

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département d'Ecologie et Environnement



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Ecologie et
Environnement *Spécialité : Protection des Ecosystèmes*

Thème

*Analyse comparative de l'efficacité des traitements
appliqués aux lixiviats du centre d'enfouissement
technique (CET) de Boghni à travers leurs propriétés
physicochimiques.*

Présenté par: M^{lle} DJAOUT Alicia
M^{lle} LABDI Manel

Soutenu le 22/09/2025 devant les membres du jury composé de :

Mr. Oudjiane Ahmed	MCB	UMMTO	Président
M ^{me} . Boubkeur Ouerdia	MAA	UMMTO	Promotrice
M ^{me} . Bachi Karima	MCB	UMMTO	Examinatrice
M ^{me} . Hedjam Hakima	MCB	UMMTO	Examinatrice

Promotion 2024/2025

Remerciements

Nous tenons, en premier lieu, à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la persévérance et la volonté nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nos remerciements les plus sincères vont à nos familles, pour leur soutien indéfectible, tant moral que matériel, ainsi que pour leur présence constante tout au long de notre parcours universitaire.

*Nous exprimons notre reconnaissance à Madame **Boubkeur**, notre promotrice, pour la qualité de son encadrement, ses conseils avisés, sa disponibilité et son accompagnement bienveillant, qui ont été essentiels dans l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous remercions Monsieur **Oudjiane Ahmed**, enseignant-chercheur, pour avoir accepté de présider le jury et d'examiner notre travail.*

*Nous remercions également Madame **Bachi Karima**, enseignante-chercheuse, ainsi que Madame **Hedjam Hakima**, enseignante-chercheuse, pour avoir accepté de faire partie du jury et d'évaluer ce travail avec attention.*

*Nos sincères remerciements s'adressent également à Madame **Asmani Katia** et Monsieur **Haddadi** pour leur encadrement technique et leur assistance précieuse au laboratoire, ainsi qu'à Monsieur **Kessir Ahmed** pour ses conseils techniques concernant la station de traitement. Nous remercions également Mademoiselle **Liticia**, pour son aide et son accompagnement au laboratoire de la Faculté de Chimie.*

*Nous remercions aussi Monsieur **Boumati** et Madame **Dilmi** pour les informations partagées et leurs conseils utiles, ainsi que les directeurs des laboratoires du **PTAPC de Bab Ezzouar** et de **SEAL**, pour avoir accepté de réaliser les analyses nécessaires à ce travail.*

Enfin, nous adressons nos remerciements à l'ensemble de nos camarades, amis, ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce mémoire.



Dédicace

Ce mémoire, fruit d'un chemin tissé de doutes, de labeur et de persévérance, puise avant tout sa force dans l'amour et la Bienveillance qui m'ont portée.

*À mon père, **Hamid**, ta présence rassurante et les valeurs que tu m'as transmises ont été mon ancre dans les moments d'incertitude.*

*À ma mère, **Zayrine**, ton amour inconditionnel et ta confiance en moi m'ont donné le souffle nécessaire pour croire en mes rêves.*

*À mes sœurs, **Célia, Dehia et Camélia**, vos rires et votre tendresse ont illuminé chaque étape de ce projet.*

*À mes frères, **Anis et Amazigh**, votre soutien constant et vos encouragements ont renforcé ma détermination.*

À mes amies fidèles, merci pour votre écoute, votre énergie et votre soutien indéfectible.

*À mon binôme **Manel** et à sa famille, votre générosité, votre accueil et votre chaleur humaine ont enrichi cette aventure d'une dimension précieuse.*

Ce mémoire vous est dédié : sans vous, il n'aurait jamais trouvé tout son sens.

Alicia



Dédicace

Ce travail de fin d'études est le fruit de nombreuses années d'efforts et de sacrifices, et je le dédie du plus profond de mon cœur aux personnes qui ont rendu cette aventure possible et qui ont jalonné mon chemin.

*À mes très chers parents, **Nabila** et **Mohammed**, pour votre amour inconditionnel, votre soutien indéfectible et les immenses sacrifices consentis qui ont été les piliers de ma réussite et ma plus grande source de motivation.*

*À mes grands-mères, **Dehbia** et **Fadma**, symboles de sagesse et de force, dont l'amour et les prières ont toujours éclairé ma route et m'ont inspirée.*

*À mes petits frères et sœurs : **Aya**, **Sofia**, **Djana**, **Aylane** et **Rayane**, pour votre joie de vivre communicative, votre innocence et votre présence qui apportent tant de bonheur dans ma vie.*

*À mon cher petit frère **Yazid**, que ton âme repose en paix. Tu restes à jamais gravé dans nos cœurs et dans nos pensées.*

*À mes cousines, **Maroua** et **Mouna**, **Lynda** pour les rires, les confidences et une amitié précieuse qui perdure.*

*À ma chère copine, **Hayet** pour son écoute, son soutien sans faille et son amitié sincère qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours.*

*À mon binôme, **Alicia**, et à sa famille, pour cette collaboration enrichissante, le partage des doutes et des joies, et le soutien mutuel qui ont fait de ce parcours une expérience inoubliable*
À vous tous, je dédie ce modeste travail en signe de ma profonde gratitude et de mon affection.

Manel

Tables des matières

Remerciements Dédicaces

**Liste des figures Liste des tableaux Liste
des abréviations**

Introduction générale..... 1

Première partie : Partie Bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les déchets et les C.E.T

I.1. Généralités sur les déchets	4
I.1.1. Définition des déchets	4
I.1.2. Classification des déchets	4
I.1.2.1. Selon l'origine.....	4
I.1.2.1.1. Déchets ménagers et assimilés	4
I.1.2.1.2. Déchets industriels	4
I.1.2.1.3. Déchets agricoles.....	5
I.1.2.2. Selon la toxicité	5
I.1.2.2.1. Déchets dangereux	5
I.1.2.2.2. Déchets non dangereux.....	5
I.1.2.2.3. Déchets inertes	5
I.1.3. Durée de vie des déchets dans la nature	5
I.1.4. Impacts des déchets sur l'environnement et la santé publique.....	6
I.1.4.1. Impacts des déchets sur l'environnement.....	7
I.1.4.1.1. Pollution de l'air	7
I.1.4.1.2. Dégradation des sols	7
I.1.4.1.3. Pollution De l'eau.....	7

I.1.4.1.4. Impacts sur la biodiversité	7
I.1.4.2. Impacts des déchets sur la santé publique.....	7
I.1.5. Gestion des déchets	8
I.1.5.1. Collecte des déchets	8
I.1.5.2. Tri des déchets	8
I.1.5.3. Transport des déchets	8
I.1.5.4. Traitement écologiquement rationnel des déchets	8
I.1.5.5. Valorisation des déchets	9
I.1.5.6. Elimination des déchets	9
I.1.5.7. Immersion des déchets.....	9
I.1.5.8. Enfouissement des déchets.....	9
I.2. Centre d'enfouissement technique (CET).....	9
I.2.1. Définition d'un CET	9
I.2.2. Classification des CET	10
I.2.3. Objectif d'un CET.....	11
I.2.4. Fonctionnement d'un CET	11
I.2.4.1. Déchets admis au CET de classe II	11
I.2.4.2. Poste de contrôle.....	11
I.2.4.3. Pont Bascule.....	11
I.2.4.4. Centre de tri	11
I.2.4.5. Casiers.....	12

Chapitre II : Caractéristiques générales du lixiviat

II. Caractéristiques générales du lixiviat	13
II.1. Définition.....	13
II.2. Mécanismes de formation du lixiviat	13
II.3. Paramètres influençant la formation et les caractéristiques des lixiviats	14
II.4. Composition du lixiviat.....	14

II.5. Paramètres physico-chimiques caractérisant les lixiviats	15
II.6. Classification des lixiviats	16
II.6.1. Lixiviats jeunes (< 5ans).....	16
II.6.2. Lixiviats intermédiaires (5-10ans).....	16
II.6.3. Lixiviats stabilisés (plus de 10 ans).....	16
II.7. Procédés de traitement des lixiviats.....	16
II.7.1. Traitement biologique	16
II.7.2. Traitement physico-chimique.....	17
II.7.3. Technique membranaires	18
II.8. Impacts des lixiviats sur l'environnement et la santé humaine	20
II.8.1. Effet des lixiviats sur l'environnement.....	20
II.8.1.1. Pollution des eaux souterraines et de surface	20
II.8.1.2. Dégradation des sols	20
II.8.1.3. Toxicité sur la faune et la flore.....	20
II.8.1.4. Pollution de l'air	21
II.8.2. Effet des lixiviats sur la santé humaine	21

Deuxième partie: Partie expérimentale

Chapitre I : Présentation générale du CET de Boghni

I. Présentation générale du CET de Boghni.....	23
I.1. Présentation de la zone d'étude	23
I.2. Localisation et délimitation du centre d'enfouissement technique (CET) de Boghni	23
I.3 Historique de l'établissement	24
I.4. Fiche technique du CET	25
I.4.1. Portail d'entrée et clôture	25
I.4.2. Poste de contrôle et pont bascule.....	25
I.4.3. Casier d'enfouissement.....	26
I.4.4. Les moyens techniques d'exploitation du site.....	27

I.4.5. Bassin de rétention des lixiviats.....	28
I.4.6. Bassin d'homogénéisation des lixiviats.....	29
I.4.7. Station de traitement des lixiviats	30
I.4.8. Bassin de stockage du concentrât.....	30
I.4.9. Groupe électrogène	31
I.4.10. Bureau technique et laboratoire de contrôle.....	31
I.5. Quantités de déchets admises au CET de Boghni	32
I.6. Origine des déchets reçus au CET de Boghni.....	33
I.7. Autres paramètres du site	34
I.7.1. Climat	34
I.7.1.1. Température.....	34
I.7.1.2. Précipitation	35
I.7.1.3. Diagramme ombrothermique	35
I.7.1.4. Humidité	36
I.7.1.5. Évaporation	36
I.8. Relief	37
I.9. Géologie	37

Chapitre II : Matériel et méthodes

II. Matériel et méthodes.....	40
II.1. Echantillonnage	40
II.2. Matériel.....	41
II.3. Méthodes d'analyses des paramètres physico-chimique des lixiviats	41
II.3.1. Paramètres physiques	41
II.3.1.1. Température	41
II.3.1.2. Conductivité électrique	41
II.3.1.3 Potentiel hydrogène.....	42

II.3.1.4.Couleur.....	43
II.3.1.5.Turbidité	43
II.3.1.5.Oxygène dissous.....	44
II.3.2. Paramètres organiques	44
II.3.2.1. Demande biologique en oxygène (DBO ₅)	44
II.3.2.2. Demande chimique en oxygène (DCO).....	45
II.3.3. Ions majeurs.....	47
II.3.3.1. Anions	47
II.3.3.1.1.Nitrates (NO ₂)	47
II.3.3.1.2.Nitrites (NO ₃ ⁻)	48
II.3.3.1.3. Chlorures (Cl ⁻).....	48
II.3.3.1.4.Sulfates (SO ₄ ²⁻)	49
II.3.3.1.5. Orthophosphates (PO ₄ ³⁻)	50
II.2.2.3.6 Carbonates (CO ₃ ⁻)	51
II.2.2.3.7 Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	52
II.3.3.2. Cations	53
II.3.3.2.1. Calcium (Ca ²⁺).....	53
II.3.3.2.2.Magnésium (Mg ²⁺)	54
II.3.3.2.3.Ammonium (NH ₄ ⁺).....	55
II.3.3.2.4. Potassium (K ⁺).....	56
II.3.4. Paramètres d'alcalinité et de dureté	56
II.3.4.1.Titre alcalimétrique complet (TAC)	56
II.3.4.2.Titre alcalimétrique (TA).....	57
II.3.4.3.Titre hydrométrique (TH)	58
II.3.5. Eléments traces métalliques (ETM)	59

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Résultats des paramètres physico-chimiques	60
III.2. Discussions des résultats des paramètres physico-chimiques	61
III.2.1. Paramètres physiques	61
III.2.2. Paramètres organiques	65
III.2.3. Ions majeurs	67
III.2.4. Paramètres d'alcalinité et de dureté	74
III.2.5. Élément traces métalliques	76
Conclusion générale	79
Propositions et perspectives	80
Références bibliographiques	82
Annexes	90
Résumé	

.

Liste des figures

Figure 1 : Schéma et description du fonctionnement d'un centre d'enfouissement technique	09
Figure 2 : Bassin de stockage du lixiviat de la décharge de Boghni	13
Figure 3 : Localisation géographique de la commune de Boghni	23
Figure 4 : Localisation géographique du CET de Boghni	24
Figure 05 : Aménagement du CET de Boghni	25
Figure 06 : Le poste de contrôle	26
Figure 07 : Le pont bascule	26
Figure 08 : Logiciel informatique de passage	26
Figure 09 : Casier en exploitation	26
Figure 10 : Géo-membrane et Géotextile	27
Figure 11 : Tractopelle..	28
Figure 12 : Pelle à chenilles CATERPILLAR	28
Figure 13 : Bassin de rétention des lixiviats.....	28
Figure 14 : Bassin d'homogénéisation	29
Figure 15 : Système de pompage des lixiviats vers la station de traitement	29
Figure 16 : Station de traitement des lixiviats par osmose inverse	30
Figure 17 : Bassin de stockage du concentrât	30
Figure 18 : Arbi groupe électrogène.....	31
Figure 19 : Bureau technique et laboratoire de contrôle	31
Figure 20 : Évaluation des moyennes mensuelles des températures à Boghni (2015 à 2024)	34

Figure 21 : Variation des moyennes mensuelles des précipitations à Boghni (2015 à 2024).	35
Figure 22 : Diagramme ombrothermique de Boghni de 2015 à 2024	35
Figure 23 : Évaluation des moyennes mensuelles de l'humidité relative (%) à Boghni (2015 à 2024)	36
Figure 24 : Variation des moyennes mensuelles de l'évaporation à Boghni (2015 à 2024)	37
Figure 25 : Mesure de la Conductivité du lixiviat à l'aide d'un conductimètre.....	42
Figure 26 : Mesure du pH sur site à l'aide d'un pH-mètre.....	43
Figure 27 : Turbidimètre utilisé pour la mesure de la turbidité.....	44
Figure 28 : Oxymètre utilisé pour la mesure de l'oxygène dissous	44
Figure 29 : Illustration de la mesure de la DBO ₅	45
Figure 30 : Illustration de la préparation des échantillons pour l'analyse de la DCO.....	46
Figure 31 : Spectrophotomètre du type UV mini-1240.....	47
Figure 32 : Dosage des Chlorures	49
Figure 33 : Dosage des Sulfates	50
Figure 34 : Réactifs utilisés pour le dosage des orthophosphates	51
Figure 35 : Dosage du calcium.....	54
Figure 36 : Spectrophotomètre (DR6000) du type UV-Vis	56
Figure 37 : Dosage du titre alcalimétrique complet TAC	57
Figure 38 : Dosage de l'indice de dureté TH	58
Figure 39 : Dosage des éléments traces métalliques par spectrométrie d'absorption atomique (SAA-Four Graphite)	59
Figure 40 : Variation de la température du lixiviat avant et après traitement	61
Figure 41 : Variation du pH du lixiviat avant et après traitement.....	62
Figure 42 : Variation de la conductivité électrique CE du lixiviat avant et après traitement	63

Figure 43 : Variation de la turbidité du lixiviat avant et après traitemen.....	64
Figure 44 : Variation de l'oxygène dissous OD du lixiviat brut et perméat	65
Figure 45 : Variation de la demande biologique en oxygène DBO ₅ du lixiviat brut et perméat	65
Figure 46 : Variation de la demande chimique en oxygène DCO du lixiviat avant et après ..	66
Figure 47 : Variation du rapport DBO ₅ /DCO du lixiviat brut et perméat	67
Figure 48 : Variation de la concentration en nitrates du lixiviat avant et après traitement.....	68
Figure 49 : Variation de la concentration en chlore du lixiviat avant et après traitement.....	68
Figure 50 : Variation de la concentration en sulfates du lixiviat avant et après traitement ...	69
Figure 51 : Variation de la concentration en orthophosphates du lixiviat avant et après traitement.....	70
Figure 52 : Variation de la concentration en bicarbonates du lixiviat avant et après traitement	71
Figure 53 : Variation de la concentration en calcium du lixiviat avant et après traitement	72
Figure 54 : Variation de la concentration en magnésium du lixiviat avant et après traitement	72
Figure 55 : Variation de la concentration en potassium du lixiviat avant et après traitement	73
Figure 56 : Variation de la concentration en ammonium du lixiviat avant et après traitement	74
Figure 57 : Variation de l'alcalinité totale TAC du lixiviat avant et après traitement	75
Figure 58 : Variation de l'indice de dureté TH du lixiviat avant et après traitement.....	76
Figure 59 : Variation de la concentration en nickel du lixiviat avant et après traitement.....	77

Liste des tableaux

Tableau 1 : Temps de dégradation naturelle de quelques produits dans l'environnement.....	6
Tableau 2 : Catégories principales de CET	10
Tableau 3 : Etapes principales du traitement des lixiviats par osmose inverse	34
Tableau 4 : Évolution annuelle des quantités de déchets admises au CET de Boghni (2016 - 2024).....	38
Tableau 5 : Répartition des déchets reçus au CET de Boghni par origine (%).....	39
Tableau 6 : Résultats des paramètres physico-chimiques du lixiviat brut, perméat et du concentrât après traitement par osmose inverse au CET de Boghni	60

Liste des abréviations

AAS : Atomic Absorption Spectrophotometer (Spectrophotomètre d'absorption atomique)

AGV : acides gras volatils

Ca²⁺ : Calcium

CaCl₂ : Chlorure de calcium

Cd: Cadmium

C.E.T : Centre d'enfouissement technique

CE : Conductivité électrique

CH₄ : Méthane

CL⁻ : Chlorures

CO₃²⁻ : Carbonates

CO₂ : Dioxyde de carbone

CIP: Clean-in-Place (Nettoyage en Place)

Cr : Chrome

Cu : Cuivre

DBO₅ : Demande biologique en oxygène

DCO : Demande chimique en oxygène

DO : L'oxygène dissous

EPIC : Etablissement public à caractère industriel et commercial

ETM : Dosage des éléments traces métalliques

F° : Degré français (unité du TH et TAC)

Fe : Fer

H₂ : Dihydrogène

HCO₃⁻ : Ion hydrogénocarbonate (bicarbonate)

Hg : Mercure

H₂S : sulfure d'hydrogène

H₂SO₄ : Acide sulfurique

HNO₃ : Acide nitrique

K⁺ : Potassium

Mg²⁺ : Magnésium

Na⁺ : Sodium

NH₄⁺ : Ammonium

Ni : Nickel

NO₃⁻ : Nitrate

NO₂⁻ : Nitrite

NaOH : Hydroxyde de sodium

OI : Osmose Inverse

Pb : Plomb

PH : potentiel hydrogène

PLC: Programmable Logic Controller

PNGD : Programme National de Gestion Intégrée des Déchets Ménagers

PO₄³⁻ : Orthophosphates

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition

SO₄²⁻ : Sulfates

TA : Titre alcalimétrique

TAC : Titre alcalimétrique total

T° : Température

TH : Titre hydrotimétrique

UV : Ultraviolets

UTN: Unité de Turbidité Néphélométrique

Zn : Zinc



Introduction Générale

Introduction Générale

L'Algérie est confrontée, depuis plusieurs décennies, à une croissance démographique soutenue et à une urbanisation rapide. Cette dynamique s'accompagne d'une production croissante de déchets ménagers et assimilés, exerçant une pression importante sur les systèmes de gestion des déchets. Ces derniers restent encore fragilisés par le manque d'infrastructures modernes, le déficit en équipements adaptés et une sensibilisation limitée de la population aux pratiques de tri, de recyclage et de valorisation (Meddour-Sahar et al., 2013). Cette situation entraîne une accumulation anarchique des déchets, avec des conséquences environnementales et sanitaires significatives : pollution des sols, contamination des eaux de surface et souterraines, ainsi que la prolifération de vecteurs pathogènes.

Pour faire face à cet enjeu, les autorités algériennes ont lancé en 2001 une stratégie nationale à travers le Programme National de Gestion Intégrée des Déchets Ménagers (PNGD). Ce programme a conduit à la mise en place de Centres d'Enfouissement Technique (CET) dans plusieurs wilayas du pays, dans le but de structurer l'élimination des déchets de manière plus contrôlée et respectueuse de l'environnement (Ministère de l'Environnement, 2002 ; Belhadj et al., 2020). Ces centres ne se limitent pas à l'enfouissement, mais assurent également la gestion des sous-produits issus de la dégradation des déchets, notamment les biogazs et les lixiviats.

Les lixiviats constituent aujourd'hui un défi environnemental majeur dans la gestion des CET. Ce sont des effluents liquides fortement pollués, produits principalement par la percolation des eaux pluviales à travers les déchets. Leur composition est très variable et dépend de plusieurs facteurs, notamment l'âge de la décharge, la nature des déchets, les conditions climatiques et la géologie du site (Kjeldsen et al., 2002 ; Renou et al., 2008). Riches en matière organique, azote ammoniacal, métaux lourds, sels dissous et composés organiques réfractaires, ces lixiviats présentent un fort potentiel de pollution des sols et des nappes phréatiques s'ils ne sont pas convenablement traités (Christensen et al., 2001).

Pour limiter ces risques, plusieurs technologies de traitement ont été mises au point. Parmi elles, l'osmose inverse qui se distingue comme une méthode particulièrement efficace, notamment pour le traitement des lixiviats anciens ou fortement concentrés. Ce procédé repose sur l'utilisation de membranes semi-perméables sous haute pression, capables de séparer les polluants de l'eau. Toutefois, son efficacité dépend fortement de la qualité du prétraitement, des conditions opérationnelles (colmatage, pression, température) et de la gestion du concentrât rejeté (Kurniawan et al., 2006 ; Foo et Hameed, 2009).

Le centre d'enfouissement technique de Boghni, situé dans la wilaya de Tizi-Ouzou, est équipé d'un système de traitement des lixiviats par osmose inverse. Ce site constitue un cadre idéal pour une étude approfondie de l'efficacité de cette technologie, à travers l'analyse des caractéristiques physico-chimiques des lixiviats avant et après traitement. Il est important de mentionner que le CET de Boghni n'a fait objet d'aucune étude auparavant.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer la performance du système d'osmose inverse mis en place au CET de Boghni. L'étude repose sur une analyse comparative des propriétés physico-chimiques (pH, conductivité, turbidité,...etc.), du lixiviat brut, du perméat (lixiviat traité) et du concentrât (résidu du traitement). Elle vise également à identifier les limites du procédé et à proposer des pistes d'amélioration pour une gestion plus efficace et durable.

Ce mémoire est structuré en deux grandes parties, qui constituent l'ossature de ce travail de recherche.

➤ La première partie est consacrée à l'étude bibliographique, qui permet d'établir le cadre théorique du sujet, à travers deux chapitres :

- ✓ Chapitre I : Généralités sur les déchets et les C.E.T.
- ✓ Chapitre II : Caractéristiques générales des lixiviats.


➤ La deuxième partie est dédiée à la démarche expérimentale. Elle détaille les différentes étapes du travail de terrain et de laboratoire, les résultats obtenus ainsi que leurs discussions. Elle comprend trois chapitres :

- ✓ Chapitre I : Présentation du site d'étude – le CET de Boghni.
- ✓ Chapitre II : Description du matériel utilisé et des méthodes d'analyse physico-

chimiques appliquées aux échantillons (lixiviat brut, perméat et concentrât).

- ✓ Chapitre III : Analyse et interprétation des résultats obtenus. Ce chapitre permet d'évaluer les résultats obtenus, des différents paramètres physico-chimiques analysés, avant et après le traitement par le procédé de l'osmose inverse.

Enfin, ce manuscrit s'achève par une conclusion générale sur l'efficacité du procédé de traitement, accompagnée de perspectives et recommandations concrètes pour améliorer la performance des systèmes de traitement et orienter les futures recherches dans ce domaine.



Première partie :
Partie Bibliographique

Chapitre I

Généralités sur les déchets et les C.E.T

I.1. Généralités sur les déchets**I.1.1. Définition des déchets**

Selon la loi algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, les déchets sont définis comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, produit ou bien meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer » (JORA, 2001).

I.1.2. Classification des déchets**I.1.2.1. Selon l'origine****I.1.2.1.1. Déchets ménagers et assimilés**

Ce sont les déchets produits par les ménages, incluant les restes alimentaires, les emballages, et les autres déchets domestiques (JORA, 2001).

I.1.2.1.2. Déchets industriels

Les déchets industriels sont des résidus issus des activités des industries, pouvant avoir un impact négatif sur l'environnement et le bien-être humain (Fenouche et Boumaza, 2018).

I.1.2.1.3. Déchets agricoles

Les déchets agricoles proviennent des activités agricoles et comprennent les résidus de cultures, les effluents d'élevage, les déchets organiques, les emballages de produits phytosanitaires et les plastiques agricoles. Leur gestion est essentielle pour réduire les impacts environnementaux (Benabdeli et Boumediene, 2006).

I.1.2.2. Selon la toxicité**I.1.2.2.1. Déchets dangereux**

Ce sont des déchets contenant des substances ou éléments qui présentent un risque pour la santé humaine ou l'environnement. Ils sont toxiques, inflammables, corrosifs, réactifs ou infectieux, et nécessitent une prise en charge spécifique pour éviter les impacts graves (Kerdoudi et al., 2018).

I.1.2.2.2. Déchets non dangereux (DND)

Ce sont des déchets qui ne présentent aucune des quinze caractéristiques de danger définies pour les déchets dangereux, telles que la toxicité, la réactivité, l'explosivité ou la corrosivité. Leur gestion est soumise à une réglementation plus souple. Ils regroupent des matériaux courants comme les déchets organiques, le verre, le plastique, le bois, etc.. (Djellouli et Zergat, 2019).

I.1.2.2.3. Déchets inertes

Ce sont des déchets qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique significative. Ils proviennent souvent des activités de construction, de démolition ou d'extraction, tels que les gravats, les bétons, les tuiles ou les céramiques (Desachy, 2001).

I.1.3. La durée de vie des déchets dans la nature

Tous les déchets ne se décomposent pas à la même vitesse. Certains disparaissent en quelques mois (Tableau 01), tandis que d'autres peuvent persister dans la nature pendant des siècles, voire des millénaires.

Le tableau ci-dessous présente le temps de dégradation naturelle de quelques produits courants dans l'environnement.

Tableau 01 : Temps de dégradation naturelle de quelques produits dans l'environnement.
(DDE Bejaïa, 2014)

Produit	Temps de dégradation
Mouchoir en papier	3 mois
Papier	2 à 5 mois
Journal	3 mois à 12 ans
Mégot de cigarette	1 à 5 ans
Chewing-gum	5 ans
Sac plastique	100 à 1000 ans

Bouteille en plastique	100 à 1000 ans
Boite de conserve	30 à 100 ans
Canette en aluminium	10 à 500 ans
Briquet jetable	1000 ans
Verre (bouteille, etc...)	4000 ans
Chaussures en cuir	5 à 40 ans
Tissu en nylon	25 à 40 ans
Planche de bois	3 à 15 ans
Emballage plastique de bouteilles	200 ans

I.1.4. Les impacts des déchets sur l'environnement et la santé publique

Les déchets constituent à la fois une ressource potentielle et un danger réel. Leur accumulation croissante, ainsi que leur complexité, posent des risques environnementaux et sanitaires majeurs. Les principaux modes de traitement des déchets, tels que l'incinération, l'enfouissement en centres d'enfouissement techniques (CET) ou le compostage, génèrent diverses formes de pollution (Mouhoun, 2008).

I.1.4.1. Impacts des déchets sur l'environnement

I.1.1.1 Pollution de l'air

L'incinération des déchets libère des gaz toxiques, notamment des dioxines et des furanes, qui peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement (Lemieux et al., 2004). Les décharges mal gérées produisent du méthane (CH₄), un puissant gaz à effet de serre responsable d'une part importante du réchauffement climatique (Bogner et al., 2008).

I.1.1.2 Dégradation des sols

L'accumulation de déchets entraîne une modification chimique et physique des sols. Les plastiques et les micro plastiques réduisent la fertilité en perturbant la structure du sol et en limitant la rétention d'eau (Rillig et al., 2019). De plus, les métaux lourds issus des déchets électroniques et industriels s'accumulent dans les sols, compromettant la productivité agricole (Alloway, 2013).

I.1.1.3 Pollution de l'eau

Les déchets solides et liquides non traités contaminent les ressources en eau. Les lixiviats issus des décharges, riches en métaux lourds (Pb, Cd, Hg...etc.) et en composés organiques toxiques, s'infiltrent dans les nappes phréatiques et les cours d'eau, affectant la biodiversité aquatique et représentant un danger pour la santé humaine (Kjeldsen et al., 2002).

I.1.1.4 Impacts sur la biodiversité

La présence de déchets plastiques dans les milieux terrestres et marins perturbe les écosystèmes. De nombreuses espèces ingèrent ces plastiques, ce qui peut nuire à leur santé, altérer leur comportement ou entraîner leur mort (Gall et Thompson, 2015). Par ailleurs, la contamination des sols et des eaux par divers polluants issus des déchets représente également une menace pour la faune et la flore locales.

I.1.4.2. Impacts des déchets sur la santé publique

La mauvaise gestion des déchets a des conséquences graves sur la santé humaine, en raison de la pollution de l'air, de l'eau et des sols. L'incinération des déchets libère des gaz toxiques, notamment des dioxines et des particules fines, augmentant les risques de maladies respiratoires et de cancers (Lemieux et al., 2004).

Les lixiviats issus des décharges contiennent des métaux lourds et des polluants organiques qui contaminent les ressources en eau, provoquant des maladies gastro-intestinales et neurologiques (Kjeldsen et al., 2002).

De plus, la dégradation des déchets plastiques en micro plastiques entraîne leur accumulation dans la chaîne alimentaire, exposant les humains à des substances toxiques (Gall et Thompson, 2015). Par ailleurs, les décharges mal gérées favorisent la prolifération d'insectes et de rongeurs, augmentant ainsi la transmission de maladies infectieuses telles que la dengue et le paludisme (Matos et al., 2017). Pour limiter ces impacts, il est essentiel de mettre en place des stratégies de gestion durable des déchets, incluant le recyclage, la réduction à la source et le traitement efficace des polluants.

I.1.5. La gestion des déchets

Selon le JORA (2001), la gestion des déchets regroupe l'ensemble des opérations visant à assurer leur collecte, leur traitement et leur élimination dans des conditions respectueuses de la santé publique et de l'environnement. Elle comprend plusieurs étapes clés :

I.1.5.1. Collecte des déchets

Cette phase consiste à ramasser et regrouper les déchets en vue de leur transfert vers des sites de traitement appropriés.

I.1.5.2. Tri des déchets

Il s'agit de séparer les déchets selon leur nature (papier, plastique, verre, organique, etc.) afin d'optimiser leur traitement et leur valorisation.

I.1.5.3. Transport des déchets

Les déchets triés sont acheminés vers des installations de stockage, de recyclage ou d'élimination.

I.1.5.4. Traitement écologiquement rationnel des déchets

Cette étape englobe les mesures garantissant une gestion des déchets respectueuse de la santé publique et de l'environnement.

I.1.5.5. Valorisation des déchets

Elle comprend les opérations permettant le recyclage, la réutilisation ou le compostage des déchets, transformant ainsi les déchets en ressources.

I.1.5.6. Élimination des déchets

Cette phase inclut les opérations d'incinération, d'enfouissement et de stockage des déchets non valorisables.

I.1.5.7. Immersion des déchets

Il s'agit du rejet de déchets dans le milieu aquatique, une pratique strictement réglementée en raison de ses impacts environnementaux.

1.1.5.8. Enfouissement des déchets

Cette opération consiste à stocker les déchets en sous-sol, généralement dans des CET.

I.2. Centre d'enfouissement technique (CET)

I.2.1. Définition d'un CET

Un CET est une installation spécialement conçue pour l'élimination des déchets par dépôt sur ou dans le sol, conformément à la réglementation environnementale en vigueur.

Selon l'article 2, point 18, du décret wallon du 27 juin 1996 relatif aux déchets, un CET est défini comme un site d'élimination des déchets par dépôt sur ou dans la terre, généralement en sous-sol, de manière à éviter toute nuisance (Décret wallon, 1996).

Un CET est conçu pour une durée d'exploitation d'au moins 20 ans (Omari, 2014) et comprend plusieurs infrastructures essentielles (Figure 1), telles que :

- Des casiers d'enfouissement étanches pour recevoir les déchets ;
- une zone de service pour l'accueil, la pesée et le contrôle des apports ;
- une station de traitement des lixiviats issus de la dégradation des déchets ;
- un système de captage et de valorisation des biogaz, principalement du méthane (Guessoum, 2023).

Ces centres représentent une alternative plus sécurisée aux décharges sauvages, en intégrant les principes du développement durable et de la protection de l'environnement (Nassro, 2022).

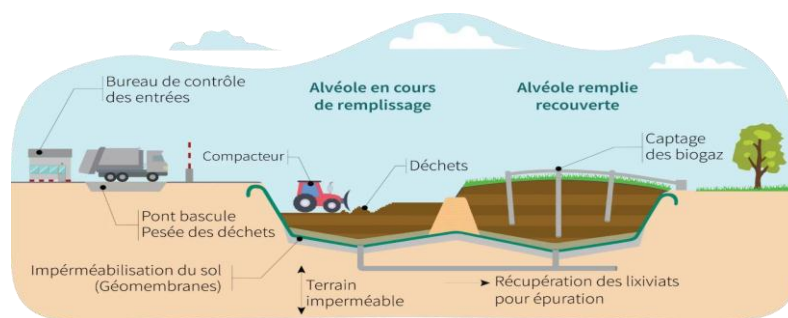


Figure 01 : Schéma et description du fonctionnement d'un centre d'enfouissement technique (SYDEVOM 04, 2023).

I.2.2. Classification des CET

En Algérie, les centres d'enfouissement techniques sont classés en fonction du type de déchets qu'ils reçoivent. Cette classification permet une gestion adaptée à la nature et au danger des déchets (Directive 1999/31/CE ; Guemra et al, 2019).

Cette classification se divise en trois catégories principales, présentées dans le tableau suivant :

Tableau 02 : Catégories principales de CET (Directive 1999/31/CE)

Classe	Type de déchets acceptés
Classe I	Déchets dangereux ou spéciaux (déchets industriels spécifiques, déchets hospitaliers, etc.)
Classe II	Déchets ménagers et assimilés (issus des ménages, commerces et certaines industries)
Classe III	Déchets inertes (gravats, béton, céramique, verre, terre, pierres, etc.)

I.2.3. Objectif d'un CET

L'objectif d'un CET est d'assurer l'élimination écologique des déchets solides tout en minimisant les impacts environnementaux et sanitaires. Le CET permet la disposition finale des déchets de manière sécuritaire, avec un contrôle rigoureux des risques de contamination du sol, de l'eau et de l'air, tout en favorisant leur valorisation (Nait Saidi et al, 2020).

I.2.4. Fonctionnement d'un CET**I.2.4.1. Les déchets admis au CET de classe II**

Les CET de classe II accueillent deux types de déchets. Les déchets ménagers et assimilés, dont la décomposition génère des lixiviats et du biogaz, constituent la part principale. Ils reçoivent aussi des déchets faiblement biodégradables, plus stables dans le temps mais présentant un potentiel de pollution modéré, nécessitant un suivi environnemental adapté (Djemaci, 2012).

I.2.4.2. Le poste de contrôle

Situé à l'entrée du site, le poste de contrôle est la première étape de gestion. Il a pour rôle de vérifier la nature des déchets entrants et de s'assurer de leur conformité aux critères d'acceptation, afin d'éviter l'introduction de substances interdites ou dangereuses (Agraniou, 2019).

I.2.4.3. Le pont bascule

Le pont bascule permet de peser les camions et de quantifier précisément les déchets admis. Chaque pesée est associée à un bordereau de transport, garantissant la traçabilité et la transparence dans la gestion des flux.

I.2.4.4. Le centre de tri

Le centre de tri a pour fonction de séparer les déchets selon leur nature afin de favoriser le recyclage et la valorisation. Les principaux matériaux récupérés sont le papier, le carton, le plastique, le verre, l'acier et l'aluminium, qui sont ensuite orientés vers des filières spécialisées (JORA, 2001).

I.2.4.5. Les casiers

Les casiers d'enfouissement sont des structures spécialement conçues pour recevoir les déchets. Ils comprennent des systèmes d'étanchéité (géomembranes), de drainage et de récupération des lixiviats et du biogaz. Cette conception vise à assurer une élimination sécurisée tout en protégeant le sol, l'eau et l'air contre la pollution (Tchobanoglous et al, 1993).

Chapitre II

Caractéristiques générales du lixiviat

II. Caractéristiques générales du lixiviat**II.1. Définition**

Le lixiviat désigne un liquide fortement pollué, généré principalement par l'infiltration des eaux météoriques (pluie, ruissellement) ou par l'humidité interne traversant une masse de déchets stockés dans une décharge ou un centre d'enfouissement technique (Figure 2).

Ce phénomène de percolation entraîne la dissolution et le transport de nombreux composés chimiques, incluant des matières organiques biodégradables, des métaux lourds, des sels minéraux, des substances toxiques et des micro-organismes pathogènes. Le lixiviat constitue ainsi un vecteur majeur de pollution, en raison de sa composition complexe et variable, et de sa forte capacité de contamination des milieux naturels environnants (Kjeldsen et al., 2002).



Figure 02 : Bassin de stockage du lixiviat de la décharge de Boghni (Originale, 2025)

II.2. Mécanismes de formation du lixiviat

La formation du lixiviat résulte d'un ensemble de processus physico-chimiques et biologiques déclenchés par l'infiltration de l'eau dans les déchets enfouis. Cette eau, en traversant les différentes couches de déchets, active plusieurs mécanismes.

- la dissolution de composés solubles (sels, métaux, substances organiques) ;
- l'hydrolyse de la matière organique complexe ;
- la dégradation biologique (aérobie ou anaérobie) ;

- la mise en solution de composés initialement présents ou produits par la dégradation.

Ces mécanismes dépendent des caractéristiques des déchets, des conditions climatiques locales (pluviométrie, température), ainsi que de la conception et de la gestion du site de stockage (Christensen et al., 2001).

II.3. Paramètres influençant la formation et les caractéristiques des lixiviats

La formation et la qualité des lixiviats sont conditionnées par plusieurs facteurs environnementaux, techniques et physico-chimiques, interagissant de manière complexe (Khatabi, 2002). Ces facteurs incluent :

- **Conditions climatiques :** La pluviométrie favorise l'infiltration de l'eau dans les déchets, ce qui accroît la production de lixiviat. La température, quant à elle, influence directement l'activité microbienne et la vitesse des réactions biochimiques
- **Nature des déchets :** La composition des déchets (taux de matières organiques biodégradables, présence de substances toxiques, humidité interne) détermine en grande partie la charge polluante du lixiviat.
- **Compaction et hauteur des casiers :** Un compactage élevé et des casiers de grande hauteur ralentissent la percolation, favorisant l'accumulation de polluants.
- **Système d'étanchéité:** La présence de barrières physiques (géomembranes, géotextiles) limite les infiltrations d'eau et donc la quantité de lixiviat produit.
- **Âge de la décharge :** Il influence le degré de dégradation des déchets et, par conséquent, la nature et la concentration des polluants présents dans le lixiviat.

II.4. Composition des lixiviats

Les lixiviats présentent une composition physico-chimique très variable, influencée par l'âge de la décharge, les types de déchets et les conditions hydriques. On peut les regrouper en quatre grandes familles de constituants (El-Fadel et al., 2002 ; Trabelsi, 2012) :

- ✓ **Matière organique :** Mesurée principalement par la demande chimique en oxygène (DCO), elle comprend des acides gras volatils, des composés humiques et fulviques.

- ✓ **Micropolluants organiques** : Notamment des hydrocarbures et composés aromatiques issues des déchets ménagers ou industriels.
- ✓ **Éléments minéraux** : Tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Fe^{2+} , qui proviennent de la dissolution des matières solides.
- ✓ **Métaux lourds et agents pathogènes** : Présents en faible concentration mais à forte toxicité, ils incluent le cadmium (Cd), le nickel (Ni), le plomb (Pb), le zinc (Zn), et diverses bactéries pathogènes.

II.5. Paramètres physico-chimiques caractérisant les lixiviats

Parmi les principaux paramètres physico-chimiques caractérisant les lixiviats, on retrouve :

- ✓ **La demande chimique en oxygène (DCO)** : indicateur clé de la charge organique du lixiviat, souvent élevée dans les lixiviats jeunes et nécessitant un traitement adapté (Tatsi et Zouboulis, 2002).
- ✓ **La demande biologique en oxygène (DBO5)** : reflète la fraction biodégradable de la matière organique et permet d'évaluer la capacité de traitement biologique du lixiviat (Kurniawan et al., 2010).
- ✓ **Le pH** : varie généralement entre 4,5 et 9 en fonction de l'âge du lixiviat. Les lixiviats jeunes sont plus acides, tandis que les lixiviats stabilisés deviennent alcalins (Lopez et al., 2004).
- ✓ **La conductivité** : indicateur de la concentration en sels dissous et de la charge ionique globale, influençant le choix du procédé de traitement (Renou et al., 2008).
- ✓ **Les métaux lourds (Cd, Pb, Zn, Cu, Hg, Cr, Ni, etc.)** : présents en quantités variables, leur toxicité impose un traitement spécifique pour éviter la contamination des sols et des eaux souterraines (Kjeldsen et al., 2002).
- ✓ **Les composés azotés (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^-)** : principalement sous forme d'ammonium dans les lixiviats jeunes, ils nécessitent un traitement biologique ou physico-chimique (Tatsi et Zouboulis, 2002).

II.6. Classification des Lixiviats

On distingue trois catégories de lixiviats, en fonction de leur âge et de leur composition (Baig et al., 1999) :

II.6.1. Lixiviats jeunes (< 5 ans) :

- Riches en acides gras volatils (molécules biodégradables)
- Faible pH (< 6,5)
- Rapport DBO₅/DCO > 0,3 (forte biodégradabilité)

II.6.2. Lixiviats intermédiaires (5-10 ans) :

- Contiennent encore des acides gras volatils mais en proportion moindre
- Apparition de substances humiques et fulviques
- pH proche de 7
- Rapport DBO₅/DCO entre 0,1 et 0,3

II.6.3. Lixiviat Stabilisé (plus de 10 ans) :

- Riche en substances humiques et fulviques (molécules complexes et peu biodégradables)
- PH alcalin (> 7,5)
- Rapport DBO₅/DCO < 0,1 (faible biodégradabilité)

II.7. Procédés de traitement des Lixiviats

Les lixiviats issus des centres d'enfouissement technique (CET) sont des effluents hautement pollués contenant des composés organiques, des métaux lourds, des nutriments azotés, des micro-organismes pathogènes et divers composés toxiques. Leur traitement est indispensable avant tout rejet dans le milieu naturel (INERIS, 2015 ; Renou et al., 2008).

II.7. 1. Traitement biologique

Ce procédé repose sur l'action de micro-organismes qui dégradent la matière organique biodégradable. Il peut être aérobie (boues activées, lagunage, biofiltres) ou anaérobie (réacteur UASB, lit bactérien) (Renou et al., 2008).

➤ Avantages :

- Faible consommation d'énergie et coûts d'exploitation réduits (Renou et al., 2008).
- Très efficace pour la réduction de la DBO5 et DCO des lixiviats jeunes (Kjeldsen, et al., 2002).
- Méthode respectueuse de l'environnement, peu de polluants secondaires (Tchobanoglous et al., 2002).

➤ Inconvénients :

- Efficacité limitée sur les lixiviats anciens et peu biodégradables (Ineris, 2015).
- Production de boues résiduelles à traiter (Tchobanoglous et al., 2002).
- Sensibilité aux variations de température, pH et charge organique (Renou et al., 2008).

II.7. 2. Traitement physico-chimique

Il permet d'éliminer les polluants spécifiques grâce à des procédés comme la coagulation- floculation, l'adsorption sur charbon actif ou l'oxydation avancée (Renou et al., 2008). Ces méthodes sont efficaces mais coûteuses et génératrices de résidus secondaires (Trabelsi, 2011).

➤ Avantage :

- Élimination rapide des métaux lourds, des matières en suspension et des phosphates (Almeida et Fernandes, 2015)
- Efficace pour les lixiviats anciens, en complément des traitements biologiques (Li et al., 2017)
- Méthode adaptable selon la concentration et le type de contaminants (Renou et al., 2008)

➤ Inconvénients :

- Coûts d'installation et d'exploitation élevés (Trabelsi, 2011)

- Production de boues ou de concentrât pollués nécessitant un traitement ultérieur (Li et al., 2017)
- Efficacité dépendante du pH et des caractéristiques physico-chimiques du lixiviat (Renou et al., 2008)

II.7. 3. Techniques membranaires

L'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse assurent une séparation efficace des polluants, bien que leur coût et le colmatage des membranes limitent leur application (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2018).

➤ Avantage :

- Efficacité élevée dans la séparation des polluants dissous (jusqu'à 90 %) (MDPI, 2023).
- Production d'un effluent de haute qualité, réutilisable ou rejetable sans risque majeur (Zhao et al., 2018).
- Technologie compacte et modulaire, adaptable à différentes capacités de traitement (Agence de l'Eau RMC, 2018).
- Faible recours aux produits chimiques, ce qui limite la formation de sous-produits secondaires (Agence de l'Eau RMC, 2018).

➤ Inconvénients

- Coûts d'investissement et de maintenance élevés (Zhao et al., 2018).
- Risque fréquent de colmatage des membranes, nécessitant un prétraitement et des nettoyages réguliers (MDPI, 2023).
- Production d'un concentrat toxique dont la gestion est complexe (Agence de l'Eau RMC, 2018).

Le tableau ci-dessous récapitule les étapes clés du processus de traitement des lixiviats au sein de la station d'osmose inverse :

Tableau 03 : Étapes principales du traitement des lixiviats par osmose inverse

N	Étape	Description Claire	Objectif principal	Données techniques
1	Pompage du lixiviat	Pompage depuis la lagune	Démarrer le processus de traitement.	Pompe à vis excentrée – Débit : 5–6 m ³ /h – Pression : 2,5–3 bar
2	Réglage du pH	Ajout d'acide sulfurique pour stabiliser le pH entre 5,5 et 6,5.	Éviter l'entartrage	Cuve de 2 m ³ – Pompe centrifuge : 2–3 m ³ /h – Pression : 1,5 bar
3	Filtration sur sable	Filtration des matières en suspension avec rétro- lavage automatique.	Protéger les membranes en éliminant les particules.	Filtre 500–700 L – Anthracite + sable – Rétro-lavage air + eau
4	Injection d'antiscalant	Dosage d'un produit anti- tartre dans le lixiviat.	Prévenir la formation de dépôts minéraux sur les membranes.	Système de dosage automatique
5	Filtration de sécurité	Élimination des particules fines résiduelles via filtres à poche et à cartouche.	Éviter l'endommagement ou colmatage des membranes.	Filtres à poche (0,6 mm) + filtres à cartouche
6	Osmose inverse – 1er étage	Séparation de l'eau et des polluants à haute pression à travers une membrane.	Obtenir de l'eau purifiée (perméat) et un concentrât.	Débit : 4–5 m ³ /h – Pression : jusqu'à 65 bar
7	Osmose inverse – 2e étage	Deuxième passage du perméat à plus basse pression pour affiner la purification.	Améliorer la qualité finale du perméat.	Pression : jusqu'à 25 bar – Réservoir tampon entre les deux étages
8	Maintien du débit circulant	Une pompe d'appoint : assure une bonne circulation dans les membranes (flux tangentiel)	Limiter les dépôts internes et maintenir l'efficacité du système	Pompe d'appoint – Flux tangentiel maintenu
9	Gestion du concentrât	Le concentrât est dirigé vers un bassin ou un site de stockage sécurisé	Évacuer les rejets concentrés de manière contrôlée.	Bassin de stockage ou transfert externe
10	Nettoyage des membranes (CIP)	Nettoyage périodique des membranes avec des produits chimiques spéciaux.	Restaurer la performance des membranes.	Cuve CIP – Pompes – Produits acides et basiques

II.8. Impacts des lixiviats sur l'environnement et la santé humaine**II.8.1. Effets des lixiviats sur l'environnement**

Les lixiviats issus des sites d'enfouissement contiennent une grande variété de polluants pouvant nuire gravement à l'environnement. Leur impact dépend de leur composition physico- chimique et de leur mode de dispersion dans les écosystèmes.

II.8.1.1. Pollution des eaux souterraines et de surface

- Les lixiviats peuvent s'infiltrer dans les nappes phréatiques et contaminer les sources d'eau potable.
- Ils sont riches en ions chlorure (Cl^-) et ammonium (NH_4^+), qui augmentent la conductivité et peuvent rendre l'eau impropre à la consommation (VADILLO et al., 1999).
- La présence de métaux lourds (Cd, Cr, Pb, Ni, Zn, etc.) est préoccupante, car ces éléments sont toxiques même à faible concentration (KJELDSEN et al., 2002).
- Les composés xénobiotiques tels que les hydrocarbures aromatiques (benzène, toluène, xylènes) et les hydrocarbures halogénés (tétrachloroéthylène, trichloréthylène) sont persistants et peuvent contaminer durablement l'environnement (KJELDSEN et al., 2002).

II.8.1.2. Dégradation des sols

- L'acidité des lixiviats en phase acidogène favorise la solubilisation des métaux lourds, augmentant leur mobilité et leur potentiel de contamination des sols (KJELDSEN et al., 2002).
- La présence de matières organiques biodégradables et non biodégradables peut modifier la structure des sols et perturber leur équilibre chimique et microbiologique.

II.8.1.3. Toxicité pour la faune et la flore

- La contamination des cours d'eau par les lixiviats peut provoquer une asphyxie aquatique due à l'épuisement de l'oxygène dissous, entraînant la mort des organismes aquatiques (CHEUNG et al., 1993).

- La toxicité des métaux lourds affecte la croissance et la reproduction des espèces aquatiques et terrestres (PLOTKIN et RAM, 1984).
- La présence de microorganismes pathogènes dans les lixiviats peut contaminer les écosystèmes et entraîner des épidémies (OSHODE et al., 2008).

II.8.1.4. Pollution de l'air

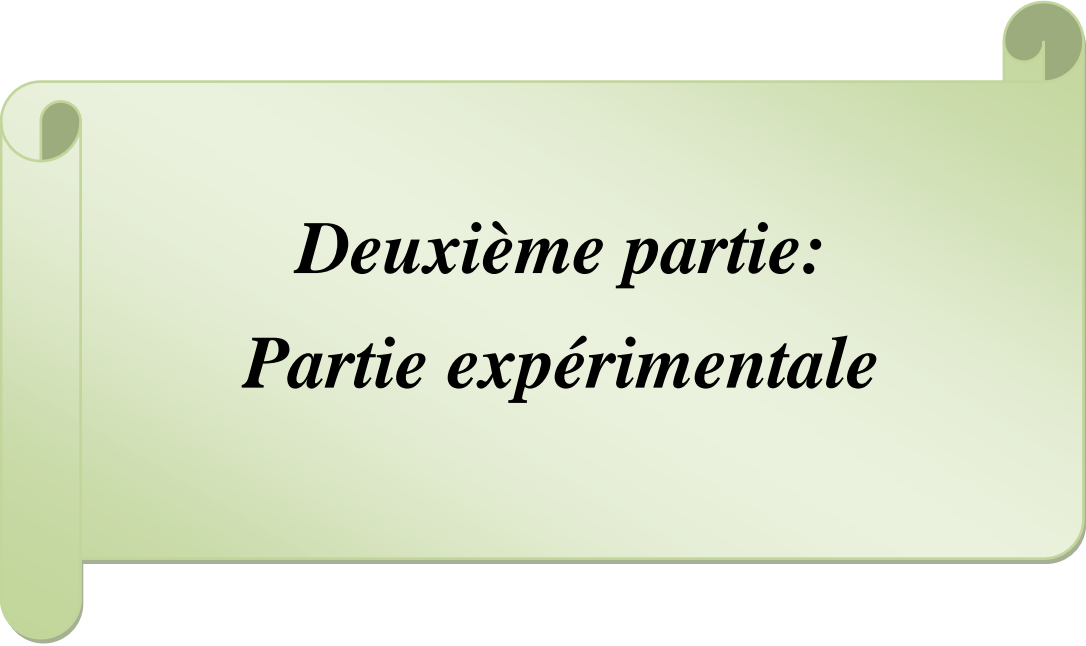
- La dégradation des matières organiques produit des gaz à effet de serre comme le méthane (CH₄) et le dioxyde de carbone (CO₂), qui contribuent au changement climatique (KJELDSEN et al., 2002).
- Certains lixiviats contiennent des composés volatils pouvant générer de mauvaises odeurs et des émanations toxiques.
- Les lixiviats constituent donc une menace environnementale majeure et nécessitent un traitement approprié avant tout rejet dans la nature.

II.8.2. Effets des lixiviats sur la santé humaine

Les lixiviats peuvent contaminer les eaux souterraines et de surface, exposant ainsi les populations aux métaux toxiques issus des déchets. Ces substances peuvent s'infiltrer dans les sols et atteindre les ressources en eau.

Les plantes absorbent également ces métaux, ce qui les intègre à la chaîne alimentaire. De plus, la présence de substances cancérigènes comme le benzène et les chlorures de polyvinyle accentue les risques pour la santé.

Il est donc essentiel de collecter et traiter ces lixiviats afin de limiter leurs impacts sur la santé et l'environnement (Jamranene et Belkacemi, 2024).



Deuxième partie:
Partie expérimentale

*Présentation générale du CET
de Boghni*

I. Présentation générale du CET de Boghni

I.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la région du bas Sébaou, au sein de la commune de Boghni, dans la wilaya de Tizi-Ouzou, plus précisément dans la partie sud-ouest de cette wilaya. Ses limites géographiques sont définies comme suit (Figure 3) :

- ✓ **Au nord** : La commune de Maatkas ;
- ✓ **A l'est** : Les communes de Mechtras et d'Assi Youcef ;
- ✓ **Au sud** : Le massif du Djurdjura et la wilaya de Bouira ;
- ✓ **A l'ouest** : La commune de Bounouh.



Figure 03 : Localisation géographique de la commune de Boghni (image Google Earth 2025)

I.2. Localisation et délimitation du centre d'enfouissement technique (CET) de Boghni

Le CET est implanté au nord-est de la commune de Boghni, à environ 7 kilomètres du centre-ville, sur une superficie de 7,15 hectares (Figure 4). Ses coordonnées géographiques sont les suivantes :

- ✓ Latitude : 36°33'26.86" N
- ✓ Longitude : 3°57'55.03" E

Le site est délimité par :

- ✓ Au nord, des terres agricoles ;
- ✓ Au sud, un couvert forestier accompagné de quelques habitations dispersées ;
- ✓ A l'est, un massif boisé ;
- ✓ A l'ouest, une zone forestière continue.



Figure 04 : Localisation géographique du CET de Boghni (Image Google Earth, 2025)

I.3. Historique de l'établissement

Le CET de Boghni est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), créé par arrêté interministériel de la 08/11/2008 portant création de l'établissement de gestion des CET et du traitement des déchets de la wilaya. Sa mise en service effective n'est intervenue qu'en 2016 (Direction de l'Environnement, 2025, audit).

I.4. Fiche technique du CET

Le CET de Boghni occupe une superficie de 7,5 hectares. Il comprend les structures suivantes (Figure 05) :

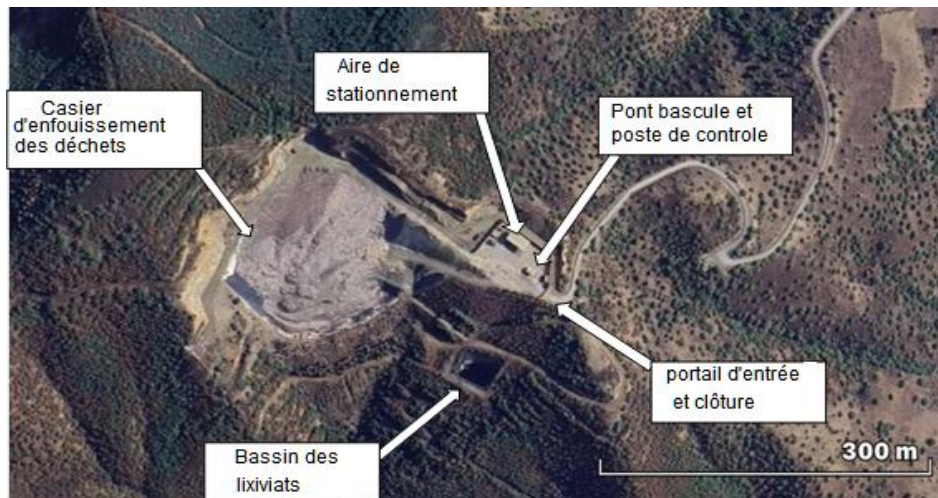


Figure 05 : Aménagement du CET de Boghni (Image Google Earth, 2025).

I.4.1. Portail d'entrée et clôture

Le CET est entièrement clôturé par un grillage robuste d'une hauteur minimale de 2 mètres, assurant la sécurité du site. L'accès est contrôlé par un portail principal, équipé d'un poste de garde, afin de limiter l'entrée aux seules personnes autorisées en dehors des heures d'ouverture.

I.4.2. Poste de contrôle et pont bascule

Un poste de contrôle est installé à l'entrée du CET pour vérifier la nature et l'origine des déchets (Figure 06). Il comprend un pont bascule aérien hors-sol d'environ 16 m de long sur 3 m de large, surélevé de 50 cm (Figure 07). Ce dispositif permet de peser les véhicules à l'entrée et à la sortie à l'aide de capteurs de charge reliés à un système informatisé (Figure 08), assurant un suivi précis des quantités de déchets qui entrent au site.



Figure 06 : Le poste de contrôle
(Originale, 2025)



Figure 07 : Le pont bascule
(Originale, 2025)

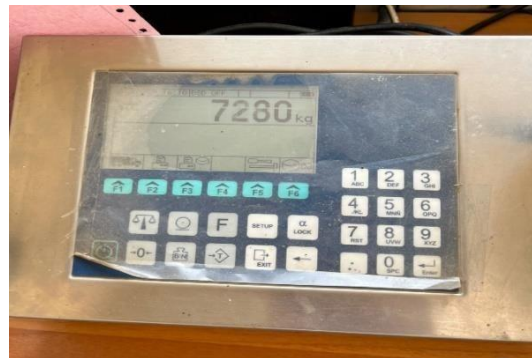


Figure 08 : Logiciel informatique de passage (Originale, 2025)

I.4.3. Casier d'enfouissement

Le site d'enfouissement est organisé autour d'un casier unique en exploitation, d'une capacité totale de 350 000 m³. Ce casier est subdivisé en plusieurs alvéoles rectangulaires pour faciliter et adapter l'exploitation selon les besoins (Figure 09).



Figure 09 : Casier en exploitation (Originale, 2025)

La construction du casier et de ses alvéoles consiste à creuser des tranchées dans le sol et à ériger des digues délimitant précisément les zones d'enfouissement.

Pour empêcher l'infiltration des lixiviats dans le sol, le casier est doublé de deux membranes successives (Figure 10):

- **Géotextile:** Matériau protecteur placé au-dessus de la géo-membrane, destiné à la protéger des agressions mécaniques et à prolonger sa durée de vie.
- **Géo-membrane:** Couche imperméable, généralement noire, qui assure l'étanchéité du casier en empêchant les lixiviats de s'infiltrer dans le sol.

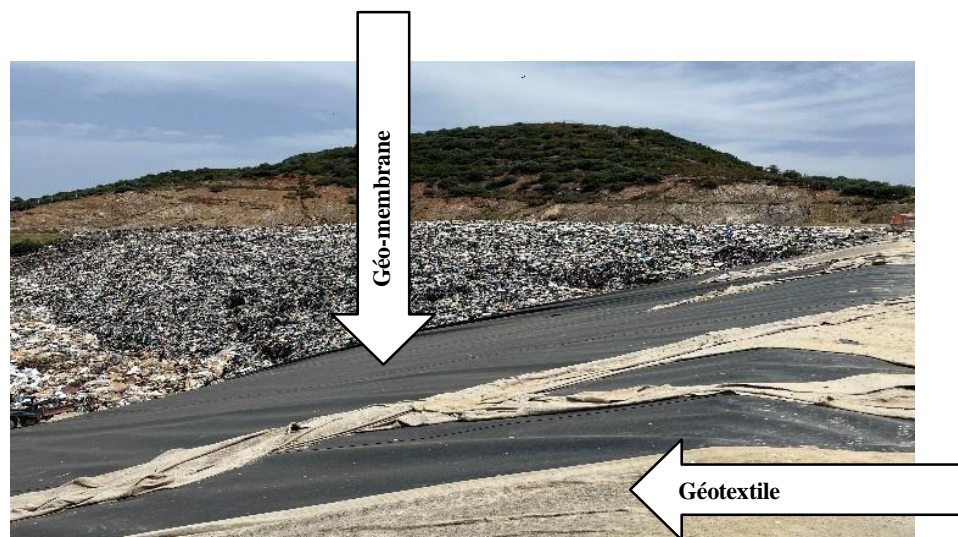


Figure 10 : Géomembrane et Géotextile (Originale, 2025)

I.4.4. Moyens techniques d'exploitation du site

Le CET de Boghni dispose de plusieurs moyens techniques destinés à assurer l'exploitation optimale du site et la gestion quotidienne des déchets. Ces équipements mécaniques permettent d'effectuer les différentes opérations de collecte, de transport, de nivellement et d'enfouissement des déchets :

- ✓ **Pelle à chenilles CATERPILLAR:** cet engin robuste sert à enlever les broussailles, déplacer les débris et niveler le sol dans les différentes zones de travail (Figure 11).
- ✓ **Tractopelle :** Machine polyvalente capable de charger les déchets, creuser des petites tranchées, déplacer des matériaux et préparer les surfaces où les déchets seront déposés (Figure 12).

- ✓ **Camion à benne basculante (7,5 tonnes) et tracteur à benne basculante (2,5 tonnes) :** Ces véhicules sont utilisés pour transporter les déchets ainsi que les matériaux de couverture, pour les étaler dans les casiers d'enfouissement.



Figure 11 : Pelle à chenilles

CATERPILLAR (Originale, 2025)



Figure 12: Tractopelle (Originale, 2025)

I.4.5. Bassin de rétention des lixiviats

Le CET de Boghni est équipé d'un bassin de rétention des lixiviats (Figure 13), destiné à collecter et stocker les effluents générés par l'infiltration de l'eau à travers les déchets enfouis. Ce bassin constitue la première étape du processus de traitement. Il est conçu avec une membrane d'étanchéité pour éviter toute infiltration dans le sol, et il permet de regrouper les lixiviats bruts avant leur transfert vers le bassin d'homogénéisation puis vers la station de traitement.



Figure 13 : Bassin de rétention des lixiviats (Original, 2025)

I.4.6. Bassin d'homogénéisation des lixiviats

Les lixiviats collectés dans le bassin de rétention sont ensuite transférés vers un bassin d'homogénéisation d'une capacité utile de 600 m³ (Figure 14). Ce bassin joue un rôle crucial dans la stabilisation des caractéristiques physico-chimiques des lixiviats, telles que le pH, la charge organique, la conductivité et la teneur en matières dissoutes, avant leur traitement par osmose inverse. Ce bassin est équipé :

- D'un système d'agitation mécanique permettant de maintenir un mélange homogène ;
- et d'une pompe de transfert assurant l'acheminement continu des lixiviats vers l'unité de traitement (Figure 15).



Figure 14 : Bassin d'homogénéisation
(Original, 2025)



Figure 15 : Système de pompage des
lixiviats) vers la station de traitement
(Original, 2025)

I.4.7. Station de traitement des lixiviats

Mise en service en 2024 après sa construction en 2019, la station de traitement des lixiviats du CET de Boghni est dimensionnée pour un débit journalier de 110 m³. Elle repose sur un procédé de traitement en plusieurs étapes, dont l'osmose inverse constitue l'étape centrale (Figure 16). Cette technologie permet de séparer efficacement l'eau purifiée (perméat) des polluants concentrés (concentrât), assurant ainsi une gestion optimisée et respectueuse de l'environnement des lixiviats générés par le casier d'enfouissement.



Figure 16 : Station de traitement des lixiviats par osmose inverse (Original, 2025).

I.4.8. Bassin de stockage du concentrât

Le bassin de stockage du concentrât est une cuve destinée à recueillir et à stocker temporairement la phase résiduelle (le concentrât) issue du traitement des lixiviats par osmose inverse. Ce concentrât est fortement chargé en polluants (matières organiques, sels dissous, métaux lourds, etc.) qui ont été retenus par les membranes.

Le bassin a une capacité de 300 m³ et est équipé d'une pompe permettant de transférer le concentrât vers le casier d'enfouissement (Figure 17).



Figure 17 : Bassin de stockage du concentrât (Originale, 2025)

I.4.9. Groupe électrogène

Un groupe électrogène d'une puissance de 250 kVA est installé afin de garantir une alimentation électrique ininterrompue du système en cas de panne ou de coupure de courant (Figure 18).



Figure 18 : Abri groupe électrogène (Originale, 2025)

I.4.10. Bureau technique et laboratoire de contrôle

Le bureau technique et le laboratoire de contrôle assurent le suivi de la station de traitement, la surveillance des performances du système, le contrôle des paramètres physico-chimiques des lixiviats, ainsi que la traçabilité des résultats (Figure 19).



Figure 19 : Bureau technique et laboratoire de contrôle (Originale, 2025)

I.5. Quantités de déchets admises au CET de Boghni

Depuis sa mise en service en 2015 jusqu'à 2024, le CET de Boghni a réceptionné un volume total de 193 957,59 tonnes de déchets ménagers et assimilés. Cette progression témoigne à la fois de l'amélioration continue du système de collecte dans les communes desservies et de la croissance démographique dans la région (EPWG-CET-TO, 2025).

La quantité annuelle admise a connu une nette augmentation, passant de 4 413,97 tonnes en 2016 à 28 063,92 tonnes en 2024, illustrant une sollicitation croissante des capacités de traitement du CET.

En 2024, le casier principal affichait un taux de remplissage de 60,95%, ne laissant qu'une capacité résiduelle de 39,05%. Cette situation met en lumière la nécessité urgente de planifier des solutions d'extension ou d'optimisation afin d'éviter une saturation prochaine du site (Tableau 4).

Le tableau suivant présente les quantités annuelles de déchets ménagers et assimilés admis au CET de Boghni entre 2016 et 2024.

Tableau 04 : Évolution annuelle des quantités de déchets admis au CET de Boghni (2016–2024) (EPWG-CET-TO, 2025)

Année	Quantité de déchets admis (tonnes)
2016	4 413,97
2017	21 258,70
2018	24 395,98
2019	23 852,18
2020	22 560,16
2021	21 463,24
2022	21 503,78
2023	26 445,66
2024	28 063,92
Total	193957,59

I.6. Origine des déchets reçus au CET de Boghni

Le CET de Boghni accueille les déchets provenant de dix communes ainsi que de plusieurs opérateurs économiques locaux. Chaque entité contribue à la quantité totale de déchets traités, selon sa population, son niveau d'urbanisation et l'organisation de son système de collecte (Tableau 5) (EPWG-CET-TO, 2025).

Le tableau ci-dessous présente la répartition, en pourcentage, des déchets reçus au CET selon leur origine :

Tableau 05 : Répartition des déchets reçus au CET de Boghni par origine (EPWG-CET-TO, 2025)

Origine	Type	Pourcentage (%)
Tizi N'Tleta	Commune	27,64%
Boghni	Commune	12,48 %
Aït Bouaddou	Commune	12,24 %
APC Ouadhia	Commune	9,39 %
Mechtras	Commune	9,20 %
Agouni Gueghrane	Commune	7,07 %
Bounouh	Commune	6,54 %
Souk El Thenine	Commune	6,24 %
Maatkas	Commune	3,98 %
Assi Youcef	Commune	1,99 %
Opérateurs économiques	Acteurs privés	4,24%

I.7. Autres paramètres du site d'étude

I.7.1. Climat

Le climat résulte de l'interaction de plusieurs facteurs fondamentaux, notamment la température, les précipitations, l'humidité atmosphérique, la lumière et le vent. Ces éléments conditionnent le fonctionnement des écosystèmes et influencent fortement la répartition de la végétation.

Selon Quézel et Médail (2003), l'Algérie appartient à une aire isoclimatique méditerranéenne, caractérisée par des hivers doux et humides et des étés chauds et secs. Cette configuration induit une période de sécheresse marquée en été, entraînant un stress hydrique plus ou moins prolongé sur la végétation.

L'ensemble des moyennes mensuelles des données climatiques traitées dans cette partie sont représentées par l'Annexe I (ONM, 2025).

I.7.1.1. Température

La température est un facteur climatique fondamental, agissant directement sur les écosystèmes, les cycles biologiques et la dynamique des sols (Dajoz, 2006).

À Boghni, les données météorologiques enregistrées entre 2015 et 2024 (Figure 20) révèlent une variation saisonnière marquée, typique du climat méditerranéen. Les températures moyennes mensuelles varient d'une saison à une autre, avec un minimum de 10,88 °C en janvier et un maximum de 29,16 °C en juillet, soit une amplitude thermique annuelle de 18,28 °C.

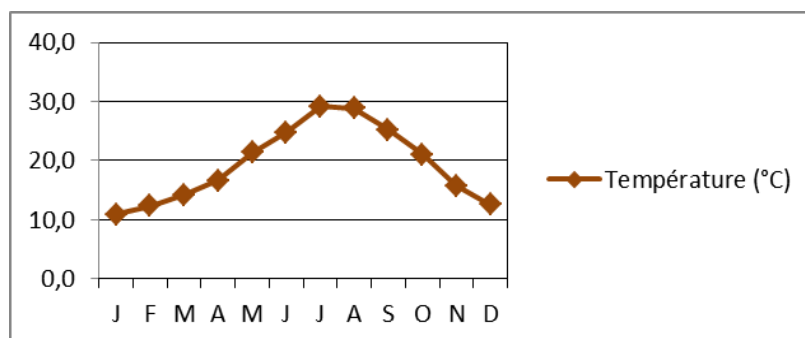


Figure 20: Évolution des moyennes mensuelles des températures à Boghni (2015 à 2024)

I.7.1.2. Précipitations

Les précipitations désignent l'ensemble de l'eau provenant de l'atmosphère qui atteint le sol sous forme liquide (pluie) ou solide (neige, grêle). Elle joue un rôle essentiel dans le cycle de l'eau et conditionne le fonctionnement des écosystèmes terrestres (Pesson, 1979).

Les précipitations moyennes mensuelles de la région de Boghni sur une période de 10 ans (2015–2024) sont illustrées par la (Figure 21) ci-dessous.

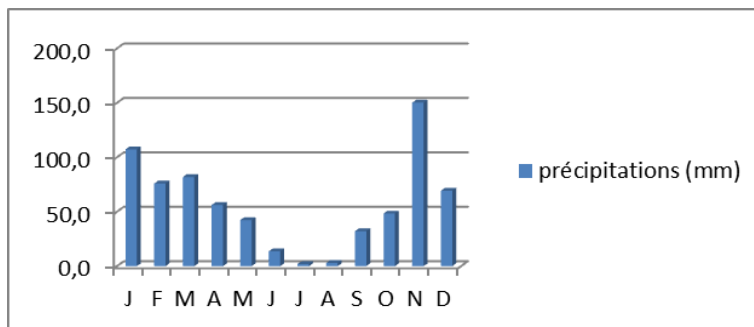


Figure 21: Variation des moyennes mensuelles des précipitations à Boghni (2015 à 2024)

La (Figure 21) montre une variation saisonnière des précipitations marquée à Boghni entre 2015 et 2024. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées en novembre (150,2 mm), tandis que l'été est nettement plus sec, avec un minimum en juillet (1,9 mm). Cette répartition reflète un climat méditerranéen, caractérisé par des hivers pluvieux et des étés secs, ce qui influence fortement l'évaporation et la disponibilité en eau dans la région.

I.7.1.3. Diagramme ombrothermique

D'après la (Figure 22), on constate que la région est caractérisée par une saison sèche qui s'étend de juin à septembre, tandis que la saison humide dure huit mois, d'octobre à mai.

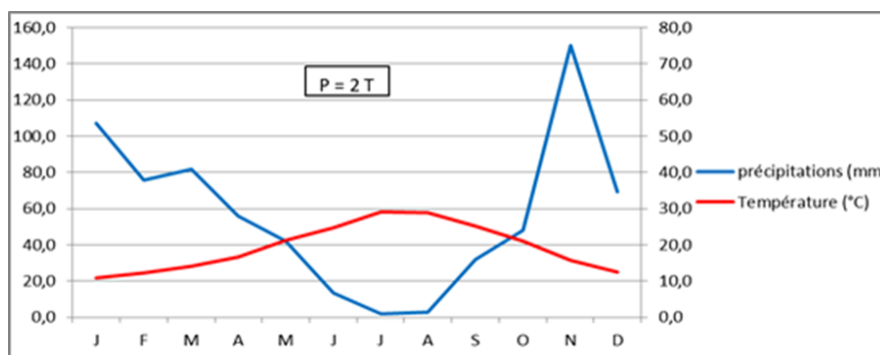


Figure 22: Diagramme ombrothermique de Boghni de 2015 à 2024

I.7.1.4. Humidité

L'humidité est un paramètre climatique essentiel, étroitement lié à la température de l'air et à la quantité de vapeur d'eau qu'il contient (Frydrych *et al.*, 1993). Elle joue un rôle important dans l'écologie des milieux naturels, en influençant la répartition et la densité des espèces, notamment en cas de conditions défavorables (Dajoz, 2006).

Dans la région de Boghni, les données enregistrées sur une période de 10 ans (2015–2024) révèlent une variation saisonnière nette de l'humidité relative (Figure 23).

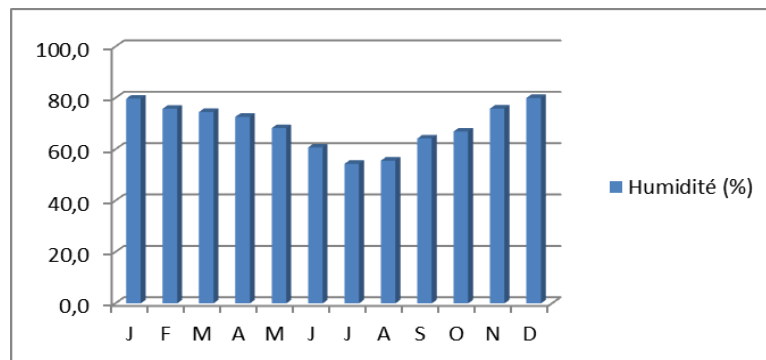


Figure 23: Évolution des moyennes mensuelles de l'humidité relative (%) à Boghni (2015–2024)

Les valeurs les plus élevées sont observées durant l'hiver, avec un maximum de 80% en décembre, tandis que les plus faibles sont enregistrées en été, atteignant un minimum de 54,4 % en juillet. Cette tendance reflète l'influence de la température sur la capacité de l'air à contenir la vapeur d'eau. Ces fluctuations saisonnières ont un effet direct sur l'évaporation, ce qui peut impacter la gestion des lixiviats dans les installations du CET de Boghni.

I.7.1.5. Évaporation

L'évaporation est le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux sous l'effet de la chaleur solaire. Elle joue un rôle clé dans le cycle de l'eau, influençant les ressources en eau et les écosystèmes (Chow *et al.*, 1988).

L'évolution de l'évaporation moyenne mensuelle enregistrée dans la région de Boghni sur la période (2015–2024) est représentée par la (Figure 24).

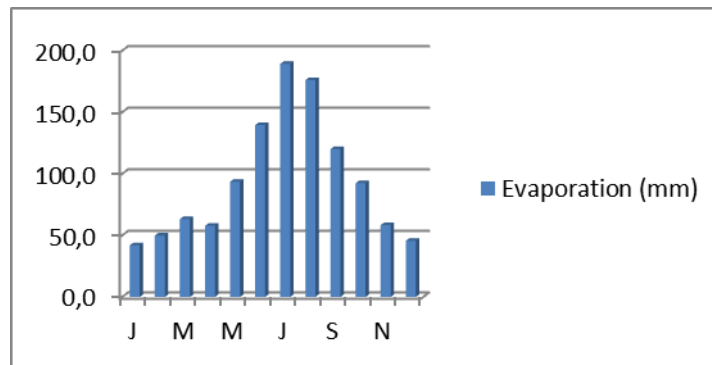


Figure 24: Variation des moyennes mensuelles de l'évaporation à Boghni (2015-2024)

D'après la (Figure 24), l'évaporation atteint son maximum en été, notamment en juillet (189,3 mm), en raison des températures élevées et de l'ensoleillement intense. En revanche, les valeurs les plus basses sont enregistrées en hiver, comme en janvier (41,9 mm) et décembre (45,5 mm), sous l'effet de températures plus fraîches et d'une humidité plus élevée.

I.8. Relief

Située en Grande Kabylie, au cœur de l'Atlas Tellien, la zone d'étude présente un relief montagneux marqué. Elle est limitée par, la Méditerranée au nord, la chaîne du Djurdjura à l'est et au sud, et l'Oued Isser à l'ouest.

Le territoire se divise en trois grandes unités :

- La chaîne côtière au nord, servant de barrière naturelle contre les vents marins ;
- Le massif central kabyle, cœur montagneux de la région ;
- Le massif du Djurdjura au sud, dont le sommet Lalla Khedidja culmine à 2308 mètres.

Entre ces massifs, vallées et plaines, comme la plaine de l'Oued Isser, apportent une certaine diversité au paysage (Direction de l'Environnement Audit, 2025).

I.9. Géologie

La zone d'étude est géologiquement diverse, comprenant :

- Des formations alluvionnaires (sable, gravier, argile) le long des terrasses de l'oued Sébaou,

- Des formations de socle kabyle, composées de roches magmatiques et métamorphiques,
- Des formations sédimentaires, notamment des marnes imperméables et des grès.

À l'exception de la couche littorale, la zone appartient au bassin versant de de l'oued Sébaou. (Direction l'Environnement Audit, 2025).

Matériel et méthodes

Cadre d'étude

Cette étude vise à analyser les caractéristiques physico-chimiques des lixiviats produits par le CET de Boghni (Tizi-Ouzou), avant et après traitement par osmose inverse. Ces lixiviats, issus de la percolation des eaux à travers les déchets, présentent une forte charge polluante pouvant impacter l'environnement.

Les analyses ont été réalisées dans différents laboratoires à savoir :

- ✓ Le laboratoire de traitement des eaux, relevant du département d'Agronomie (FSBSA), pour la mesure de la demande biologique en oxygène (DBO₅) ;
- ✓ Le laboratoire de pédagogie de chimie de l'environnement (Faculté des Sciences), pour l'analyse de la demande chimique en oxygène (DCO) ;
- ✓ Le laboratoire de la SEAAL de Tizi-Ouzou, implanté au sein de la station de traitement d'eau potable du barrage Taksebt, pour la réalisation des analyses des ions majeurs (cations et anions).
- ✓ Le dosage des ETM a été réalisé au sein du laboratoire du plateau technique d'analyses physicochimiques de Bab Ezzouar (Alger).

L'objectif de cette étude est de caractériser le lixiviat sur le plan physico- chimique, d'évaluer les risques environnementaux associés à sa composition, et de juger l'efficacité du traitement par osmose inverse. Les résultats obtenus permettront de formuler des recommandations en vue d'une meilleure gestion de ces effluents et de la réduction de leur impact environnemental.

II. Matériel et méthodes**II.1. Échantillonnage**

Le 22 avril 2025, des prélèvements de lixiviat ont été réalisés au niveau du CET de Boghni (Tizi-Ouzou). Trois types d'échantillons ont été collectés : le lixiviat brut, le perméat (lixiviat traité) et le concentrât (résidu du traitement). Pour garantir la représentativité des échantillons et éviter toute contamination, des flacons stériles ont été utilisés, conformément aux protocoles d'échantillonnage standardisés. Les échantillons ont été immédiatement placés dans une glacière isotherme, puis transportés au laboratoire. À leur arrivée, ils ont été conservés à 4 °C afin de préserver leurs caractéristiques chimiques et biologiques jusqu'à l'analyse. Certains échantillons ont été acidifiés à l'acide nitrique pour l'analyse des métaux.

II.2. Matériel

L'ensemble des équipements, appareils, verreries ainsi que les réactifs chimiques utilisés dans le cadre de cette étude sont spécifiés de manière détaillée dans l'Annexe II.

II.3. Méthodes d'analyses des paramètres physico-chimiques des lixiviats

Les lixiviats produits par le CET de Boghni présentent un fort potentiel de contamination pour l'environnement. Afin d'évaluer leur impact, une importante analyse physico-chimique a été réalisée sur les échantillons prélevés.

Les paramètres étudiés sont les suivants :

- ✓ **Paramètres physiques:** température, conductivité électrique, pH, couleur, turbidité et oxygène dissous ;
- ✓ **Paramètres organiques :** Demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO₅) et demande chimique en oxygène (DCO) ;
- ✓ **Ions majeurs (anions et cations) :** chlorures (Cl⁻), sulfates (SO₄²⁻), nitrates (NO₃⁻), nitrites (NO₂⁻), orthophosphates (PO₄³⁻), magnésium (Mg²⁺), calcium (Ca²⁺), ammonium (NH₄⁺) et potassium (K⁺) ;
- ✓ **Paramètres d'alcalinité et de dureté :** titres alcalimétriques complet (TAC), titre alcalimétrique (TA), titre hydrotimétrique (TH) ;
- ✓ **Éléments traces métalliques (ETM) :** cadmium (Cd) et nickel (Ni).

II.3.1. Paramètres physiques

II.3.1.1. Température

La température est un facteur écologique essentiel qui influence les réactions chimiques, biologiques et la solubilité des substances dans le lixiviat (Gaujous, 1993). Elle a été mesurée sur le terrain à l'aide d'un thermomètre. Les résultats sont exprimés en °C.

II.3.1.2. Conductivité électrique

La conductivité électrique exprime la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique, en lien direct avec sa teneur en ions dissous. Elle permet ainsi d'estimer le degré de minéralisation d'un liquide. Plus la concentration en sels dissous est élevée, plus la conductivité l'est également (Brémaud *et al.*, 2006).

La mesure de la conductivité du lixiviat a été réalisée au laboratoire à l'aide d'un conductimètre (Figure 25). La procédure adoptée est la suivante :

- ✓ Placer l'échantillon dans un bécher propre ;
- ✓ immerger complètement l'électrode dans la solution ;
- ✓ attendre la stabilisation de la lecture.

Les résultats sont exprimés en milli siemens par centimètre (mS/cm).



Figure 25 : Mesure de la conductivité du lixiviat à l'aide d'un conductimètre (Originale, 2025)

II.3.1.3. Potentiel Hydrogène (pH)

Le pH est un indicateur de l'acidité ou de la basicité d'une solution, lié à la concentration en ions hydrogène (H^+). Sa mesure a été effectuée sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre (Figure 26), selon les étapes suivantes :

- ✓ Prélever un échantillon de lixiviat dans un récipient ;
- ✓ immerger intégralement l'électrode du pH-mètre dans l'échantillon ;
- ✓ attendre la stabilisation de la lecture avant de noter la valeur du pH.



Figure 26 : Mesure du pH sur site à l'aide d'un pH-mètre (Originale, 2025)

II.3.1.4. Couleur

L'évaluation de la couleur des lixiviats a été réalisée sur le terrain par simple observation visuelle, à la fois avant et après traitement. En l'absence d'analyses spectrophotométriques en laboratoire, cette appréciation repose uniquement sur la comparaison des teintes observées à l'œil nu.

II.3.1.5. Turbidité

La turbidité de l'eau est un indicateur de la concentration en particules en suspension, telles que le limon, l'argile, les micro-organismes ou les algues, qui altèrent la clarté du liquide.

La mesure de la turbidité a été réalisée à l'aide d'un turbidimètre (Figure 27), selon les étapes suivantes :

- ✓ Verser l'échantillon dans une fiole propre de 25 mL ;
- ✓ essuyer soigneusement la fiole avec un papier ;
- ✓ placer la fiole dans l'appareil ;
- ✓ effectuer la lecture après stabilisation de la valeur affichée.

Les résultats sont exprimés en unités NTU (Nephelometric Turbidity Units).



Figure 27 : Turbidimètre utilisé pour la mesure de la turbidité (Originale, 2025)

II.3.1.6. Oxygène dissous

L'oxygène dissous joue un rôle essentiel dans les processus biologiques aérobies responsables de la dégradation des polluants organiques présents dans les eaux usées et les lixiviats (Boulay & Dufresne, 2010).

La concentration en oxygène dissous a été mesurée sur site à l'aide d'un oxymètre (Figure 28), selon la procédure suivante :

- ✓ Un échantillon homogène de lixiviat a été prélevé dans un récipient de 10 litres ;
- ✓ la sonde de l'oxymètre a été immergée dans l'échantillon ;
- ✓ la lecture a été notée après stabilisation de la valeur affichée.



Figure 28 : Oxymètre utilisé pour la mesure de l'oxygène dissous (Originale, 2025).

II.3.2. Paramètres organiques

II.3.2.1. Demande biologique en oxygène (DBO₅)

La DBO₅ correspond à la quantité d'oxygène dissous consommée par les micro-organismes pour dégrader la matière organique biodégradable contenue dans un échantillon, sur une période de 5 jours à une température contrôlée de 20 °C.

Dans ce contexte, des analyses de la DBO_5 ont été réalisées sur des échantillons de lixiviats bruts et perméat, dans le but d'évaluer l'efficacité du procédé de traitement appliqué (Figure 29). Concernant le concentrât, la DBO_5 n'a pas été mesurée vu le manque de moyen au niveau du laboratoire où elle a été mesurée. Les mesures ont été faites dans les 24 heures suivant l'échantillonnage. La procédure expérimentale adoptée est la suivante :

- ✓ Verser 97 mL de lixiviat dans des flacons munis d'un barreau magnétique ;
- ✓ ajouter une pincée d'allyle-thiourée, puis déposer deux pastilles d'hydroxyde de potassium dans chaque bouchon intérieur à l'aide de pinces ;
- ✓ insérer un panneau aimanté dans chaque flacon pour assurer un mélange homogène ;
- ✓ fermer les flacons sans les visser hermétiquement puis poser le flacon sur un incubateur à 20 °C à l'obscurité pendant 5 jours.



Figure 29 : Illustration de la mesure de la DBO_5 (Originale, 2025)

II.3.2.2. Demande chimique en oxygène (DCO)

La DCO permet d'estimer la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation chimique de la matière organique, qu'elle soit biodégradable ou non, présente dans un échantillon. Elle constitue un indicateur global de la pollution organique et s'exprime en $mg O_2/L$.

Dans cette étude, des analyses de DCO ont été réalisées sur des échantillons de lixiviat brut, perméat, ainsi que sur le concentrât, afin de quantifier la charge organique totale (Figure 30).

La procédure expérimentale appliquée est la suivante :

- ✓ Verser 500 mL de lixiviat dans une fiole jaugée de 1000 mL ;
- ✓ compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge afin d'obtenir une dilution homogène ;
- ✓ prélever différents volumes croissants (de 1 mL à 6 mL) du lixiviat dilué dans des fioles de 100 mL ;
- ✓ compléter chaque fiole avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge ;
- ✓ introduire 2,5 mL de chaque échantillon dilué dans des tubes à DCO ;
- ✓ ajouter successivement 1,5 mL de réactif de digestion, puis 3,5 mL de réactif acide ;
- ✓ placer les tubes dans un DCO-mètre et les chauffer pendant 120 minutes à 150 °C ;
- ✓ laisser refroidir les tubes pendant environ 15 minutes ;
- ✓ effectuer la lecture des résultats à l'aide d'un spectrophotomètre réglé à une longueur d'onde de 600 nm (Figure 31).

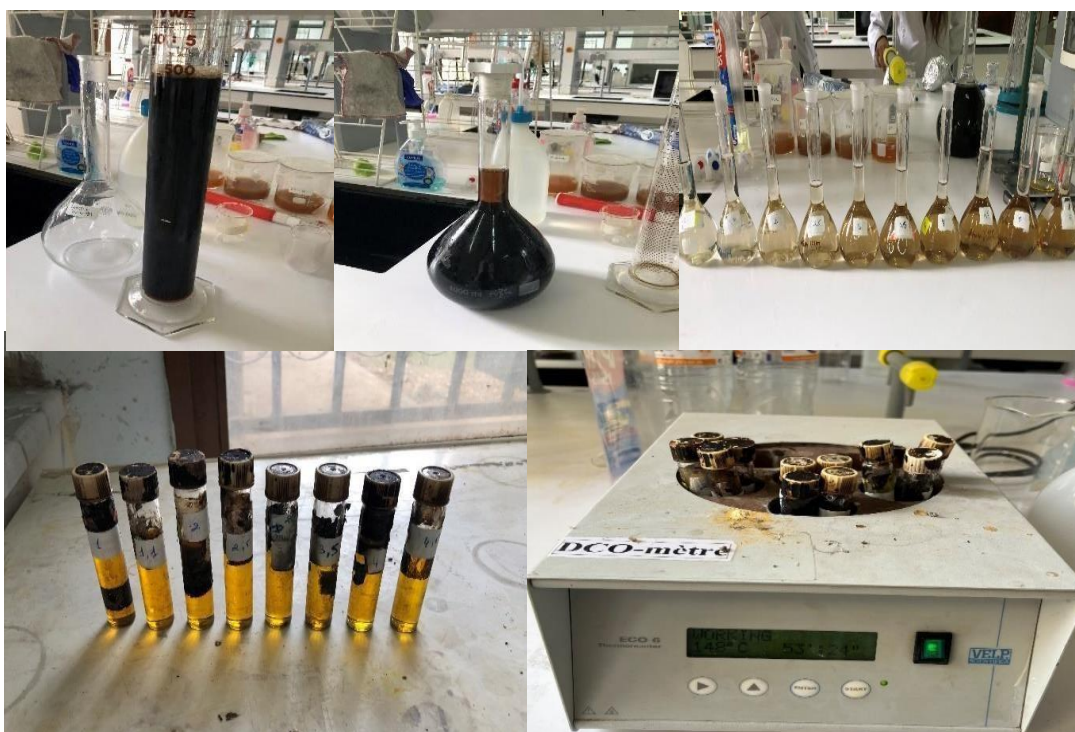


Figure 30 : Illustration de la préparation des échantillons pour l'analyse de la DCO (Originale, 2025)

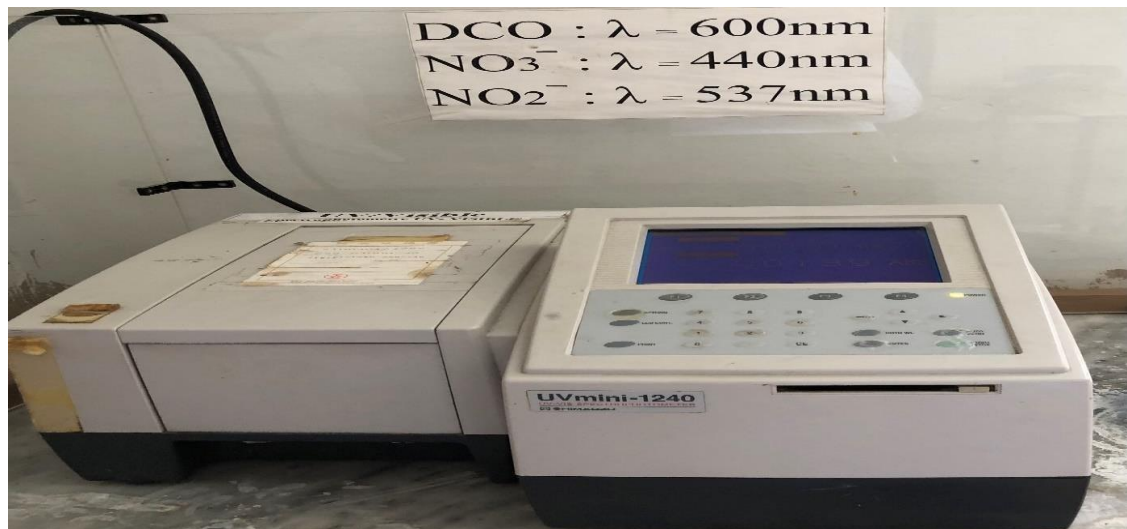


Figure 31 : Spectrophotomètre du type UV mini-1240 (Originale, 2025)

II.3.3. Ions majeurs

II.3.3.1. Anions

II.3.3.1.1. Nitrites (NO₂⁻)

Le dosage des nitrites a été réalisé par colorimétrie. La concentration est déterminée en fonction de l'intensité de la couleur développée après un temps de réaction de 20 minutes, offrant une bonne précision.

Le mode opératoire est le suivant :

- ✓ Trois fioles jaugées propres ont été utilisées : une pour le lixiviat brut, une pour le lixiviat traité, et une pour le concentrât.
- ✓ dans chaque fiole, 40 mL d'échantillon ont été versés.
- ✓ un millilitre de réactif coloré spécifique aux nitrites a été ajouté dans chaque fiole.
- ✓ le volume a été ajusté avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.
- ✓ les fioles ont été bouchées et agitées doucement par retournement.
- ✓ un temps de contact de 20 minutes a été respecté avant la lecture.
- ✓ la mesure de la teneur en nitrites a été effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre.
- ✓ les résultats sont exprimés en mg/L de NO₂⁻.

II.3.3.1. 2. Nitrates (NO_3^-)

La détermination des nitrates a été réalisée par colorimétrie. En présence de salicylate de sodium, les nitrates forment un composé jaune (para-nitrosalicylate de sodium) mesurable par spectrophotométrie.

La procédure expérimentale adoptée est la suivante :

- ✓ Trois cellules ont été préparées : la première contenant 15 mL de lixiviat brut, la deuxième 15 mL de lixiviat traité (perméat), et la troisième 15 mL de concentrât.
- ✓ un sachet de réactif Nitriver06 a été ajouté dans chaque cellule, puis le contenu a été homogénéisé soigneusement.
- ✓ après un temps de contact de 3 minutes, 5 mL de chaque solution ont été éliminés.
- ✓ le second réactif, Nitriver03, a ensuite été ajouté aux 10 mL restants dans chaque cellule, suivi d'une nouvelle homogénéisation.
- ✓ les mélanges ont été laissés à réagir pendant 18 minutes.
- ✓ à l'issue du temps de réaction, la mesure de la teneur en nitrates a été effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre de type DR6000.
- ✓ les résultats obtenus sont exprimés en mg/L de NO_3^- .

II.3.3.1.3. Chlorures (Cl^-)

Les étapes de l'analyse des chlorures sont détaillées comme suit :

- ✓ Prélever précisément 100 mL de chaque échantillon (lixiviat brut, perméat, concentrât) dans des erlenmeyers séparés. Un quatrième erlenmeyer est utilisé pour l'eau distillée servant de témoin blanc ;
- ✓ ajouter 1 mL de solution de chromate de potassium (K_2CrO_4 à 5 %) dans chaque erlenmeyer en tant qu'indicateur ;
- ✓ emplir une burette avec une solution de nitrate d'argent (AgNO_3) de concentration connue et ajuster le niveau au zéro ;

- ✓ procéder au titrage en ajoutant la solution de nitrate d'argent goutte à goutte tout en agitant constamment, jusqu'à l'apparition d'une coloration rouge brique persistante ;
- ✓ noter avec précision le volume de nitrate d'argent consommé pour chaque échantillon et pour le témoin (Figure 32).
- ✓ la concentration en ions chlorure (Cl^-) est déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$[\text{Cl}^-] = (\text{VS} - \text{VB}) \times \text{C} \times \text{F} \times \text{FC} / \text{VA}$$

Avec :

- **VS** : volume (en mL) de solution de nitrate d'argent utilisé pour le titrage de l'échantillon,
- **VB** : volume (en mL) utilisé pour le titrage du blanc,
- **C** : concentration réelle de la solution de nitrate d'argent (mol/L), généralement corrigée à 0,02 mol/L,
- **F** : facteur de conversion correspondant à la masse molaire du NaCl, soit **35 453 mg/mol**,
- **FC** : facteur correctif lié au volume délivré, de l'ordre de **1,03**,
- **VA** : volume d'échantillon analysé (en mL), en tenant compte des éventuelles dilutions.



Figure 32 : Dosage des chlorures (Originale, 2025).

II.3.3.1. 4. Sulfates (SO_4^{2-})

La détermination des ions sulfates est réalisée par méthode colorimétrique à l'aide du réactif Sulfaver 4, composé de chlorure de baryum et d'un agent de détection. Ce réactif réagit

avec les ions sulfates pour former un complexe coloré, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en sulfates. La mesure est effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre DR6000.

L'analyse a été effectuée selon les étapes suivantes :

- ✓ Prélever 10 mL de l'échantillon (lixiviat brut, perméat, concentrât) dans une cellule de 20 mL ;
- ✓ ajouter le réactif Sulfaver 4 (Figure 33) ;
- ✓ agiter doucement et laisser reposer 5 minutes ;
- ✓ effectuer la lecture à l'aide du spectrophotomètre DR6000.

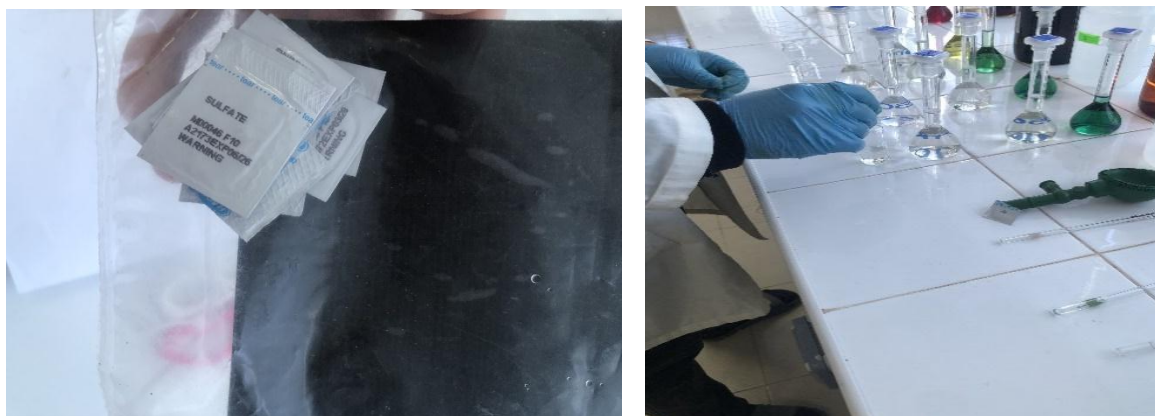


Figure 33 : Dosage des sulfates (Originale, 2025).

II.3.3.1. 5. Orthophosphates (PO_4^{3-})

Les orthophosphates réagissent en milieu acide avec l'heptamolybdate d'ammonium pour former un complexe de molybdate de phosphate, dont la coloration bleue est intensifiée par l'ajout d'acide ascorbique (Figure 34). L'absorbance est mesurée par spectrophotométrie.

Les manipulations ont été réalisées comme suit :

- ✓ Verser 40 mL de chaque échantillon (et du blanc) dans des fioles jaugées de 50 mL ;
- ✓ ajouter 1 mL d'acide ascorbique, suivi de 2 mL d'heptamolybdate d'ammonium ;
- ✓ compléter au trait de jauge avec de l'eau distillée ;
- ✓ laisser réagir pendant 30 minutes ;
- ✓ Lire l'absorbance au spectrophotomètre DR6000.

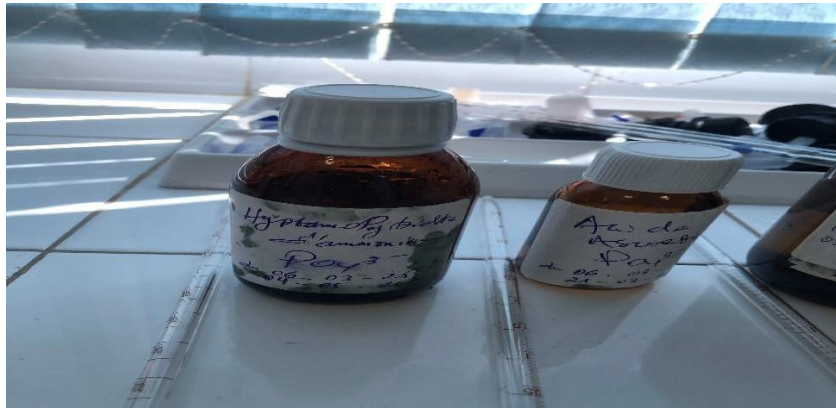


Figure 34 : Réactifs utilisés pour le dosage des ortho phosphates (Originale, 2025)

II.2.2.3.6 Carbonates (CO_3^{2-})

Pour nos échantillons, l'analyse des carbonates s'effectue via un protocole de titrage précis, garantissant une quantification fiable de leur concentration.

Expression de résultat :

$$(V1 \times N \times 1000) / V \times M$$

Avec :

- **V1** : Volume d'acide titrant utilisé (en mL), indiquant la quantité de réactif nécessaire.
- **N** : Normalité de l'acide titrant (en eq/L), représentant sa concentration réactive.
- **1000** : Facteur de conversion (sans unité) pour ajuster les unités vers, par exemple, le mg/L .
- **V** : Volume de l'échantillon prélevé (en mL), la quantité initiale analysée.
- **M** : Poids équivalent de la substance (en mg/eq), convertissant les équivalents en masse mesurable.

Les étapes de l'analyse sont les suivantes :

- ✓ Versez 100 mL de chaque échantillon (lixiviat brut, perméat, concentrat) dans des fioles ;
- ✓ ajoutez quelques gouttes d'indicateur phénolphtaléine à chaque échantillon ;

- ✓ ajoutez quelques gouttes d'indicateur rouge de méthyle dans chacun des mêmes échantillons ;
- ✓ titrez avec de l'acide sulfurique (H₂SO₄) jusqu'à la disparition complète de la couleur rose ;
- ✓ notez le volume utilisé.

II.2.2.3.7 Bicarbonates (HCO₃⁻)

L'analyse des bicarbonates dans nos échantillons est effectuée par un titrage en deux étapes, permettant de quantifier leur présence de manière précise.

Expression de résultat :

$$(V1 \times N \times 1000) / V \times M$$

Avec :

- **V1** : Volume d'acide titrant utilisé (en mL), indiquant la quantité de réactif nécessaire.
- **N** : Normalité de l'acide titrant (en éq/L), représentant sa concentration réactive.
- **1000** : Facteur de conversion (sans unité) pour ajuster les unités vers, par exemple, le mg/L.
- **V** : Volume de l'échantillon prélevé (en mL), la quantité initiale analysée.
- **M** : Poids équivalent de la substance (en mg/éq), convertissant les équivalents en masse mesurable.

Le processus d'analyse a comporté les étapes suivantes :

- ✓ Versez 100 mL de chaque échantillon dans des fioles séparées ;
- ✓ ajoutez quelques gouttes d'indicateur phénolphtaléine ;
- ✓ titrez avec de l'acide sulfurique (H₂SO₄) jusqu'à la disparition de la couleur rose;
- ✓ notez le volume utilisé (V1) ;

- ✓ ajoutez ensuite quelques gouttes d'indicateur rouge de méthyle dans le même échantillon ;
- ✓ continuez à titrer avec H₂SO₄ jusqu'à ce que la couleur passe du jaune à l'orange-rouge; notez le volume total d'acide utilisé depuis le début (V₂).

II.3.3.2. Cations

II.3.3.2.1. Calcium (Ca²⁺)

Le dosage du calcium est réalisé à l'aide d'une solution d'EDTA en milieu alcalin (pH 12 à 13), en présence de Murexide comme indicateur (Figure 35). Le changement de couleur du rouge au violet marque la fin de la complexation du calcium (Rodier, 1996).

Les opérations ont été menées de la manière suivante :

- ✓ Prélever 50 mL d'échantillon dans un erlenmeyer de 250 mL ;
- ✓ ajouter 2 mL de NaOH, puis quelques gouttes de Murexide ;
- ✓ titrer avec l'EDTA jusqu'au virage violet ;
- ✓ noter le volume d'EDTA utilisé ;

Expression des résultats :

$$[\text{Ca}^{2+}] = [(C1 \times V1 \times A) / V0] \times FC \times 1000 \times F$$

Avec :

- **C1** : La concentration de la solution d'EDTA, qui est de 0,01 ml.
- **V1** : Le volume de solution d'EDTA (en ml) utilisé pour le titrage.
- **A** : La masse molaire du calcium, soit 40,08 g/mol.
- **V0** : Le volume de l'échantillon (en ml) prélevé pour l'analyse.
- **FC** : Le facteur de correction du titre.
- **F** : Le facteur de dilution, si l'échantillon a été dilué avant l'analyse.



Figure 35 : Dosage du calcium (Originale 2025)

II.3.3.2.2. Magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium est un minéral essentiel intervenant dans plus de 300 réactions enzymatiques, notamment dans la production d'énergie et la fonction musculaire (Gröber *et al.*, 2015).

La méthode d'analyse appliquée pour chacun des échantillons (lixiviât brut, perméat et concentrât) comprend les étapes suivantes :

- ✓ Prélever 100 mL de l'échantillon et le verser dans une fiole ;
- ✓ ajouter 1 mL de NH_4OH ;
- ✓ introduire 2 à 3 gouttes de l'indicateur Noir Ériochrome T. La solution prend alors une teinte rouge-vin ;
- ✓ effectuer le titrage à l'aide d'une solution d'EDTA jusqu'au virage au bleu ;
- ✓ relever avec précision le volume d'EDTA utilisé ;

La concentration totale en ions magnésium, exprimée en milligrammes par litre (mg/L), se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$[Mg^{2+}] = [(C1 \times (V2 - V1) \times A' / V0) \times Fc \times 1000 \times F]$$

Avec :

- **Mg²⁺** : représente la teneur en magnésium, exprimée en milligrammes par litre (mg/L).
- **V₂** : correspond au volume d'EDTA (en millilitres) utilisé lors du dosage de l'échantillon pour déterminer le Titre Hydrométrique (TH).
- **V₁** : représente le volume d'EDTA (en millilitres) utilisé après le dosage de l'échantillon pour déterminer la concentration en calcium.
- **A'** : est la masse molaire du magnésium, qui est de 24,31 grammes par mole (g/mol).
- **V₀** : indique le volume de l'échantillon (en millilitres) prélevé pour l'analyse, soit 50 mL.
- **C₁** : est la concentration de la solution d'EDTA.
- **FC** : représente le facteur de correction de l'EDTA.
- **F** : est le facteur de dilution, si l'échantillon a été dilué.

II.3.3.2.3. Ammonium (NH₄⁺)

L'ammoniac (présent sous forme d'ion ammonium dans les conditions physiologiques) constitue l'une des principales sources d'azote pour la biosynthèse des acides aminés cellulaires. Il est continuellement produit chez les organismes vivants par divers processus biochimiques. Toutefois, son accumulation dans les cellules peut entraîner des lésions tissulaires (Bittsánszky, A., Pilinszky, K., Gyulai, G., Komives, T., 2015).

Afin de doser l'ammonium dans les différents échantillons (lixiviât brut, perméat et concentrât), la procédure suivante est appliquée :

- ✓ Verser 40 mL de l'échantillon dans une fiole de 50 mL ;
- ✓ ajouter 4 mL de réactif coloré NH₄⁺ ;
- ✓ ajouter ensuite 4 mL de dichloroisocyanurate de sodium ;
- ✓ compléter jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée ;

- ✓ agiter, puis laisser reposer la solution pendant 1 heure ;
- ✓ effectuer la lecture à l'aide du spectrophotomètre DR6000 (Figure 36).



Figure 36 : Spectrophotomètre(DR6000) du type UV-Vis (Originale, 2025)

II.3.3.2.4. Potassium (K^+)

L'analyse du potassium dans les échantillons (lixiviat brut, perméat et concentrât) est réalisée selon les étapes suivantes :

- ✓ Prélever 25 mL de l'échantillon ;
- ✓ Ajouter le réactif Potassium 1 (poudre en sachet contenant du tétrasodium EDTA dihydraté) ;
- ✓ Ajouter ensuite le réactif Potassium 2 (formaldéhyde de méthanol) ;
- ✓ Terminer en ajoutant le réactif Potassium 3 (tétraphénylborate de sodium) ;
- ✓ Agiter doucement la solution, puis laisser reposer pendant 3 minutes ;
- ✓ Effectuer la lecture à l'aide du spectrophotomètre DR6000.

II.3.4. Paramètres d'alcalinité et de dureté

II.3.4.1. Titre alcalimétrique complet (TAC)

Le TAC (titre alcalimétrique complet) permet d'évaluer la teneur en sels minéraux dissous dans une solution aqueuse. Il reflète ainsi l'alcalinité, c'est-à-dire la concentration en ions bicarbonate (HCO_3^-) et carbonate (CO_3^{2-}).

Pour cette analyse, on procède comme suit :

- ✓ Verser 100 mL de chaque échantillon (lixiviat brut, perméat, concentrât) dans des erlenmeyers propres ;
- ✓ Ajouter 3 gouttes de rouge de méthyle dans chaque récipient en tant qu'indicateur ;
- ✓ Effectuer le titrage avec de l'acide sulfurique jusqu'à l'apparition d'une teinte rose pâle indiquant le point final de la réaction (Figure 37).

Expression du résultat :

$$\text{TAC} = V_2 \times 5 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

- V_2 : volume d'acide sulfurique (en mL) ajouté depuis la burette.

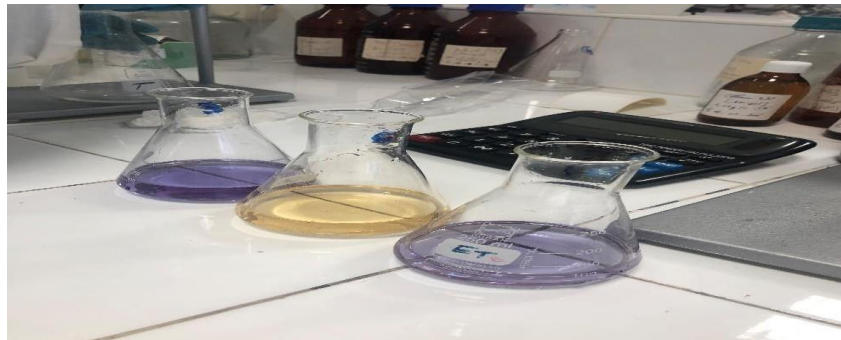


Figure 37 : Dosage du titre alcalimétrique complet TAC (Originale, 2025)

II.3.4.2. Titre alcalimétrique (TA)

Ce titrage a pour objectif de déterminer l'alcalinité liée aux bases fortes, en particulier la teneur en ions carbonate (CO_3^{2-}).

Les étapes de l'analyse sont les suivantes :

- ✓ Prélever 100 mL de chaque échantillon (lixiviat brut, perméat et concentrât) dans un erlenmeyer de 250 mL ;
- ✓ Ajouter 2 à 3 gouttes de phénolphtaléine ;
- ✓ Effectuer un titrage avec de l'acide (HCl ou H_2SO_4) jusqu'à disparition de la couleur rose foncé ;
- ✓ Noter le volume d'acide ajouté (V_1) ;
- ✓ Le résultat est exprimé en degrés français ($^\circ\text{F}$).

Expression du résultat :

$$TA = V_1 \times 10 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

- V_1 : volume d'acide sulfurique (en mL) ajouté depuis la burette.

II.3.4.3. Titre hydrotimétrique (TH)

Le titre hydrotimétrique (TH) mesure la dureté totale de l'eau, c'est-à-dire sa teneur en sels de calcium et de magnésium. Il est exprimé en degrés français ($^\circ\text{F}$), et permet d'évaluer le niveau de calcaire dans l'échantillon (Figure 38).

Expression du résultat :

$$TH = V_2 \times 2 \times FC \times F$$

- V_2 : volume d'EDTA (en mL) utilisé lors du titrage.
- FC : facteur de correction de la solution d'EDTA.
- F : facteur de dilution (le cas échéant).

Le protocole expérimental s'effectue comme suit :

- ✓ Prélever 50 mL de chaque échantillon (lixiviat brut, perméat et concentrât) dans un erlenmeyer ;
- ✓ ajouter 4 mL de solution tampon ;
- ✓ ajouter 2 à 3 gouttes d'indicateur Noir Mordant : une coloration rose apparaît en présence d'ions calcium et magnésium ;
- ✓ titrer avec la solution d'EDTA jusqu'au virage de la couleur rose au bleu ;
- ✓ relever le volume d'EDTA utilisé.

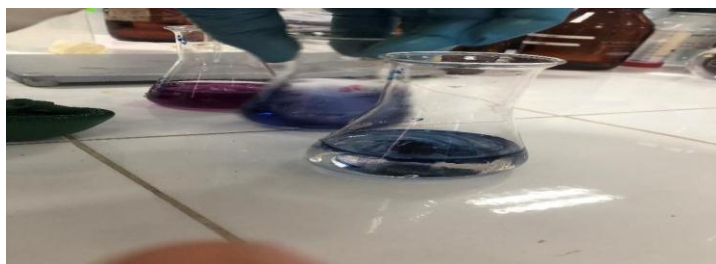


Figure 38 : Dosage de l'indice de dureté TH (Originale, 2025).

II.3.5. Eléments traces métalliques (ETM)

Les seuls éléments à doser par la méthode de spectrophotométrie d'adsorption atomique (SAA) sont le cadmium (Cd) et le nickel (Ni) à cause de l'indisponibilité du matériel nécessaire pour le dosage d'autres éléments métalliques. Le principe du dosage repose sur l'absorption de la lumière par les atomes métalliques après vaporisation de l'échantillon dans une flamme.

Le protocole à suivre pour la préparation et le dosage des ETM est le suivant :

- ✓ Filtrer les lixiviats avec du papier filtre Whatman 540 (0.45 μm) dans des fioles de 50 mL ;
- ✓ Transférer les filtrats dans des flacons en polypropylène décontaminés et les conserver au réfrigérateur jusqu'à analyse ;
- ✓ Préparer une gamme d'étalonnage pour chaque ETM en diluant une solution mère commerciale à 1000 mg/L en solutions filles de 100 mL (ex. : 0,1 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 mg/L) ;
- ✓ Préparer des blancs (sans ETM) pour contrôler les erreurs de manipulation ;
- ✓ Effectuer les mesures avec un appareil type Perkin-Elmer A Analyst 100 (Figure 39).
- ✓ Les résultats s'affichent automatiquement sur ordinateur et enregistrés en mg/L ou $\mu\text{g/L}$, les concentrations étant calculées via une courbe d'étalonnage élaborée au même moment par l'ordinateur.



Figure 39 : Dosage des éléments traces métalliques par spectrométrie d'absorption atomiques (SAA-Four Graphite) (Originale, 2025)

Résultats et discussion

III.1. Résultats des paramètres physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques sont illustrés dans le tableau 6 :

Tableau 6 : Résultats des paramètres physico-chimiques du lixiviat brut, perméat et du concentrât après traitement par osmose inverse au CET de Boghni.

Elément	Paramètre	Lixiviats				
		Lixiviat brut	Perméat	Concentrât	Normes algériennes	
Paramètres physiques	T °C	16,1	18	17,4	30 (*)	
	pH	8,7	6,27	7,4	6,5- 8,5 (*)	
	CE (ms/cm)	10,02	0,034	12,72	-	
	Oxygène dissous (mg/L)	1,07	5,70	-	-	
	Turbidité (UTN)	6,15	2,44	2,13	-	
Paramètres organiques	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	280	20	-	35 (*)	
	DCO (mg O ₂ /L)	5183,54	25,33	8166,99	125 (*)	
	DBO ₅ /DCO (mg O ₂ /L)	0,05	0,80	-	-	
Ions majeurs	Anions	NO ₂ ⁻ (mg/L)	0	0	0	1 (**)
		NO ₃ ⁻ (mg/L)	60	0,11	110	30 (**)
		Cl ⁻ (mg/L)	13140,86	0	17522,85	2000 (**)
		SO ₄ ²⁻ (mg/L)	2000	0	6000	600 (**)
		PO ₄ ³⁻ (mg/L)	40	0	60	5 (**)
		CO ₃ ²⁻ (mg/L)	0	0	0	30 (**)
	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	12200	4,88	14640	-	
	Cations	Ca ²⁺ (mg/L)	4857,70	0,80	6476,93	200 (**)
		Mg ²⁺ (mg/L)	2358,07	0,94	3772,91	150 (**)
		NH ₄ ⁺ (mg/L)	350	1,03	680	30 (*)
K ⁺ (mg/L)		2400	1	2600	50 (**)	
Paramètres d'alcalinité et de dureté	TAC (F°)	5000	0,4	6000	-	
	TA (F°)	0	0	0	-	
	TH (F°)	2178	0,59	3168	-	
Eléments traces métalliques	Cd (mg/L)	0	0	0	0,2 (*)	
	Ni (mg/L)	0,14	0	0,16	3 (*)	

➤ (*) décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006, Journal Officiel de la République Algérienne n°26.

➤ (**) décret exécutif n°90-160 du 10 juillet 1993, Journal Officiel de la République Algérienne, n°41

III.2. Discussions des résultats des paramètres physico-chimiques

III.2.1. Paramètres physiques

L'analyse des paramètres physiques des lixiviats issus du CET de Boghni permet de mieux appréhender leur état de pollution et l'efficacité des traitements appliqués.

III.2.1.1. Température

La température est un facteur clé qui influence directement l'activité microbienne et les processus de dégradation des matières organiques. Dans le cadre de cette étude, les températures mesurées sont de 16,1 °C pour le lixiviat brut, 18 °C pour le perméat et 17,4 °C pour le concentrât. Ces valeurs, proches de la température ambiante, indiquent une faible activité exothermique, suggérant ainsi une activité microbienne modérée. De plus, Ces températures demeurent bien inférieures à la norme algérienne de 30 °C, **comme précisé par le décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006 (JORA, 2006)**, confirmant l'absence de conditions propices à une dégradation thermique excessive (Figure 40).

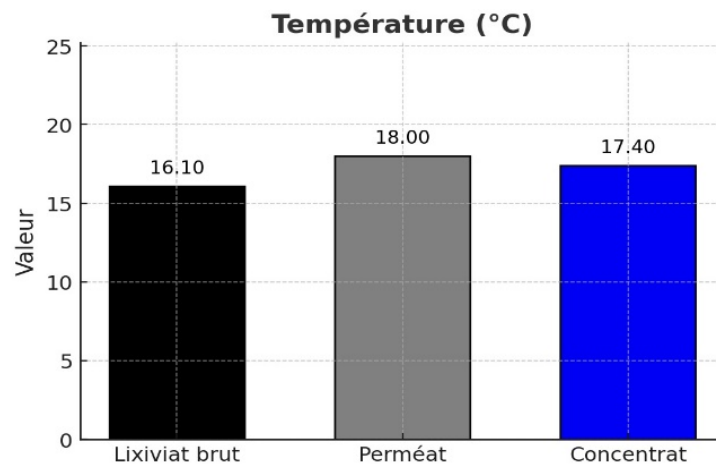


Figure 40 : Variation de la température du lixiviat avant et après traitement.

III.2.1.2. Potentiel hydrique (pH)

Le pH est un paramètre essentiel pour évaluer le stade de dégradation des déchets (Rodier et al., 2009). Les mesures effectuées sur le terrain indiquent un pH de 8,7 pour le lixiviat brut, indiquant une phase méthanogène avancée. Le perméat, avec un pH de 6,27, se situe en phase acidogène, où des acides organiques sont majoritairement produits. Le concentrât affiche un pH de 7,4, ce qui suggère une transition vers la méthanogène (Figure 41).

Par référence à la norme algérienne (JORA, 2006), le pH du perméat est en dessous des limites acceptées (6,5 à 8,5), ce qui pourrait refléter une légère acidification liée au traitement. Par contre, le pH du lixiviat brut est légèrement plus basique que la norme. Ceci est dû probablement à l'âge des lixiviats qui deviennent de plus en plus stables.

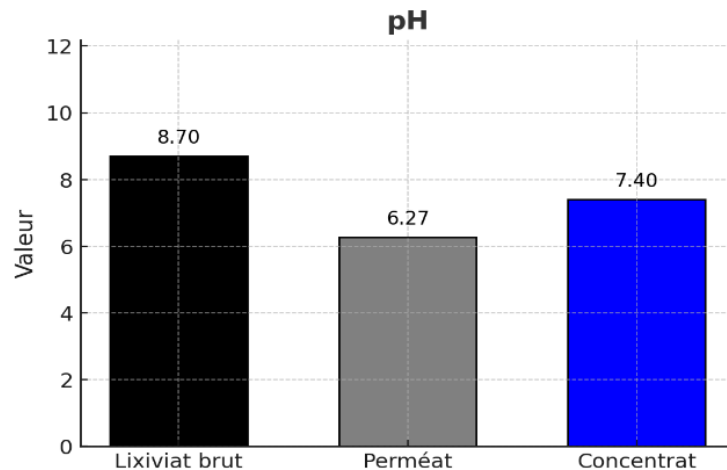


Figure 41 : Variation du pH du lixiviat avant et après traitement

III.2.1.3. Couleur

L'observation visuelle des lixiviats avant et après traitement révèle des différences significatives en termes de couleur. Le lixiviat brut présente une couleur noire, ce qui est le signe d'une forte concentration en matières organiques et en composés humiques, caractéristiques des lixiviats anciens ou mal traités. Après traitement, le perméat devient transparent, traduisant une réduction substantielle de la charge organique. En revanche, le concentrât conserve une teinte noire, ce qui reflète l'accumulation des polluants extraits. Ces résultats corroborent les observations de Renou et al. (2008), qui notent qu'un lixiviat foncé devient plus clair après un traitement efficace, ce qui témoigne d'une amélioration de sa qualité.

III.2.1.4. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) est un indicateur clé de la charge ionique des lixiviats, reflétant la concentration en sels dissous et donc le niveau de pollution minérale. Le lixiviat brut présente une conductivité de 10,02 mS/cm, traduisant une charge ionique importante et une pollution minérale significative. Après traitement, le perméat affiche une conductivité nettement plus faible de 0,034 ms/cm, indiquant une forte réduction de la concentration en sels dissous et donc une épuration efficace. À l'inverse, le concentrât atteint

une conductivité de 12,72 ms/cm, révélant une accumulation marquée des ions éliminés du perméat au cours du traitement (Figure 42). Ces résultats confirment l'efficacité du procédé de séparation dans la réduction de la charge ionique du lixiviat, tout en illustrant la concentration des polluants dans le flux de rejet. Cette variabilité de la pollution selon les étapes du traitement est bien documentée dans la littérature sur la gestion des lixiviats (DAMIEN, 2002).

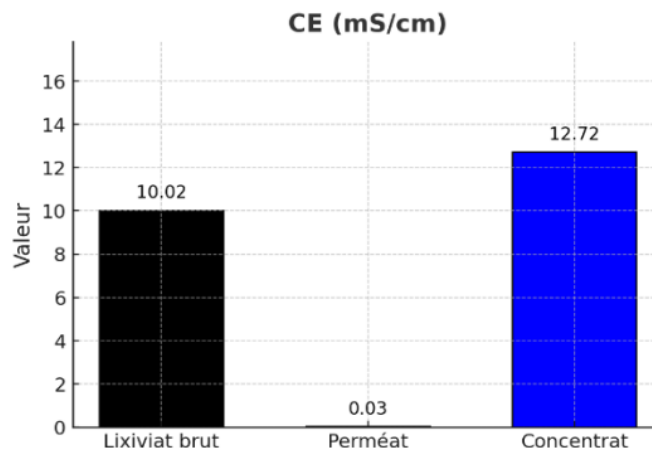


Figure 42 : Variation de la conductivité électrique (CE) du lixiviat avant et après traitement.

III.2.1.5. Turbidité

La turbidité est un paramètre physico-chimique qui mesure le degré de trouble d'un liquide, causé par la présence de particules en suspension telles que des matières organiques, minérales ou microbiennes (Rodier et al., 2009). Elle constitue un indicateur important de la qualité des eaux usées et des lixiviats.

Les résultats obtenus montrent une diminution nette de la turbidité entre les différents types de lixiviats analysés. Le lixiviat brut présente une turbidité de 6,15 NTU, révélant une présence notable de matières en suspension. Après traitement, la turbidité du perméat chute à 2,44 NTU, indiquant une élimination significative des particules solides au cours du processus de traitement. Le concentrât affiche quant à lui une turbidité de 2,13 NTU, légèrement inférieure à celle du perméat. Cela peut s'expliquer par une plus faible présence de particules en suspension dans le concentrât, ou par une meilleure efficacité de séparation, notamment grâce à la première étape de dessablage qui a permis d'éliminer une grande partie des matières solides dès le début du traitement (Figure 43).

Les valeurs enregistrées pour le perméat et le concentrât, bien qu'abaissées, montrent que le lixiviat initialement très chargé subit une clarification notable, sans toutefois atteindre une limpidité parfaite. Cela souligne à la fois l'efficacité partielle du traitement et la nécessité de procédés complémentaires pour assurer une qualité optimale, surtout si le perméat est destiné à un rejet ou à une réutilisation. Ainsi, ces résultats confirment que les lixiviats issus de la décharge de Boghni restent significativement pollués et nécessitent une gestion rigoureuse afin de limiter leur impact environnemental.

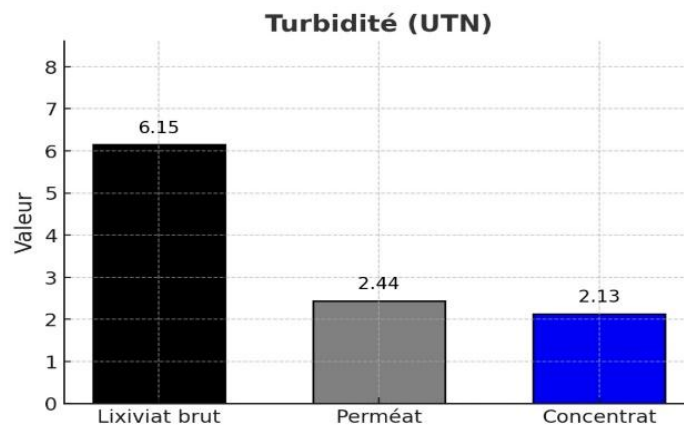


Figure 43 : Variation de la turbidité du lixiviat avant et après traitement.

III.2.1.6. Oxygène dissous (OD)

L'oxygène dissous (OD) représente la quantité d'oxygène disponible dans un milieu aquatique pour assurer le bon déroulement des processus biologiques, notamment la respiration des organismes vivants. Il constitue un paramètre clé pour évaluer la qualité de l'eau, le bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques et l'efficacité des traitements épuratoires (APHA, 2017). L'oxygène dissous permet d'évaluer la capacité du milieu à soutenir un traitement biologique. Un taux faible ou nul d'OD indique une forte charge polluante et un environnement anaérobie, défavorable aux bactéries aérobies utilisées dans les traitements biologiques classiques. Ainsi, l'OD est un indicateur important pour déterminer la faisabilité d'un traitement biologique du lixiviat.

Dans cette étude, les concentrations en oxygène dissous varient selon le type de lixiviat. Le lixiviat brut présente une teneur faible de 1,07 mg/L à 16 °C ce qui peut être attribué à une forte charge organique consommant rapidement l'oxygène disponible ou à une activité biologique limitée. En revanche, le perméat affiche une concentration plus élevée, de 5,70 mg/L à 18 °C, traduisant une meilleure qualité de l'eau et une charge polluante

réduite après traitement. Il est important de noter que la température influence négativement la solubilité de l'oxygène : plus elle est élevée, moins l'oxygène se dissout dans l'eau, ce qui rend la valeur du perméat d'autant plus significative malgré une température plus haute (Figure 44).

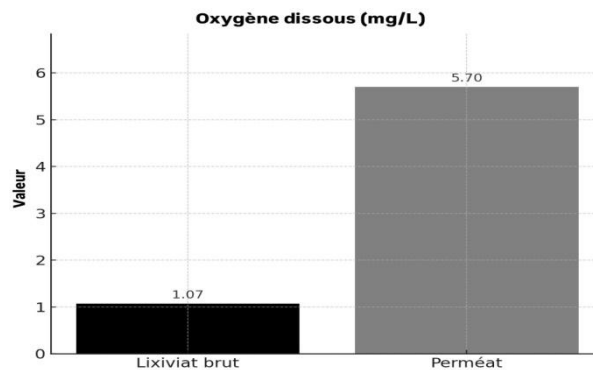


Figure 44 : Variation de l'oxygène dissous (OD) du lixiviat brut et perméat

III.2.2. Paramètres organiques

III.2.2.1. Demande biologique en oxygène (DBO₅)

D'après la (Figure 45), la DBO₅ du lixiviat brut, avant traitement, est de 14 mg/L. En tenant compte d'un facteur de dilution de 20, la demande en oxygène réelle pour la dégradation de la matière organique s'élève donc à 280 mg/L, cette valeur indique une forte pollution organique. Après traitement, la DBO₅ mesurée chute à 1 mg/L, ce qui correspond à une demande en oxygène de 20 mg/L avec le même facteur de dilution. Cela montre une réduction importante de la charge organique du lixiviat après traitement.

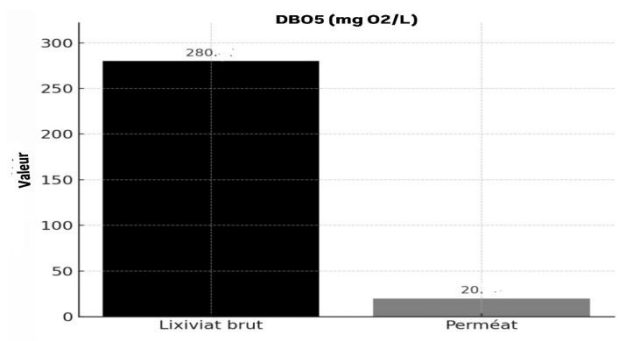


Figure 45 : Variation de la demande biologique en oxygène (DBO₅) du lixiviat brut et perméat

III.2.2.2. Demande chimique en oxygène (DCO)

Notre étude des concentrations en DCO met en lumière l'impact du traitement. Le lixiviat brut, avec une DCO de 5183,54 mg/L, présente une charge organique extrêmement élevée, bien au-delà de la norme algérienne de rejet pour les effluents industriels généralement fixée à 125 mg/L par le Décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006). Le perméat, affichant une DCO de 25,33 mg/L, démontre une élimination presque totale des substances oxydables, témoignant de l'efficacité remarquable du processus de traitement. En revanche, le concentrât, avec une DCO de 8166,99 mg/L, révèle une accumulation massive des polluants écartés, nécessitant une gestion spécifique avant tout rejet ou réutilisation (Figure 46).

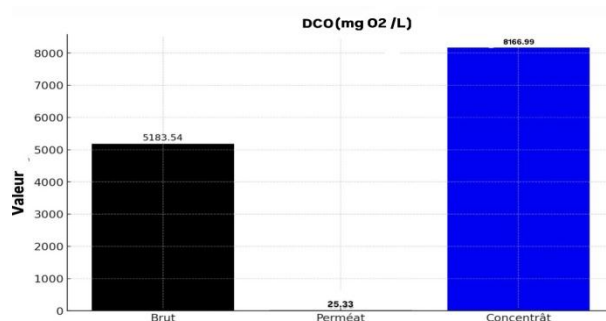


Figure 46 : Variation de la demande chimique en oxygène (DCO) du lixiviat avant et après traitement

III.2.2.3. Le rapport DBO₅/DCO

L'analyse des résultats du rapport DBO₅/DCO révèle une efficacité de traitement exceptionnelle. Le lixiviat brut, avec un rapport de 0,05, se classe dans la catégorie des lixiviats stabilisés ou anciens, caractérisés par une matière organique difficilement biodégradable (Figure 47). Cette valeur est en ligne avec des observations similaires faites dans des études sur des décharges anciennes, comme à Oued Semar en Algérie, où il est de 0,09 (Amri et Bentama, 2021). Cependant, après traitement, le rapport a bondi à 0,80, ce qui est une amélioration remarquable. Cela indique que la forte charge polluante réfractaire a été efficacement décomposée en composés plus simples et biodégradables. Cette performance dépasse largement les résultats obtenus dans d'autres travaux. Par exemple, selon l'étude de Kerbachi et al., (2010) sur un lixiviat partiellement stabilisé, ce rapport est de 0,15 après traitement, tandis qu'une étude menée sur le CET d'El Oued a rapporté un rapport de seulement 0,20. En conclusion, l'augmentation spectaculaire du rapport DBO₅/DCO dans le perméat témoigne de la performance supérieure de la méthode de traitement par rapport aux techniques conventionnelles.

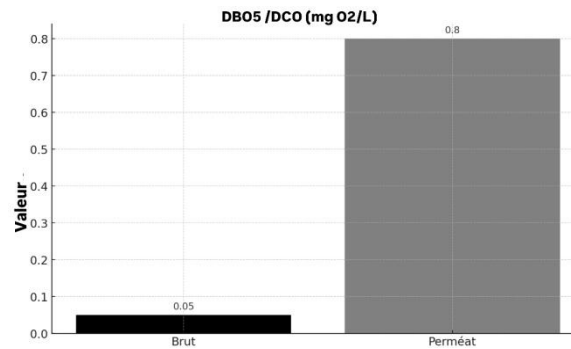


Figure 47 : Variation du rapport DBO₅/DCO du lixiviat brut et perméat

III.2.3. Ions majeurs

III.2.3.1. Les anions

III.2.3.1.1. Nitrites NO₂⁻

Les nitrites (NO₂⁻) sont des anions issus de l'acide nitreux. Ils proviennent de l'oxydation de l'ammonium ou de la réduction des nitrates, et signalent une pollution organique récente (Stumm et Morgan, 1996). Dans notre étude, les trois types de lixiviat (brut, perméat, concentrât) affichent une concentration en nitrites de 0 mg/L, ce qui indique que les nitrites sont absents ou présents en quantités indétectables. C'est un résultat positif, car cela suggère l'absence de contamination organique significative récente entraînant la formation de nitrites, ou que le processus de nitrification est complet, convertissant les nitrites en nitrates. Les valeurs sont bien en dessous de la norme algérienne de 50 mg/L.

III.2.3.1.2. Les Nitrates (NO₃⁻)

Les nitrates sont des composés issus de l'acide nitrique (HNO₃), largement utilisés comme engrais en agriculture. En excès, ils peuvent contaminer les eaux et nuire à la santé humaine, en particulier celle des nourrissons (WHO, 2011).

Dans cette étude, les concentrations en nitrates varient selon les étapes de traitement. Le lixiviat brut contient 60 mg/L, indiquant une pollution importante. Après traitement, le perméat affiche une faible teneur de 0,11 mg/L, montrant une bonne efficacité du procédé. En revanche, le concentrât atteint 110 mg/L, ce qui signifie que les nitrates sont bien retenus mais transférés dans cette phase. Une gestion appropriée du concentrât est donc essentielle pour éviter une nouvelle pollution (Figure 48).

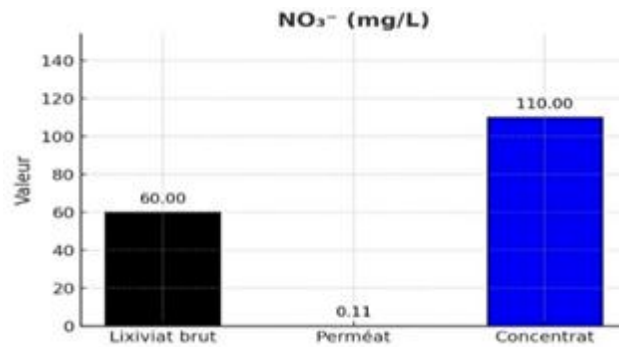


Figure 48 : Variation de la concentration en nitrates du lixiviat avant et après traitement

III.2.3.1.3. Chlorures (Cl⁻)

Les chlorures sont des indicateurs de salinité et de pollution d'origine domestique ou industrielle (Rodier, 1996). Dans notre étude, une concentration élevée de 13 140,86 mg/L a été observée dans le lixiviat brut, ce qui reflète une forte minéralisation typique des effluents de décharge. Après traitement, cette valeur chute à 0 mg/L dans le perméat, traduisant l'efficacité du procédé pour réduire la charge saline dans l'eau traitée (Figure 49).

En revanche, le concentrât atteint une teneur de 17 522,85 mg/L, en raison de l'accumulation des chlorures dans cette phase. Ce transfert est courant avec les traitements membranaires, d'où l'importance d'une gestion adaptée du concentrât (Figure 49).

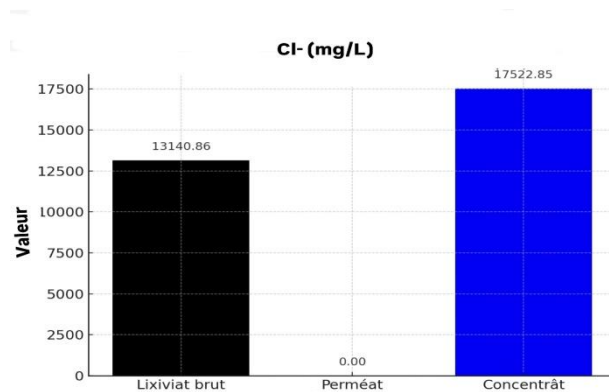


Figure 49 : Variation de la concentration en chlore du lixiviat avant et après traitement.

III.2.3.1.4. Sulfates SO₄²⁻

Les sulfates sont des indicateurs de pollution d'origine naturelle ou anthropique, fréquemment retrouvés dans les lixiviats (Morris et Fan, 2010). Dans notre étude, le lixiviat

brut présentait une concentration élevée de 2 000 mg/L (Figure 50), reflétant une minéralisation importante. Cette valeur est très élevée comparée à la limite maximale fixée par la norme algérienne pour l'eau potable, qui est de 600 mg/L (voir tableau n° 6), ce qui souligne l'inadéquation du lixiviat brut à toute forme d'usage sans traitement préalable.

Après traitement, aucun sulfate n'a été détecté dans le perméat (0 mg/L), ce qui démontre l'efficacité du procédé utilisé, notamment en termes de rétention des sels. Toutefois, une concentration de 6 000 mg/L a été mesurée dans le concentrât (figure 50), traduisant un transfert complet des sulfates vers cette phase. Ce résultat souligne que si l'eau traitée est bien épurée, le concentrât, lui, devient une source potentielle de pollution et nécessite une prise en charge appropriée pour éviter tout rejet non maîtrisé.

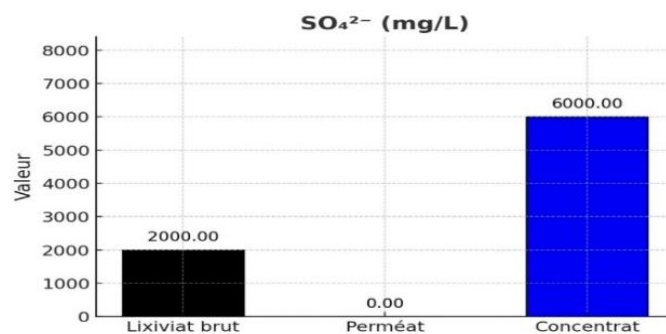


Figure 50 : Variation de la concentration en sulfates du lixiviat avant et après traitement.

III.2.3.1.5. Ortho phosphates (PO₄³⁻)

Les orthophosphates sont des composés phosphorés essentiels en biologie et largement utilisés en agriculture, mais leur présence en excès dans les eaux peut favoriser l'eutrophisation (Correll, 1998). Dans notre étude, le lixiviat brut présentait une concentration de 40 mg/L (Figure 51), indiquant une charge importante en phosphates. Cette valeur caractérise les lixiviats matures.

Après traitement, le perméat affiche une concentration nulle (0 mg/L), ce qui traduit une élimination quasi-totale des ortho phosphates et confirme la grande efficacité du procédé utilisé. En parallèle, le concentrât atteint une valeur de 60 mg/L, montrant que les ortho phosphates extraits ont été retenus dans cette phase. Comparées à la norme algérienne qui est de 5 mg/L, les valeurs obtenues sont très élevées ce qui démontre la nécessité d'une gestion rigoureuse pour éviter toute pollution secondaire.

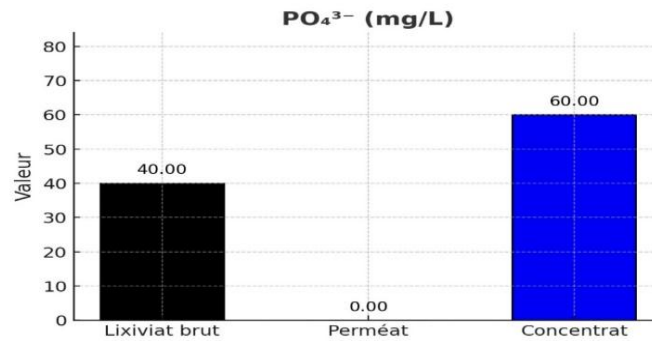


Figure 51 : Variation de la concentration en orthophosphates du lixiviat avant et après traitement.

III.2.3.1.6. Carbonate (CO₃²⁻)

Le carbonate (CO₃²⁻) est une espèce inorganique présente principalement dans les eaux à pH élevé. Il intervient dans les équilibres acido-basiques et peut précipiter avec des cations tels que le calcium pour former des composés insolubles, notamment le carbonate de calcium (Appelo et Postma, 2005).

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont montré des concentrations nulles en carbonates dans le lixiviat brut, le perméat et le concentrât. Cette absence peut être liée au pH neutre à légèrement basique des échantillons analysés, une condition qui favorise la prédominance des bicarbonates (HCO₃⁻) par rapport aux carbonates. De plus, les concentrations en CO₃²⁻ pourraient être inférieures à la limite de détection de la méthode analytique utilisée.

Conformément à la norme algérienne relative aux rejets d'effluents liquides industriels, définie par le décret exécutif n°90-160 du 10 juillet 1993, la valeur limite autorisée pour les carbonates est fixée à 30 mg/L. Ainsi, l'ensemble des échantillons analysés dans cette étude est pleinement conforme à cette exigence réglementaire.

Ces résultats soulignent également l'intérêt de compléter l'analyse par la mesure de l'alcalinité totale ou des bicarbonates, afin d'obtenir une évaluation plus précise du pouvoir tampon du lixiviat, élément essentiel pour anticiper son comportement chimique lors du traitement ou du rejet.

III.2.3.1.7. Bicarbonate (HCO_3^-)

Le bicarbonate est une forme du carbone inorganique dissous, dominante dans les eaux naturelles à pH neutre. Il joue un rôle clé dans le maintien du pH grâce au système tampon bicarbonate/carbonate (Stumm & Morgan, 1996). Notre étude a porté sur la mesure des bicarbonates dans trois échantillons issus du traitement du lixiviat : le lixiviat brut, le perméat et le concentrât. Les résultats de mesure des carbonates dans nos échantillons, montrent des concentrations de 12 200 mg/L dans le lixiviat brut, 4,88 mg/L dans le perméat, et 14 640 mg/L dans le concentrât (Figure 52). On observe une forte diminution dans le perméat, ce qui montre que le traitement est efficace pour réduire les bicarbonates à ce stade.

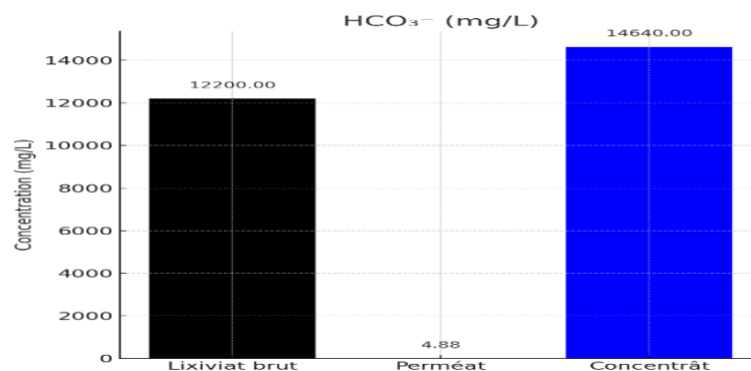


Figure 52 : Variation de la concentration en bicarbonates du lixiviat avant et après traitement

III.2.3.2. Les cations

III.2.3.2.1. Calcium (Ca^{2+})

Le calcium est un ion responsable de la dureté de l'eau, issu de la dissolution des roches calcaires (Hem, 1985). Dans notre étude (Figure 53), le lixiviat brut présente une concentration élevée (4 857,70 mg/L) en Ca^{2+} , cette valeur s'explique par le taux élevé des carbonates, indiquant une forte minéralisation. Après traitement, la valeur chute à 0,80 mg/L dans le perméat, ce qui montre une bonne performance du procédé d'osmose inverse pour éliminer les ions divalents. En revanche, le concentrât atteint une concentration très élevée (6476,93 mg/L), traduisant une accumulation importante. Cela confirme l'efficacité du traitement. En comparant ces valeurs enregistrées dans le perméat et le concentrât à la norme algérienne (200 mg/L) (Tableau 6), on constate qu'elles sont très élevées. Ceci implique la nécessité d'une gestion rigoureuse de cette phase résiduelle pour éviter les risques environnementaux liés aux rejets concentrés en sels.

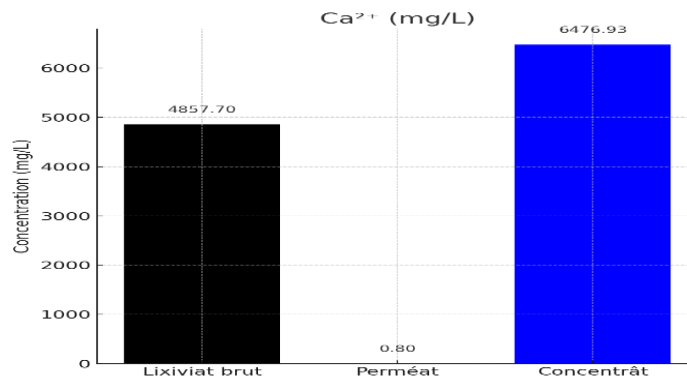


Figure 53 : Variation de la concentration en calcium du lixiviat avant et après traitement.

III.2.3.2.2. Magnésium (Mg²⁺)

Le magnésium est un cation divalent naturellement présent dans l'eau, provenant notamment de la dissolution de minéraux comme la dolomie et contribuant à la dureté de l'eau, tout comme le calcium (USGS, 2018). Dans notre étude, le lixiviat brut affiche une concentration élevée de 2 358,07 mg/L (Figure 54), révélant une forte minéralisation initiale. Le perméat contient très peu de magnésium (0,94 mg/L), démontrant une excellente performance du traitement, par osmose inverse. En parallèle, le concentrât atteint 3 772,91 mg/L, ce qui confirme que les ions magnésium ont été efficacement retenus et concentrés dans cette phase. Ce phénomène est typique des procédés membranaires, mais met en évidence la nécessité d'une gestion adéquate de cette fraction résiduelle pour éviter tout risque environnemental.

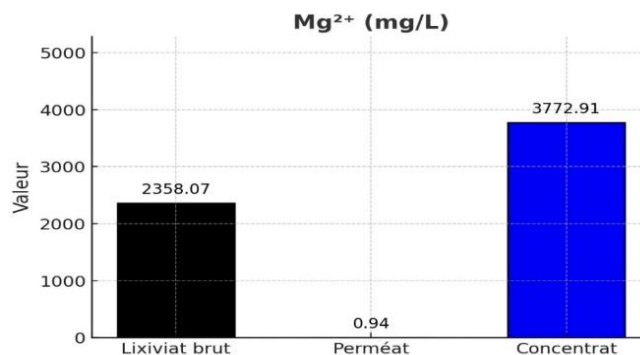


Figure 54: Variation de de la concentration en magnésium du lixiviat avant et après traitement.

III.2.3.2.3. Potassium (K^+)

Le potassium (K^+) est un cation monovalent fréquemment présent dans les lixiviats, principalement issu de la dégradation des déchets organiques. Il est souvent retrouvé à des concentrations élevées dans les lixiviats jeunes, pouvant dépasser 1000 mg/L (Kjeldsen et al., 2002). Dans notre étude, le lixiviat brut présente une concentration de 2400 mg/L, une valeur très élevée. Le perméat, par contre, affiche une valeur très faible de 1 mg/L, indiquant une excellente efficacité du système de traitement pour éliminer le potassium (Figure 55). Cette rétention montre que le procédé est performant pour retenir les ions K^+ . Le concentrât, quant à lui, atteint 2600 mg/L, confirmant la capacité du système à concentrer les ions non traités dans le flux résiduel. Toutefois, cette charge élevée nécessite une gestion adaptée du concentrât.

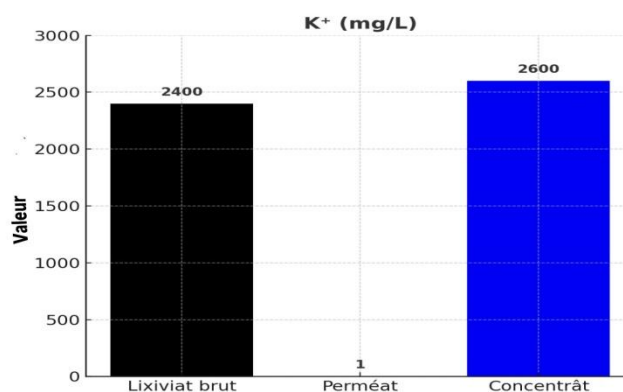


Figure 55 : Variation de la concentration en potassium du lixiviat avant et après traitement

III.2.3.2.4. Ammonium NH_4^+

Dans notre étude, les concentrations en ammonium ont été mesurées dans les trois fractions du lixiviat : le lixiviat brut, le perméat, et le concentrât. Les résultats obtenus (Figure 56) montrent une concentration de **350 mg/L** en ammonium dans le **lixiviat brut**, une valeur extrêmement élevée, traduisant une forte pollution azotée caractéristique des effluents issus des centres d'enfouissement technique. Après traitement par osmose inverse, la concentration en ammonium chute à **1,03 mg/L** dans le **perméat**, ce qui témoigne d'une efficacité notable du traitement. En revanche, le **concentrât** présente une concentration encore plus élevée que celle du lixiviat brut, atteignant **680 mg/L**, ce qui est logique puisqu'il s'agit de la phase contenant les polluants retenus par le procédé.

Selon la norme algérienne relative au rejet des eaux usées dans le milieu récepteur, fixée par le décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006, la concentration maximale admissible en ammonium est de 30 mg/L.

Ainsi, seul le perméat respecte largement cette limite réglementaire, confirmant la performance du traitement, bien que cette concentration soit très proche du seuil. En revanche, le lixiviat brut et le concentrât dépassent largement cette limite et ne peuvent être rejetés dans le milieu naturel sans un traitement préalable adéquat.

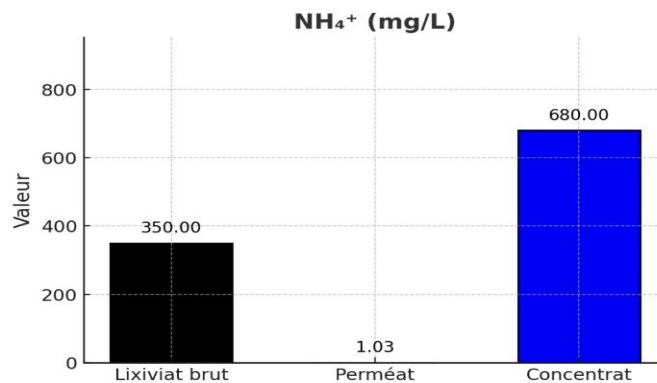


Figure 56: Variation de la concentration en ammonium du lixiviat avant et après traitement

III.2.4. Paramètres d'alcalinité et de dureté

III.2.4.1. Titre alcalimétrique complet (TAC)

Le titre alcalimétrique complet (TAC) est un paramètre essentiel qui exprime la capacité tampon de l'eau, c'est-à-dire son aptitude à neutraliser les acides, principalement liée à la présence d'hydrogénocarbonates (Nor et al., 2023). Dans notre étude, le lixiviat brut présente une valeur très élevée de 5 000 F° (Figure 57), indiquant une forte alcalinité initiale.

Après traitement, le perméat montre une chute importante du TAC, atteignant 0,4 F°, ce qui témoigne de la grande efficacité du procédé dans l'élimination des composés alcalins de la phase épurée. À l'inverse, le concentrât enregistre une valeur encore plus élevée, de 6 000 F°, traduisant l'accumulation des substances alcalines dans cette phase. Cela souligne l'importance d'une gestion rigoureuse du concentrât pour limiter les impacts environnementaux potentiels.

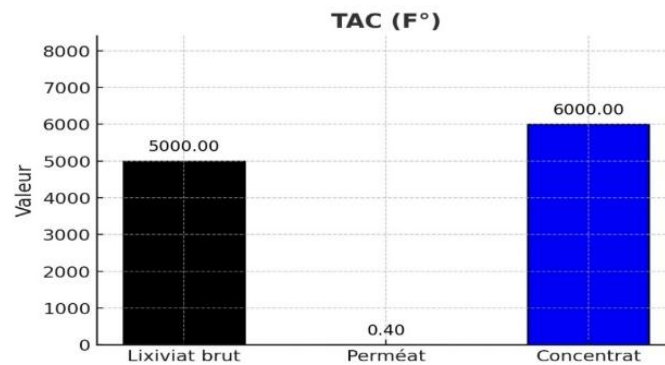


Figure 57 : Variation de l'alcalinité totale (TAC) du lixiviat avant et après traitement

III.2.4.2. Titre alcalimétrique (TA)

Le titre alcalimétrique (TA), qui représente la part de l'alcalinité liée aux ions hydroxydes et à la moitié des ions carbonates (Rodier, 1996), a présenté dans notre étude une valeur nulle (0 mg/L) dans l'ensemble des échantillons analysés, à savoir le lixiviat brut, le perméat et le concentrât. Cette absence d'alcalinité caustique indique que, bien que le lixiviat brut soit fortement alcalin (TAC élevé), l'alcalinité est exclusivement sous forme d'hydrogencarbonates, présents à un pH inférieur à 8,3. Les résultats obtenus montrent également que le processus de traitement, tout comme la concentration des résidus, n'a pas généré ou conservé de formes basiques fortes, ce qui est cohérent avec un environnement au pH globalement neutre.

III.2.4.3. Titre hydrotimétrique (TH)

Le titre hydrotimétrique (TH), ou dureté de l'eau, est une mesure de la concentration totale des ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) dissous, exprimée en degrés français (°f), où 1 °f correspond à 10 mg/L de CaCO_3 (Faust et Aly, 1998). Dans notre étude (Figure 58), le lixiviat brut présente un TH très élevé de 2 178 F°, traduisant une dureté importante, typique des lixiviats fortement minéralisés. Après traitement, le perméat affiche un TH très faible de 0,59 F°, ce qui indique une excellente efficacité du procédé de traitement pour éliminer les ions responsables de la dureté. En revanche, le concentrât atteint une valeur de 3 168 F°, bien supérieure à celle du lixiviat brut, témoignant d'une forte accumulation des ions divalents dans cette phase résiduelle. Ces résultats confirment la performance du système de séparation, tout en soulignant l'importance d'une gestion rigoureuse du concentrât afin de limiter les risques environnementaux ou techniques liés à la dureté.

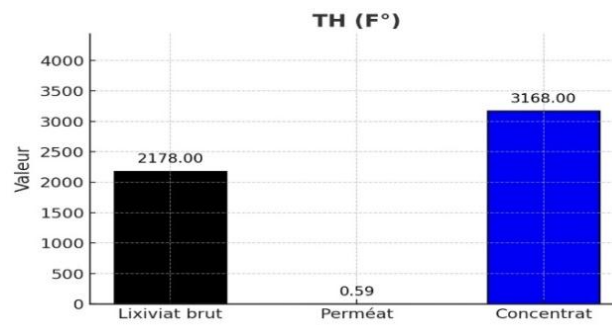


Figure 58 : Variation de l'indice de dureté (TH) du lixiviat avant et après traitement

III.2.5. Éléments traces métalliques

III.2.5.1. Cadmium (Cd)

Le cadmium (Cd) est un métal lourd toxique utilisé dans les batteries, pigments et certains déchets industriels. Il est reconnu pour ses effets néfastes sur la santé humaine, notamment sur les reins et les os, et est classé comme cancérigène (ATSDR, 2012). Dans cette étude (tableau 6), les analyses par AAS ont révélé une concentration nulle (0 mg/L) de Cd dans le lixiviat brut, le perméat et le concentrât, indiquant une absence de détection. Cette absence apparente peut être due à une très faible teneur initiale, à la précipitation du Cd sous forme insoluble ou à sa fixation sur les matières solides ou organiques. Le fait que le cadmium ne soit pas détecté dans le concentrât confirme sa faible présence globale dans le lixiviat étudié. Toutefois, pour valider définitivement cette absence, des techniques de dosage plus sensibles comme l'ICP-MS pourraient être envisagées.

III.2.5.2. Nickel (Ni)

Le nickel (Ni) est un métal lourd potentiellement toxique, fréquemment retrouvé dans les lixiviats en raison de la dégradation de matériaux métalliques et de certains déchets industriels (Kabata-Pendias et Mukherjee, 2007).

Dans le cadre de cette étude (Figure 59), les analyses ont révélé une concentration de 0,14 mg/L dans le lixiviat brut, 0 mg/L dans le perméat, et 0,16 mg/L dans le concentrât. La faible teneur observée dans le perméat indique une rétention efficace du Ni par le système d'osmose inverse. En parallèle, la concentration accrue dans le concentrât confirme l'accumulation du nickel du côté rejet, traduisant une bonne performance de séparation membranaire (Fu et Wang, 2011).

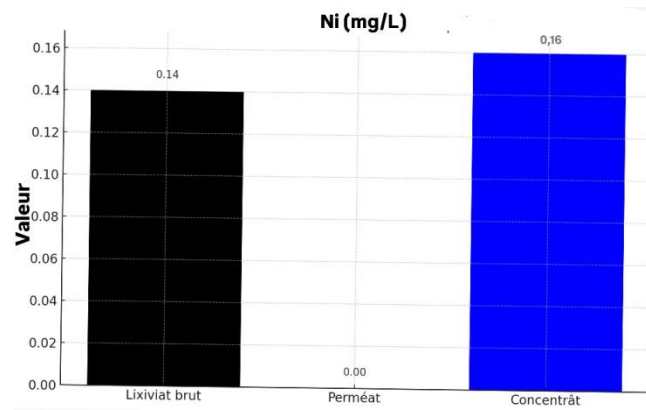


Figure 59 : Variation de la concentration en nickel du lixiviat avant et après traitement.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était d'évaluer la qualité physico-chimique des lixiviats du CET de Boghni et d'apprécier l'efficacité de leur traitement par osmose inverse.

Les résultats révèlent que le lixiviat brut présente une forte pollution, avec des concentrations très élevés en DCO, chlorures, bicarbonates et cations, dépassant largement les normes algériennes. Le perméat issu de l'osmose inverse respecte globalement les normes, confirmant l'efficacité du procédé.

Toutefois, le concentrât demeure fortement chargé en sels et en matière organique, soulignant la nécessité d'un traitement complémentaire ou d'une stratégie de valorisation adapté

Propositions et perspectives

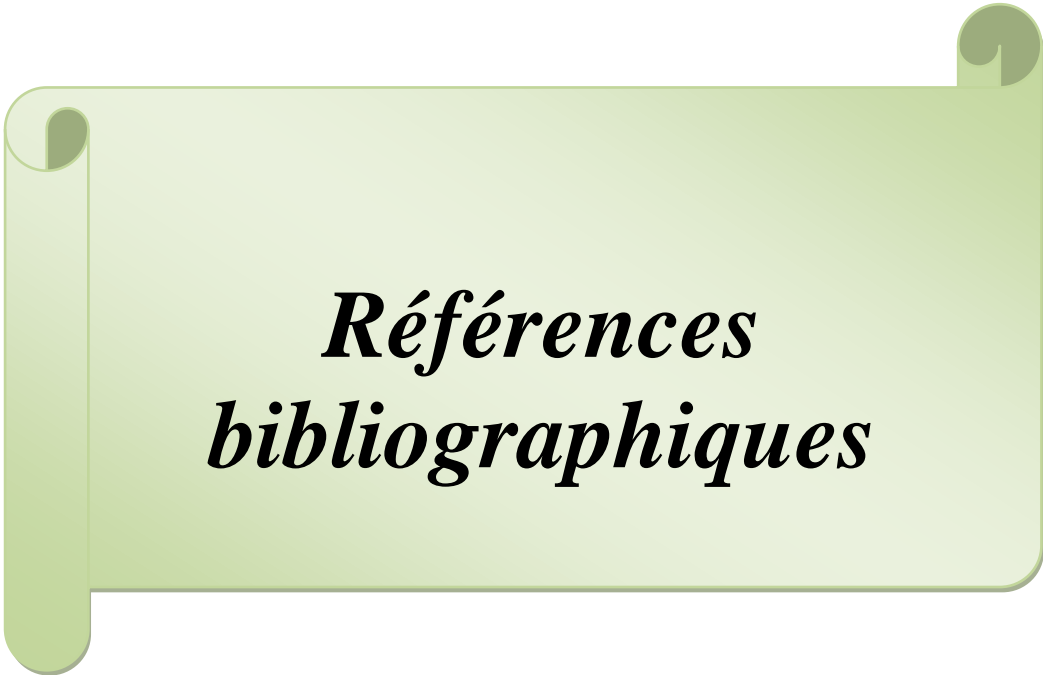
La station de traitement des lixiviats du centre d'enfouissement technique (CET) de Boghni (Figure 60), bien que construite en 2019, n'a été mise en service qu'en 2024. Elle utilise un procédé d'osmose inverse capable de traiter jusqu'à 110 m³ de lixiviat par jour. Malgré son importance dans la protection de l'environnement, plusieurs difficultés ont été rencontrées, telles que des retards de mise en service, des interruptions de fonctionnement, un manque de personnel qualifié et des problèmes de gestion.

Pour améliorer son efficacité et garantir son bon fonctionnement à long terme, les actions suivantes sont proposées :

- Établir un programme de maintenance préventive pour éviter les pannes et assurer la continuité du traitement.
- Renforcer la formation du personnel, notamment sur le pilotage de l'osmose inverse, la sécurité et les interventions techniques.
- Allouer un budget annuel dédié aux pièces de rechange, membranes, produits chimiques et services techniques spécialisés.
- Améliorer la communication avec la population locale, afin de sensibiliser sur les enjeux environnementaux liés aux lixiviats.
- Intégrer des énergies renouvelables, comme les panneaux solaires, pour réduire les coûts d'exploitation et l'impact environnemental.
- Installer un système SCADA pour le suivi automatique et en temps réel des paramètres de fonctionnement.

- Mettre en place une solution durable pour le concentrât, comme l'évaporation solaire ou le traitement par oxydation avancée.
- Prévoir une extension de la capacité de traitement en cas d'augmentation des volumes de lixiviats liés à la croissance des déchets ou aux conditions climatiques.
- Ajouter un prétraitement adapté (filtration, charbon actif ou traitement biologique) pour améliorer les performances et protéger les membranes.
- Réaliser des évaluations périodiques des performances techniques et environnementales, en vue d'ajuster les stratégies de gestion.

Ces propositions visent à optimiser le fonctionnement de la station, à assurer une gestion durable des lixiviats, et à protéger efficacement les ressources naturelles et la santé publique. Leur mise en œuvre nécessite un engagement fort des autorités locales et des gestionnaires du site.



*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- **AGENCE DE L'EAU RMC (2018).** Gestion des lixiviats de décharges. Solution technologiques [Document interne, Agence de l'Eau Rhône Méditerranée corse).
- **AGRANIOU, M. R. (2019).** Analyse de fonctionnement d'un centre d'enfouissement technique : Cas du CET de Corso (Boumerdès). Mémoire de Master, Université Salah Boubnider Constantine3.
- **ALMEIDA, C. M. R., & FERNANDES, M. A. (2015).** Physico-chemical treatment of landfill leachates: A review. *Waste Management & Research*, 33(5), 421- 432.
- **ALLOWAY, B. J. (2013).** Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (3^e éd.), Springer.
- **AMRI, Z., ET BENTAMA, O. (2021).** Analyses et caractérisation des lixiviats de la décharge d'Oued Semar (Mémoire de Master). Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB).
- **APHA. (2017).** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association.
- **APPELO, C. A. J., & POSTMA, D. (2005).** Geochemistry, Groundwater and Pollution (2nd ed.), CRC Press.
- **ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2012).** Toxicological Profile for Cadmium. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, GA.
- **BARLAZ, M. A. (1998).** Carbon storage during biodegradation of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(2), 373–380. <https://doi.org/10.1029/98GB00737>.
- **BATSTONE, D. J., KELLER, J., ANGELIDAKI, I., KALYUZHNYI, S. V., PAVLOSTATHIS, S. G., ROZZI, A., & AL. (2002).** Anaerobic Digestion Model No (ADM1). IWA Publishing.
- **BENABDELI, K., & BOUMEDIENE, A. (2006).** Valorisation des déchets agricoles en Algérie. *Revue des Bioressources*, 6(1), 33–40.
- **BELHADJ, M., ABIDI, N., MENADI, B. (2020).** Article publié dans *Waste Management & Research*, une revue spécialisée dans la gestion des déchets

- **BOGNER, J., PIPATTI, R., HASHIMOTO, S., DIAZ, C., MARECKOVA, K., DIAZ, L., & GREGORY, R. (2008).** Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: Conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. *Waste Management & Research*, 26(1), 11-32.
- **BONNEAU, A., & LECLERC, G. (1979).** L'enfouissement sanitaire : principes, méthodes et contraintes (Rapport technique n° EP-R-79-36). Polytechnique Montréal.
- **BREMAUDE C., CLAISSE J.R., LEULIER F., THIBAUT J. (2006).** Alimentation, santé, qualité de l'environnement et du cadre de vie en milieu rurale, Edition educagri, dijon, France, p220-221.
- **BOULAY, C & DUFRESNE, C. (2010).** Impact de l'oxygène dissous sur la dégradation des polluants organiques dans le lixiviat. *Journal of Environmental Mangement*, 15(4), 267-279.
- **CHEUNG, K.C., ET AL. (1993).** Contribution des fortes concentrations en azote ammoniacal à la toxicité des lixiviats. *Science of the Total Environment*, 127(1-2), 123-133.
- **CHRISTENSEN, T. H., ET AL. (2001).** Publié dans *Applied Geochemistry*, revue scientifique spécialisée dans l'étude des contaminants environnementaux.
- **CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. (1988).** *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- **CHRISTENSEN, T. H., KJELDEN, P., BJERG, P. L., JENSEN, D. L., CHRISTENSEN, J. B., BAUN, A., ALBRECHTSEN, H.-J., & HOLM, P. E. (2001).** Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, 16(7-8), 659-718.
- **CHRISTENSEN, T. H. (2002).** Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297- 336
- **CORRELL, D. L. (1998).** The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *Journal of Environmental Quality*, 27(2), 261-266.
- **DAJOZ, R. (2006).** Précis d'écologie. 8^e édition, Dunod, Paris, 615 p.
- **DAMIEN .A (2002).** Guide du traitement des déchets ; DUNOD, Paris
- **DESACHY C., (2001).** Les déchets solides sensibilisation à une gestion écologique. Ed. Tec et Doc, Paris, 96 p.

- **DECRET WALLON (1996)**. Décret du 27 juin 1996 relatif aux déchets, article 2, point 18. Moniteur belge.
- **DECRET EXECUTIF N°06-141 DU 19 AVRIL 2006**, Journal Officiel de la République Algérienne n°26.
- **DECRET EXECUTIF N°90-160 DU 10 JUILLET 1993**, Journal Officiel de la République Algérienne, n°41
- **DEUBLEIN, D., & STEINHAUSER, A. (2011)**. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. Wiley-VCH.
- **DIRECTIVE 1999/31/CE DU CONSEIL (26 AVRIL 1999)**. Directive du Conseil concernant la mise en décharge des déchets. Journal officiel des Communautés européennes, L 182/1.
- **DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT DE TIZI OUZOU. (2025)**. Audit environnemental du CET de Boghni. (Rapport interne non publié). Tizi-Ouzou : Direction de l'Environnement de la Wilaya.
- **DJELLOULI, A., & ZERGAT, M. (2019)**. Conception de réseaux de récupération et valorisation des déchets dangereux : cas des piles et des accumulateurs. Mémoire de Master II, Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen.
- **DJEMACI, A. (2012)**. Gestion des déchets ménagers et assimilés en Algérie : problématique et perspectives. Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou.
- **EL-FADEL, M., FINDIKAKIS, A., & LECKIE, J. O. (2002)**. Environmental impacts of solid waste landfilling. Journal of Environmental Management, 64(1), 1-12. DOI: 10.1016/S0301-4797(02)00088-6.
- **ANONYME (2025)**. Établissement public de wilaya de gestion des centres d'enfouissement technique – Tizi-Ouzou. Document interne.
- **FAUST, S. D., & ALY, O. M. (1998)**. Chemistry of Water: An Environmental Perspective. CRC Press.
- **FENOUCHE, A., & BOUMAZA, M. (2018)**. La valorisation des déchets. Université des Frères Mentouri Constantine 1.
- **FOO, K. Y., HAMEED, B. H. (2009)**. Article réel et reconnu, également dans Journal of Hazardous Materials.
- **FRYDRYCH, R., GROCHOWSKA, J., & SOBOTA, J. (1993)**. Hydrological and meteorological conditions influencing water balance in small catchments. Polish

- Academy of Sciences, Institute of Meteorology and Water Management.
- **Fu, F., & Wang, Q. (2011).** Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418.
 - **GALL, S. C., & THOMPSON, R. C. (2015).** THE impact of debris on marine life. *Marine Pollution Bulletin*, 92(1-2), 170-179.
 - **GALVEZ-CLOUTIER, R. (2009).** Gestion de déchets dangereux et sites contaminés (GCI- 6070 A-09). Département génie civil, Université Laval.
 - **GAUJOUS, D. (1993).** La pollution des milieux aquatiques : aide-mémoire. 2^{ème} édition rue Lavoisier : technique et documentation 212 p.
 - **GUESSOUM, B. (2023).** Impact environnemental d'un centre d'enfouissement technique des déchets ménagers et assimilés. École Nationale Polytechnique d'Alger.
 - **HEM, J. D. (1985).** Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water (3rd ed.). U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 2254.
 - **IAMRANENE, Sabrina et BELKACEMI, Kacia. (2024).** Le centre de traitement des lixiviats du C.E.T d'Oued Falli (Tizi Ouzou) : fonctionnement, perspectives et propositions. Mémoire de Master, Spécialité : Protection des Écosystèmes, Université Mouloud Mammeri de Tizi- Ouzou.
 - **INERIS (2015).** Rapport d'étude: Traitement des lixiviats de décharges. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques.
 - **JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE (2001).** Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
 - **JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE (23 AVRIL 2006).** n°2 ,24 Rabie El aouel 1427.
 - **KABATA-PENDIAS, A., & MUKHERJEE, A. B. (2007).** *Trace Elements from Soil to Human.* Springer.
 - **KERBACHI, R., BOUMECHHOUR, F. & AL (2010).** Traitement des lixiviats partiellement stabilisés issus du CET d'Ouled Fayet par la combinaison de la coagulation, d'oxydation Fenton et d'adsorption sur le charbon actif grain.
 - **KHATTABI, H. (2002).** Influence des précipitations et de la température sur la composition des lixiviats d'une décharge à ciel ouvert. *Environmental Research*, 45(2), 203–215.

- **KERDOUDI, N., TAZEROUT, M., & BOUALLOU, C. (2018).** Gestion des déchets dangereux en Algérie : état des lieux et perspectives. *Revue des Énergies Renouvelables*, 21(4), 709–716.
- **KJELDTSEN, P., BARLAZ, M. A., ROOKER, A. P., BAUN, A., LEDIN, A., & CHRISTENSEN, A. H. (2002).** Present and long-term composition of MSW landfill leachate. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297-336.
- **KURNIAWAN, T.A., LO, W., CHAN, G.Y.S. (2010).** “Physico-chemical treatments for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate.” *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 38-49.
- **KURNIAWAN, T. A., ET AL. (2006)** – Physico-chemical treatments Techniques for wastewater Laden with Heavy Metals. *Chemical Engineering* , 118,83-98.
- **LEMIEUX, P. M., LUTES, C. C., & SANTOIANNI, D. A. (2004).** Emissions of organic air toxics from open burning: A comprehensive review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(1), 1-32.
- **LI, J., YANG, Y., & WEI, J. (2017).** Treatment of landfill leachate using physico- chemical processes: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(19), 15957-15970.
- **LOPEZ, A., PAGANO, M., VOLPE, A., DI PINTO, A.C. (2004).** “Fenton’s pre-treatment of mature landfill leachate.” *Chemosphere*, 54(7), 1005-1010.
- **MATOS, C., & SOUSA, J. (2017).** Waste management and its impact on health: a global environmental issue. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(6), 676.
- **MDPI (2023).** Landfill leachate treatment using membrane technology: A review. *Membranes*, 13(3), 231.
- **MINISTÈRE DE L’AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L’ENVIRONNEMENT. (2002).** Stratégie nationale de gestion des déchets. Document officiel, République Algérienne Démocratique et Populaire.
- **MOULIN, P. (2008).** Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468–493.
- **MOUHOUN, S. (2008).** Étude comparative d’impact des déchets ménagers sur certaines propriétés physicochimiques et microbiologiques du sol de deux décharges : Boukhalfa et Ain-El-Hammam (wilaya de Tizi-Ouzou, Algérie). Mémoire de Magister,

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

- **MORRIS, J. C., FAN, A. M. (2010).** Health effects of sulfate in drinking water. California EPA, Office of Environmental Health Hazard Assessment.
- **NASSRO, M. (2022).** Le centre d'enfouissement technique : réalisation et fonctionnement. Université de Constantine.
- **NAIT SAIDI, M., Bellemalem, M. R., & Sadi, M. (2020).** Gestion des déchets en Algérie : étude du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Mila [Mémoire de master, Université Constantine 3 Salah Boubnider, Institut de gestion des techniques urbaines]
- **NOR, A. M. M., AHMAD, W. A. W., GHANI, W. A. W. A. K., et al. (2023).** Current trends of analytical techniques for total alkalinity measurement in water samples: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103217.
- **OMARI, F. (2014).** Contribution à l'étude du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de la ville de Mostaganem. Mémoire de Master, Université de Mostaganem.
- **OFFICE NATIONAL DE LA METEOROLOGIE (ONM). (2025).** Station de Tizi-Ouzou, données climatiques (2015-2024)
- **OSHODE, FELIX A., ET AL. (2008).** Identification de microorganismes pathogènes dans les lixiviats et leurs risques pour l'environnement. *Waste Management & Research*, 26(5), 510- 518.
- **PESSON, P. (1979).** Éléments de climatologie biologique et bioclimatologie. Masson, Paris, 336 p.
- **PLOTKIN, PAUL, & RAM, GOPI. (1984).** Toxicité des lixiviats et leurs effets sur la faune et la flore aquatique. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 3(2), 151-158.
- **QUEZEL, P. & MEDAIL, F. (2003).** Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Elsevier, Paris, 571 p.
- **RODIER, J. (1996).** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Dunod, Paris.
- **RODIER, J., LEGUBE, B., MERLET, N. (2009).** L'analyse de l'eau. 9e édition, Dunod.
- **RENOU, S., POULAIN, S., MOULIN, P., & GAGNAIRE, J. (2008).** Filières classiques de traitement des lixiviats. *L'EAU, L'INDUSTRIE, LES NUISANCES*, n°311, pp. 66-68.

- **RENOU, S., GIVAUDAN, J.G., POULAIN, S., DIRASSOUYAN, F., MOULIN, P. (2008).** Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150 (3), 468- 493.
- **RILLIG, M.C., LEHMANN, A., RYO, M., & BERGMANN, J. (2019).** Microplastic effects on plants. *New Phytologist*, 223(3), 1066-1070.
- **STUMM, W., & MORGAN, J. J. (1996).** *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- **SILLET, A., BAIG, S., & COLIN, J. L. (2001).** Pollutants in landfill leachate: Classification and impact assessment. *Waste Management & Research*, 19(3), 221–232.
<https://doi.org/10.1177/0734242X0101900306>
- **SYDEVOM 04. (2023).** Le fonctionnement d'un centre d'enfouissement technique. Site officiel du SYDEVOM – Syndicat Mixte Départemental d'Élimination et de Valorisation des Ordures Ménagères des Alpes-de-Haute-Provence.
<https://www.sydevom04.fr>.
- **TATSI, A.A., ZOUBOULIS, A.I. (2002).** A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate. *Advances in Environmental Research*, 6(3), 207-219.
- **TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., & VIGIL, S. A. (2002).** *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*. McGraw-Hill Education.
- **TRABELSI, S. (2011).** Études de traitement des lixiviats des déchets urbains par les procédés oxydation avancée photochimiques et électrochimiques : application aux lixiviats de la décharge tunisienne 'Jebel chakir'. Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar.
- **TRABELSI, H. (2011).** Review on the treatment of landfill leachate: The case of Tunisia. *Environmental Engineering and Management Journal*, 10(3), 293-298
- **TRABELSI, S. (2012).** Caractérisation des lixiviats de décharge et leur impact sur les milieux récepteurs. Thèse de doctorat. Université de Tunis El Manar, 2012.
- **U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2019).** *Hardness of Water: Effects of Calcium and Magnesium*. Water Science School.
- **VADILLO, JOSE M., ET AL. (1999).** Influence des ions Cl⁻ et NH₄⁺ sur la conductivité des lixiviats et leur impact sur les eaux souterraines.

Références bibliographiques

- **WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2011).** Nitrate and nitrite in drinking- water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.
- **ZEROUATI ,F.Z (2017).** Ministre de l'environnement et des Energies renouvelables. Algérie. Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables.



Annexes

Annexe I : Données climatiques mensuelles de la station de Boghni (2015-2025) (ONM, 2025)

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc
T°Moy/mensu (°C)	10,9	12,3	14,2	16,6	21,4	24,8	29,2	28,9	25,2	21,1	15,8	12,5
Précipitations (mm)	107,3	75,9	81,9	56,2	42,3	13,7	1,9	3,0	32,1	48,3	150,2	69,4
Humidité moy (%)	79,8	75,8	74,5	72,7	68,3	60,8	54,4	55,6	64,2	67,0	75,9	80,0
évaporation (mm)	41,9	49,9	63,3	57,8	93,6	139,6	189,3	176,0	120,2	92,5	58,4	45,5

Annexe II : Matériel et réactifs utilisés pour les analyses physico-chimiques

1. Appareils utilisés

Appareil	Rôle / Utilité principale
Conductimètre	Mesure de la conductivité électrique
pH-mètre	Mesure du pH
Spectrophotomètre UV-Visible	Dosage des matières organiques (DCO, DBO5, etc.)
Spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA)	Analyse des éléments traces métalliques (ETM)
Turbidimètre	Mesure de la turbidité
Balance analytique	Pesée des échantillons et réactifs
Agitateur magnétique avec chauffage	Homogénéisation et chauffage des solutions
Centrifugeuse	Séparation des phases solide/liquide
Étuve	Séchage à température contrôlée
Bain-marie	Maintien à température constante des échantillons
Autoclave	Stérilisation du matériel

2. Verrerie et petit matériel

Matériel	Utilité principale
Béchers (100 - 1000 mL)	Préparation et manipulation des solutions
Fiole jaugée	Dilution et préparation de solutions étalons
Tubes à essai	Réactions chimiques en petite quantité
Pipettes graduées	Transfert précis de liquides
Pipettes automatiques (micropipettes)	Dosage précis en μL et mL
Ballons jaugés	Préparation de solutions mères
Entonnoirs	Filtration ou transfert de liquides
Flacons en verre	Conservation des échantillons
Portoirs à tubes	Maintien des tubes à essai

3. Réactifs chimiques utilisés

Réactif / Substance	Utilisation
Acide sulfurique (H_2SO_4)	Réglage du pH, minéralisation des matières organiques
Acide nitrique (HNO_3)	Préparation des échantillons pour métaux
Hydroxyde de sodium (NaOH)	Ajustement du Ph
Chlorure de calcium (CaCl_2)	Tests de dureté
Sulfate de baryum (BaSO_4)	Précipitation des sulfates
Réactif de Nessler	Détection de l'ammonium (NH_4^+)
Réactif au phénol	Analyse des phénols
Réactifs colorimétriques	Dosages UV-visible (nitrates, phosphates, etc.)
Eau distillée	Solvant pour préparations

4. Consommables

Consommable	Utilisation
Gants en latex	Protection lors de la manipulation
Masques de protection	Sécurité contre les vapeurs chimiques
Papier filtre	Filtration des échantillons
Flacons stériles	Prélèvement et stockage des lixiviats
Bouchons en plastique	Fermeture hermétique des contenants
Étiquettes autocollantes	Identification des échantillons

Résumé

Cette étude s'inscrit dans une démarche d'évaluation de l'efficacité du traitement des lixiviats produits par le Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Boghni, en mettant particulièrement l'accent sur le procédé d'osmose inverse. Le lixiviat brut se caractérise par une forte charge polluante, tant organique que minérale, avec des concentrations élevées en matières oxydables et en sels dissous, notamment en ions chlorure, bicarbonate, calcium et magnésium. Le rapport très faible entre la DBO₅ et la DCO traduit une faible biodégradabilité, caractéristique des lixiviats matures et stabilisés. Les analyses physico-chimiques confirment la performance du traitement membranaire, avec une élimination quasi totale des polluants dans le perméat. En revanche, le concentrât reste fortement contaminé, soulignant la nécessité de traitements complémentaires ou de solutions de valorisation adaptées. En conclusion, cette étude met en évidence l'efficacité de l'osmose inverse tout en rappelant les enjeux environnementaux liés à la gestion durable des résidus concentrés.

Mots-clés : lixiviat, osmose inverse, perméat, concentrât, centre d'enfouissement technique.

Abstract

This study evaluates the effectiveness of leachate treatment at the Technical Landfill Center (CET) of Boghni, with a particular focus on the reverse osmosis process. The raw leachate exhibits a high pollutant load, both organic and inorganic, with elevated concentrations of oxidizable matter and dissolved salts such as chloride, bicarbonate, calcium, and magnesium. The very low BOD₅/COD ratio indicates poor biodegradability, typical of mature and stabilized leachate. Physico-chemical analyses confirm the high performance of the membrane treatment, achieving near-complete removal of pollutants in the permeate. However, the concentrate remains heavily contaminated, emphasizing the need for additional treatment or suitable valorization strategies. In conclusion, this study highlights the effectiveness of reverse osmosis while underscoring the environmental challenges associated with the sustainable management of the concentrated residues.

Keywords: leachate, reverse osmosis, permeate, concentrate, technical landfill center.