étape importante du traitement des boues qui facilite leur transformation de l'état liquide à l'état solide. Elle permet de réduire la teneur en eau des boues, aboutissant à un taux de solidité variant entre 15 et 40 %, selon le procédé de

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

traitement des eaux, les propriétés des boues et la technique de déshydratation employée [16], On identifie deux types de déshydratation des boues :

2.6.1. Déshydratation mécanique :

Dans les usines de traitement des eaux usées, l'étape finale du traitement des boues consiste à les déshydrater pour en retirer le plus d'eau possible. On obtient un contenu en matières sèches qui se situe entre 15 et 35%. Les boues renferment encore jusqu'à 85% d'eau. Il est donc essentiel d'améliorer cette phase pour garantir l'élimination maximale de l'eau. Les méthodes de déshydratation couramment employées comprennent le filtre à bandes presseuses, le filtre presse et la centrifugeuse. [16]

2.6.1.1. Filtre à bandes presseuses : Ce processus de filtration sous pression progressive (de 0,3 à 1 bar) comprime la boue entre un bandeau filtrant et un bandeau presse au moyen de rouleaux. Le processus comprend plusieurs étapes : la floculation à l'aide de poly-électrolytes, le déversement de l'eau interstitielle sur un filtre, et enfin le pressage progressif de la boue séchée entre deux toiles.

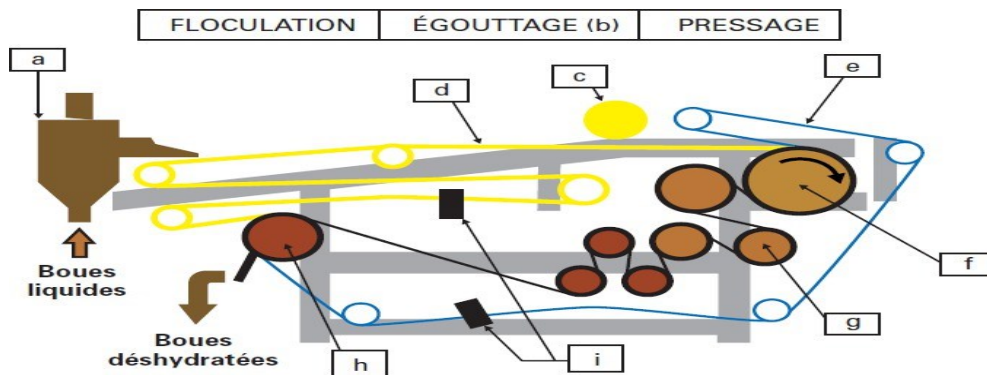


Figure 2. Schéma de principe de fonctionnement d'un filtre à bande.

2.6.1.2. Filtre presse : Cet équipement filtre les boues en chambre hermétique sous des pressions variant de 5 à 15 bars, et fonctionne de manière discontinue.

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

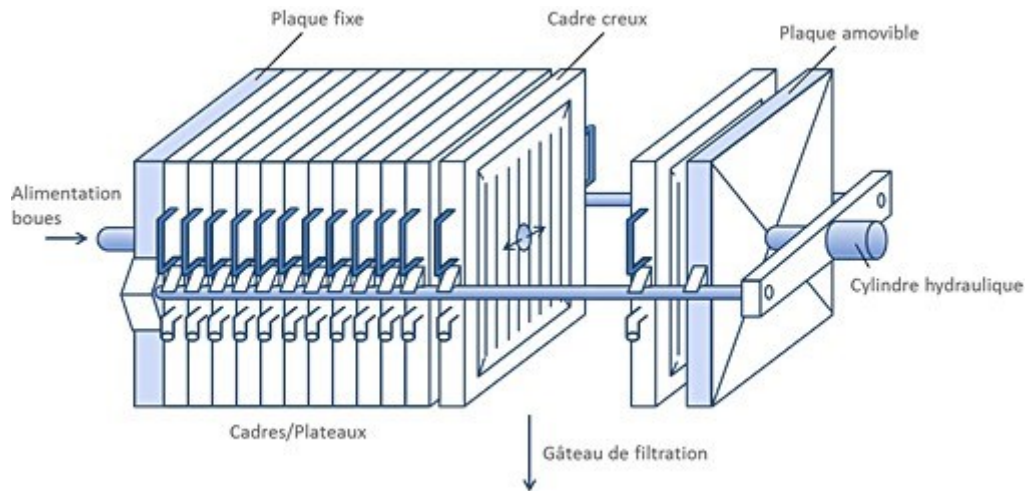


Figure 3. Schéma de principe de fonctionnement d'un filtre à presse.

2.6.1.3. La centrifugeuse : Comparable à une sédimentation accélérée, la centrifugation est précédée d'un traitement avec des polymères synthétiques pour obtenir une boue flocculée.

2.6.2. Déshydratation naturelle (Lit de séchage) :

Les lits de séchage sont particulièrement adaptés aux boues fortement minéralisées provenant d'une station d'épuration complète ou d'un système de digestion des boues. La déshydratation naturelle des boues se réalise de deux manières distinctes lorsque la boue est introduite dans des bassins peu profonds garnis de graviers et de sable dotés d'un système de drainage : Le processus de filtration naturel à travers le substrat qui peut engendrer une diminution de jusqu'à 80% du niveau d'humidité et l'évaporation naturelle [16].

2.7. Elimination et Valorisation des boues résiduelles :

La gestion des boues résiduelles implique diverses méthodes de valorisation et d'élimination, visant à réduire leur impact environnemental.

2.7.1. L'incinération :

L'incinération des boues seules est rarement pratiquée. Elles doivent être combinées à

Chapitre 2. Les Procédés de Traitement des Boues

divers déchets dans des incinérateurs spécifiques pour assurer une combustion efficace et conforme aux normes.

2.7.2. Valorisation agronomique :

L'épandage sur les sols est une méthode de valorisation agronomique des boues, qu'elles soient brutes, chaulées, compostées ou séchées. Cette pratique est conditionnée par l'effet fertilisant des boues et leur conformité aux critères réglementaires de sécurité. La législation actuelle encadre l'épandage en prenant en compte la durée d'application, les concentrations du sol en éléments non organiques, ainsi que les concentrations des boues en matières organiques et inorganiques [13].

2.7.3. Valorisation énergétique :

Le processus de valorisation énergétique consiste à transformer des matières organiques en énergie renouvelable (comme l'électricité ou la chaleur). La valorisation énergétique des boues, que ce soit par méthanisation ou pyrolyse, contribue manifestement à la préservation de l'environnement [16].

Chapitre3 : Impact Environnemental et Risque Sanitaire des Boue

Chapitre 3. Impact Environnemental et Risque Sanitaire

Chapitre 3 : Impact Environnemental et Risque Sanitaire des Boues

3.1. L'impact sur l'environnement :

Les boues résiduairees issues du traitement des eaux (qu'elles soient urbaines, industrielles ou de ruissellement) contiennent une diversite de composants organiques, mineraux et biologiques. L'epandage de ces boues sur le sol peut induire des modifications environnementales significatives. On observe notamment des alterations de la structure et de la composition du sol, une elevation de temperature due a la fermentation (microclimat), l'apparition de vegetation ruderales (flore) et des emissions gazeuses telles que le H₂S ou le CH₄ dans l'atmosphere. Ces changements, en particulier la pollution des sols et de l'eau par des substances toxiques, representent une menace serieuse pour l'ecosysteme et la sante humaine [13].

Les boues de traitement, riches en metaux lourds, en composés organiques difficilement dégradables et en agents pathogènes, posent un risque environnemental non négligeable. Leur interaction avec le sol est modulée par les propriétés intrinsèques de ce dernier, les conditions climatiques et la localisation géographique. Les lixiviats générés ont le potentiel de contaminer les eaux souterraines et les cours d'eau, surtout lors d'épisodes de fortes précipitations. De surcroît, le transport et l'élimination de ces boues contribuent à la dissémination de polluants atmosphériques, notamment les gaz sulfuriques et azotés, reconnus pour leurs effets préjudiciables sur la santé humaine et animale [16].

3.2. Risque sanitaire :

Les boues issues des usines de traitement des eaux usées sont riches en matière organique et en nutriments, ce qui pourrait les rendre intéressantes pour une valorisation agricole. Cependant, elles peuvent également contenir des agents infectieux, des métaux lourds et d'autres polluants chimiques susceptibles de nuire à la santé humaine et animale si elles ne sont pas gérées de manière adéquate. L'évaluation du risque sanitaire est déterminée par la nature de l'élément présent et sa concentration dans l'environnement. [17]

3.2.1. Les éléments traces inorganiques :

Parmi les éléments inorganiques, les éléments traces métalliques sont les plus préoccupants

Chapitre 3. Impact Environnemental et Risque Sanitaire

pour la santé humaine. Leur présence dans l'organisme, que ce soit par voie respiratoire (inhalation) ou par ingestion, peut provoquer diverses pathologies. En voici quelques exemples:

- **Plomb** : Il engendre des troubles physiologiques et neurologiques, une élévation de la pression sanguine accompagnée de lésions vasculaires et intestinales, ainsi que des dysfonctionnements rénaux. Les troubles neurologiques affectent les systèmes nerveux central et périphérique, se manifestant couramment par de l'amnésie et des altérations des capacités cognitives et comportementales.
- **Cuivre** : À des concentrations élevées et sous ses formes oxydées, le cuivre possède un pouvoir toxique significatif.
- **Cadmium** : Il est à l'origine de divers problèmes rénaux et d'une augmentation de la tension artérielle. Étant transporté dans le sang par l'hémoglobine, sa concentration est principalement observée dans le foie et les reins.
- **Zinc** : Une exposition excessive peut entraîner des nausées et des perturbations du système digestif, suivies de complications au niveau du système respiratoire et de problèmes dermatologiques. Par ailleurs, le zinc est suspecté d'être cancérigène pour l'homme[17].

Tableau 1. Valeurs toxicologiques proposés par OMS de quelques métaux [13]

Métaux	Voie d'exposition	Organe critique	Valeur
Cd	Inhalation	Rein	$2.10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Ingestion		$2.10^{-2} \text{mg}/\text{kg}/\text{j}$
Cr III	Inhalation	Foie	$60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (métal)
	Ingestion		$1,5 \text{mg}/\text{kg}/\text{j}$
Cr VI	Inhalation	Bronches poumons	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Ingestion		$3 \cdot 10^{-3} \text{mg}/\text{kg}/\text{j}$
Cu	Inhalation	Système digestif	$1 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Ingestion		$0,5 \text{mg}/\text{kg}/\text{j}$
Ni	Inhalation	Système respiratoire	$9 \cdot 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Ingestion	Rein	$8 \cdot 10^{-3} \text{mg}/\text{kg}/\text{j}$
Pb	Inhalation	Rein, Cellule sanguine,	$0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Ingestion		$3,6 \cdot 10^{-3} \text{mg}/\text{kg}/\text{j}$
Zinc	Ingestion	Système sanguin	$0,5 \text{mg}/\text{kg}/\text{j}$

Chapitre 3. Impact Environnemental et Risque Sanitaire

3.2.2. Les éléments traces organiques :

Les hydrocarbures chlorés et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) représentent une menace importante pour la santé humaine. Voici des exemples de ces substances et de leurs impacts :

- **Chlorobenzène** : Rapidement assimilé par voie respiratoire, il se concentre dans le foie, les reins, les poumons et principalement dans le tissu adipeux. Un époxyde intermédiaire réactif se forme, créant des liaisons irréversibles avec les macromolécules des cellules hépatiques, rénales et pulmonaires.[18]
- **Hexachlorobenzène** : Cette molécule présente une forte persistance environnementale. Elle s'accumule préférentiellement dans les tissus à haute teneur lipidique, tels que les tissus adipeux ou la peau.[6]
- **Polychlorobiphényle (PCB)** : Les PCB peuvent se bioaccumuler dans les tissus vivants et sont faiblement biodégradables. Outre leur potentiel cancérigène, une exposition chronique, même minime, peut entraîner chez les enfants des symptômes tels que vertiges et troubles cognitifs, tandis qu'elle peut provoquer des perturbations métaboliques et affecter la thyroïde chez les adultes.[18]
- **HAP** : Les HAP présentent des risques majeurs en raison de leur capacité à provoquer des mutations et à favoriser le développement du cancer. Certains d'entre eux, comme le Benzo(a)pyrène, ont été identifiés comme ayant une probabilité ou une possibilité de causer le cancer chez l'homme. Le benzo[k]fluoranthène, le benzo[j]fluoranthène, le benzo[a]anthracène, le benzo[b]fluoranthène et cinq autres composés de HAP (Benzo(a)anthracène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(a)pyrène et Dibenzo(a,h)anthracène) sont considérés comme des substances toxiques.[13]

Chapitre 3. Impact Environnemental et Risque Sanitaire

Tableau 2. Valeurs toxicologiques proposés par OMS des quelques hydrocarbures qui peuvent être cancérogènes. [6]

Hydrocarbure	Voie d'exposition	Organe critique	Valeur
Chlorobenzène	Inhalation	Système hépatique	10 µg/m ³
Hexachlorobenzène	Inhalation	des Poumons	1,3.10 ⁻⁴ (µg/m ³)
PCB	Inhalation	Tractus respiratoire	4,6 10 ⁻⁶ (µg/m ³)
Benzo(a)Pyrène	Inhalation	Tractus respiratoire	8,7 10 ⁻² (µg/m ³)

3.2.3. Eléments biologiques :

Les **microorganismes pathogènes** constituent une menace biologique pour la santé humaine. Ces derniers peuvent infiltrer l'organisme humain par diverses voies, notamment par voie respiratoire (via les aérosols) ou par ingestion (par leur dispersion dans les eaux et les sols). Des bactéries telles qu'*Escherichia coli* et *Salmonella*, ainsi que des virus comme le virus de l'hépatite, sont fréquemment présents dans les boues résiduelles et sont susceptibles de provoquer des maladies potentiellement graves. [13] Des exemples spécifiques incluent :

- **Salmonella** : La présence de cette bactérie dans le corps entraîne une montée soudaine de la température, des douleurs abdominales, de la diarrhée, des nausées et, parfois, des vomissements. [7]
- **Escherichia coli** : Chez les adultes, elle provoque des diarrhées généralement hémorragiques, des douleurs abdominales et parfois des vomissements. Elle peut entraîner des complications graves chez les enfants, notamment une insuffisance rénale. Dans les situations les plus sévères, des complications neurologiques centrales peuvent apparaître [6].
- **Les vibrions** : Les vibrions sont des bactéries aquatiques, souvent présentes dans les milieux marins et estuariens, dont plusieurs espèces sont pathogènes pour l'homme. Parmi elles, *Vibrio cholerae* (sérogroupes O1 et O139) est responsable du choléra, une maladie diarrhéique sévère pouvant entraîner une déshydratation massive et la mort sans traitement rapide. D'autres espèces comme *V. parahaemolyticus* et *V. vulnificus* provoquent des gastro-entérites et des infections des plaies [1].
- **Virushépatique** : L'infection provoque des symptômes comparables à une hépatite

Chapitre 3. Impact Environnemental et Risque Sanitaire

virale aiguë. Ceux-ci incluent un ictère (jaunisse), une asthénie générale, une perte d'appétit, des douleurs abdominales, des nausées, de la fièvre, des diarrhées, des altérations de la couleur des selles ou des urines, ainsi qu'une hépatomégalie (augmentation du volume du foie) [18].

Le risque majeur est lié essentiellement aux nématodes intestinaux, du fait de leur

Chapitre 3. Impact Environnemental et Risque Sanitaire

persistance environnementale remarquable et de la très faible quantité nécessaire à la transmission de l'infection.

3.2.3. Présence et diversité des parasites :

- Les nématodes (*Ascaris*, *Trichuris*, *Ankylostoma*) dominent la charge parasitaire, représentant 98,3% des organismes identifiés.[18]
- Les œufs d'helminthes incluent également des cestodes (*Taenia*) et des trématodes (*Schistosoma*), avec une prévalence variable selon les conditions sanitaires locales [19].

3.3. Impact sur la vie marine :

Les boues contiennent des polluants (métaux lourds, pathogènes, résidus médicamenteux) qui, s'ils sont mal gérés, finissent souvent dans les océans. Cela engendre des conséquences écologiques et socio-économiques majeures.

3.3.1. Contamination des écosystèmes :

- **Métaux lourds** (plomb, mercure, cadmium) : Bioaccumulation dans les organismes marins, perturbant les réseaux trophiques.
- **Pathogènes** (bactéries, virus) : Prolifération d'agents infectieux, affectant notamment les espèces sensibles (mollusques, coraux).
- **Résidus médicamenteux** (antibiotiques, hormones) : Dérèglement des fonctions biologiques (reproduction, croissance).

3.3.2. Conséquence écologique et sanitaire :

- **Biodiversité marine** : Dégradation des habitats (blanchiment des coraux, mortalité piscicole).
- **Sécurité alimentaire** : Risque de toxicité pour les espèces consommées par l'homme (mercure dans les poissons).
- **Qualité des eaux côtières** : Eutrophisation, hypoxie, turbidité accrue, impactant les activités touristiques et aquacoles.

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

4. Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

4.1. Description de la Zone de BARAKI :

La zone étudiée correspond à la commune de Baraki, localisée dans la plaine de la Mitidja. Cette entité urbaine occupe une position stratégique :

- À 15 kilomètres au sud de la capitale nationale, Alger,
- À 13 kilomètres du littoral méditerranéen,
- Et à 13 kilomètres au nord-est de Dely Ibrahim.

Baraki est reconnue comme l'une des principales communes de la partie méridionale de l'agglomération algéroise.



Figure 4 : Localisation géographique de la commune de Baraki.

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

4.2. Localisation de la Station d'Épuration de BARAKI :



Figure 5: Localisation de la station d'épuration Baraki Alger

4.3. Présentation de la station d'épuration de Baraki :

Une station d'épuration des eaux usées (STEP) est conçue pour traiter et purifier les eaux usées, Le processus implique plusieurs phases successives où les polluants, initialement en suspension dans l'eau, sont progressivement concentrés sous forme de boues résiduelles. Ces matières solides, générées lors de l'épuration, peuvent ensuite produire du biogaz grâce à une digestion anaérobie.

La STEP de Baraki met en œuvre la filière de traitement suivante :

- Deux postes de relevage PR1 & PR2.
- Dégrillage fin et grossier mécanisé.
- Dessablage associé à une déshuilation.
- Traitement biologique par bassin d'aération
- Pompes des boues recirculées et des boues activées excédentaires
- Clarification par décantation secondaire
- Ouvrage de rejet.
- Concentration des boues par épaissement

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

- Stabilisation anaérobie des boues (digestion)
- Valorisation énergétique du biogaz produit
- Déshydratation mécanique et stockage des boues.

Tableau 3.Élément compris dans la section (T1 et T2)

N°	Ouvrage	Nombre (T1+T2)
1	PR 01	3vis
2	PR 02	4vis
3	Dégrilleur	4
4	Dessableur	4+4
5	Décanteur primaire	4+4
6	Bassin d'aération	4+4
7	Clarificateur	4+4
8	Filtration	7
9	Epaississeur	2
10	Digesteur	3+3
11	Gazomètre	1+1
12	Torchère	1+1
13	Déshydratation	6+6
14	Epaississement mécanique	4

La STEP de Baraki est de type de boue activée a moyenne charge, elle se compose de deux filières :

A- Filiere eau :

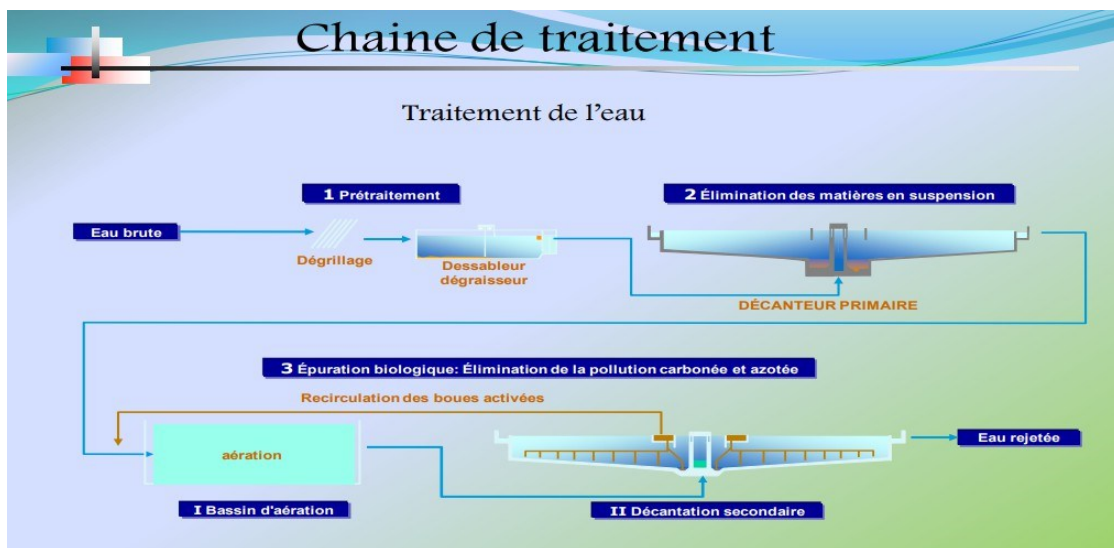


Figure 6.Schéma de la filière traitement de l'eau

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

4.3.1. Poste de relevage PR1 :

L'alimentation en eau de la station d'épuration des eaux usées se fait via des vis et des pompes, qui transportent l'eau jusqu'au poste de dégrillage, puis à travers les différentes étapes du processus de traitement. Ensuite, l'eau est relevée afin de garantir un écoulement gravitaire tout au long des étapes suivantes du traitement, jusqu'à atteindre le traitement tertiaire.

Sources d'arrivée à PR1: Par pompage via PR36 ; EL Harrach



Figure 7. poste de relevage PR1 (photo prise sur terrain 17 avril 2025)

4.3.2. Poste de relevage PR2 :

Les eaux brutes prélevées à la station PR1 sont transférées vers le bassin PR2 pour y être combinées aux effluents de l'émissaire BABA ALI. Le mélange est ensuite acheminé par des pompes à vis vers l'unité de dégrillage.

Sources d'arrivée à PR2:

- Par pompage via PR01
- Par gravitaire (Collecteur Baba Ali)
- Retours épaisseurs



Figure 8. Poste de relevage PR2 (photo prise sur terrain 17 avril 2025)

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

4.3.3. Les prétraitements :

La phase de prétraitement vise principalement à éliminer les débris indésirables et une proportion des matières solides en suspension (MES) contenues dans l'eau non traitée, préalablement aux étapes biologiques et de filtration avancée.

Les différentes mesures en phase de prétraitement sont :

- **Mesure de pH** : Maintenu entre 6,0 (seuil minimal) et 9,0 (seuil maximal) ;
- **Conductivité des eaux brutes** : Surveillée en amont du poste de relevage PR2, avec un seuil d'alerte fixé à 2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$;
- **Conductivité des eaux brutes** : Surveillée en amont du poste de relevage PR2, avec un seuil d'alerte fixé à 2 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$;



Figure 9. Mesures simultanées de pH, température, conductivité et hydrocarbures (17 avril 2025)

4.3.4. Dégrillage :

Cette étape consiste à intercepter les déchets solides de dimensions supérieures à 60 mm (dégrillage grossier) puis 20 mm (dégrillage fin), contenus dans le canal d'admission.

- **03 dégrilleurs grossiers** avec 60 mm d'entrefer
- **03 dégrilleurs fins** avec 20 mm d'entrefer
- **Vitesse de passage maximale** : 0,24 m/s

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki



Figure 10. Dégrilleurs mécanique fin et grossier

4.3.5. Dispositif de Prélèvement d'échantillons :

Un système automatisé de prélèvement est positionné après le dégrilleur fin. Sa fonction consiste à collecter des échantillons d'eau brute en vue d'analyses en laboratoire. L'activation des prélèvements est synchronisée avec un signal déclencheur généré par la mesure du débit entrant de l'eau.



Figure 11. Préleveur automatique à l'entrée

4.3.6. Classificateur à sables :

Le classificateur à sable permet essentiellement de séparer l'eau du sable revenant du dessableur.

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki



Figure 12: Classificateur à sables

4.3.7. Dessablage-déshuilage:

Dans cet ouvrage:

- Les sables contenus dans les eaux usées tombent au fond du bassin et sont aspirés.
- Les graisses sont raclées à la surface puis acheminées vers le traitement des graisses.



Figure 13. Dessableur-Déshuileur (photo prise sur terrain 17 avril 2025).

4.3.8. Décanteur Primaire:

Cette première étape permet de capter la majorité des matières solides en suspension (MES), avec un taux d'abattement avoisinant 60%. Elle réduit également environ 30% de la

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

demande biologique en oxygène (DBO) et 30% de la demande chimique en oxygène (DCO), jouant ainsi un rôle significatif de pré-épuration.



Figure 14. Décantation primaire (photo prise sur terrain 17 avril 2025).

4.3.9. Traitement biologique (bassin d'aération) :

Cœur du traitement des eaux usées, il assure l'oxygénation et le brassage des boues activées pour éliminer les matières organiques grâce à l'action des micro-organismes.



Figure 15. Bassin d'aération (photo prise sur terrain 17 avril 2025)

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

4.3.10. Clarificateur (Décanteur secondaire) :

Après le traitement biologique, les micro-organismes forment des floccs de boues. Le clarificateur permet leur séparation, produisant ainsi:

- Une eau clarifiée.
- Des boues biologiques en excès.



Figure 16: Clarificateur



Figure 17. Floccs de boues

4.3.11. Traitement Tertiaire :

L'objectif principal est d'améliorer la qualité microbiologique de l'eau grâce à deux procédés complémentaires : irradiation UV et filtration sur lit de sable. L'ultraviolet agit comme un agent physique de désinfection, neutralisant les microorganismes pathogènes dont la présence dans le réservoir accélérerait la croissance bactérienne et compromettrait la stabilité biochimique.

Les filtres Aquazur® exploitent un média sableux pour créer une barrière filtrante. Bien qu'efficaces, ils n'assurent pas une rétention intégrale de MES résiduelles ; certaines particules subsistent malgré l'optimisation du procédé. Le sable utilisé, homogène en texture et granulométrie, doit être couvert de bâches opaques pour bloquer la lumière. Cette prévention est importante afin d'inhiber le développement d'algues et les risques d'eutrophisation associés.

En sortie de traitement, l'eau présente ces caractéristiques : MES résiduelles : 10%, DBO : 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, DCO : 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki



Figure 18. Filtre à sable (filtration par filtres Aquazur®)

B) - Filière boue :

Les boues qui sortent des processus de traitement des eaux contiennent approximativement 95-99% d'eau. L'assèchement des boues vise à réduire leur contenu en eau ou à améliorer leur sécheresse pour minimiser leur volume et leur charge fermentable. Ce traitement comprend les phases d'épaississement, de déshydratation et de stabilisation.

4.3.12. L'épaississement des boues:

C'est un procédé permettant de concentrer les matières solides présentes dans les boues issues du traitement primaire et biologique, en augmentant leur teneur en matière sèche de 2 à 10 % jusqu'à 20 à 50 %. Le but principal de l'épaississeur est de diminuer leur volume. L'accroissement de l'épaisseur des boues s'effectue par :

- Processus de séparation de la phase solide et de la phase liquide par décantation.
- Concentrer les boues de 10 g/l à 60 g/l.
- Transférez les boues vers la cuve de pompage des boues concentrées.

4.3.13. Épaississement statique (Boue Primaire):

Le but de l'épaississement des boues est de minimiser leur volume en favorisant, via un processus gravitaire, leur concentration. Cette phase consiste à distinguer l'eau en surplus, connue sous le nom de surnageant, qui est par la suite renvoyée à l'entrée de la station (PR02) pour être

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

réintégrée dans le processus.

Deux épaisseurs statiques sont exclusivement réservés aux boues primaires. Ces boues épaissies seront par la suite combinées à d'autres boues pour créer des boues mixtes, qui seront dirigées vers les digesteurs. Cette procédure est indispensable pour améliorer la gestion des boues et préparer les matériaux pour les phases de traitement suivantes, telles que la stabilisation ou la valorisation.



Figure 19.Épaisseurs statiques (photo prise sur terrain avril 2025).

4.3.14. Épaississement dynamique (Boue Biologique):

Les boues résultant du processus biologique sont dirigées vers le pré-épaisseur, une phase cruciale qui contribue à diminuer leur volume tout en améliorant leur densité. Ce processus s'effectue par l'incorporation de polymère, qui stimule la floculation des particules et simplifie leur séparation de l'eau. Par conséquent, le pré-épaisseur aide à la gestion efficace des boues en préparant leur traitement futur, tout en diminuant leur empreinte écologique.



Figure 20. le pré-épaississeur (photo prise sur terrain avril 2025)

4.3.15. Digestion anaérobique :

C'est un processus compliqué qui a pour objectif de diminuer le volume des boues, surtout en ce qui concerne leur contenu en matière sèche, tout en stabilisant la matière organique qu'elles renferment. Cette stabilisation contribue à réduire considérablement les odeurs désagréables fréquemment liées à la décomposition des matières organiques, en entravant leur décomposition anaérobie.

De plus, ce processus facilite aussi la production de biogaz, une source d'énergie renouvelable qui peut être utilisée, notamment pour produire de l'électricité ou de la chaleur. Cette méthode, généralement effectuée dans des digesteurs anaérobies, présente donc des bénéfices écologiques et énergétiques, tout en participant à une gestion plus durable et performante des boues produites par l'épuration des eaux résiduaires.



Figure 21. Le Digesteur (photos prises sur terrain avril 2025)



Figure 22.panneau explicatif sur la digestion (photo prise sur terrain avril 2025)

4.3.15.1. Introduction des boues dans le digesteur :

Les boues destinées à la digestion sont d'abord dirigées vers un bassin d'entrée. À cet endroit, elles sont mélangées à des boues préalablement réchauffées, issues d'un circuit de recirculation. Le transfert vers la partie inférieure du digesteur s'opère via une canalisation spécifique, depuis ce réservoir d'apport.

4.3.15.2. Recirculation et réchauffage des boues :

L'augmentation thermique des boues s'effectue au sein d'un échangeur tubulaire fonctionnant en mode contre-courant. La boue y circule à travers un tube enveloppé d'eau chaude déjà préchauffée. Ce dispositif favorise un transfert thermique optimal afin d'atteindre la température désirée. La boue chauffée est ensuite réintroduite dans le digesteur afin de préchauffer les boues à traiter et d'optimiser leur viscosité. Deux capteurs placés sur les boues et un autre sur l'eau assurent le contrôle de la température



Figure 23Echangeur de chaleur de la STEP (Photo prise sur terrain avril 2025)

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

4.3.15.3. Agitation des boues :

Un système d'agitation interne au digesteur permet d'obtenir une répartition uniforme des matières, maintient une homogénéité thermique et favorise le contact entre la matière organique et les microorganismes dégradants. Chacun digesteur dispose de cinq agitateurs : un situé au centre et quatre organisés en parallèle.

4.3.15.4. Récupération du biogaz :

Le biogaz produit dans le digesteur est récupéré sous la coupole. Une portion est recyclée dans le digesteur à l'aide d'un compresseur pour mélanger les boues, alors que l'autre partie est éliminée, enregistrée et ensuite entreposée.

4.3.15.5. Conservation et valorisation du biogaz :

Le gaz non exploité pour le brassage est conservé dans un réservoir de gaz, qui exerce une régulation de pression sur le dôme du digesteur. Le gaz est ensuite valorisé pour alimenter le système de chauffage, tandis que l'excédent est brûlé via une torchère de sécurité.



Figure 24. Gazomètres à basse pression (prise sur terrain avril 2025).

4.3.16. Conditionnement des Boues :

Cette étape préalable à la déshydratation mécanique est essentielle pour optimiser l'efficacité des équipements. La majorité des boues organiques y subissent un traitement spécifique (conditionnement), souvent par ajout de polymère à 3 g/L. Ce procédé conditionne directement le taux d'extraction d'eau et prévient des dysfonctionnements critiques : surcharges des

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

systèmes, accumulation de lixiviats et colmatage des filtres à toiles.



Figure 25. L'incorporation de polymère (photo prise sur terrain avril 2025).



Figure 26. le polymère (prise sur terrain avril 2025).

4.3.17. La Déshydratation des Boues:

La déshydratation des boues a pour objectif principal de réduire leur teneur en eau, facilitant ainsi leur gestion et leur transport. Après avoir traversé l'atelier de déshydratation, les boues sortent avec une siccité moyenne d'environ 25 %. Les filtrats, qui sont essentiellement constitués d'eau sont renvoyés en tête de la station (PR01) pour être réintégrés dans le processus de traitement des eaux usées.

Le filtre à bande, utilisé dans ce processus, est constitué de deux toiles principalement séparées et entraînées par un ensemble de rouleaux cylindriques ; ces toiles servent à retenir les boues tout en permettant à l'eau d'être évacuée. Des forces de pression sont appliquées sur les boues lorsqu'elles passent entre les toiles, ce qui permet d'éliminer l'excès d'eau, en réduisant

Chapitre 4 : Présentation de la Station d'Épuration Baraki

ainsi la masse et la fluidité des boues. Cette technologie est efficace pour obtenir des boues déshydratées avec une consistance plus solide, facilitant leur gestion ultérieure et réduisant les coûts liés à leur élimination.



Figure 27.Le filtre a bande de la STEP de Baraki (prise sur terrain 2025).

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

Chapitre 5 : Matériels et Méthodes

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5. Matériels et Méthodes :

5.1. Introduction :

Notre analyse porte sur des boues déshydratée fraîche provenant de la station d'épuration de Baraki. Cette installation traite les eaux usées de l'Oued El Harrach, mélange d'effluents domestiques et de rejets industriels.

5.2. Objectif de la Caractérisation Des Boues :

L'étude des propriétés des boues vise à déterminer leur aptitude à une valorisation agricole ou énergétique, ou à définir des modalités d'élimination sécurisées, limitant les risques sanitaires pour les populations.

5.3. Échantillonnage :

Pour notre étude, nous avons procédé au prélèvement de boues déshydratées fraîches les échantillons ont été conditionnés dans des sachets de congélation étiquetés (date/heure/lot) et placés en réfrigération à 4°C.

5.4. Caractéristiques physico-chimiques

Plusieurs paramètres ont été examinés dans ce travail : Teneur en matière sèche (siccité), Taux d'humidité, Mesure du pH, Conductivité électrique (CE), les matières volatiles sèches (MVS), Dosage de l'azote (Méthode Kjeldahl), la granulométrie, et le dosage de phosphore.

5.4.1. Détermination de l'Humidité :

L'humidité résiduelle correspond à la perte de masse enregistrée après séchage d'un échantillon à 105°C. Ce paramètre permet de calculer la fraction solide et la siccité.

Nous avons introduit les échantillons de masses connues (m_1) de boue à l'air libre dans l'étuve (105 °C) pendant 24h, l'évolution des masses est suivie par pesée jusqu'à l'obtention des masses (m_2) constants.

$$\text{Humidité} = \frac{(m_1 - m_0) - (m_2 - m_0)}{(m_2 - m_0)} \times 100$$

Avec :

m_0 : Masse du creuset vide (en g)

m_1 : Masse de la boue avec le creuset (en g)

m_2 : Masse de la boue séchée avec le creuset (en g)

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5.4.2. Matières sèches (MS) (siccité) :

La siccité représente le pourcentage massique de matière sèche dans l'échantillon. Son calcul suit la norme NF12880 : on pèse un échantillon de boue avant et après étuvage à 105°C. La différence de masse équivaut au volume d'eau évaporée.

Le résidu solide présent dans le creuset après séchage constitue la matière solide totale. Cette fraction inclut l'ensemble des composés organiques, minéraux, dissous, en suspension et volatils. La siccité se calcule selon :

$$\text{Siccité} = \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0} * 100 \text{ (\%)}$$

Avec :

- P_0 = Masse du creuset vide (g)
- P_1 : Masse du creuset + échantillon humide (g)
- P_2 : Masse du creuset + échantillon sec (g)



Figure 29. Creuset vide



Figure 28. creuset avec boue séchée

5.4.3. Matière volatile sèche « MVS » et Matière Minérale :

Le résidu est porté pendant deux heures à 550 °C dans un four à moufle, préalablement chauffé, et thermostaté (NF12880).

Chapitre 5 : Matériels et méthodes



Figure 30. Four à moufle

5.4.4. Détermination du potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH quantifie l'activité des ions hydrogènes, indiquant le caractère acide ou basique d'un milieu. Sa détermination s'effectue par électrométrie à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de boue dans l'eau, conformément à la norme NF 12176.

Nous avons pesé 20g de boue brute, puis nous l'avons versée dans un bécher de 100 ml. Nous avons ensuite ajouté 50 ml d'eau distillée et agité le mélange pendant 30 minutes. Après avoir laissé décanter pendant 15 minutes, nous avons plongé l'électrode dans l'eau à analyser et effectué la lecture à l'aide du pH-mètre après stabilisation.



Figure 31. Lecture avec le Ph mètre

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5.4.5. Conductivité électrique :

Cette mesure est réalisée par électrométrie avec un conductimètre sur une suspension boue/eau, suivant le protocole de la norme ISO 11265.

Nous avons pesé 20 g de boue brute, puis l'avons versée dans un bécher de 100 ml. Nous avons ensuite ajouté 50 ml d'eau distillée et agité le mélange pendant 30 minutes. Après avoir laissé décanter pendant 15 minutes, nous avons mesuré la conductivité de la suspension à l'aide d'un conductimètre.



Figure 32. Conductimètre

5.4.6. Dosage de l'Azote Total (Méthode Kjeldahl) :

Cette technique transforme l'azote organique des boues en ammonium sous l'effet de l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré à chaud. Pour optimiser l'oxydation, la température est augmentée par ajout de sels de cuivre et de potassium. Après minéralisation complète, l'ammonium libéré est dosé par distillation en milieu basique (soude en excès, NF 13342). La méthode comporte trois phases : minéralisation, distillation et titrage.

5.4.6.1. Minéralisation :

La phase de minéralisation vise à convertir l'azote organique en azote ammoniacal. Le protocole est le suivant :

- Prélever 2 g d'échantillon dans un ballon de 250 ml

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

- Ajouter un mélange catalytique (sulfates de potassium et de calcium, sélénium) et 20 ml d'H₂SO₄ concentré
- Chauffer jusqu'à obtention d'un liquide incolore à teinte verte stable
- Refroidir, diluer progressivement avec 200 ml d'eau distillée sous refroidissement, puis ajuster au volume

5.4.6.2. Distillation :

L'azote ammoniacal est séparé par entraînement à la vapeur :

- Introduire 10-50 ml de solution minéralisée dans l'appareil de distillation (Büchi)
- Ajouter 50 ml de solution sodique concentrée (d=1,33)
- Dans un bécher destiné à recueillir le distillat ; introduire 20 ml de l'indicateur composé de :
 - **Pour 1L de solution :**
 - 20 g d'acide borique ;
 - 200 ml d'éthanol absolu ;
 - **10 ml d'indicateur qui contient :**
 - 1/4 de rouge de méthyle à 0,2% dans de l'alcool à 95°
 - 3/4 de vert de bromocrèsol à 0,1% dans l'alcool à 95°

Remarque : on peut utiliser l'acide borique sans indicateur à condition de disposer d'un PH mètre.

- Distiller jusqu'à recueil d'au moins 100 ml de distillat (le réfrigérant doit être immergé dans la solution)

5.4.6.3. Titrage :

Le titrage quantifie l'azote ammoniacal distillé.

- Titrer en retour avec de l'acide sulfurique N/20 ou N/50 jusqu'à la ré-obtention de la couleur initiale de l'indicateur.

1ml d' H2 SO4 (1 N) → 0,014g d'azote.

1 ml " N/50 → 0,014 /50 = 0,00028g d'azote

$$N(\%)=V1 \times 0,00028 \times \frac{100}{Y} \times \frac{250}{V0}$$

=3.5%

Avec :

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

V_1 : Descente de burette (ml) : (Volume de l'acide sulfurique N /50).

Y : Poids de l'échantillon de départ.

V_0 : Volume de la prise d'essai.



Figure 34.Appareil INKJEL



Figure33.Balance



Figure 35.Burette pour le dosage



Figure 36.Distillateur

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

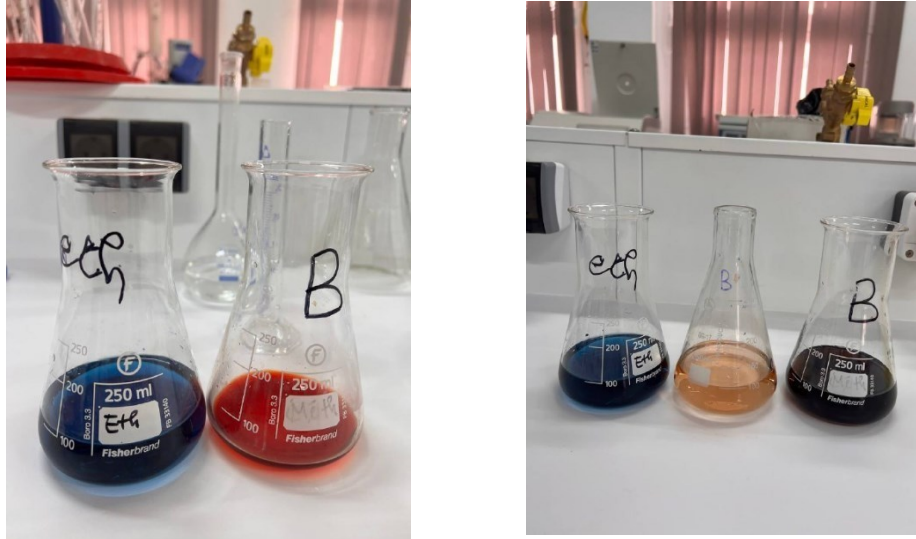


Figure 37. Résultat finale

5.4.7. Dosage du phosphore (P, Méthode Colorimétrique) :

5.4.7.1 Principe :

En milieu acide, les ions phosphate (PO_4^{3-}) forment un complexe coloré bleu avec le molybdate d'ammonium, après réduction à l'acide ascorbique. La mesure spectrophotométrique s'effectue à 720 nm. La procédure comporte deux étapes :

1. Établissement d'une courbe de calibration par analyse d'une série de solutions étalons ;
2. Mesure de l'absorbance de l'échantillon de boue, suivie de la détermination de sa concentration phosphatée par interpolation graphique (Norme NF14672).

5.4.7.2. Préparation de la solution mère S_0 :

- Dissoudre 0,439 g de KH_2PO_4 (phosphate monopotassique anhydre) dans une fiole jaugée de 1 L.
- Concentration molaire obtenue : $C = 3,23 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
En effet :
$$n = \frac{m}{M(\text{KH}_2\text{PO}_4)} = \frac{0,439}{136,1} = 3,23 \cdot 10^{-3}$$
- Compléter au trait de jauge avec de l'eau distillée et homogénéiser.
- **Dilutions successives** : Prélever 10,0 mL de la solution mère à l'aide d'une pipette jaugée
- Introduire dans une fiole jaugée de 100 mL et ajuster au trait avec de l'eau distillée (dilution au 1/10) ;
- Répéter cette dilution au 1/10 sur la solution obtenue.
- **Solution S_0 finale** : Concentration molaire = $3,23 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, équivalente à 1 mg P · L⁻¹ (exprimée en masse de phosphore élémentaire par litre).

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

Justification concentration massique : 1 mg d'élément phosphore correspond à $n = \frac{m}{M(P)} = \frac{1 \times 10^{-3}}{31} = 3,23 \cdot 10^{-5} \text{ mol}$ d'atomes de phosphore.

- Comme 1 mole de dihydrogénophosphate de potassium contient 1 mole d'atomes de phosphore, la concentration molaire de la solution S_0 est bien $C_0 = 3,23 \cdot 10^{-5} \text{ mol. L}^{-1}$.

5.4.7.3. Préparation de gamme étalon :

Cinq solutions étalons (S_1 à S_5) sont préparées selon le schéma suivant :

Solution	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
C' (mg P/L)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
V_0 (mL)	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
V eau (mL)	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5

- Matériel : Micropipette pour S_0 , burette pour l'eau distillée.
- Les volumes spécifiques sont déterminés par le tableau opératoire.

5.4.7.4. Tracée de la courbe d'étalonnage :

- 1.0 mL du réactif a été versé dans le contenu de chaque tube à essai.
- Le mélange a été bien agité. Il a été attendu environ 15 minutes pour que la coloration bleue se stabilise.
- L'absorbance A de chaque solution a été mesurée à une longueur d'onde de $\lambda = 720 \text{ nm}$.
- Une représentation graphique de l'absorbance (A) en fonction de la concentration (C) en phosphore a été réalisée.

5.4.7.5. Analyse :

- Introduire 0,5 g de boues dans un flacon, puis ajouter 500 mL d'eau distillée.
- Homogénéiser vigoureusement le mélange à l'aide d'un agitateur en verre ou d'un barreau magnétique pendant plusieurs minutes, afin d'obtenir une suspension uniforme.
- Procéder à la filtration de cette suspension.
- Prélever 5,0 mL du filtrat, l'introduire dans un tube à essais avec 1,0 mL de réactif, puis mesurer l'absorbance selon le même principe que précédemment.
- Déterminer la concentration massique en phosphore de l'échantillon en reportant la valeur d'absorbance sur la courbe d'étalonnage établie.

5.4.8. Le rapport C/N :

La quantité de carbone organique est déduite de la teneur en matière organique (MO) à l'aide de la relation :

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

$$CO (\%) = 1,72 MO (\%)$$

Où le coefficient 1,72 correspond à la teneur moyenne en carbone dans la matière organique. Le rapport carbone/azote (C/N) est ensuite calculé à partir de ces valeurs [18].

5.4.9. Eléments Traces métalliques

Le dosage des métaux lourds a été effectué au niveau du laboratoire central de SEAAL qui assurera les analyses des éléments Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, Hg dans la boue de la station de Baraki chaque mois.

5.4.10. Caractérisation Granulométrique des Échantillons :

- L'analyse granulométrique des boues déshydratées permet de déterminer la répartition des particules selon leur taille afin d'évaluer leurs propriétés physiques et leur potentiel de valorisation. Cette caractérisation est essentielle pour orienter le traitement, la manipulation ou l'élimination des boues (NF EN 933-1).

5.4.10.1. Mode Opérateur : (Les analyses granulométriques ont été effectuées à l'ENSSMAL)

- L'échantillon de boue déshydratée est séché à 105°C pendant 24 heures dans une étuve.
- L'échantillon séché est pesé pour obtenir sa masse initiale.
- L'échantillon est remis dans l'étuve à 105°C pendant 24 heures pour assurer une dessiccation complète.
- L'échantillon est pesé une seconde fois afin de confirmer l'absence de variation de masse significative, attestant ainsi un séchage complet.
- L'échantillon séché est introduit dans une colonne de tamis montée sur une tamiseuse mécanique. Les tamis sont sélectionnés et empilés selon les normes AFNOR [21], avec un diamètre de mailles décroissant de haut en bas. La série de tamis utilisée est la suivante : 3150 µm- 2000µm -1600µm -1250 µm -800 µm -630 µm-500 µm- 400µm- 315 µm- 200µm -160 µm -100µm-80µm-63µm- 50µm-40µm.
- Le tamisage est effectué mécaniquement pendant 10 minutes.

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

- Après le tamisage, la quantité de matière retenue sur chaque tamis est pesée. Les masses obtenues pour chaque classe granulométrique sont enregistrées.



Figure 38. Le dispositif de tamisage des sédiments (Tamiseuse électrique).



Figure 39. Fractions granulométriques de sédiments retenues sur les différents tamis après tamisage

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5.4.10.2. Le Traitement des données :

Les données relatives au tamisage et aux pesées ont été représentées par des courbes cumulatives, dessinées sur un graphique semi-logarithmique qui indique le pourcentage cumulé en ordonnée et le diamètre estimé du grain en millimètre en abscisses.

L'analyse de ces graphes fournit les indices granulométriques et fixe les paramètres qui décrivent la répartition granulométrique des sédiments [22].

❖ Les indices granulométriques à calculer :

➤ Pour le béton :

Le module de finesse : Norme Européenne [EN 12620]

$$MF = 1 / 100 \sum (\text{Refus cumulés sur tamis normalisés})$$

$$M\text{F} = 1 / 100 \sum (87.05 + 91.24 + 93.57 + 95.55 + 97.30 + 97.81 + 98.31) = 6.60$$

Selon la norme **NF P 18-540**

$MF < 2,2$: Sable fin (risque de retrait)

$2,2 \leq MF \leq 2,8$: Sable optimal pour béton

$MF > 2,8$: Sable grossier (risque de ségrégation)

$MF = 6.60 > 2,8$ donc le sable est grossier et il n'est pas optimal pour le **béton**.

➤ Pour le mélange bitumineux : NF EN 13108

- Le coefficient d'uniformité (Cu)

Formule d'indice d'uniformité : (Bernard, Février 2023)

$$Cu = D60 / D10$$

D60 : diamètre pour lequel 60 % des grains sont plus fins

D10 : diamètre pour lequel 10 % des grains sont plus fins

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5.4.11. Analyses bactériologiques

5.4.11.1. Recherche et dénombrement des indicateurs de contaminations fécales :

5.4.11.1.1. La méthode du nombre le plus probable (NPP) :

Cette technique fournit une évaluation statistique du nombre présumé de micro-organismes répartis de façon aléatoire dans l'échantillon [21]. L'estimation de la densité bactérienne est réalisée en utilisant le principe de vraisemblance, basé sur les réponses positives observées, pour une ou plusieurs dilutions successives de la suspension bactérienne initiale dans des milieux de culture en liquide [21].

❖ La formule de N :

$$N (\text{germes}/g) = \frac{Npp * Fd}{Ve}$$

D'où :

- **Fd** : Facteur de dilution.
- **Identification du NPP** : rassemblement de 3 séries de dilution dans le tableau de Mac Grady.
- **Volume semé** : 1 ml.
- **N** : Nombre de germes par millilitre.
- La lecture de NPP se fait avec la table de Mac Grady (Annexes).

❖ Coliformes Totaux :

Les coliformes sont des bacilles gram-négatifs, facultativement aérobies ou anaérobies, non sporulés, dépourvus d'oxydase, qui peuvent proliférer en présence de sels biliaires et fermenter le lactose pour produire des acides et des gaz en 24 à 48 heures à une température variant de 36 à 37 °C [23].

On peut rechercher et compter ces germes dans le milieu de culture BCPL [24]. La recherche se découpe en deux phases distinctes :

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

A- Test présomptif:

Après une homogénéisation minutieuse de l'échantillon pour obtenir une distribution uniforme des microorganismes, nous avons effectué huit dilutions décimales consécutives (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} et 10^{-8}) ; Les dilutions sont constamment réalisées dans un environnement aseptisé.

- L'étude est effectuée en milieu BCPL (Bouillon de lactose au pourpre de bromocrésol à concentration simple).
- À l'aide d'une pipette stérile, nous prélevons systématiquement 1 mL de la dilution 10^{-1} que nous le versons dans le premier tube de la série contenant 10 mL de milieu BCPL et une cloche de Durham. On continue de la même façon jusqu'à la dernière dilution.
- Avant incubation, nous tapotons délicatement chaque tube pour chasser le gaz sous les cloches de Durham. Puis, nous vortexons soigneusement pour garantir une homogénéité parfaite entre l'inoculum et le milieu.
- Enfin, nous incubons les tubes à 37 °C pendant 24 à 48 heures.

➤ Lecture:

Apparition d'un trouble plus une production de gaz dans les cloches Durham, signe de présence de coliformes, associé à un changement de couleur du milieu vers le jaune [24].

B- Test confirmative:

Afin de confirmer la présence de coliformes totaux, les tubes BCPL présumés positifs sont repiqués dans du bouillon lactosé à bile vert brillant (BLBVB) en transférant 1 mL d'inoculum dans 10 mL de milieu. Les tubes sont ensuite incubés à la même température [24].

➤ Lecture:

Après incubation, les tubes de BLBVB qui montreront à la fois, une libération de gaz (supérieure au $1/10^{\text{ème}}$ de la hauteur de la cloche) et un trouble microbien seront considérés comme positifs [25].

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

❖ Coliformes Thermotolérants :

On fait référence aux coliformes thermotolérants en parlant de coliformes qui possèdent des caractéristiques similaires aux coliformes totaux après une incubation à 44 °C. On peut rechercher et quantifier ce genre de micro-organismes dans l'eau [23].

A- Test Présomptif:

- On peut rechercher et compter ces germes dans le milieu de culture BLBVB.
- Après une homogénéisation minutieuse de l'échantillon pour obtenir une distribution uniforme des microorganismes, nous avons effectué huit dilutions décimales consécutives (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} et 10^{-8}) ; Les dilutions sont constamment réalisées dans un environnement aseptisé.
- À l'aide d'une pipette stérile, on prend 1 ml de la dilution 10^{-1} et on le verse dans le premier tube de la série de trois tubes ; qui contient 10 ml de milieu BLBVB et une cloche de Durham. On continue de la même façon jusqu'à la dernière dilution.
- Nous tapotons délicatement chaque tube pour chasser le gaz sous les cloches de Durham. Puis, nous vortexons soigneusement pour garantir une homogénéité parfaite entre l'inoculum et le milieu.
- L'incubation a lieu à une température de 44°C pendant une durée de 24 à 48 heures.

➤ **Lecture :**

Observation de la production de gaz dans les cloches Durham, signe de présence de coliformes.

B- Test confirmatif:

On refait le test présomptif une autre fois pour confirmer la présence de coliformes thermotolérants.

➤ **Lecture :**

Observation d'un trouble plus la production de gaz dans les cloches Durham, confirme présence de coliformes.

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

C- Test de MacKenzi :

On fait le test de MacKenzi pour la recherche d'Escherichia Coli.

- **Prélèvement** : On prélève 1 ml de chaque tube positif de BLBVB.
- **Ensemencement** : On transfère dans un tube de 5 mL d'EPI (le milieu eau peptone exemple d'indole).
- **Incubation** : Incuber à 37°C pendant 24 à 48 heures.

➤ Lecture :

Apparition d'un trouble plus un halo rouge sur la surface, indique la production d'indole par Escherichia Coli suite à l'ajout de 2 à 3 gouttes du réactif de Kovacs [25].

5.4.11.2. Dénombrement des streptocoques fécaux :

Les streptocoques du groupe D (qui possèdent l'antigène du groupe D) sont des coques Gram positives, incapables de bouger, facultativement anaérobies et non sporulantes. Lorsqu'ils sont cultivés dans un milieu liquide, ils forment des diplocoques et/ou des chaînes [24] .

On effectue deux tests consécutifs : un test présomptif utilisant le milieu de Rothe, suivi d'un test confirmatif avec le milieu Eva-Litsky [21].

A- Test présomptif :

Après une homogénéisation minutieuse de l'échantillon pour obtenir une distribution uniforme des microorganismes, nous avons effectué huit dilutions décimales consécutives (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} et 10^{-8}) ; Les dilutions sont constamment réalisées dans un environnement aseptisé.

- À l'aide d'une pipette stérile, on prend 1 ml de la dilution 10^{-1} et on le verse dans le premier tube de la série de trois tubes ; qui contient 10 ml de milieu ROTH. On continue de la même façon jusqu'à la dernière dilution.
- L'incubation a lieu à une température de 37°C pendant une durée de 24 à 48 heures.

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

➤ Lecture :

Les tubes présentant un trouble sont considérés comme positifs [21].

B- Test Confirmatif :

Les tubes de ROTH positifs sont repiqués dans une série de tubes contenant le milieu Evalitsky. L'incubation se fait à 37°C, pendant 24 heures.

➤ Lecture :

On considérera comme positifs les tubes présentant :

- Un trouble microbien [25].
- Une pastille violette (ou blanche) au fond du tube [25].

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

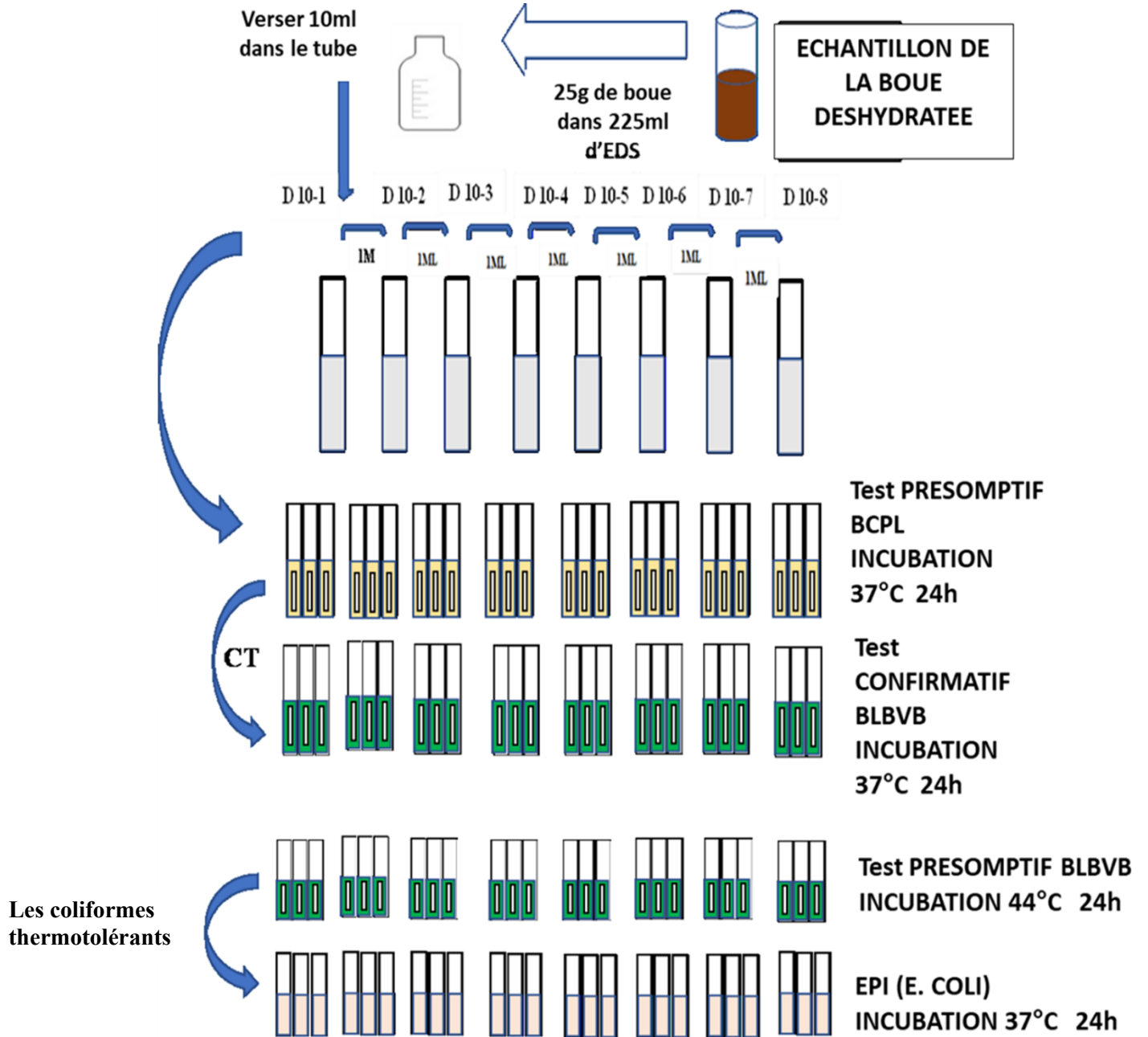


Figure 40. Protocol de dénombrement des Coliformes Totaux et Coliformes Fécaux

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

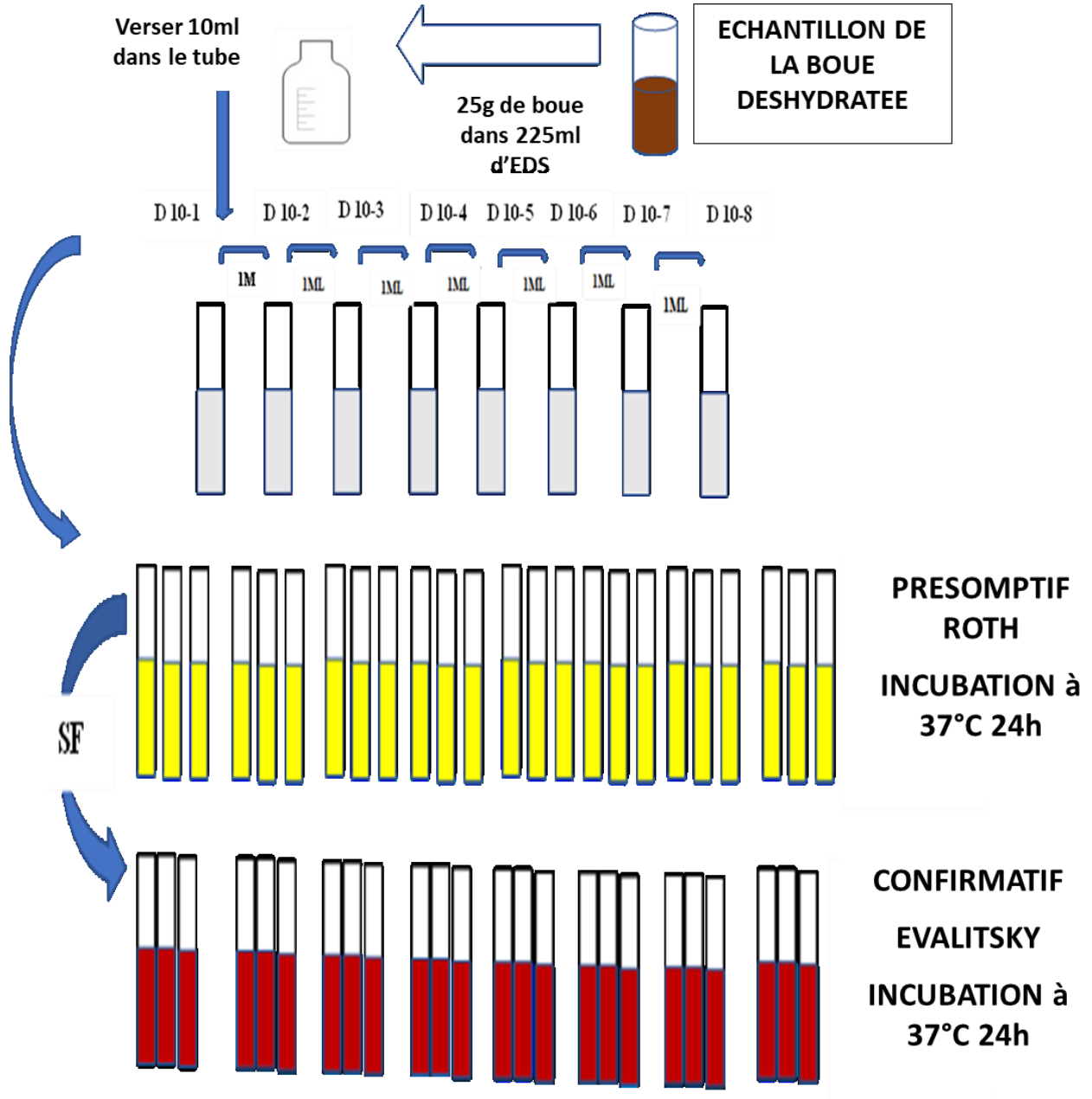


Figure 41. Protocol de dénombrement des Streptocoques Fécaux.

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5.4.11.3. Dénombrement des Spores Bactéries Anaérobies Sulfito-Réductrices (ASR) :

Ces indicateurs de contamination fécale ancienne sont dénombrés sur gélose viande foie [21]. La méthode d'incorporation en gélose dans des tubes profonds est utilisée pour rechercher et compter les spores des ASR présents dans l'eau.

- Après une homogénéisation minutieuse de l'échantillon pour obtenir une distribution uniforme des microorganismes, nous avons effectué huit dilutions décimales consécutives (10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} et 10^{-8}) ; Les dilutions sont constamment réalisées dans un environnement aseptisé.
- Une fois soigneusement homogénéisé, on transfère approximativement 1 ml de chaque dilution dans un tube stérile (un tube par dilution), les huit tubes ont été ensuite chauffés à 80 °C pendant une durée de 8 à 10 minutes, pour objectif d'éliminer toutes les formes végétatives potentielles des ASR qui pourraient s'y trouver.
- Après avoir chauffé, on refroidit rapidement les tubes en les plaçant sous l'eau du robinet.
- Après fusion et refroidissement à $47 \pm 1^{\circ}\text{C}$, nous avons incorporé approximativement 18 à 20 ml de gélose Viande-Foie (VF) additionnée des additifs (alun de fer et sulfite de sodium) dans chaque tube.
- Une couche de l'huile de paraffine est ajoutée.
- Le milieu est laissé à durcir 30 min sur la table de travail, puis incubé à 37°C pendant 24 à 48 heures.

➤ **Lecture :**

- La lecture sera effectuée après 24 heures.
- Toutes les colonies noires de 0,5 mm de diamètre ayant poussé en masse sont comptées, et le total est reporté pour les huit tubes contenant chacun 1 ml d'échantillon à analyser [25].
- Cette coloration résulte de la germination des spores bactériennes dans le milieu de culture car elles résident dans un environnement propice à leur [21].

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

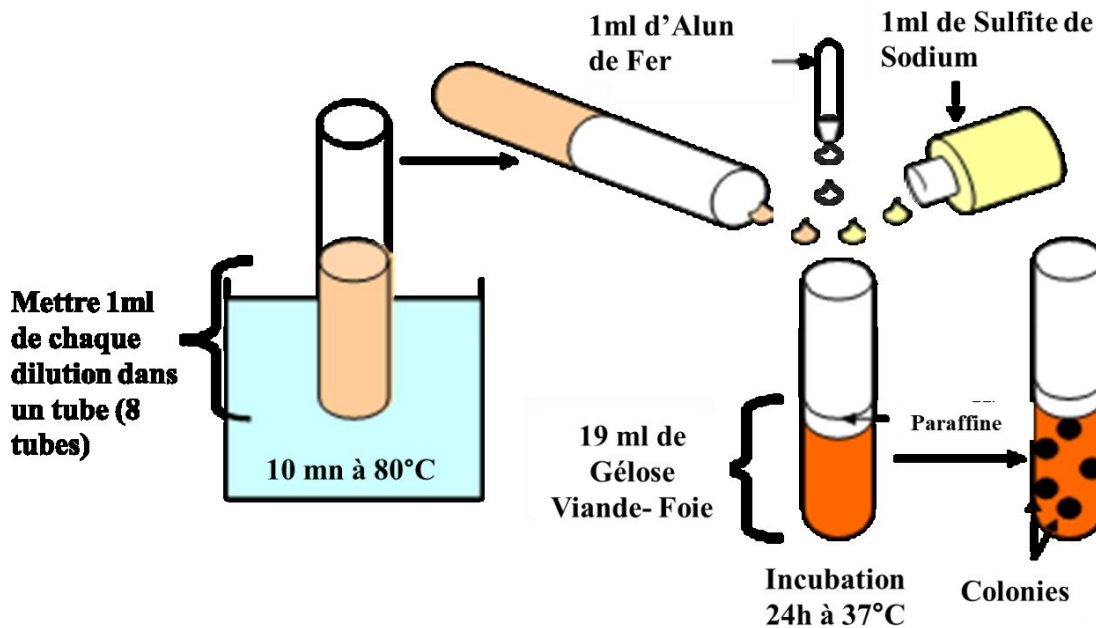


Figure 42. Recherche et dénombrement des germes anaérobies sulfito- réducteurs

5.4.11.4. Recherche et dénombrement du *Pseudomonas* :

Un bacille Gram négatif, Oxydase positif, ayant la capacité de générer de l'ammoniac à partir de l'acétamide. *Pseudomonas aeruginosa* est aussi une bactérie fortement pathogène et résistante aux divers antibiotiques [23].

Culture : Après prélèvement aseptique de 0,1 mL de chaque dilution décimale (10^{-1} à 10^{-8}), un étalement est réalisé sur gélose au cétrimide à l'aide d'un râteau stérile. Les boîtes sont ensuite incubées à $37 \pm 0,5$ °C pendant 18-24 h.

➤ Lecture

Les colonies de *Pseudomonas aeruginosa* apparaissent de couleur blanc-crème, avec un aspect muqueux [26].

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5.4.11.5. Recherche des Staphylocoques :

Il s'agit de bactéries *cocco* Gram positives, agencées en amas, non mobiles, ne formant pas de spores, catalase-positives et oxydase-négatives.

La culture de ce type de germes peut être réalisée sur milieu Chapman [26].

À partir de la solution mère et des dilutions décimales (10^{-1} à 10^{-8}), 0,2 mL est ensemencé puis étalé uniformément sur gélose Chapman au râteau stérile. Les boîtes sont incubées à 37 °C pendant 24 h avant dénombrement des colonies en surface. »

➤ Lecture :

On compte les colonies qui se sont formées en surface.

- Si le milieu reste rouge, les colonies sont mannitol-négatives (-) : elles ne fermentent pas le mannitol. Une légère alcalinisation du milieu se produit par l'utilisation des peptones dans leur métabolisme énergétique [10].

- Si le milieu vire au jaune, les colonies sont mannitol-positives (+) : elles fermentent le mannitol, provoquant une acidification du milieu lors de leur processus métabolique énergétique [26].

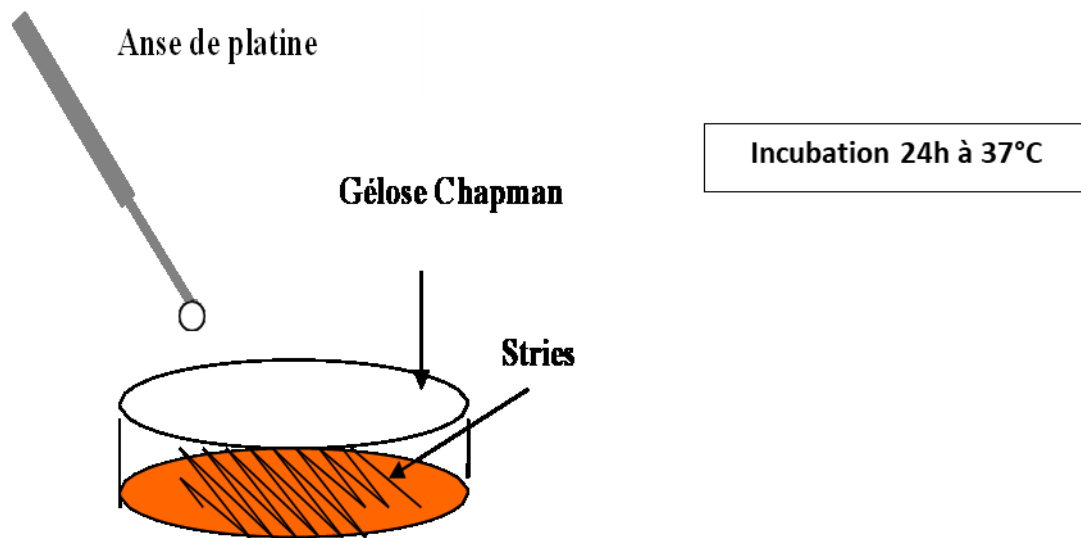


Figure 43: Recherche des Staphylocoques

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5.4.11.6. Recherche de *Salmonella* et *Shigella* :

Culture : Premier jour : Enrichissement primaire

L'enrichissement initial se fait dans le milieu SFB.

On Place 1ml de l'échantillon à analyser dans un tube contenant 10 ml du milieu SFB. Par la suite, le tube sera incubé à une température de 37°C pendant une durée de 24 heures[21].

Deuxième jour : enrichissement secondaire et ensemencement

Après l'incubation, le tube contenant le bouillon d'enrichissement primaire est soumis à l'étape suivante :

- On prélève 0,2 ml de ce bouillon, que l'on ensemence sur une gélose SS (*Salmonella-Shigella*), un milieu solide sélectif utilisé pour la culture des bactéries du genre *Salmonella* et *Shigella* [21].
- L'incubation s'effectue à 37 °C pendant 24 heures.

➤ **Lecture :**

Les colonies se présentent avec couleur rose ou rose à centre noir [25].

➤ **Identification :**

L'identification des salmonelles et Shigelles se fait par :

- Une inspection macroscopique
- Une inspection microscopique des colonies suspectes.
- Identification à l'aide d'une galerie biochimique. API 20^E

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

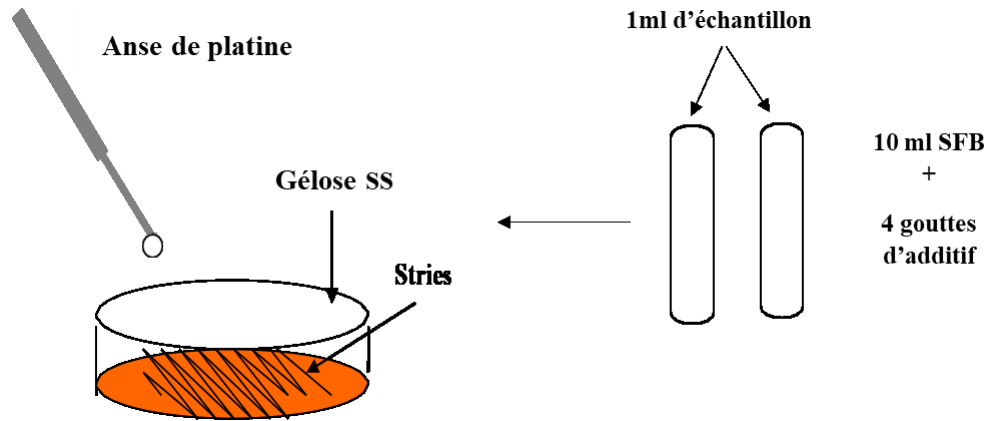


Figure 44. Recherche des Salmonelles et Shigellas

5.4.11.7. Recherche des Vibrions

Les *Vibrionaceae* manifestent comme des bacilles Gram négatifs (BGN), hautement mobiles, possédant l'oxydase, aéro-anaérobies facultatifs, fermentant le glucose sans produire de gaz ni d'H₂S.

Premier Jour : Enrichissement primaire

L'enrichissement initial se fait dans un milieu alcalin peptoné (EPA). Pour cela, on introduit 10ml de l'échantillon à analyser dans un flacon contenant 50 ml de ce milieu, puis on incube le tout à une température de $36\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant une durée de 24 heures.

Deuxième jour : Enrichissement secondaire et Isolement

Après incubation, le flacon contenant l'enrichissement primaire est soumis aux étapes suivantes :

- Ensemencement sur gélose TCBS, suivi d'une incubation à une température de $36\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 24 heures.

➤ Lecture :

Les vibrions apparaissent généralement sous forme de colonies lisses, transparentes et présentant des caractéristiques morphologiques typiques [21].

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

➤ Identification :

- Coloration de Gram : bacilles Gram négatif (-)
- Test de l'oxydase : positif (+)
- Identification par API 20 NE.

5.4.11.8. Recherche des Levures :

On fait la culture des levures sur le milieu Sabouraud, qui est un environnement traditionnel pour la culture.

- Nous Ensemençons 0,1 mL de chaque dilution décimale (de 10^{-1} à 10^{-8}) à la surface du milieu Sabouraud.
- Incuber les boîtes à 37 °C pendant 24 heures.

➤ Lecture :

- La lecture se fait après 24heures.
- Les colonies se présentent sous une forme bombée, crémeuse et de couleur blanche [25].

5.4.11.9. FTAM (flores aérobies mésophiles totale):

Elle englobe tous les germes pathogènes et non pathogènes capable de se multiplier en milieu aérobie [23].

Inoculer 0.2 ml des dilutions décimales (10^{-1} à 10^{-8}) sur la surface du milieu GN. Incuber à une température de 37°C pendant 24h.

➤ Lecture :

Les colonies apparues sont d'une couleur blanche et une forme lenticulaire. Le dénombrement de la flore totale, nous renseigne sur la charge microbienne du produit analysé [23].

Chapitre 5 : Matériels et méthodes

5.4.11.10. Recherche des Œufs d'helminthes :

5.4.11.10.1. Examen macroscopique :

Renseigne sur la consistance et la couleur de la boue ainsi que la présence d'éléments surajoutés qui peuvent être d'origine parasitaire.

5.4.11.10.2. Examen microscopique :

- Dans un verre à pied, on triture une noix de boue avec de l'eau physiologique à 0,9%.
- On rajoute progressivement l'eau physiologique à 0,9% afin d'obtenir une dilution optimum, ni trop forte, ni trop faible ;
- Par la suite on prend une lame porte objet sur laquelle on dépose deux gouttes de cette suspension, chacune à une extrémité ;
- On rajoute une goutte de Lugol double à 1% à l'une d'entre elles et on recouvre d'une lamelle.
- La lecture se fait en zigzag de droite à gauche ou de haut en bas à l'objectif X10 puis l'objectif X40.
- L'examen à l'eau physiologique permet de garder la mobilité des formes végétatives des protozoaires aidant ainsi au diagnostic différentiel entre les espèces d'amibes. Quant au Lugol, colore la chromatine des noyaux des kystes facilitant leur identification.
- Quel que soit le résultat de l'examen direct, on doit faire obligatoirement deux techniques de concentration dont le principe diffère.

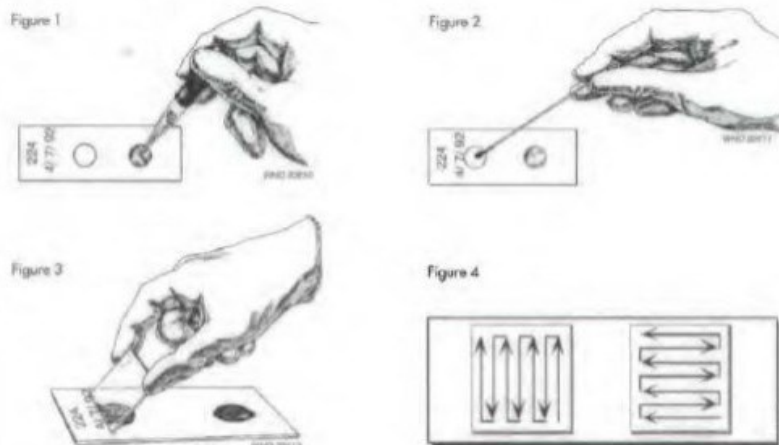


Figure 45.étapes d'examen parasitologies des boues

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

6. Résultats et Discussions

6.1. Introduction :

Ce chapitre expose les caractéristiques physico-chimiques, granulométriques et microbiologiques des boues issues de la station d'épuration de Baraki. Les données analysées permettront d'établir un profil détaillé des propriétés de ces boues.

6.2. Analyses physico-chimiques :

Les valeurs mesurées pour la boue de Baraki sont synthétisées dans le tableau 4.

Tableau 4. Les valeurs physico-chimiques de la boue déshydratée.

Paramètre	Unité	Valeur
Humidité	%	74.6
MS	%	26
MVS	%	45.5
PH	/	7.8
Conductivité	$\mu\text{S/cm}$	940
Dosage azote	%	3.5
Dosage phosphore	mg/L	1,04
Rapport C/N	%	15.71

6.3. Interprétation des résultats des analyses de la boue :

6.3.1. Humidité :

Un taux d'humidité élevé (74,6%) complique le stockage et le transport, tout en favorisant la prolifération microbienne [27]. Pour notre boue le taux d'humidité est fort et égale à **74.6%**.

6.3.2. Matières sèches (MS) (siccité) :

Ce paramètre détermine la masse réelle des boues et influence leur manutention :

- Boues liquides : siccité $\leq 10\%$
- Boues pâteuses : $10\% < \text{siccité} \leq 25\%$
- Boues solides : $25\% < \text{siccité} \leq 85\%$
- Boues sèches : siccité $> 85\%$

Notre analyse a révélé que la boue contient 26% de matière sèche, cela signifie que la boue est une **Boue solide** [18].

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

6.3.3. Matière volatile sèche (MVS) :

La mesure de MVS est utilisée pour déterminer la part de la matière organique présente dans les MS permettant d'estimer la stabilité des boues, c'est à dire leurs capacités à ne pas fermenter.

- Plus le taux de MVS est élevé plus les boues sont susceptibles de fermenter rapidement et donc de produire du **biogaz**.
- Notre analyse a révélé que la boue contient 45.5% de MVS, cela signifie que près de la moitié de la matière sèche est organique et potentiellement biodégradable, ce qui est un indicateur de la stabilité et de la valeur énergétique de la boue (notamment pour la méthanisation).
- Ce taux n'est ni très faible (ce qui indiquerait une boue très minérale ou stabilisée), ni très élevé (qui indiquerait une forte teneur en matière organique fraîche) [18].

6.3.4. Détermination du potentiel d'hydrogène (pH) :

La boue fraîche présente initialement une acidité qui évolue vers la basicité après stockage. Notre échantillon montre un pH quasi-neutre **7.8** [28], idéal pour un amendement agricole visant à corriger l'acidité des sols et optimiser l'absorption racinaire [6].

6.3.5. Conductivité électrique :

La valeur mesurée (940 $\mu\text{S}/\text{cm}$) indique une faible salinité selon Baize (2000). Cette caractéristique écarte tout risque d'augmentation de la pression osmotique du sol, rendant la boue compatible avec une valorisation agricole [6].

Tableau 5: Echelle de la salinité en fonction de la conductivité électrique

Classe	Désignation	Conductivité électrique (ms/cm)à25°C
0	Non salé	<2,5
1	Faiblement salé	2,5-5
2	Moyennement salé	5-10
3	Salé	10-15
4	Fortement salé	15-20
5	Très fortement salé	20-27,5
6	Excessivement salé	27,5-40
7	Hyper salé	>40

6.3.6. Dosage de l'azote (Méthode Kjeldahl) :

D'après les résultats obtenus, notre boue est riche en azote (**N= 3.5%**), donc ce taux élevé est due à la dégradation de la matière organique par la digestion aérobie/anaérobie au moment du traitement des boues. Par conséquent, cette boue qui contient une forte concentration en azote, peut être idéalement utilisée comme engrais dans l'épandage agricole, sous forme d'amendement fertilisant [28].

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

6.3.7. Rapport C/N :

Le rapport C/N (carbone/azote) est un indicateur clé du degré d'évolution et de la biodégradabilité de la matière organique dans les boues [29]. Ce rapport permet d'apprécier qualitativement la capacité de minéralisation de l'azote organique contenu dans la boue.

En appliquant la relation linéaire entre la quantité de matière organique et celle de carbone organique : $CO (\%) = 1,72 MO$

$$CO (\%) = 1.72 * 32\% = 55\%$$

Alors : Rapport C/N = 55/3,5

$$\text{Rapport C/N} = 15.71\%$$

D'après les résultats des analyses, la boue de la STEP renferme 55% de carbone organique et 3.5% d'azote (NTK) dans la matière sèche, ce qui donne un rapport C/N = 15.71%.

Le rapport carbone sur azote (C/N) est un indicateur qui permet de juger le degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement dans le sol [30] :

- Si $C/N < 15$: Production d'azote ; la vitesse de décomposition s'accroît et est à son maximum pour un rapport $C/N = 10$.
- $15 < C/N < 20$: Le besoin en azote est couvert, permettant une bonne décomposition de la matière carbonée.
- $C/N > 20$: Il n'y a pas assez d'azote pour permettre la décomposition du carbone. Une compétition s'établit entre l'absorption par les plantes et la réorganisation de la matière organique par les micro-organismes du sol. L'azote est alors prélevé dans les réserves du sol, la minéralisation est lente et ne restitue au sol qu'une faible quantité d'azote minéral [30].

Le rapport C/N de **15,71%** mesuré dans la boue indique un équilibre carbone-azote optimal pour une décomposition rapide [30]. Cette valeur, typique des amendements organiques bien stabilisés, garantit une libération efficace d'azote assimilable, sans risque majeur de pertes ou de

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

blocage. Pour un usage agronomique, cette boue constitue donc un fertilisant à action rapide, adapté aux cultures nécessitant un apport immédiat en N.

6.3.8. Dosage du phosphore :

Le phosphore, dont la plupart des sols sont mal pourvus, compte pour 0.1 à 0.4% de la matière sèche, un épandage des boues peut combler ce déficit puisqu'elles contiennent une teneur en cet élément [28].

Selon les résultats obtenus à partir de la courbe d'étalonnage (**courbe N° 1**), la concentration en phosphates dans l'échantillon de boue est d'environ **1,04 mg/L**. À première vue, et sous l'hypothèse que aucun contaminant indésirable n'est détecté, ces boues pourraient être considérées pour une utilisation en agriculture [29].

Ces trois derniers résultats montrent que les boues sont riches en nutriments : azote, phosphore et matière organique, qui constituent des ressources précieuses pour une future réutilisation. Toutefois, il est impératif de procéder à l'analyse et à la quantification des éléments problématiques, tels que les métaux lourds, avant toute réutilisation. **(La manipulation elle a été faite à l'ENSSMAL et les résultats sont obtenue à l'ENSSMAL aussi)**

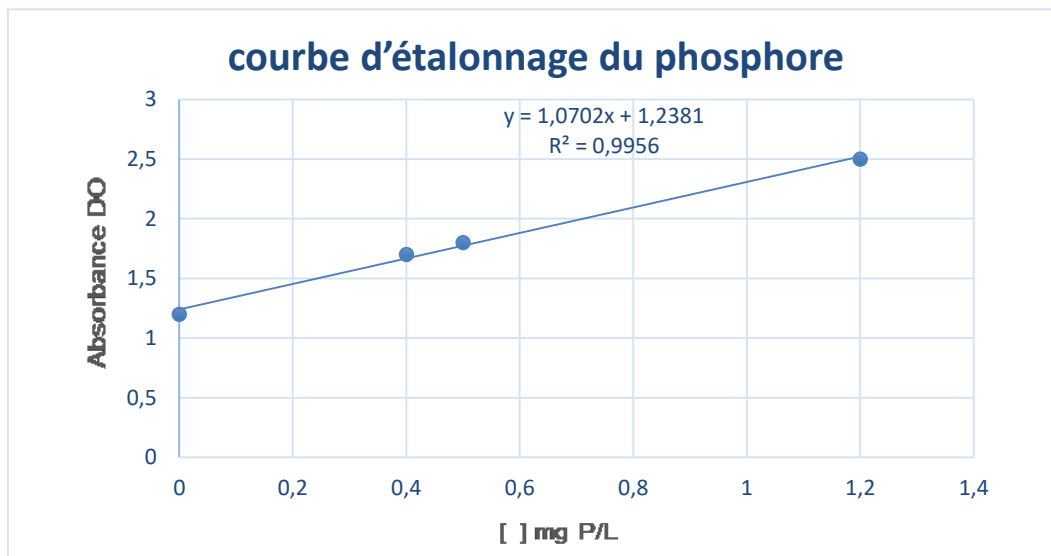


Figure 46. Courbe d'étalonnage du phosphore (ENSSMAL)

6.3.9. Teneur en Eléments Traces Métalliques :

Les éléments traces métalliques sont réputés pour leur toxicité sur la plupart des microorganismes telluriques. Leurs effets de dénaturation des protéines ou de destruction de l'intégrité de la membrane cellulaire affectent la croissance, la morphologie et le métabolisme de

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

ces microorganismes telluriques. De nombreuses études montrent que la biomasse bactérienne d'un sol a tendance à diminuer suite à une contamination par un métal.

Tableau 6 : Les Analyse des métaux lourds de la boue de la station de Baraki

Elément	Moyenne (mg/kg MS)	Valeurs limites Val. Agricole NA 17731 (mg/kg MS)	Valeurs limites admise dans les boues NFU44-095 (mg/kg MS)	Valeurs limites admises dans le compost NFU44-095 (mg/kg MS)
<i>Cd</i>	<4	40	10	3
<i>Co</i>	7,026			
<i>Cr</i>	83,9	1750	1000	120
<i>Cu</i>	117,77	1750	1000	300
<i>Fe</i>	18650,45			
<i>Mn</i>	164,47			
<i>Ni</i>	56,36	400	200	60
<i>Pb</i>	58,46	1200	800	180
<i>Zn</i>	458,33	4000	3000	600
<i>Hg</i>	6,3	25	10	2
<i>Cr+Cu+Ni+Zn</i>	716,36	4000	4000	

Les Analyse de la boue de la station de Baraki montre que les éléments traces métalliques (ETM) varient d'un métal à l'autre, leurs concentrations dépendent de l'origine des eaux usées entrant dans les stations d'épuration (STEP), ces ETM retrouvés dans les boues d'épuration, représentent un facteur limitant dans la réutilisation agricole [30].

La teneur en métaux lourds est un paramètre très important pour la valorisation des boues dans le domaine agricole. Les analyses réalisées dans le cadre de ce projet révèlent que la majorité des métaux lourds présents dans les boues déshydratées respectent les normes en vigueur (NA 17731 pour l'agriculture et NFU44-095 pour les boues et composts).

Les boues issues de la station de Baraki présentent des teneurs élevées en fer, bien que celui-ci soit classé parmi les oligoéléments. L'origine de cette augmentation reste indéterminée ; elle pourrait être attribuée au phénomène de concentration induit par l'oxydation de la matière organique [31].

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Les études menées dans le contexte de ce projet indiquent que la plupart des métaux lourds contenus dans les boues déshydratées sont conformes aux normes actuelles (NA 17731 pour l'agriculture et NFU44-095 pour les boues et composts). Plus précisément, les niveaux de cadmium (<4 mg/kg MS), chrome (83,9 mg/kg MS), cuivre (117,77 mg/kg MS) et plomb (58,46 mg/kg MS) sont largement en dessous des limites réglementaires, ce qui exclut toute menace notable liée à ces éléments.

Cependant, deux éléments nécessitent une attention particulière :

- **Le nickel (56,36 mg/kg MS) et le zinc (458,33 mg/kg MS)** affichent des concentrations qui s'approchent des seuils permis pour le compostage (respectivement 60 et 600 mg/kg MS), ce qui pourrait limiter cette option de recyclage sans une surveillance accrue.
- **Le niveau de mercure (6,3 mg/kg MS)** dépasse la limite autorisée pour le compostage (2 mg/kg MS), créant un obstacle technique significatif pour ce secteur. Il serait indispensable de mener une enquête sur la source de cette pollution et d'élaborer des traitements spécifiques (lavage, stabilisation) pour envisager une réutilisation sans risque.
- Enfin, la somme **Cr+Cu+Ni+Zn (716,36 mg/kg MS)** reste bien en dessous du seuil critique (4000 mg/kg MS), écartant tout risque d'effet cocktail.

Les résultats des éléments traces métalliques confirment que l'épandage agricole constitue la filière de valorisation la plus adaptée pour ces boues, sous réserve d'un suivi régulier des teneurs en nickel et zinc. En revanche, le compostage nécessiterait un prétraitement ciblé sur le mercure pour être viable. Cette étude met en lumière l'importance d'une caractérisation fine des boues afin d'optimiser leur gestion tout en garantissant la sécurité environnementale.

6.3.10. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique de la boue sert à déterminer la distribution des tailles des particules qui la composent, ce qui permet de mieux comprendre et contrôler ses propriétés physiques et son comportement lors des traitements ou des valorisations [32].

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Les résultats de l'analyse granulométrique de la boue sont représentés dans le graphique ci-dessous [22], et résumé dans le tableau 4 (annexe05). **(Manipulation a l'ENSSMAL résultats obtenue à l'ENSSMAL)**

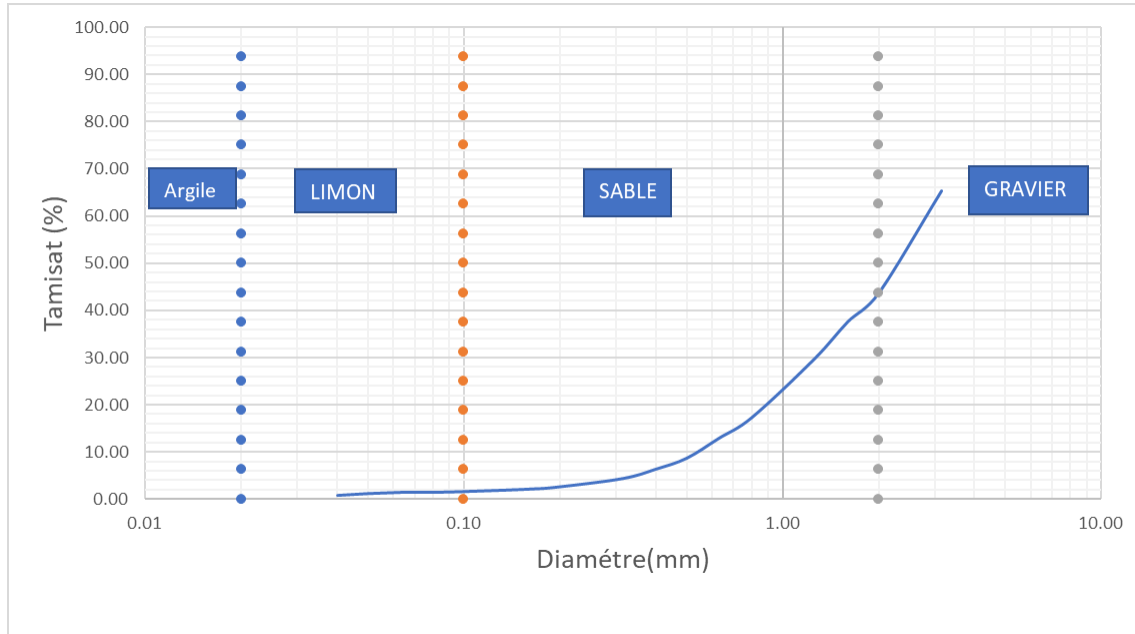


Figure 47. Courbe granulométrique de la boue. (ENSSMAL)

Ce graphique représente la courbe granulométrique de la boue, c'est-à-dire la répartition des différentes tailles de particules qui la composent. L'axe horizontal indique le diamètre des particules (en mm) sur une échelle logarithmique, tandis que l'axe vertical montre le pourcentage de tamisât, c'est-à-dire la proportion cumulée de particules passant à travers les tamis. La lecture de la courbe permet d'observer que la boue contient une faible proportion de particules fines (argile et limon), car la courbe monte lentement dans la zone des faibles diamètres. En revanche, elle s'élève rapidement à partir de 0,1 mm jusqu'à 10 mm, ce qui indique une dominance de particules plus grossières, principalement du sable et du gravier. Ainsi, cette boue est de nature grossière, avec une majorité de sableuse et graveleuse.

La composition granulométrique de la boue est représentée dans le graphique circulaire ci-dessous [22].

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

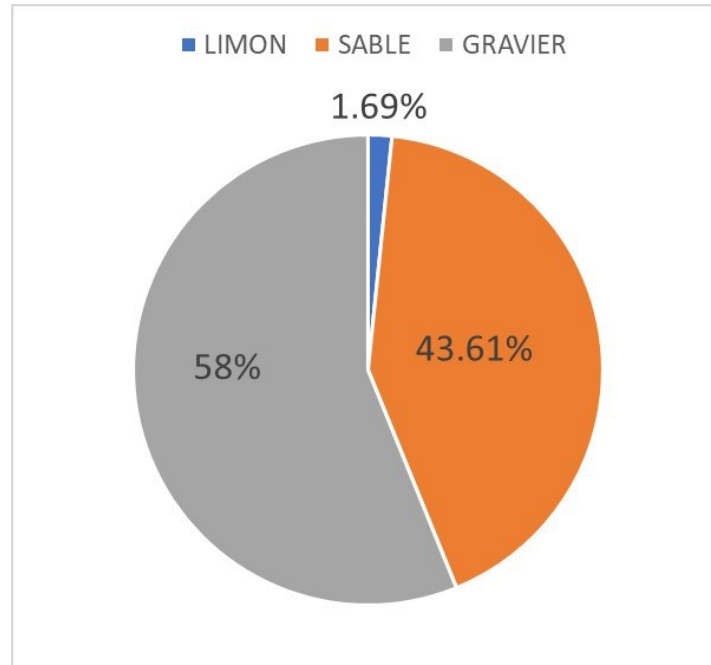


Figure 48. Composition granulométrique de la boue.

Ce graphique circulaire représente la composition granulométrique de la boue, répartie en trois fractions principales : limon, sable et gravier. Le gravier domine largement avec **58 %**, indiquant que la boue est majoritairement composée de particules grossières. Le sable, avec **43,61 %**, montre également une présence importante de particules de taille intermédiaire. En revanche, le limon n'est présent qu'à hauteur de **1,69 %**, ce qui témoigne d'une très faible proportion de particules fines. Ainsi, la composition globale confirme que cette boue est essentiellement de nature grossière.

La granulométrie suggère un matériau bien drainant, adapté à des usages où la stabilité et la perméabilité sont recherchées, comme dans la fabrication de béton et de bitume.

6.3.10.1. Calcul des indices granulométriques :

A) - Pour le béton :

- **Calcul du module de finesse :** Norme Européenne [EN 12620]

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

$$MF = 1 / 100 \sum (\text{Refus cumulés sur tamis normalisés})$$

$$M\% = 1 / 100 \sum (87.05 + 91.24 + 93.57 + 95.55 + 97.30 + 97.81 + 98.31) = 6.60$$

Selon la norme NF P 18-540 :

- $MF < 2,2$: Sable fin (risque de retrait)
- $2,2 \leq MF \leq 2,8$: Sable optimal pour béton
- $MF > 2,8$: Sable grossier (risque de ségrégation)

$MF = 6.60 > 2,8$ donc le sable est grossier et il **n'est pas optimal pour le béton.**

B)- Pour le mélange bitumineux : NF EN 13108

➤ Coefficient d'uniformité (Cu)

La Formule d'indice d'uniformité est exprimée par [33] :

$$Cu = D_{60} / D_{10}$$

D60 : diamètre pour lequel 60 % des grains sont plus fins

D10 : diamètre pour lequel 10 % des grains sont plus fins

Si le Cu est élevé (> 4) cela indique une granulométrie bien graduée, favorable pour la compacité et la stabilité du mélange **bitumineux** [34].

Dans notre étude, on a trouvé : **D60=3** et **D10=0.5**

Donc $Cu = 3 / 0.5 = 6$

Le Cu de la boue est élevé (> 4) donc la granulométrie est bien graduée et peut assurer une bonne durabilité et compacité du mélange bitumineux.

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

6.4. Analyses bactériologiques :

Ce travail implique, d'une part, une analyse quantitative qui inclut le dénombrement des micro-organismes et, d'autre part, une analyse qualitative qui vise à identifier tous les micro-organismes présents [25].



6.4.1. Les indicateurs de contamination fécale :

Il est essentiel de rechercher les coliformes, car une multitude d'entre eux se trouvent en grande quantité dans les excréments des animaux à sang chaud. Ils sont donc des indicateurs de première importance [35].

Les résultats que nous avons obtenus sont présentés dans les tableaux suivants et l'histogramme suivis d'une interprétation.

❖ Aspect des résultats :

6.4.1.1. Les coliformes totaux :


Test présomptif BCPL	POSITIF (trouble + production de gaz dans la cloche de durham)	
Test confirmatif BLBVB	POSITIF (un trouble + Production de gaz)	

6.4.1.2. Les coliformes fécaux :


Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Test présomptif BLBVB	POSITIF (trouble + Production de gaz dans la cloche de durham)	
Test de Mac Kenzi	Négatif (pas d'halo rouge, absence d'E.COLI)	

6.4.1.3. Les streptocoques fécaux :

Test présomptif ROTH	POSITIF (trouble microbien)	
----------------------	--------------------------------	---

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Test confirmatif Evalitsky	POSITIF (trouble + Une pastille violette au fond de tube)	
----------------------------	--	---

❖ Résultats de calcul du nombre des germes

Le calcul du nombre de germes a été effectué selon la formule suivante (voir le tableau de groupement des résultats en annexe) :

$$N (\text{germes /g}) = \text{NPP} * \text{Fd} / \text{Ve}$$

La valeur NPP est déterminée à l'aide de la table de Mac Grady (annexe N°04)

Tableau 7: Résultats des germes indicateurs de la contamination fécale

Types de germes	Les coliformes totaux	Les coliformes fécaux	Les streptocoques fécaux
Nombre de germes	9×10 ² UFT/g	90 UFT/g	9×10 ² UFT/g

Les résultats du dénombrement des indicateurs de contamination fécale sont présentés dans l'histogramme ci-dessous.

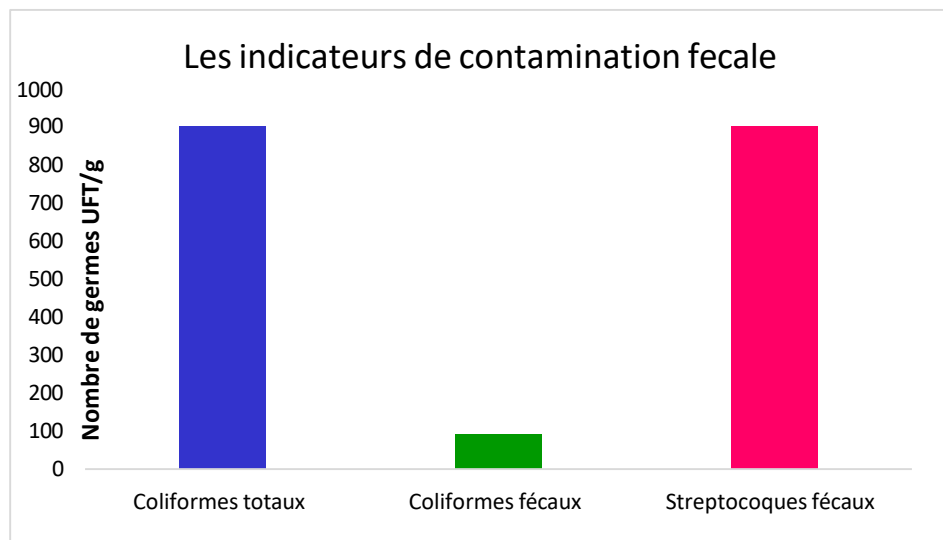


Figure 49. Représentation graphique des indicateurs de contamination fécale.

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Le graphique présente le nombre de germes indicateurs de contamination fécale, exprimés en UFT/g. On observe une charge très élevée en coliformes totaux et en streptocoques fécaux (environ 900 UFT/g chacun), tandis que la concentration en coliformes fécaux est nettement plus faible (environ 90 UFT/g). Cette distribution suggère une contamination fécale significative, probablement ancienne ou partiellement dégradée.

Cette répartition indique une contamination globale importante de l'échantillon principalement d'origine environnementale et fécale ancienne ou persistante, puisque les streptocoques fécaux survivent plus longtemps dans l'environnement. La faible quantité de coliformes fécaux, qui sont des indicateurs de contamination fécale récente, suggère que la pollution fécale n'est pas récente ou qu'elle provient de sources où ces germes ne survivent pas longtemps.

La présence élevée de coliformes totaux et streptocoque fécaux dans les boues séchées peut être attribuée à leur nutrition par les boues fraîches pendant le processus d'épuration, ainsi qu'à la teneur élevée de ces boues en substances organiques qui stimule la prolifération de ces germes [36].

6.4.2. Les spores anaérobies sulfitoréductrices :

❖ Aspect des résultats de la dilution 10^{-1} jusqu'à 10^{-8} :

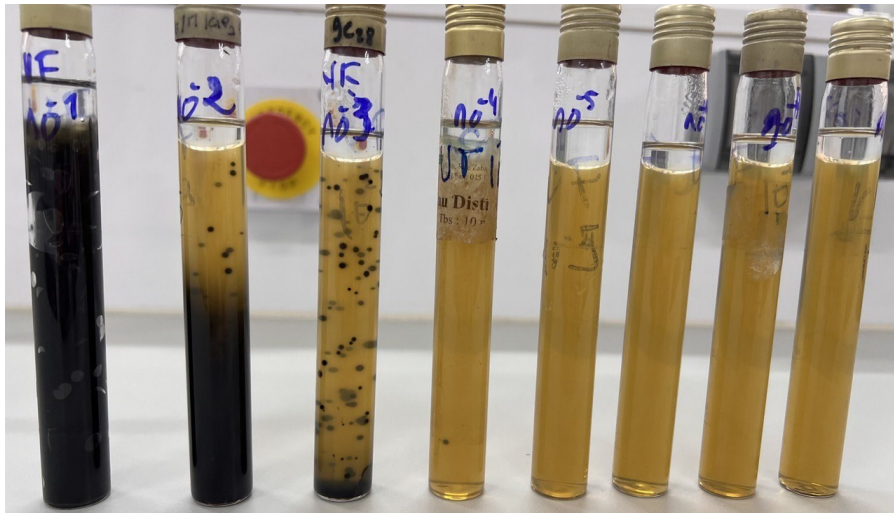


Figure 50.les spores anaérobies sulfitoréductrices

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Les résultats de dénombrements sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Pour calculer la concentration réelle de spores dans l'échantillon original, il faut multiplier le nombre de spores comptées par le facteur de dilution :

- Pour la dilution $10^{-3} = 93 \times 10^3$ spores/g
- Pour de la dilution $10^{-4} = 1 \times 10^4$ spores/g

Tableau 8: Résultats de dénombrement des spores anaérobies sulfitoréductrices

Dilutions	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}
Nombre de spores (spore /g)	Indénombrable	Indénombrable	$93 * 10^3$	$1 * 10^4$	0	0	0	0

La boue contient une concentration très élevée de spores, estimée entre $9,3 \times 10^7$ et 1×10^8 spores par gramme. Cette concentration importante suggère une activité microbienne significative dans l'échantillon. La présence de spores en si grand nombre pourrait indiquer des conditions favorables à la croissance de microorganismes sporulants (comme certaines bactéries du genre *Bacillus* ou *Clostridium*)

On considère généralement les anaérobies sulfito-réducteurs comme des indicateurs de contamination ancienne. Les spores, qui sont beaucoup plus résistantes que les formes de déceler une contamination fécale ancienne, bien que cela ne soit pas toujours garanti, car les clostridies sulfito-réductrices peuvent provenir du sol [25].

Une telle charge en spores, notamment de bactéries sporulées (ex : *Bacillus*, *Clostridium*), peut présenter un risque pour l'environnement et la santé humaine, surtout si la boue est utilisée en agriculture. Ces spores sont très résistantes aux traitements classiques [37].

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Tableau 9. Résultats des analyses bactériologique de la boue

Germes	10 ⁻¹		10 ⁻²		10 ⁻³		10 ⁻⁴		10 ⁻⁵		10 ⁻⁶		10 ⁻⁷		10 ⁻⁸	
FTAM	Ind	Ind	Ind	Ind	576	19	28	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Staphylocoque	Ind	Ind	Ind	Ind	21	10	5	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Pseudomonas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Levures	Ind	Ind	Ind	Ind	37	22	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0

À l'aide de la formule de calcul normalisée, nous avons calculé le nombre d'UFC :

$$N = \frac{\sum C}{V \times (n^1 + 0.1n^2)} \times \frac{1}{d}$$

Pour les :

- **FTAM (flore totale mésophile aérobie) :**

$$N = \frac{576+19+28+8}{0.1 \times (2+0.1 \times 2)} \times \frac{1}{10^{-3}} = 3 \times 10^6 \text{ UFC}$$

- **Staphylocoques :**

$$N = 2 \times 10^7 \text{ UFC}$$

- **Pseudomonas :**

Absence des colonies

- **Levures :**

$$N = 3 \times 10^7 \text{ UFC}$$

$\sum C$	Sont des colonies comptés sur les deux boîtes retenues
V	Volume de l'inoculum (0.1 ml dans la surface)
d	Dilution correspondante à la première boîte retenue, avec l'inoculum le moins dilué
n	Nombre de boîtes retenues

- **FTAM :**

Les boues de STEP de BARAKI sont également caractérisées par une forte charge microbienne FTAM > $\times 10^6$ UFC par gramme de boue, ce qui traduit un résultat insatisfaisant.

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Cela montre que la déshydratation, bien qu'elle réduise la teneur en eau, ne suffit pas à éliminer complètement la charge microbienne. Alors cette boue conserve une activité microbiologique importante, ce qui peut influencer sa stabilité, son odeur, et son potentiel de valorisation.

➤ **Staphylocoques :**

Le nombre élevé de staphylocoques (2×10^7 UFC) signale une contamination d'origine humaine ou animale, fréquente dans les boues urbaines. Ces bactéries peuvent être pathogènes, notamment *Staphylococcus aureus*, ce qui pose un risque sanitaire en cas de manipulation ou d'épandage agricole sans traitement complémentaire.

➤ **Levures :**

La concentration de (3×10^7 UFC) pour les levures indique une forte présence de micro-organismes fongiques. Les levures sont généralement moins préoccupantes que les bactéries pathogènes, mais leur abondance peut influencer la décomposition de la matière organique et leur présence peut favoriser la biodégradation lors de l'épandage, mais certaines espèces peuvent être pathogènes pour les plantes.

➤ **Pseudomonas :**

Aucune colonie de **Pseudomonas** n'a été détectée dans l'échantillon. C'est un résultat positif, car certaines espèces (ex : *Pseudomonas aeruginosa*) sont pathogènes opportunistes. Ceci diminue le danger de propagation de ces bactéries durant l'épandage.

Les résultats montrent que la boue déshydratée contient une charge microbienne élevée, notamment en FTAM, staphylocoques et levures, mais sans Pseudomonas détecté. Pour l'épandage agricole, il est essentiel d'intégrer ces données dans une gestion raisonnée, respectueuse de la réglementation et de la santé publique. Un suivi régulier et des traitements complémentaires peuvent améliorer la sécurité de cette pratique.

6.5. Les Œufs d'helminthes :

L'analyse de la présence ou absence des œufs d'helminthes a été réalisée sur la boue. Les résultats ont révélé une absence totale d'œufs d'helminthes, ce qui indique une bonne qualité sanitaire du produit sur ce critère et une faible probabilité de contamination parasitaire.

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

6.6. Voies de valorisation de la boue selon les résultats :

6.6.1. Valorisation agricole :

6.6.1.1. Compostage :

Selon la norme NFU 44 095, le nombre des germes doit respecter les normes suivantes pour pouvoir valoriser la boue comme compost :

- *Escherichia coli* 10^4 /g.
- *Clostridium perfringens* 10^3 /g M.B. 10^2 /g M.B (norme difficile à atteindre).
- Œufs d'Helminthes Absence dans 1g de M.B.
- Salmonelles Absence dans 1g de M.B.

➤ Le nombre de ces germes dans notre échantillon :

- Absence d'*Escherichia coli*.
- *Clostridium perfringens* $93 \cdot 10^3$ /g M.B. 10^2 /g M.B.
- Œufs d'Helminthes Absence dans 1g de M.B.
- Salmonelles : Absence dans 1g de M.B.

L'analyse biologique des boues a révélé des concentrations en pathogènes relativement proches des seuils établis par les normes de compostage, cette proximité des valeurs suggère un potentiel intéressant de valorisation des boues par compostage.

Le compostage est essentiellement un processus de stabilisation de la matière organique, suivi d'une valorisation organique qui produit un compost régulé par les mêmes normes que celles de l'épandage agricole.

6.6.1.2. Epandage :

L'Épandage des boues en agriculture est une pratique qui offre l'opportunité de recycler la matière organique nécessaire au sol. De plus les boues représentent un fertilisant qui permet à l'agriculteur de réduire ses charges en engrais fertilisants classiques.

Les Boues résiduelles urbaines doivent être gérées conformément à la Loi N°01-19 relative à la gestion, maîtrise et la valorisation des déchets, ainsi qu'aux décret exécutif N°06-104 du 28 février 2006 fixant les catégories de déchets dangereux.

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

Les prescriptions techniques spécifiques à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées sur les terrains agricoles doivent être détaillées dans un cadre opérationnel précis. Parallèlement, l'élaboration de normes algériennes pour le compostage de ces boues est nécessaire. Ces textes réglementaires imposent la réalisation d'une étude préalable à l'épandage – un plan d'épandage – ainsi qu'un suivi agronomique annuel.

6.6.1.3. L'utilisation des boues comme fertilisant :

Les boues peuvent servir d'engrais pour optimiser la qualité du sol et stimuler le développement des végétaux. Les boues renferment des nutriments comme l'azote, le phosphore, le potassium et d'autres composants indispensables pour la croissance des végétaux.

Toutefois, l'utilisation des boues en tant qu'engrais doit se faire de manière prudente et en suivant des normes de sécurité spécifiques. Les boues peuvent renfermer des polluants comme les métaux lourds et les substances chimiques, ainsi que des agents infectieux tels que des parasites, des virus et des bactéries. L'azote et le phosphore contenus dans les boues se présentent majoritairement sous forme organique, garantissant une libération progressive dans le sol et un apport nutritionnel durable aux cultures. Ces nutriments existent en une version organique et sont diffusés graduellement dans le sol, garantissant ainsi un apport nutritionnel prolongé pour les plantes. En outre, l'emploi des boues comme engrais peut rehausser la qualité du sol en boostant sa teneur en matières organiques, en bonifiant sa structure et en soutenant la capacité de rétention d'eau [29].

6.6.2. Valorisation énergétique :

6.6.2.1. La Co-incinération :

Les boues sont brûlées en combinaison avec les ordures ménagères, peu importe leur teneur en matière sèche. L'incinération produit des fumées qu'il faudra traiter, ainsi que des cendres qui doivent être valorisées ou évacuées vers des centres de stockage, et éventuellement y subir un traitement d'inertage.

Chapitre 6 : Résultats et Discussions

6.6.2.2. L'incinération spécifique

Dans les installations spécifiques utilisées principalement par les grandes collectivités, les boues sont préalablement déshydratées (à 30 % de siccité) pour faciliter leur auto-combustion. L'incinération spécifique entraîne une génération approximative de 330 kg de résidus par tonne de boue brûlée. Les dangers sanitaires liés à la combustion des boues semblent être minimes. Les émissions de dioxines et de furanes sont inférieures à celles produites par l'incinération des ordures ménagères. On trouve majoritairement des métaux lourds dans les résidus de combustion. Dans la phase gazeuse, seuls Hg, Cd et partiellement Zn et Pb sont présents. Toutefois, seul Hg peut être libéré dans l'atmosphère [29].

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Le but principal de notre recherche était de réaliser une caractérisation physico-chimique et microbiologique de la boue déshydratée provenant de la station d'épuration de Baraki. Ceci avait pour objectif de trouver une solution à la problématique liée à l'élimination de ces boues résiduelles dans les conditions les plus économiques tout en respectant les contraintes liées à la protection de l'environnement et la santé publique. Les résultats obtenus ont mis en lumière différents paramètres essentiels. Sur le plan physico-chimique, les boues sont riches en matière organique et en nutriments (azote, phosphore, potassium), ce qui offre des possibilités intéressantes pour leur valorisation agricole en tant qu'amendement organique, compost ou fertilisant à condition de respecter les limites réglementaires relatives aux métaux lourds et aux germes pathogènes.

Les études de granulométrie ont démontré une structure plutôt favorable au mélange bitumineux. Simultanément, l'analyse biologique a fourni une évaluation de la charge infectieuse des boues, un facteur important pour choisir les techniques de traitement avant leur valorisation. Les résultats soulignent le besoin d'un traitement supplémentaire (hygiénisation, compostage, séchage thermique...) pour minimiser la charge microbienne et garantir l'utilisation sécurisée des boues. En considérant ces facteurs, diverses options de valorisation sont possibles : l'exploitation agricole supervisée, la production de compost, ou encore la valorisation énergétique (incinération spécifique, co-incinération). En conclusion, la valorisation des boues de la STEP de Baraki représente une alternative prometteuse pour la gestion durable de ces résidus, à condition de mettre en œuvre des traitements adaptés et de respecter les exigences réglementaires. Une telle démarche s'inscrit pleinement dans une logique d'économie circulaire, en transformant un déchet en ressource utile pour l'environnement dans la filières agricole ou énergétique.

Références bibliographiques

Bibliographie

- [1] S, Bilal, H, Abdellah (2023). Étude et réalisation d'un distillateur solaire thésis. Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2023. [En ligne]. [Consulté le: 28 avril 2025] Disponible sur : [file:///C:/Users/hp/Downloads/Seddi%20Bilal,%20Haddadi%20Abdellah%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/Seddi%20Bilal,%20Haddadi%20Abdellah%20(1).pdf)
- [2] S. Nada, 2021 « Effet de la nature des rejets sur le fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées (STEP) de GUELMA », [En ligne]. [Consulté le: 28 juin 2025] Disponible sur : [file:///C:/Users/hp/Downloads/Seddi%20Bilal,%20Haddadi%20Abdellah%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/Seddi%20Bilal,%20Haddadi%20Abdellah%20(1).pdf)
- [3] « CONTRIBUTION A L'ETUDE DU ROLE DE LA VEGETATION DANS L'EPURATION DES EAUX USEES DANS LES REGIONS ARIDES ». Consulté le: 28 avril 2025. [En ligne]. Disponible sur: http://thesis.univ-biskra.dz/891/3/Chap%201_LES%20EAUX%20USEES_.pdf
- [4] Rédaction (A.M), 2021 « Informations utiles : Comprendre les eaux usées », *energymagazinedz*. [En ligne]. Consulté le: 3 mai 2025. Disponible sur: <https://www.energymagazinedz.com/2021/11/13/informations-utiles-comprendre-les-eaux-usees/>
- [5] A. MANI ,FERRAG Abderrezak, 2019 « Etude de traitement des eaux usées et valorisation des boues par compostage ; cas STEP Hadjout. » [En ligne] Consulté le: 28 avril 2025. Disponible sur: https://docs.google.com/document/d/1sb_oNobcnjgO27HrowGGEVsvdFTQBAn7BLMcGICKA1o/edit?usp=drive_web&ouid=103474443811948162137&usp=embed_facebook
- [6] BOUKEBECHÉ Nessrine, 2016 « CaractÉrisations des boues de la station d'épuration de Baraki », Ecole Nationale Polytechnique-Alger.
- [7] Mr BEKKI Abd elmadjid et Mr KORICHI Maamar, 2019 « CaractÉrisation et valorisation de la boue de la station d'épuration de Sidi Ali lebhharBEJAIA », bejaia,
- [8] M. Bali, 2024 « Traitement des eaux usées », Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux, Université de Gabès, Institut Supérieur des Sciences et Techniques des Eaux, Université de Gabès, Tunisia, décembre. Consulté le: 3 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-04838747>
- [9] Y. REBBOUH, « Valorisation et élimination des boues del la station d'épuration de BARAKI W. d'ALGER », BLIDA 1 SAAD DAHLAB .
- [10] SAHRI Nada et BOUKHAROUBA N/EL Houda, « Effet de la nature des rejets sur le fonctionnement de la station d'épuration des eaux usées (STEP) deGUELMA».
- [11] Gouffi Samia et Dali Wissem-Samia, « Les boues d'épuration : Caractéristiques, traitement, gestion et valorisation », Université A. MIRA , BEJAIA, 2019.
- [12] « Traitement et valorisation des boues de station d'épuration d'Oued D'Hous.la ville de Bouira. »
- [13] « 📖 Thèses-Algérie: Doctorat, Magister, Master... » . [En ligne]. Consulté le: 25 mai 2025. Disponible sur: <https://www.theses-algerie.com>
- [14] C. V. Andreoli, M. Von Sperling, et F. Fernandes, *Sludge treatment and disposal*. in Biological wastewater treatment series, no. volume 6. London: IWA publ, 2007.
- [15] M. H. Imane, « Gestion des boues des stations d'épuration au Maroc : Quantification, caractérisation et options de traitement et de valorisation ».
- [16] MAZOUNI Abdelkrim & RAMDANI Amar, 2017 « Traitement et valorisation des boues de station d'épuration d'Oued D'Hous.la ville de Bouira. », UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA, bouira, .
- [17] A. Manel, « Caractérisation des boues de la STEP de Réghaia ».
- [18] M. AMOUCHE, « Caractérisation des boues de la STEP de Réghaia ».
- [19] AKPO Y 1*, SAWADOGOG.J 2 et , DEGNON R.G 3, « Évaluation de la contamination parasitologique des eaux usées domestiques collectées et traitées à la station d'épuration de Cambérène (Dakar) », Université de Parakou, Faculté d'Agronomie, Département de Production et Santé Animales, BP 123 Parakou, Bénin. 2 Ecole Inter-états des Sciences et Médecine Vétérinaires,

Références bibliographiques

- BP 5077, Dakar-Fann, Sénégal. 3 Université d'Abomey-Calavi, Département de Génie de Technologie Alimentaire, 01 BP 2009 Cotonou, Bénin, p. 7.
- [20] « Fiche methode phosphates.pdf ». [En ligne]. ». Consulté le: 10 juin 2025 Disponible sur: <https://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/littoral/investigationlittorale/Fiche%20methode%20phosphates.pdf>
- [21] BOUAZIZ Thanina et DJERRAI Nouredine, « Etude des caractéristiques physicochimiques et bactériologiques des eaux de mer et des sédiments dans le port de plaisance de « Sidi Fredj », en vue d'une immersion. », memoire d'ingeniorat, ENSSMAL (Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral).
- [22] Jérôme Fournier, Chantal Bonnot-Courtois, Raphael Paris, Monique Le Vot, 2012. «Analyses granulométriques. Principes et méthodes »,
- [23] Ben Ayed L.*1 et , Hassen A.*, Jedidi N.*, Saidi N.*, Bouzaiane O.*, Murano F.*, 2005 «Caractérisation des paramètres physico-chimiques et microbiologiques au cours d'un cycle de compostage d'ordures ménagères », (Tunisie),
- [24]B. Attrassi, L. Mrabet, A. Douira, K. Ounine & N. El Haloui, 6 Mai 2005 « etude de la valorisation agronomique des composts des Etude de la valorisation agronomique des composts des déchets ménagers »,
- [25] Fartas Kaltoum et Laouissi Hana, 2014 « Etude Microbiologique Des Boues Des Eaux Usées De La Ville De Guelma »,
- [26] Dahel Zanat, 2009 « Analyse de la qualité bactériologique des eaux du littoral Nord-Est algérien à travers un bioindicateur la moule Perna perna. » ANNABA, BADJI-MOKHTAR,
- [27] CHERGUI Fadoua Nihad, « Caractérisation et valorisation des boues de la station d'épuration de la ville de Boussaâda. », Biskra– Université Mohamed khider.
- [28] RAMDANI NADIA, « Contribution à l'étude des boues urbaines de la station d'épuration des eaux usées résiduelles. Effet sur la fertilité d'un sol sableux », Université d'Oran.
- [29] ROUIBAH NIHAD, « LA VALORISATION BIOLOGIQUE DES BOUES (la zone industrielle BELLARA) », Constantine 1 Université des Frères Mentouri
- [30] AIT AMIRI Yacine, 2012 « ETUDE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE DE LA STATION D'EPURATION DE BARAKI », Ecole Nationale Polytechnique-Alger, .
- [31] OUALI KHALED, 2015 « Teneurs en Éléments Traces Métalliques des sols agricoles de la Wilaya de Tizi Ouzou », Tizi Ouzou Université Mouloud Mammeri,
- [32]M. Masson , L. Richard A. Gruat, 2021 « Recommandations techniques pour la mesure de la distribution granulométrique des sédiments et matières en suspension de cours d'eau »,.
- [33] Dr GOUBA Bernard, « Traçage de la courbe granulométrique et la détermination des coefficients de Hazen par la méthode analytique ».
- [34] Dr. GADOURI. H, « Polycopié de cours : Master 2-Géotechnique Routière ».
- [35] benyahia rim, « analyse bibliographique des boues resedulaires de la step de baraki »,BLIDA universite blida1.
- [36] CE'LINE PUJOL, EMMANUEL EUGE'NE, LUC DE SAINT MARTIN, et XAVIER NASSIF, « Interaction of Neisseria meningitidis with a Polarized Monolayer of Epithelial Cells ».
- [37] Emily Viau et Jordan Peccia, « Survey of Wastewater Indicators and Human Pathogen Genomes in Biosolids Produced by Class A and Class B Stabilization Treatments ».

Les Annexes

Annexe 01 :

Tableau 1 : Résultats des coliformes fécaux.

Dilution	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8
Résultats	+ + -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
Groupement des résultats	2	0	0	0	0	0	0	0
Norme correspondant				200				

Annexe 02:

Tableau 2 : Résultats des coliformes totaux.

Dilution	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8
Résultats	+ + +	+ + +	+ + -	- - -	- - -	- - -	- - -	- - -
Groupement Des résultats	3	3	2	0	0	0	0	0
Nombre correspondant				320				

Annexe 03 :

Tableau 3: Résultats des streptocoques fécaux.

Dilution	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8
Résultats	+++	+++	++-	----	----	----	----	----
Groupement Des résultats	3	3	2	0	0	0	0	0
Nombre correspondant				320				

Annexe 04 :

Table de Mac Grady :

Nombre de tubes positifs au niveau des 3 taux de dilution retenus	NPP	Nombre de tubes positifs au niveau des 3 taux de dilution retenus	NPP
000	< 0,3		
001	0,3	230	2,9
010	0,3	300	2,3
020	0,6	301	4
100	0,4	302	6
101	0,7	310	4
110	0,7	311	7
111	1,1	322	12
120	1,1	320	9
121	1,5	321	15
200	0,9	322	21
201	1,4	323	29
210	1,5	330	20
211	2,0	331	50
220	2,1	332	110
221	2,8	333	>110

Annexe 05 :

Tableau 4 : résultats des analyses granulométriques.

Diamètre (mm)	Refus (g)	Refus cumulé(g)	Refus cumulé(%)	Tamisé Cumulé (%)
3.15	121.69	121.69	34.77	65.23
2	75.66	197.35	56.39	43.61
1.6	21.05	218.4	62.40	37.60
1.25	28.1	246.5	70.43	29.57
0.8	42.76	289.26	82.65	17.35
0.63	15.43	304.69	87.05	12.95
0.5	14.65	319.34	91.24	8.76
0.4	8.16	327.5	93.57	6.43
0.315	6.91	334.41	95.55	4.45
0.2	6.13	340.54	97.30	2.70
0.16	1.78	342.32	97.81	2.19
0.1	1.77	344.09	98.31	1.69
0.08	0.52	344.61	98.46	1.54
0.063	0.11	344.72	98.49	1.51
0.05	0.85	345.57	98.73	1.27
0.04	1.38	346.95	99.13	0.87

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل
École Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement
du Littoral

DEPARTEMENT DE RESSOURCES VIVANT



Projet de fin d'études En vue de l'obtention du diplôme de :

**Startup de l'arrêté ministériel n° 1275 Diplôme – Startup
Spécialité : Biotechnologie Marine**

Thème :



**Production un biocharbon enrichi en
bactéries résistantes aux métaux lourds, à
partir des boues des STEP pour un
système de filtration bioactif.**

Equipe de Projet

ZERRAD Souad

MERABET Nahida

CHERIEF Fatma

Equipe d'encadrement

Mme ALOUACHE Souhila

Mme Ghezali Katia

Années universitaires : 2024-2025

Contents

I.	Introduction Générale	4
II.	Chapitre préliminaire : Présentation de l'idée et des promoteurs	5
1)	Origine de l'idée	5
	Pourquoi ce choix ?	5
2)	Les valeurs suggérées	6
3)	Equipe Projet	6
4)	Les Objectifs du projet	7
5)	Le planning de réalisation du projet	8
6)	Business Model Canvas	9
III.	Aspects innovants	9
1.	La nature des innovations	9
2.	Les domaines d'innovation	9
IV.	Chapitre : Etude marketing et Commercial	12
1.	Présentation de la concurrence (Benchmark – en Algérie)	12
2.	Gamme des produits offerts par les concurrents	12
3.	Les valeurs proposées de BioGreenChar :	13
4	.Analyse stratégique du marché	14
	A. Le segment du marché	14
1)	Mesure de l'intensité de la concurrence (axée sur les produits similaires à BioGreen)	15
2)	Analyse SWOT :	16
V.	Stratégie Marketing	17
1.	Présentation de la charte de l'entreprise BioGreenChar	17
2.	Le produit et ses Caractéristiques	19
a.	Nom du produit :	19
b.	Stratégie de tarification (prix) en Dinar Algérien - DZD	20
3.	Stratégie de communication (Promotion) :	21
4.	Stratégie de placement (Distribution) :	22
VI.	Chapitre : Processus de fabrication et prototypage:	23
1.	Prototypage primaire	23
2.	Le processus de production du biochar	24
	Section 3 : Moyens nécessaires au démarrage de l'activité et estimation financière	26
	Estimation financière :	28
1.	Estimation économique pour la réalisation du projet	28
2.	Estimation économiques des couts fixes et variables :	29
3.	Équipement de bureau et laboratoire	30

5. Ressources financières	31
Première année :	32
Deuxième année :	32

I. Introduction Générale

Face à la pression croissante de la pollution industrielle et urbaine, l'Algérie est confrontée à deux défis environnementaux majeurs :

- La contamination des milieux aquatiques par des eaux usées notamment polluées par les métaux lourds toxiques, dans les zones côtières, agricoles et industrielles.
- La gestion non valorisée des boues issues des stations d'épuration (STEP),

Dans ce contexte, notre projet propose une solution innovante, durable et circulaire : valoriser les boues de STEP pour produire un biocharbon actif seul ou enrichi par des bactéries marines résistantes aux métaux lourds, dans le but de créer un système de filtration bioactif capable d'éliminer efficacement les polluants présents dans l'eau.

Ce projet allie biotechnologie, gestion des déchets et protection de l'environnement, tout en répondant aux enjeux de durabilité et de souveraineté technologique en Algérie.

- **Bio Green** : Entreprise de traitement de l'eau basée sur l'utilisation de biochar seul ou combiné à des bactéries résistantes aux métaux lourds

II. Chapitre préliminaire : Présentation de l'idée et des promoteurs

1) Origine de l'idée

L'idée du projet est née à partir de notre constat de terrain au cours de nos études et stages dans le domaine de l'environnement marin, du traitement des eaux, et de biotechnologie.

Nous avons observé que :

- Les boues d'épuration, bien qu'abondantes, sont souvent considérées comme des déchets sans valeur, alors qu'elles sont riches en matière organique et minérale.
- Parallèlement, nos recherches ont permis d'isoler des bactéries marines capables de résister aux métaux lourds, ce qui ouvre la voie à leur utilisation dans des bio-procédés de dépollution.

En croisant ces deux problématiques, nous avons vu l'opportunité de transformer un déchet localement disponible en une ressource à haute valeur ajoutée : un biocharbon bioactif performant dans la filtration des eaux polluées et comme support pour les bactéries résistantes aux métaux lourds dans un procédé biologique de traitement des effluents chargés en métaux lourds.

Pourquoi ce choix ?

Nous avons choisi cette approche pour plusieurs raisons stratégiques et environnementales :

- **Environnementale** : répondre à la problématique urgente de la pollution métallique dans les rejets industriels et urbains.
- **Circulaire** : mettre en œuvre un modèle d'économie circulaire en valorisant les déchets issus des STEP.
- **Scientifique** : exploiter les capacités naturelles des bactéries résistantes pour créer une filtration bioactive synergique.
- **DZLocale et nationale** : proposer une solution adaptée au contexte algérien, avec des matières premières disponibles sur place et une technologie accessible.
- **Économique** : offrir aux structures (STEP, industries, collectivités) une alternative moins coûteuse et plus durable que les systèmes importés ou chimiques.

Ce choix est donc à la fois **écologique, logique et innovant**, aligné avec les objectifs de développement durable (ODD), et porteur d'un **fort potentiel d'impact** sur le territoire national.

2) Les valeurs suggérées

Notre procédé de traitement repose sur l'utilisation de biocharbon actif enrichi en bactéries marines résistantes aux métaux lourds, produit à partir de boues de STEP valorisées localement. Ce système de filtration bioactive constitue une solution écologique, innovante et économiquement viable, unique sur le marché algérien.

Conçu pour offrir une efficacité de décontamination optimale, ce système permet de réduire significativement les niveaux de polluants métalliques (comme le plomb, le zinc ou le cadmium) dans les eaux usées, tout en respectant les normes environnementales en vigueur.

Grâce à sa structure modulaire et flexible, notre technologie peut être facilement adaptée aux besoins spécifiques de chaque client et intégrée aux installations existantes, qu'il s'agisse d'industries, de petites stations d'épuration ou d'unités agricoles ou aquacoles.

En combinant les propriétés d'adsorption du biocharbon avec les capacités biodégradantes des bactéries résistantes, notre solution assure une filtration à double action : physique et biologique. Elle offre ainsi une valeur ajoutée environnementale sans compromettre la simplicité d'utilisation ou la durabilité du système.

Par ailleurs, notre engagement pour une production responsable se traduit par l'emploi de matériaux recyclables et réutilisables, limitant l'impact écologique et réduisant les coûts globaux. Cela nous permet de proposer des prix compétitifs, tout en garantissant un accompagnement technique personnalisé et un suivi post-installation efficace.

Notre ambition est de rendre le traitement des effluents pollués plus accessible, plus local, et plus durable, en apportant une réponse concrète aux défis environnementaux que connaît aujourd'hui l'Algérie.

3) Equipe Projet

L'équipe de travail de **BioGreenChar** est actuellement constituée de **Zerrad Souad**, ainsi que de **Chérief Fatma** et **Merabet Nahida**, toutes trois étudiantes en 5e année en biotechnologie marine à l'École Supérieure des Sciences de la Mer (Alger).

Au cours de notre cursus, nous avons acquis des compétences approfondies dans les méthodes biotechnologiques appliquées à l'environnement, notamment dans le traitement biologique des polluants, la microbiologie, et la valorisation des déchets. Nos différentes expériences en laboratoire, renforcées par des stages pratiques, nous ont permis de maîtriser les outils et techniques nécessaires au développement de systèmes de filtration bioactifs à base de biocharbon.

Nos projets de fin d'études ont renforcé notre expertise dans le domaine de la résistance bactérienne aux métaux lourds ainsi que sur les boues activées et leur valorisation, des enjeux cruciaux dans la dépollution des milieux aquatiques industriels. Nous avons su combiner nos connaissances pour proposer une solution novatrice, écologique et accessible, à travers le projet **BioGreenChar**.

En parallèle, nous avons suivi des formations en entrepreneuriat, innovation verte et gestion de projet, ce qui nous a permis de développer une vision claire et structurée pour lancer une solution biotechnologique durable et adaptée aux besoins environnementaux de l'Algérie.

4) Les Objectifs du projet

Le projet BioGreenChar vise à développer une solution innovante et durable de traitement des eaux polluées par les métaux lourds, à travers la valorisation des boues de STEP et l'exploitation des bactéries marines résistantes, dans un contexte algérien marqué par une forte pression environnementale et un manque de solutions locales adaptées.

Nous cherchons à réduire les coûts de traitement pour les utilisateurs, tout en garantissant une efficacité élevée dans la décontamination des effluents. Notre système de filtration bioactif permet non seulement de respecter les normes environnementales nationales et internationales, mais aussi de contribuer à la réduction de l'empreinte écologique des industries.

Nous visons à convaincre les acteurs algériens – STEP, usines, collectivités – de la pertinence, de la fiabilité et de l'impact positif de notre technologie de biofiltration enrichie en bactéries résistantes. À travers BioGreenChar, nous aspirons à bâtir une référence nationale dans le traitement durable des eaux polluées, fondée sur des performances prouvées et une approche scientifique rigoureuse.

En développant des partenariats avec les centres de recherche, les institutions publiques et les entreprises privées, nous souhaitons également promouvoir l'innovation locale, renforcer la filière de la dépollution et accélérer l'adoption de solutions algériennes face aux défis environnementaux.

Enfin, notre ambition est d'étendre progressivement notre gamme de produits et services à d'autres formes de pollution (pharmaceutiques...) et d'explorer des opportunités d'exportation à l'international, en plaçant la biotechnologie environnementale algérienne sur la carte des solutions vertes mondiales.

5) Le planning de réalisation du projet

Le projet BioGreen se déroulera en plusieurs phases progressives, réparties sur une durée estimée de 12 à 18 mois, en tenant compte du contexte algérien (partenariats, validations, tests, etc.).

Phases	Taches	Durée (Mois)
Phase 1 : Étude préparatoire et mise en place	<ul style="list-style-type: none"> Analyse technique, économique et environnementale du projet. Signature de conventions avec les STEP, laboratoires et partenaires industriels. Isolement et culture des bactéries marines résistantes aux métaux lourds. Réacteur de pyrolyse, équipements de laboratoire, contenants de filtration. 	1 à 3 Mois
Phase 2 : Phase de développement	<ul style="list-style-type: none"> Immobilisation des souches sur le biocharbon (création du filtre bioactif). Pyrolyse des boues de STEP et optimisation des paramètres de production. Validation de l'efficacité du produit sur des effluents synthétiques et réels. Fabrication des premiers filtres modulaires (granulés, cartouches...). 	4 à 8
Phase 3 : pilote et validation	<ul style="list-style-type: none"> Mise en place d'un système de test dans une STEP ou une industrie partenaire. Mesure de l'efficacité du filtre, durée de vie, régénération, conformité Amélioration du produit selon les retours de terrain. 	9 à 12
Phase 4 : Lancement commercial	<ul style="list-style-type: none"> Dépôt de la solution auprès des autorités environnementales algériennes. Campagne de sensibilisation auprès des clients cibles (industries, communes...). 	13 à 18

	<ul style="list-style-type: none"> • Fixation des prix, stratégie de distribution, plan de vente. • Livraison des premiers filtres à des partenaires clients. 	
--	---	--

6) Business Model Canvas

III. Aspects innovants

1. La nature des innovations

Le projet **BioGreen** repose sur une double innovation à la fois **technologique** et **environnementale**, qui répond à un besoin réel en Algérie en matière de traitement des effluents industriels et de valorisation des déchets.

➤ **Innovation technologique :**

- **Utilisation de bactéries marines multirésistantes aux métaux lourds**, isolées localement, capables de dégrader ou d'absorber efficacement certains polluants métalliques toxiques (chrome, plomb, cadmium...).
- **Production de biocharbon actif à partir des boues de STEP**, un déchet généralement non valorisé, transformé en un matériau filtrant hautement performant.
- **Intégration des bactéries dans une matrice bioactive (biofiltre)**, pour créer un système de **filtration combinée** (adsorption + bioremédiation), unique sur le marché local.

➤ **Innovation environnementale :**

- Valorisation de déchets locaux (boues de STEP) dans une logique d'**économie circulaire**.
- Réduction de l'impact environnemental des traitements traditionnels (moins de boues toxiques secondaires, pas de réactifs chimiques).
- Contribution à la dépollution de l'eau et à la protection des écosystèmes aquatiques en Algérie.

2. Les domaines d'innovation

Le projet BioGreen s'inscrit dans plusieurs domaines d'innovation interconnectés :

1. Biotechnologie environnementale
 - ▶ Utilisation de micro-organismes naturels pour le traitement des polluants métalliques.
2. Valorisation des déchets et économie circulaire
 - ▶ Transformation des boues de STEP en biocharbon réutilisable.
3. Traitement des eaux industrielles et usées
 - ▶ Développement d'un système de filtration biologique, local, modulaire et efficace.
4. DZ Innovation sociale et territoriale
 - ▶ Offre adaptée au contexte algérien : faible coût, autonomie, accessibilité aux petites structures et aux communes.
5. Développement durable
 - ▶ Réduction de la pollution, réutilisation des ressources, conformité aux normes environnementales.

3. Parties prenantes

Le succès du projet **BioGreenChar** repose sur une collaboration étroite avec différents acteurs clés, à la fois institutionnels, scientifiques, industriels et sociaux. Chacun joue un rôle stratégique dans le développement, la validation, l'implémentation et la diffusion de notre technologie de filtration bioactive.

a) Institutions publiques et réglementaires

- **Ministère de l'Environnement et des Énergies Renouvelables, Ministère de l'industrie**
Pour l'agrément environnemental, le suivi réglementaire et le soutien politique à la valorisation des déchets.
- **Agence Nationale des Déchets (AND), Office national d'assainissement (ONA) , SEAAL et ANVREDET**
Partenaires potentiels pour l'appui technique, l'innovation verte, et l'intégration dans des programmes nationaux de dépollution.
- **Collectivités locales (wilayas, APC)**
Acteurs clés pour la mise en œuvre du projet au niveau territorial et l'intégration dans les infrastructures publiques existantes.

b) Secteur industriel

b-1 les fournisseurs

- **Stations d'épuration des eaux usées (STEP)**
Principaux fournisseurs de matière première (boues) et Bénéficiaires indirectes de l'utilisation du système **BioGreenChar**. par le traitement en amont des eaux usées industrielles.

- **Equipements d'installations** : fournisseurs d'équipements de traitement des eaux (colonnes, pompes...etc)

b-2 les clients

- **Industries polluantes (métallurgiques, chimiques, textiles, électroménager.... etc.)**
Cibles commerciales directes intéressées par des solutions locales et moins coûteuses pour le traitement de leurs effluents métalliques.
- **Les fermes aquacoles** : clients potentiels
- **Les hotels** : clients potentiels

c) Secteur scientifique et académique

- **Écoles et universités et centre de recherche (ex : École Supérieure des Sciences de la Mer, USTHB, ENP, CDER...)**
Partenaires pour la recherche, les analyses de performance, et le développement de procédés de bioactivation.

d) Autres acteurs de l'environnement

- **Laboratoires spécialisés en microbiologie et traitement des eaux**
Appui pour la manipulation des bactéries résistantes aux métaux lourds.
- Les bureaux d'études spécialisés dans la gestion de l'eau et des déchets,
- Des ONG environnementales,
- Et des projets publics/privés cherchant à investir dans des solutions innovantes de dépollution.

e) Incubateurs, structures d'accompagnement et financement

- **Incubateurs et structures de soutien (Algeria Venture, ANPT, PNSR, ...etc.)**
Accompagnement dans le développement du modèle économique, la structuration de l'entreprise et l'accès aux financements.
- **Organismes de financement et investisseurs à impact (ASF, NESDA, Banques...)**
Acteurs intéressés par les projets à fort potentiel environnemental et économique (fonds verts, startups environnementales, etc.).

IV. Chapitre : Etude marketing et Commercial

1. Présentation de la concurrence (Benchmark – en Algérie)

En Algérie, le domaine du traitement des eaux polluées, notamment celles contaminées par les métaux lourds, est encore en développement. Le marché est principalement dominé par des solutions importées ou des technologies classiques à base de traitements chimiques. Peu d'acteurs locaux proposent des alternatives écologiques et biologiques comme celle que développe **BioGreenChar**..

Nos principaux concurrents sont :

- Les entreprises spécialisées dans le traitement des eaux usées, qui utilisent principalement des techniques traditionnelles (décantation, coagulation, chloration) sans réelle efficacité sur les métaux lourds.
- Les importateurs de solutions techniques étrangères (stations compactes, membranes, systèmes physico-chimiques), souvent coûteuses, non modulables, et peu accessibles aux petites et moyennes structures.
- Certains projets universitaires ou initiatives pilotes en biotechnologie environnementale, qui restent encore au stade expérimental et ne sont pas industrialisés ni commercialisés à grande échelle.

✚ **BioGreenChar**.se distingue par son approche circulaire et innovante, fondée sur :

- la valorisation locale des boues de STEP,
- l'utilisation de bactéries marines algériennes résistantes,
- et un système de biofiltration accessible, durable et personnalisable.

2. Gamme des produits offerts par les concurrents

Les produits généralement proposés par nos concurrents se répartissent en plusieurs catégories :

a. **Filtres classiques à base de charbon actif**

- Utilisés pour l'adsorption de matières organiques et certains polluants, mais inefficaces contre les métaux lourds spécifiques.

- b. **Systemes chimiques de traitement** (précipitation, coagulation, neutralisation)
 - ▶ Utiles mais nécessitent des produits chimiques coûteux, génèrent des boues résiduelles toxiques, et ont un fort impact environnemental.
- c. **Unités de traitement par membranes (osmose inverse, nanofiltration)**
 - ▶ Très performantes mais très onéreuses à l'achat et à l'entretien, peu adaptées aux petites stations locales ou aux communes rurales.
- d. **Bioréacteurs ou solutions biologiques importées**
 - ▶ En cours de développement dans certaines régions, mais souvent génériques avec un potentiel de traitement différent des bactéries utilisées, et d'autres types de charbon.
- e. **Filtres conventionnels à sable ou à charbon actif importé**
 - ▶ Efficaces contre certaines matières organiques, mais peu performants sur les métaux lourds.
- f. **Solutions biologiques en phase pilote (universités, laboratoires)**
 - ▶ Recherches prometteuses, mais pas encore commercialisées ni valorisées sur le terrain.

✚ **BioGreenChar** vient combler un vide stratégique en proposant :

- Une solution **écologique et économique**,
- Fondée sur des **ressources locales (boues + Bactéries marines algériennes)**,
- Avec un impact réel sur la **réduction des métaux lourds dans les effluents**,
- Et une **intégration facile** dans les infrastructures existantes (STEP, industries, zones rurales).

3. Les valeurs proposées de BioGreenChar :

- Produire un biocharbon actif à partir des boues de STEP, selon un protocole adapté au contexte local.

- Évaluer l'efficacité du biocharbon seul, puis enrichi en bactéries résistantes aux métaux, sur l'adsorption et la bioremédiation de métaux lourds tels que le chrome, le plomb et le cadmium.
- Proposer une alternative durable et économique aux procédés classiques de traitement des effluents industriels en Algérie.

4 .Analyse stratégique du marché

La problématique de la pollution des eaux par les métaux lourds en Algérie est en nette croissance, en raison du développement industriel, du vieillissement des infrastructures et du manque de systèmes de traitement adaptés. Cela crée un marché en forte demande pour des solutions de traitement efficaces, locales et durables.

A. Le segment du marché

La problématique de la pollution des eaux par les métaux lourds en Algérie est en nette croissance, en raison du développement industriel, du vieillissement des infrastructures et du manque de systèmes de traitement adaptés. Cela crée un marché en forte demande pour des solutions de traitement efficaces, locales et durables.

1. Stations d'épuration (STEP)

L'Algérie compte plus de 200 stations d'épuration réparties sur le territoire national. Une grande partie d'entre elles génère annuellement des quantités importantes de boues (jusqu'à 50 000 tonnes/an au total), très peu valorisées à ce jour. Ces boues représentent une ressource gratuite et disponible pour la production de biocharbon dans notre projet.

- Ce seul segment représente un marché d'approvisionnement local stratégique pour BioGreenChar..

2. Industries polluantes

Le pays abrite des **centaines d'unités industrielles** actives dans des secteurs fortement générateurs de pollution métallique :

- Métallurgie et transformation du fer
- Tanneries, textiles et peinture

- Chimie, pharmacie et pétrochimie
- Agroalimentaire avec rejets contaminés

Ces industries doivent traiter leurs effluents pour se conformer à la réglementation environnementale, sous peine de sanctions. Cependant, les solutions actuelles (importées ou chimiques) sont souvent inaccessibles pour les PME.

Ces industries constituent un marché potentiel prioritaire pour la solution BioGreenChar., à la fois moins coûteuse, écologique et adaptée aux normes.

3. Collectivités locales et zones rurales

Plus de 40 % des communes algériennes n'ont pas d'accès à un traitement moderne des eaux usées ou n'ont pas de STEP fonctionnelle. Cela ouvre la voie à des solutions mobiles, modulables et autonomes, comme celle proposée par BioGreenChar., basée sur un filtre bioactif localement produit.

- Ce segment offre une opportunité de déploiement territorial progressif, à travers les APC, les wilayas, ou via des projets publics/privés de développement durable.

Estimation globale du marché cible :

Même à une échelle pilote, le marché potentiel se chiffre en :

- Milliers de tonnes de boues valorisables,
- Centaines d'industries clientes potentielles,
- et milliers de m³ d'eaux à traiter par jour.

La demande pour des solutions de filtration innovantes, accessibles et respectueuses de l'environnement est réelle et en croissance, notamment avec les nouvelles politiques nationales sur la valorisation des déchets, la gestion de l'eau et la transition verte.

1) Mesure de l'intensité de la concurrence (axée sur les produits similaires à BioGreen)

Entreprise	Description	Forces	Faiblesses

BioGreen (<i>notre projet</i>)	Production de biocharbon actif à partir de boues de STEP, enrichi en bactéries marines résistantes pour la biofiltration des métaux lourds.	<ul style="list-style-type: none"> • Solution écologique 100 % locale • Faible coût • Double action (adsorption + bioremédiation) • Valorisation des déchets STEP 	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelle sur le marché • Besoin de démonstration sur site • Nécessite sensibilisation des clients industriels
GreenTech Algérie	Fournisseur de filtres écologiques pour l'eau, avec approche environnementale, souvent importés ou hybrides.	Bonne réputation dans le secteur de l'environnement Solutions globales adaptées aux collectivités	Produits souvent importés et non spécifiquement conçus pour les métaux lourds Prix élevés
BioEpur Algérie (<i>hypothétique</i>)	Startup proposant des filtres à base de charbon actif enrichi en micro-organismes, en partenariat avec un centre de recherche.	Approche bioinspirée Collaboration universitaire Expérience pilote dans 1 ou 2 zones industrielles	Manque d'industrialisation Coût élevé lié aux biotechnologies Faible autonomie de production
HydroClean DZ	Propose des systèmes de traitement des effluents industriels incluant le charbon actif, parfois couplés à des UV ou ozonation.	Systèmes modulables, adaptés aux industries Bon réseau commercial dans l'Est algérien	Systèmes importés, souvent onéreux Ne traite pas spécifiquement les métaux lourds biologiquement Pas de valorisation locale
CleanWat DZ Solutions	Entreprise spécialisée dans la purification industrielle avec des solutions chimiques et physiques.	Expérience dans l'industrie lourde Conformité aux normes internationales	Aucun composant biologique Aucun engagement sur la valorisation des déchets Non alignée avec la transition écologique en Algérie

2) Analyse SWOT :

Opportunités (Opportunities)	Faiblesses (Weaknesses)	Forces (Strengths)	Menaces (Threats)
-------------------------------------	--------------------------------	---------------------------	--------------------------

Marché en croissance en Algérie pour les solutions de traitement durable des eaux.	Technologie encore jeune nécessitant une phase de sensibilisation du marché.	Solution écologique et innovante, basée sur des ressources locales (boues + bactéries marines algériennes).	Concurrence future possible de grandes entreprises internationales ou de solutions chimiques.
Soutien possible des pouvoirs publics pour les projets environnementaux et circulaires.	Besoin initial d'investissement pour les équipements de pyrolyse et les unités de culture bactérienne.	Faible coût de production grâce à la valorisation de déchets disponibles gratuitement (boues de STEP).	Fluctuation des politiques environnementales ou retard dans leur application.
Accès potentiel à des financements (NESDA PME innovantes, programmes environnementaux).	Dépendance à des partenaires institutionnels pour les autorisations et l'accès aux STEP.	Positionnement unique en Algérie : aucun concurrent direct offrant une solution bioactive combinée.	Difficulté à convaincre les industriels habitués aux solutions classiques.
Possibilité de partenariats avec des universités, communes et STEP pour essais ou co-développement.	Manque de notoriété de la marque BioGreenChar à ses débuts.	Adaptabilité aux différents clients : industries, communes, STEP, ONG.	Risque de ralentissement administratif pour les autorisations ou les appels d'offres publics.
Intérêt croissant pour les solutions biologiques et la valorisation des déchets dans la recherche et l'industrie.	Complexité logistique possible si les sites sont éloignés (collecte de boues, livraison de filtres).	Respect des normes environnementales et appui aux politiques de transition verte.	Manque de main d'œuvre spécialisée dans les biotechnologies environnementales.

V. Stratégie Marketing

1. Présentation de la charte de l'entreprise BioGreenChar.

La charte de **BioGreenChar** constitue le socle des valeurs, des principes éthiques et de la vision stratégique que notre équipe souhaite défendre à travers son projet. Elle guide nos actions, nos choix et nos engagements envers nos partenaires, nos clients et l'environnement.

Vision

Offrir une solution innovante, durable et locale pour le traitement des eaux polluées et la valorisation des déchets, afin de contribuer activement à la transition écologique en Algérie.

Mission

Valoriser les boues issues des stations d'épuration algériennes en produisant un biocharbon performant.

Utiliser des bactéries marines résistantes aux métaux lourds pour améliorer la qualité des eaux traitées.

Proposer une solution de biofiltration accessible, écologique et adaptée au contexte algérien.

Sensibiliser les acteurs industriels, publics et territoriaux à l'importance des technologies vertes et de l'économie circulaire.

Nos valeurs :

Durabilité : Nous concevons des produits qui respectent l'environnement et réduisent l'empreinte écologique.

Ancrage local : Nos solutions sont développées à partir de ressources et de compétences algériennes.

Innovation : Nous intégrons la biotechnologie et l'écoconception au cœur de notre démarche.

Responsabilité : Nous œuvrons dans le respect des normes environnementales et sociales, avec transparence.

Éthique : Nous promouvons une activité responsable, équitable et respectueuse de l'humain et de la nature.

Engagements de BioGreenChar.

Offrir une alternative verte, locale et efficace aux traitements industriels polluants.

Collaborer avec les collectivités, les STEP, les chercheurs et les industriels dans une logique de co-développement.

Respecter les normes de qualité, de sécurité et de protection de l'environnement en vigueur.

Favoriser l'éducation environnementale et la sensibilisation des jeunes, des citoyens et des décideurs.

2. Le produit et ses Caractéristiques

a. Nom du produit :

- **BioGreenChar** : biocharbon conçue à partir des boues
- **BioGreenFilter** : procédé à Filtre bioactif à base de seul
- **BioGreenFilter** : procédé à Filtre bioactif à base de biocharbon enrichi en bactéries marines résistantes aux métaux lourds.

➤ Description générale :

Le produit **BioGreenChar** est un système de filtration bioactif conçu pour le traitement des eaux contaminées notamment par les métaux lourds. Il est constitué d'un biocharbon produit à partir des boues de STEP algériennes, enrichi ou non par des souches bactériennes marines à potentiel de bioremédiation.



Caractéristique	Détail
Support filtrant	Biocharbon microporeux obtenu par pyrolyse contrôlée des boues de STEP.

Agent biologique	Bactéries marines résistantes aux métaux lourds (ex. : <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> spp.).
Fonction double	- Adsorption des métaux lourds par le biochar - Traitement par bactéries fixées sur le biochar : Lit bactérien.
Durabilité	Matériau réutilisable après régénération simple (séchage ou activation thermique).
Format	Cartouches filtrantes modulables, avec ou sans bactéries.
Température de fonctionnement	15–45 °C
Débit optimal	Adaptable selon les volumes à traiter et dimensionnement du biofiltre : de 10 à 1 000 L/h.
Conditionnement du biochar	Sacs de 5, 10 ou 25 kg, ou unités prêtes à poser.

Nous proposons le **BioGreen Filter** sous trois formats adaptés à différents usages et besoins :

Formule	Description	Utilisation ciblée
Standard (BGF-S)	Biochar purifié et enrichi en bactéries, granulométrie moyenne.	Filtres d'eau domestiques, aquaculture
Pro (BGF-P)	Haute densité bactérienne, granulométrie fine pour meilleure rétention.	STEP, stations industrielles
Agro (BGF-A)	Mélange biochar-bactéries adapté à l'agriculture (rétention + amélioration sol)	Agriculture durable et sols pollués

b. Stratégie de tarification (prix) en Dinar Algérien - DZD

Formule	Conditionnement	Prix estimatif
BGF-S	Sachet de 1 kg	~800 DZD

Formule	Conditionnement	Prix estimatif
BGF-P	Sac de 5 kg	~3 800 DZD
BGF-A	Sac de 10 kg	~6 500 DZD

Ces prix sont **indicatifs** et pourront être ajustés selon les coûts de production et les volumes commandés.

Des **réductions** sont envisagées pour les **commandes en gros** (coopératives, agriculteurs, collectivités).

3. Stratégie de communication (Promotion) :

La stratégie de communication du **BioGreen Filter** repose sur la **sensibilisation écologique**, l'**innovation technologique** et la **valorisation locale**. Elle vise à convaincre à la fois les acteurs institutionnels, les agriculteurs, les industriels et le grand public.

Objectifs de communication :

Informar sur les **propriétés innovantes** du produit (filtration bioactive, bactéries résistantes, valorisation des déchets).

Mettre en avant son **impact environnemental positif**.

Créer une **image de marque verte, locale et engagée**.

Développer une **communauté d'utilisateurs éco-responsables**.

Moyens de promotion :

Canal	Moyens utilisés	Objectif visé
Réseaux sociaux	Campagnes Facebook, Instagram, LinkedIn, TikTok	Sensibiliser, toucher un public large et jeune
Supports imprimés	Flyers, affiches, brochures dans les événements et lieux publics	Informar localement et visuellement

Canal	Moyens utilisés	Objectif visé
Événements écologiques	Participation à des salons, foires, conférences environnementales	Valoriser l'innovation, attirer des partenaires
Écoles & universités	Présentations dans les écoles d'ingénieurs, instituts agronomiques, STEP	Informers les futurs acteurs du secteur
Emailing / Newsletters	Envois ciblés à des acteurs de l'environnement, STEP, ONG, industriels	Créer un lien direct avec les clients potentiels
Partenariats locaux	Collaboration avec les agriculteurs, mairies, coopératives, associations	Encourager la diffusion locale et l'essai terrain
Médias locaux	Reportages à la radio, à la télévision régionale, articles de presse spécialisée	Améliorer la notoriété et légitimer le produit auprès du public

Slogan proposé :

BioGreen Filter – Filtrer naturellement, dépolluer durablement.

4. Stratégie de placement (Distribution) :

La stratégie de placement du **BioGreen Filter** repose sur une **distribution multi-canal**, afin de rendre le produit accessible aux différents types de clients : institutions, industriels, agriculteurs et particuliers.

Canaux de distribution prévus :

Canal	Détail	Objectif
Vente directe	Vente depuis notre unité de production ou point de vente partenaire	Réduire les coûts, créer un lien direct avec le client
Distributeurs spécialisés	Magasins de produits agricoles, ou point de vente d'un sous-traitant	Atteindre des utilisateurs techniques et professionnels

Canal	Détail	Objectif
E-commerce	Création d'un site web officiel et vente sur des plateformes comme Jumia, Ouedkniss, etc.	Cibler les jeunes, faciliter les commandes à distance
Vente en gros (B2B)	Fourniture à grande échelle pour les coopératives, entreprises, collectivités locales	Cibler les gros acheteurs pour maximiser l'impact
Marchés agricoles	Présence dans les foires agricoles, marchés écologiques et salons régionaux	Sensibiliser les agriculteurs et vendre en direct
Partenariats institutionnels	Collaboration avec les municipalités, ministères, STEP, ONG environnementales	Intégrer le produit dans des projets de dépollution

Méthodes de conditionnement BioGreenchar :

Sacs de 1 kg, 5 kg et 10 kg.

Étiquetage clair avec logo, fiche d'utilisation et précautions.

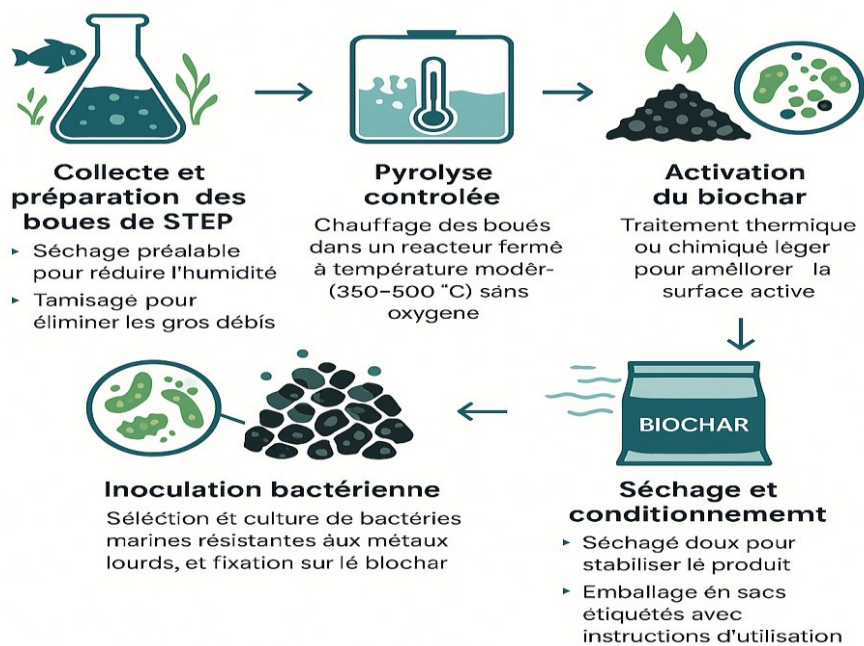
Code QR pour accéder à des vidéos explicatives.

VI. Chapitre : Processus de fabrication et prototypage:

1. Prototypage primaire

Pour une station destinée aux petites et moyennes entreprises de capacité entre 21-1000EH (équivalent habitant).

Garantie : 10 ans



2. Le processus de production du biochar

Il suit plusieurs étapes clés :

Collecte et préparation des boues de STEP

- ▶ Séchage préalable pour réduire l'humidité.
- ▶ Tamisage pour éliminer les gros débris.

Pyrolyse contrôlée

- ▶ Chauffage des boues dans un réacteur fermé à température modérée (350–500°C) sans oxygène.
- ▶ Production de biochar à haute porosité.

Activation du biochar

- ▶ Traitement thermique ou chimique léger pour améliorer la surface active.

Inoculation bactérienne

- ▶ Sélection et culture de bactéries marines résistantes aux métaux lourds.
- ▶ Fixation des bactéries sur le biochar (immobilisation par trempage ou pulvérisation).

Séchage et conditionnement

- ▶ Séchage doux pour stabiliser le produit.
- ▶ Emballage en sacs étiquetés avec instructions d'utilisation.

2.1 Conditionnement :

Le conditionnement du BioGreen Filter est conçu pour :

Préserver la qualité et l'activité biologique du produit,

Faciliter le transport, le stockage et l'utilisation,

Répondre aux besoins variés des utilisateurs (particuliers, agriculteurs, STEP, industriels...).

2.1.1 Le conditionnement primaire :

Le conditionnement primaire désigne le premier emballage en contact direct avec le produit.

Il est essentiel pour préserver la qualité du BioGreen Filter, notamment la viabilité des bactéries et la stabilité physico-chimique du biochar.

Choix du conditionnement primaire :

Matériau utilisé	Justification
Sachet plastique épais PE recyclable (ou biosourcé)	Imperméable à l'humidité et à l'air, protège la charge bactérienne
Sachet aluminisé multicouche (option haut de gamme)	Barrière renforcée contre l'oxygène et les UV pour une conservation longue
Sachet kraft doublé avec film intérieur PE	Solution écologique, esthétique et résistante pour la gamme « verte »

2.1.2 Conditionnement secondaire :

Le conditionnement secondaire regroupe plusieurs unités de conditionnement primaire afin de faciliter le stockage, la distribution et la présentation commerciale du produit. Il joue également un rôle de protection supplémentaire lors du transport.

Types utilisés :

- ✓ **Cartons recyclables** : contenant 5 à 10 sachets de 1 kg ou 2 à 3 sacs de 5 kg.
- ✓ **Boîtes à rabats renforcées** : pour une meilleure protection contre l'humidité et les chocs.
- ✓ **Présentoirs en carton rigide** : utilisés dans les points de vente pour faciliter l'exposition du produit.

2.1.3 Conditionnement tertiaire :

Le conditionnement tertiaire est destiné à la logistique de masse : il assure la sécurité du transport, la manutention et le stockage à grande échelle.

Types utilisés :

Palettes bois (type Europe – 120 x 80 cm) : pour regrouper les cartons ou sacs.

Film plastique rétractable ou étirable : pour stabiliser et protéger les unités pendant le transport.

Casiers ou caisses en bois (optionnel) : pour les expéditions longues distances ou à l'international.

Section 3 : Moyens nécessaires au démarrage de l'activité et estimation financière

Le lancement de l'activité nécessite la mobilisation de moyens humains, matériels, techniques et financiers. Ces moyens sont répartis en 4 catégories principales.

- **Moyens humains :**

Poste	Rôle
2 Ingénieur en biotechnologie/ Génie des Procédés	Supervision du processus de fabrication, inoculation bactérienne
Technicien de laboratoire	Préparation des cultures bactériennes, contrôle qualité
Opérateur technique	Collecte des boues, conduite de la pyrolyse et du conditionnement
Responsable logistique	Gestion du stockage, distribution et commandes
Responsable marketing	Communication, promotion et relations clients
Administrateur / Comptable	Gestion des finances, des achats et des ventes

Moyens matériels Unité de production, Laboratoire et projet :

Équipement	Utilisation
Réacteur de pyrolyse	Transformation des boues en biochar
Incubateurs et autoclave	Culture et stérilisation des bactéries
Cuves de fermentation	Multiplication des souches bactériennes
Système de séchage	Séchage du biochar avant et après inoculation
Matériel de conditionnement	Sacs, sachets, étiqueteuses, scelleuses
Véhicule utilitaire léger	Transport des matières premières et livraison du produit
Colonnes, pompes	Réalisation du système de filtration

○ Moyens Infrastructures :

Infrastructure de stockage : local ventilé, à l'abri de l'humidité (Unité de production de biochar+dépôt+ Laboratoire de manipulation).

Poste de travail bureautique : gestion des commandes, communication, marketing. (bureau)

Connexion internet fiable pour vente en ligne et visibilité digitale.

Moyens financiers (investissement initial estimé) :

Dépense principale	Montant estimatif (en DZD)
Achat du réacteur de pyrolyse	1 500 000 – 2 000 000 DZD
Équipements de laboratoire	800 000 – 1 200 000 DZD
Conditionnement & stockage	300 000 DZD
Communication & marketing initial	200 000 DZD
Frais administratifs (création, locaux...)	150 000 DZD

Estimation financière :

1. Estimation économique pour la réalisation du projet

A. Équipements pour la production de biocharbon

Désignation	Quantité	Prix unitaire estimé (DA)	Total (DA)
1. Réacteur de pyrolyse artisanal (baril modifié ou mini-four)	1	50 000	50 000
2. Broyeur manuel ou petit broyeur électrique	1	25 000	25 000
3. Tamis (acier inox ou plastique, plusieurs mailles)	1 lot	10 000	10 000

4. Balance de précision	1	12 000	12 000
5. Séchoir solaire ou boîte de séchage	1	10 000	10 000

Total B = 107 000 DA

B. Équipements de la station de biofiltration (utilisation)

Désignation	Quantité	Prix unitaire estimé (DA)	Total (DA)	Remarques
1. Colonnes de filtration en plexiglas/PVC (H 70 cm, D 10–15 cm)	2	60 000	120 000	Transparentes ou PVC opaque, selon budget
2. Pompe péristaltique / pompe de circulation	1	45 000	45 000	Pour circulation continue
3. Cuve d'entrée (stockage eau brute, ~50 L)	1	12 000	12 000	PEHD ou plastique alimentaire
4. Cuve de sortie (eau filtrée)	1	12 000	12 000	Idem
5. Tubes, raccords, vannes, fixations	1 lot	25 000	25 000	Connectique complète
6. Système de contrôle du débit (débitmètre ou vanne)	1	10 000	10 000	Pour ajuster le flux
7. Thermomètre ou capteurs (optionnels)	1	6 000	6 000	Température, éventuellement pH

Total A = 230 000 DA

Total global équipement installation (a + b) = 230 000 DA + 107 000 DA = 337 000 DA

2. Estimation économiques des couts fixes et variables :

Poste de dépense	Estimation (DA)	Justification
Énergie (pompe, chauffage, séchage, etc.)	300 000	Électricité pour pompes, séchage biochar, ventilation, 25 000 DA/mois env.

Consommables de labo	250 000	Gants, réactifs, milieux de culture, désinfectants, verrerie jetable
Eau de lavage, eau technique	60 000	Pour rinçage, nettoyage, simulation de pollution (env. 5 000 DA/mois)
Entretien & remplacement petit matériel	150 000	Raccords, tubes, joints, robinets à remplacer régulièrement
Transport et logistique	200 000	Livraison de matières premières, déplacement personnel, carburant
Maintenance du réacteur à biochar	150 000	Nettoyage, changement de couvercles, fuites, huile, graissage
Location ou charges locales (eau/élec part)	150 000	Si l'installation est dans un local partagé ou semi-industriel
Fournitures générales (papier, encre, etc.)	60 000	Impression, fournitures de bureau, petit matériel administratif
Autres frais imprévus / sécurité / petits outils	90 000	Extincteurs, petit outillage, masques, câbles, outils de maintenance

Total fonctionnement estimé : 1 310 000 + 400 000 = 1 710 000 DA

3. Équipement de bureau et laboratoire

Désignation	Nombre	Prix unitaire (DA)
Micro-ordinateur	1	70 000
Imprimante	1	20 000
Bureau	1	20 000
Chaises	2	15 000
Armoire de bureau	1	4 000
Équipement de laboratoire	1	300 000
Total		4290 DA

4. Les ressources humaines

Nous avons besoin de :

- 2 ingénieurs en biotechnologie / génie des procédés, avec un salaire de 90 000 DA/mois → $2 \times 1\,080\,000 = 2\,160\,000$ DA/an
- 1 technicien de laboratoire avec un salaire de 50 000 DA/mois → 600 000 DA/an
- 1 opérateur technique avec un salaire de 45 000 DA/mois → 540 000 DA/an
- 1 responsable logistique avec un salaire de 60 000 DA/mois → 720 000 DA/an
- 1 responsable marketing avec un salaire de 60 000 DA/mois → 720 000 DA/an

➤ 1 administrateur / comptable avec un salaire de 55 000 DA/mois → 660 000 DA/an

Poste	Salaire mensuel	Salaire annuel
2 Ingénieur en biotechnologie/ Génie des Procédés	90 000 DA	2 160 000 DA
Technicien de laboratoire	50 000 DA	600 000 DA
Opérateur technique	45 000 DA	540 000 DA
Responsable logistique	60 000 DA	720 000 DA
Responsable marketing	60 000 DA	720 000 DA
Administrateur / Comptable	55 000	660 000

Total salaires : 460 000 DA / mois soit 5 400 000 DA / an

5. Ressources financières

La réalisation du système de biofiltration repose sur l'acquisition d'équipements techniques, la production interne de biocharbon, des charges de fonctionnement, ainsi que la mobilisation de ressources humaines qualifiées.

La structure financière est estimée comme suit :

Composante principale	Montant estimé (DA)
Équipements de bureau	144 000
Équipements de laboratoire (génériques)	300 000
Équipements spécifiques de l'installation	230 000
Équipements de production du biocharbon	107 000
Charges de fonctionnement (énergie, entretien, consommables, transport, etc.)	1 710 000
Salaires annuels du personnel	5 400 000
Total global estimé	7 891 000 DA

6. Chiffre d'affaires et revenus du projet

Le chiffre d'affaires prévisionnel repose sur la commercialisation de systèmes de biofiltration complets (colonne + pompe + modules biocharbon + bactéries), ainsi que sur la vente de colonnes biologiques supplémentaires ou de recharges de biocharbon.

- 1 système complet (installation biocharbon+bactéries) : 7 000 000 DA
- 1 colonne supplémentaire (sans pompe) : 4 000 000 DA

Première année :

Produit	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant total (DA)
Systemes complets vendus	3	7 000 000	21 000 000
Colonnes supplémentaires vendues	3	4 000 000	12 000 000

Chiffre d'affaires total (année 1) : 33 000 000 DA

Deuxième année :

Produit	Quantité	Prix unitaire (DA)	Montant total (DA)
Systemes complets vendus	3	7 000 000	21 000 000
Colonnes supplémentaires vendues	6	4 000 000	24 000 000

Chiffre d'affaires total (année 2) : 45 000 000 DA

Business Model Canvas

<p>PARTENAIRES CLÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> - STEP ET ONA (APPROVISIONNEMENT EN BOUES) - MINISTÈRES DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'INDUSTRIE - UNIVERSITÉS ET CENTRES DE RECHERCHE - INCUBATEURS ET STRUCTURES D'ACCOMPAGNEMENT 	<p>ACTIVITÉS CLÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> - PRODUCTION DE BIOCHARBON - INOCULATION BACTÉRIENNE - INSTALLATION ET MAINTENANCE DES FILTRES - SENSIBILISATION ET COMMERCIALISATION <p>RESSOURCES CLÉS</p> <ul style="list-style-type: none"> - BOUES DE STEP (MATIÈRE PREMIÈRE LOCALE) - RÉACTEUR DE PYROLYSE ET ÉQUIPEMENTS DE LABORATOIRE - SOUCHES BACTÉRIENNES MARINES RÉSISTANTES - COMPÉTENCES EN BIOTECHNOLOGIE 	<p>PROPOSITIONS DE VALEUR</p> <ul style="list-style-type: none"> - FILTRATION BIOACTIVE COMBINANT BIOCHAR ET BACTÉRIES RÉSISTANTES AUX MÉTAUX LOURDS - SOLUTION ÉCOLOGIQUE ET LOCALE - RÉDUCTION DES COÛTS PAR RAPPORT AUX SYSTÈMES IMPORTÉS - VALORISATION DES BOUES EN RESSOURCE UTILE 	<p>RELATIONS CLIENTS</p> <ul style="list-style-type: none"> - ACCOMPAGNEMENT TECHNIQUE PERSONNALISÉ - SENSIBILISATION ÉCOLOGIQUE ET FORMATION - SUIVI POST-INSTALLATION ET SERVICE APRÈS-VENTE <p>CANAUX DE DISTRIBUTION</p> <ul style="list-style-type: none"> - VENTE DIRECTE (UNITÉ DE PRODUCTION) - DISTRIBUTEURS SPÉCIALISÉS (MAGASINS AGRICOLES) - E-COMMERCE (SITE WEB, JUMIA, OUEDKNISS) - VENTE EN GROS B2B - PARTENARIATS AVEC COLLECTIVITÉS ET STEP 	<p>SEGMENTS DE CLIENTS</p> <ul style="list-style-type: none"> - STATIONS D'ÉPURATION (STEP) - INDUSTRIES POLLUANTES (MÉTALLURGIE, CHIMIE, TEXTILE, AGROALIMENTAIRE) - COLLECTIVITÉS LOCALES ET ZONES RURALES - FERMES AQUACOLES ET HÔTELS
<p>STRUCTURE DES COÛTS</p> <ul style="list-style-type: none"> - ACHAT DES ÉQUIPEMENTS (RÉACTEUR, INCUBATEURS, SÉCHOIRS) - CONDITIONNEMENT ET LOGISTIQUE - MARKETING ET SENSIBILISATION - SALAIRES ET FONCTIONNEMENT 		<p>SOURCES DE REVENUS</p> <ul style="list-style-type: none"> - VENTE DE BIOCHARBON SEUL - VENTE DE BIOFILTRES ENRICHIS EN BACTÉRIES - PRESTATIONS D'INSTALLATION ET DE MAINTENANCE 		