



République algérienne démocratique et
populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de
la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj de BOUIRA
Faculté des Sciences appliqués
Département des génies des procédés



Mémoire de Master

En Génie des procédés

Spécialité : Génie de l'environnement

Thème

Etudes des caractéristiques des lixiviats du CET d'AHNIF

Réalisé par :

- SOUDANI Nour El Houda
- MERAD Naouel

Devant le jury composé de :

NAWEL EL HANAFI	MCA	U.A.M.O.BOUIRA	PRESIDENTE
FARID AOUDJIT	MCA	U.A.M.O.BOUIRA	PROMOTEUR
ABDERRAZAQ HAMADACHE	MCA	U.A.M.O.BOUIRA	EXAMINATEUR

2024/2025

Remerciements

En premier lieu, nous exprimons notre gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'aboutissement de ce travail, ainsi que le courage de surmonter les diverses difficultés rencontrées tout au long de ce parcours.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur **Farid Aoudjit** pour avoir accepté de nous encadrer. Sa disponibilité, sa bienveillance, sa générosité intellectuelle et la qualité de ses conseils ont été d'une aide précieuse dans la réalisation de ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de notre respect et de notre sincère gratitude.

Nos remerciements vont également aux membres du jury **Madame Nawel El Hanafi** et **Monsieur Abderrazaq Hamadache** pour avoir accepté d'évaluer notre travail. Nous sommes particulièrement honorés par leur présence et leur intérêt. Nous leur adressons nos plus profonds remerciements et tout notre respect.

Nous remercions chaleureusement l'ensemble du personnel du département de *Génie des procédés*, en particulier les enseignants qui nous ont transmis leurs connaissances et leur passion tout au long de notre formation. Nos pensées reconnaissantes vont également à toutes les personnes, connues ou anonymes, qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à nos familles, et en particulier à nos parents et à nos frères, pour leur soutien inconditionnel, leur amour indéfectible, leurs encouragements constants et leur présence réconfortante à chaque étape de ce parcours. Nous exprimons aussi notre gratitude à nos amis pour leur appui moral et leurs encouragements sans faille.

Nous souhaitons également adresser un remerciement particulier à l'ensemble de nos enseignants et encadrants, en particulier ceux de l'**Agence Nationale des Déchets**, pour leur accompagnement précieux, leur professionnalisme et leur engagement constant à nos côtés.

Nous adressons également nos remerciements à l'équipe de l'**EPWG CET Nadhif de Bouira** pour leur accueil, leur disponibilité, ainsi que pour les informations et les ressources techniques mises à notre disposition, qui ont grandement facilité la conduite de notre étude sur le terrain.

Nous exprimons une gratitude particulière à **Madame Ben Saadia Houda**, **Madame Ben Youcef Hayat** et **Monsieur Sahi Samir**, membres de cette équipe, pour leur accompagnement constant, leur collaboration précieuse et l'ensemble des facilités qu'ils nous ont offertes tout au long de notre travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire, avant tout, à mon cher époux **Toufik**, pilier de ma vie et de ce parcours académique. Ton soutien indéfectible, ta patience infinie, ta foi inébranlable en mes capacités, et ton amour constant ont été pour moi une source inestimable de force. À chaque moment de doute ou de fatigue, tu as su être présent, m'encourageant avec bienveillance et m'aidant à avancer. Ce travail porte en filigrane l'empreinte de ta présence silencieuse mais essentielle.

À mes parents bien-aimés, que je remercie du plus profond de mon cœur. Vous m'avez élevée avec des valeurs de persévérance, de respect, et d'amour du savoir. Votre appui constant, votre tendresse rassurante et votre confiance en moi m'ont portée jusqu'ici. Sans vous, ni ce mémoire ni le chemin qu'il symbolise n'auraient été possibles. Que cette réussite soit le reflet de tout ce que vous avez semé en moi.

À mes sœurs adorées, **Jihan** et **Sonia**, mes frères, **Ryad** et **Sami**, qui ont toujours été là, dans les moments heureux comme dans les plus difficiles. Votre affection, vos encouragements sincères et votre complicité m'ont accompagnée tout au long de ce parcours. Vous avez su, par un mot, un geste ou une simple présence, raviver ma motivation et me faire sentir entourée.

À mes amis fidèles, à ma famille élargie, merci pour l'amour, la confiance et le respect que vous m'avez témoignés. Vous avez été pour moi une source constante d'énergie et d'équilibre, surtout dans les moments où j'avais besoin d'un regard bienveillant ou d'un mot réconfortant.

À l'ensemble de mes enseignants et encadrants, qui ont su m'inspirer, m'accompagner et me transmettre leur savoir avec rigueur et passion. Vous avez enrichi mon parcours d'une précieuse expérience humaine et intellectuelle.

À mes collègues et camarades de promotion **Hanan**, **Celylia** et **Hayat**, avec qui j'ai partagé deux années intenses de travail, d'échanges, de solidarité et de dépassement de soi. Ensemble, nous avons affronté les difficultés, partagé nos doutes et célébré nos petites victoires. Ce chemin, je l'ai parcouru avec vous, et je vous en remercie sincèrement.

Enfin, à toutes celles et ceux qui m'ont connue, de près ou de loin, et qui, par un mot, un geste, une pensée ou un sourire, ont marqué mon parcours d'une empreinte particulière. À chacun et chacune d'entre vous, ce mémoire vous est aussi dédié.

MERAD NAOUEL

Dédicace

Je souhaite dédier ce travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réussite de cette expérience de stage.

À mes chers parents,

*piliers de ma vie, qui m'ont toujours entourée d'un amour inconditionnel, d'une bienveillance sans faille et d'une présence rassurante.
Pour leur patience infinie, qui a su apaiser mes moments de découragement, et leurs encouragements constants, qui ont nourri ma volonté d'avancer.
C'est dans leurs valeurs, leur confiance et leurs sacrifices silencieux que j'ai puisé la force et la détermination nécessaires pour franchir chaque étape de ce parcours.
Rien de ce que j'accomplis aujourd'hui ne serait possible sans tout ce qu'ils m'ont transmis.*

À mon mari Abderrahmane,

*mon partenaire de vie, mon roc dans les tempêtes, mon soutien dans les moments d'incertitude.
Ton amour profond, ta patience inlassable et ta capacité à toujours croire en moi, même lorsque moi-même je doutais, ont été des moteurs puissants tout au long de ce parcours.
Ta présence à mes côtés m'a apporté la stabilité, la sérénité et l'équilibre nécessaires pour affronter chaque étape de ce défi. Ce mémoire est aussi le reflet de ton soutien inconditionnel, et je te le dédie avec tout mon amour.*

À ma sœur Amina,

*un être exceptionnel, toujours présente dans les moments de doute comme dans les instants de joie.
Ta générosité, ta force et ton écoute ont été pour moi une véritable lumière tout au long de ce chemin.
Tu as su trouver les mots justes quand j'en avais besoin, tu as cru en moi même quand je doutais.
Ton soutien indéfectible m'a portée bien plus que tu ne peux l'imaginer.
Cette réussite est aussi la tienne.*

À mes frères Kamel, Samir, Fouad et Mohamed Amine,

*pour leur présence discrète mais constante, leur fierté exprimée en silence, et leur façon unique de me montrer leur affection.
Merci pour votre protection, vos encouragements sincères et votre confiance en moi.
Vous avez été, chacun à votre manière, une source de motivation et de stabilité. **À ma***

famille,
qui a toujours été un refuge de confiance et de soutien, m'accompagnant à chaque étape
avec bienveillance.

À mes enseignants et encadrants,
académiques et professionnels, pour leur expertise précieuse, leurs conseils avisés et
l'opportunité qu'ils m'ont offerte de grandir dans un environnement stimulant.

À mes collègues et amis Hanane et Celylia,
qui ont été à mes côtés, partageant les moments difficiles comme les réussites, et qui
m'ont soutenue par leurs paroles et leurs gestes.

Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi et m'ont encouragée, je vous adresse ma profonde
gratitude.

« Le succès n'est jamais le fruit d'un effort solitaire,
mais celui d'un parcours partagé avec ceux qui croient en nous. »

SOUDANI NOUR EL HOUDA

الملخص

تتناول هذه المذكرة إشكالية إدارة ومعالجة العصارة، وهي تلك السوائل الملوثة والخطيرة التي تنتجها مراكز الردم التقني . وفي مواجهة التحديات البيئية المرتبطة بالزيادة المستمرة في إنتاج النفايات، تقترح الدراسة حلاً متقدماً للمعالجة يعتمد على التناضح العكسي ذي المرحلتين. يستكشف العمل خصائص العصارة، وتقنيات المعالجة المختلفة المتوفرة، ويسلط الضوء على فعالية وموثوقية العملية الغشائية المختارة لإزالة التلوث من هذه السوائل. يُظهر تحليل المعايير الفيزيائية والكيميائية للمحلول النفاذ انخفاضاً كبيراً في الملوثات العضوية والنيتروجينية والمعدنية، مما يتوافق مع المعايير البيئية السارية ويؤكد كفاءة تنقية إجمالية تبلغ حوالي 99 %

الكلمات المفتاحية

العصارة، مركز الردم التقني، التناضح العكسي، معالجة النفايات، السوائل الملوثة، المعايير الفيزيائية والكيميائية، المعالجة الغشائية، إزالة التلوث، كفاءة التنقية

Résumé

Ce mémoire porte sur la problématique de la gestion et du traitement des lixiviats, ces effluents liquides et très polluants générés par les Centres d'Enfouissement Technique (CET). Face aux enjeux environnementaux liés à la production croissante de déchets, l'étude propose une solution de traitement avancée basée sur l'osmose inverse à double étage. Le travail explore les caractéristiques des lixiviats, les différentes technologies de traitement existantes, et met en évidence l'efficacité et la fiabilité du procédé membranaire choisi pour la dépollution de ces effluents. L'analyse des paramètres physico-chimiques du perméat montre une réduction significative des polluants organiques, azotés et minéraux, respectant ainsi les normes environnementales en vigueur et confirmant un rendement épuratoire global d'environ 99%.

Mots-clés : Lixiviat, Centre d'Enfouissement Technique (CET), Osmose inverse, Traitement des déchets, Effluents polluants, Paramètres physico-chimiques, Procédé membranaire, Dépollution, Rendement épuratoire.

Abstract (English)

This thesis addresses the critical issue of managing and treating leachate, highly polluting liquid effluents generated by Landfill Sites (CETs). Given the environmental challenges associated with increasing waste production, the study proposes an advanced treatment solution based on double-stage reverse osmosis. The work explores the characteristics of leachate, various existing treatment technologies, and highlights the effectiveness and reliability of the chosen membrane process for depolluting these effluents. Physicochemical analysis of the permeate demonstrates a significant reduction in organic, nitrogenous, and mineral pollutants, thereby complying with current environmental standards and confirming an overall purification efficiency of approximate

Keywords : Leachate, Landfill site (CET), Reverse osmosis, Waste treatment, Polluted effluents, Physicochemical parameters, Membrane process, Depollution, Purification efficiency.

Table des matières

Remerciements

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction	1
1 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	2
1.1 Généralités sur les déchets et les CET	2
1.2 Définition des déchets	2
1.3 Classification des déchets	2
1.3.1 Les déchets solides urbains	2
1.3.2 Déchets ménagers et assimilés	3
1.3.3 Déchets encombrants	3
1.3.4 Déchets spéciaux	3
1.3.5 Déchets d'activité de soins	3
1.3.6 Déchets inertes	3
1.4 Gestion des déchets	3
1.4.1 Collecte des déchets	4
1.4.2 Tri des déchets	4
1.4.3 Valorisation des déchets	4
1.4.4 Élimination des déchets	4
1.4.5 L'enfouissement technique	4
1.5 Définition de Centre d'enfouissement technique (CET)	5
1.6 Types de Centre d'enfouissement technique (CET)	5
1.6.1 CET de Classe 1	6
1.6.2 CET de Classe 2	6
1.6.3 CET de Classe 3	7
1.7 Objectifs du CET	7
1.8 Analyse des impacts du centre d'enfouissement technique sur l'environnement	7
1.8.1 Impacts liés aux rejets liquides	7
1.8.2 Impacts liés aux rejets atmosphériques	8
1.8.3 Impacts liés au bruit	8
1.8.4 Impacts socio-économiques	8
1.9 Définition des lixiviats	9
1.10 Types de lixiviats	9

1.10.1	Lixiviats jeune	9
1.10.2	Lixiviats intermédiaires	9
1.10.3	Lixiviats stabilisés	10
1.11	Formation des lixiviats	10
1.12	Composition de lixiviat	12
1.13	Paramètres influant sur les lixiviats	15
1.14	Impact du lixiviat sur l'environnement et la santé humaine	16
1.14.1	Sur l'environnement	16
1.14.2	Sur la santé humaine	16
1.15	Réglementation sur les lixiviats	19
1.16	Paramètres Physico-Chimiques caractérisant les lixiviats	19
1.16.1	Paramètres physiques	20
1.16.2	Paramètres chimiques	20
1.16.3	Métaux lourds	21
1.16.4	Composés spécifiques	21
1.17	Procédés de traitement des lixiviats	21
1.17.1	Traitement par voie biologique	21
1.17.2	Procédés chimiques	23
1.17.3	Méthode physique	25
1.17.4	Méthodes membranaires	25
2	MATERIELS ET METHODES	27
2.1	Présentation de la zone d'étude	27
2.1.1	Délimitation du site de la zone d'étude	27
2.1.2	Choix du site :	28
2.2	Activités actuelles du Centre d'enfouissement technique d'Ahnif	28
2.3	Estimation de la production moyenne en déchets	30
2.4	Le casier	31
2.4.1	Exploitation du casier	31
2.4.2	Mise en place d'un système de drainage et traitement des lixiviats .	31
2.5	Biogaz	33
2.6	Centre de tri	33
2.7	Clôture	34
2.8	Traitement des lixiviats par osmose inverse	35
2.8.1	Phénomène d'osmose inverse	35
2.8.2	Membrane d'osmose inverse	36
2.8.3	Processus de traitement des lixiviats par osmose inverse à deux étages	37
2.8.4	Liste des composants principaux de traitement du lixiviat par os- mose inverse à deux étages	38
2.9	Objectifs du traitement	41
2.10	Prélèvement des lixiviats	42
2.11	Mesure des paramètres de la pollution	42
2.11.1	Préparation analytique : dilution, gestion des consommables et sé- lection des tests LCK	43
2.11.2	Équipements de laboratoire et méthodes d'analyse	44
2.11.3	Méthode de fonctionnement du spectrophotomètre avec tubes LCK	45

3	RESULTATS ET DISCUSSION	50
3.1	Caractérisation des lixiviats bruts de CET AHNIF	50
3.2	Caractérisation du lixiviat après traitements	53
3.3	Conclusion	57
	Annexe	62

Liste des figures

Chapitre 1

- Figure 1.1 : La chaîne de la gestion des déchets 05
- Figure 1.2 : La composition des lixiviats 15

Chapitre 2

- Figure 2.1 : Localisation administrative de la zone d'étude 27
- Figure 2.2 : Délimitation de site du C.E.T d'Ahnif 28
- Figure 2.3 : Plan d'implantation du CET Ahnif 29
- Figure 2.4 : Casier de CET Ahnif 31
- Figure 2.5 : Structure en coupe de la double barrière d'étanchéité mise en place au sein du CET 32
- Figure 2.6 : Fin de casier d'enfouissement 33
- Figure 2.7 : Centre de tri de CET Ahnif 34
- Figure 2.8 : Comparaison entre l'osmose et l'osmose inverse 36
- Figure 2.9 : Structure d'un module de membrane spirale pour osmose inverse .. 36
- Figure 2.10 : Schéma de la station de traitement de lixiviat par OI double étage d'Ahnif 38
- Figure 2.11 : Bassin d'homogénéisation 39
- Figure 2.12 : Filtre à sable 39
- Figure 2.13 : Filtre à poche 40
- Figure 2.14 : Filtre à cartouche 40
- Figure 2.15 : Bassin de concentrât 41
- Figure 2.16 : Acide sulfurique 42
- Figure 2.17 : Anti-scalant 42
- Figure 2.18 : Principe fondamental de la dilution 44

• Figure 2.19 : Tubes LCK	45
• Figure 2.20 : Spectrophotomètre	45

Chapitre 3

• Figure 3.1 : Histogramme des concentrations en DCO mesurées lors des prélèvements	51
• Figure 3.2 : Histogramme des concentrations en $\text{NH}_4\text{-N}$ mesurées lors des prélèvements	52
• Figure 3.3 : Histogramme des concentrations en DCO après traitement	54
• Figure 3.4 : Histogramme des concentrations en $\text{NH}_4\text{-N}$ après traitement	55

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau 1.1 : Types de centre d'enfouissement technique	6
Tableau 1.2 : Comparaison des lixiviats selon l'âge de la décharge	10
Tableau 1.3 : Les principales étapes de dégradation des déchets en décharge	12
Tableau 1.4 : Paramètres physico-chimiques des lixiviats	14
Tableau 1.5 : Métaux et éléments traces présents dans les lixiviats	14
Tableau 1.6 : Nuisances créées par une décharge	18
Tableau 1.7 : Comparaison entre traitements biologiques aérobie et anaérobie	22
Tableau 1.8 : Comparaison entre les procédés classiques de traitement	26

Chapitre 2

Tableau 2.1 : Quantités des déchets générés	30
Tableau 2.2 : Objectifs de performance du traitement des lixiviats	42
Tableau 2.3 : Principaux équipements de laboratoire	45

Chapitre 3

Tableau 3.1 : Paramètres physico-chimiques du lixiviat brut du CET AHNIF à trois périodes	50
Tableau 3.2 : Origine de la couleur et de l'odeur des déchets en décomposition	53
Tableau 3.3 : Paramètres physico-chimiques du perméat du CET AHNIF à trois périodes	54

Liste des abréviations

CET	Centre d'Enfouissement Technique
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DBO₅	Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours
MES	Matières en Suspension
NH₄⁺	Ion ammonium
NTK	Azote Total Kjeldahl
COV	Composés Organiques Volatils
AGV	Acides Gras Volatils
HT	Hydrocarbures Totaux
OI	Osmose Inverse
UF	Ultrafiltration
NF	Nanofiltration
PE	Polyéthylène
PVC	Polychlorure de vinyle
GRP	Plastique Renforcé de Fibre de Verre
Fe²⁺ / Fe³⁺	Fer ferreux / ferrique
COT	Carbone Organique Total
TDS	Total Dissolved Solids (Solides Dissous Totaux)
SBR	Sequencing Batch Reactor (Réacteur biologique séquentiel)
pH	Potentiel Hydrogène
MOD	Matière Organique Dissoute
UV	Rayonnements ultraviolets
EF	Électron Fenton
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
LCK	Lange Cuvette Kits

Introduction générale

La gestion des déchets solides constitue l'un des enjeux environnementaux majeurs des sociétés contemporaines. L'évolution croissante des activités humaines, associée à une urbanisation accélérée, engendre une production accrue de déchets dont le traitement, en particulier par enfouissement, génère des effluents liquides appelés *lixiviats*. Ces derniers présentent une charge polluante importante, à la fois organique, minérale et parfois métallique, susceptible de contaminer les sols, les eaux souterraines et les écosystèmes aquatiques s'ils ne sont pas correctement maîtrisés.

Le Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Ahnif, situé dans la wilaya de Bouira, constitue l'un des sites concernés par cette problématique. L'étude des lixiviats qui y sont produits est essentielle afin d'évaluer l'impact environnemental potentiel du centre et de proposer des solutions de gestion adaptées. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail, qui vise à caractériser les lixiviats du CET d'Ahnif et à évaluer leur conformité vis-à-vis des normes de rejet en vigueur.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique détaillée portant sur les déchets, les centres d'enfouissement technique, la genèse des lixiviats, leur composition physico-chimique, ainsi que les procédés de traitement existants. Une attention particulière est portée à l'impact environnemental des lixiviats et au cadre réglementaire applicable.
- Le deuxième chapitre présente la zone d'étude (CET d'Ahnif), ainsi que la méthodologie adoptée pour le prélèvement, le suivi et l'analyse des échantillons de lixiviats. Ce chapitre détaille également les équipements et protocoles analytiques utilisés.
- Le troisième chapitre regroupe les résultats expérimentaux obtenus à travers les analyses physico-chimiques des lixiviats, comparés aux normes de rejet. Il propose une lecture critique de ces résultats à travers une interprétation technique permettant de formuler des observations pertinentes sur l'efficacité du système de traitement.

À travers cette étude, nous cherchons à mieux comprendre les caractéristiques des lixiviats du CET d'Ahnif et à contribuer à l'amélioration des pratiques de gestion environnementale au niveau local.

Chapitre 1

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Généralités sur les déchets et les CET

La résolution efficace d'un problème environnemental passe d'abord par la compréhension de ses causes. Les lixiviats générés dans les Centres d'Enfouissement Technique (CET) proviennent principalement de la décomposition des déchets qui y sont stockés. Ces effluents liquides, souvent fortement pollués, se forment lorsque l'eau s'infiltre à travers les déchets solides, entraînant avec elle des substances dissoutes ou en suspension.

Ainsi, une bonne compréhension de la gestion des lixiviats nécessite d'abord une analyse globale des déchets solides, en portant une attention particulière aux déchets ménagers et assimilés. Ces derniers constituent en effet la majeure partie des apports dans les CET et jouent un rôle central dans la formation des lixiviats.

1.2 Définition des déchets

Selon la loi algérienne 01-19, un déchet est défini comme un résidu issu d'une activité de production, de transformation ou d'utilisation. Il peut également s'agir de toute matière, substance ou bien mobilier que son détenteur abandonne ou est tenu légalement d'éliminer. Sur le plan économique, un déchet se caractérise par l'absence ou la négativité de sa valeur pour son propriétaire, à un instant et dans un contexte géographique précis [1].

1.3 Classification des déchets :

D'après la réglementation en vigueur en Algérie, les déchets sont classifiés en trois grandes familles [2] :

- Les déchets ménagers et assimilés.
- Les déchets spéciaux (industriels, agricoles, soins, services, ...)
- Les déchets inertes.

Étant donné que la typologie des déchets et les méthodes de traitement peuvent varier d'un pays à l'autre, il est essentiel de définir avec précision les termes adoptés dans ce travail :

1.3.1 Les déchets solides urbains

Conformément à l'article 2 du décret n° 84-378 du 15 décembre 1984, ils regroupent les ordures ménagères et les déchets de nature et de volume comparables, tels que :

- ordures ménagères industrielles ou collectives,
- produits issus du balayage ou du curage des égouts,
- déchets encombrants (meubles, gravats, carcasses automobiles),,
- déchets anatomiques ou infectieux hospitaliers,
- des déchets et issues d'abattoirs,
- emballages et résidus commerciaux.

1.3.2 Déchets ménagers et assimilés

Il s'agit des déchets provenant des foyers ainsi que de certaines activités commerciales, artisanales ou industrielles, dont la nature et la composition sont semblables aux ordures ménagères (déchets de cuisine, emballages, etc.) ...

1.3.3 Déchets encombrants

Il s'agit de déchets encombrants générés par les ménages, qui, en raison de leur encombrement élevé, ne peuvent être pris en charge de la même manière que les déchets ménagers traditionnels. Parmi ces déchets, on peut citer notamment les meubles, les pneumatiques et les appareils électroménagers...

1.3.4 Déchets spéciaux

Les déchets spéciaux désignent l'ensemble des déchets dont les caractéristiques physico-chimiques exigent un mode de traitement adapté. Issus majoritairement des secteurs industriel, agricole, médical ou des services, ils ne peuvent être pris en charge par les dispositifs standards appliqués aux déchets ménagers. Une sous-catégorie, dite de déchets dangereux, regroupe ceux dont la composition présente des éléments toxiques susceptibles d'engendrer des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

1.3.5 Déchets d'activité de soins

Les déchets spéciaux désignent l'ensemble des déchets dont les caractéristiques physico-chimiques exigent un mode de traitement adapté. Issus majoritairement des secteurs industriel, agricole, médical ou des services, ils ne peuvent être pris en charge par les dispositifs standards appliqués aux déchets ménagers. Une sous-catégorie, dite de déchets dangereux, regroupe ceux dont la composition présente des éléments toxiques susceptibles d'engendrer des effets néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

1.3.6 Déchets inertes

Ces déchets, lors de leur enfouissement, conservent leurs propriétés initiales sans subir de transformations physiques ; chimiques et biologiques. Ils proviennent essentiellement d'activités telles que l'extraction minière, les travaux de carrière, la construction, la rénovation ou la démolition. Ne présentant aucun signe de contamination par des substances toxiques ou des composants générateurs de nuisances, ils ne posent pas de menace pour la santé humaine ni pour l'environnement.

1.4 Gestion des déchets :

La gestion des déchets englobe l'ensemble des étapes allant de la collecte jusqu'à l'élimination, en passant par le tri, le transport, le stockage, la valorisation et le suivi de ces opérations. Cette définition permet d'identifier plusieurs composantes spécifiques du dispositif de gestion des déchets actuellement appliqué en Algérie [2] :

1.4.1 Collecte des déchets

Cette opération consiste à récupérer les déchets et à les centraliser dans un point de collecte, en vue de leur acheminement ultérieur vers une installation de traitement appropriée.

1.4.2 Tri des déchets

Cette étape consiste à distinguer les déchets selon leur composition ou leur catégorie, dans le but d'optimiser leur prise en charge. Elle permet, par exemple, d'isoler les matières comme le plastique, le papier ou autres types de résidus pour un traitement plus adapté.

1.4.3 Valorisation des déchets

Cette phase regroupe différentes formes de valorisation des déchets, telles que leur réutilisation, leur recyclage ou leur transformation biologique. Le recyclage permet de redonner une seconde vie à des matériaux ou objets en fin d'usage, tandis que le compostage repose sur l'action des micro-organismes du sol, qui décomposent la matière organique afin de générer un produit final stable et sain : le compost.

1.4.4 Élimination des déchets

Cette étape regroupe l'ensemble des traitements finaux appliqués aux déchets ne pouvant être valorisés. Elle inclut notamment les procédés thermiques, physico-chimiques et biologiques, ainsi que les pratiques d'élimination telles que l'enfouissement, l'immersion, le stockage ou la mise en décharge.

- Immersion : désigne le rejet de déchets dans un environnement aquatique..
- Enfouissement : correspond à l'entreposage souterrain de déchets.
- Incinération : il s'agit d'un procédé de combustion contrôlée visant à oxyder la fraction combustible des déchets dans des unités adaptées à leur nature variable.

Ce dernier procédé permet une réduction significative du volume des déchets à traiter, notamment pour les substances telles que les huiles usées, solvants, hydrocarbures ou résidus industriels. Les sous-produits issus de cette combustion, tels que le mâchefer et les cendres, sont ensuite dirigés vers un centre d'enfouissement technique pour élimination finale.

1.4.5 L'enfouissement technique

Les déchets ultimes spéciaux désignent ceux qui, compte tenu des limites actuelles sur le plan technique et économique, ne peuvent être ni valorisés ni rendus moins nocifs. Il s'agit principalement de résidus dont la récupération des éléments utiles est impossible et dont le potentiel de dangerosité ou de pollution ne peut être réduit. Dans les centres d'enfouissement technique (CET), on admet surtout des déchets à caractère solide et minéral, dont la charge polluante est principalement liée à des métaux lourds peu mobiles. Ces déchets se distinguent par une réactivité chimique très faible, une faible capacité d'évolution dans le temps et une solubilité quasi nulle.



FIG. 1.1: la chaîne de la gestion des déchets

1.5 Définition de Centre d'enfouissement technique (CET)

Le Centre d'Enfouissement Technique (CET) est une évolution de la décharge contrôlée, conçu pour minimiser les impacts environnementaux liés à l'enfouissement des déchets. Il repose sur une gestion rigoureuse incluant la sélection des déchets, la récupération des effluents (lixiviats et biogaz), ainsi que la mise en place de barrières de protection du sol et des eaux. Ce dispositif vise à réduire les risques de pollution des nappes phréatiques et à assurer un suivi environnemental à long terme [3].

1.6 Types de Centre d'enfouissement technique (CET)

La classification des centres de stockage des déchets repose sur la nature des déchets qu'ils peuvent recevoir ainsi que sur leur degré de perméabilité. Ainsi, ces installations sont réparties en trois types distincts, conformément aux critères réglementaires [4] comme mentionné dans le tableau 1.1 :

Tableau 1.1 : Classification des Centres d'Enfouissement Technique (CET)

Type de CET	Description
CET de type 1	Destiné à accueillir les déchets industriels dangereux
CET de type 2	Reçoit les ordures ménagères et déchets assimilés.
CET de type 3	Reçoit les déchets inertes : terres, gravats, béton concassé, etc.

1.6.1 CET de Classe 1

Au-delà des déchets urbains courants, ces centres d'enfouissement sont conçus pour recevoir également certains rejets industriels spécifiques, considérés comme déchets spéciaux. Ces derniers sont classifiés en deux sous-groupes selon leurs propriétés physico-chimiques et leur niveau de dangerosité :

- **Déchets de catégories A :**

- Les sous-produits issus des procédés d'incinération ;
- Les résidus générés par l'industrie sidérurgique, tels que les poussières métalliques et les boues d'usinage ;
- Les déchets provenant des opérations de forage ;
- Les rejets minéraux issus de traitements chimiques, incluant notamment les oxydes métalliques, les sels inorganiques et les composés métalliques divers.

- **Déchets de catégories B :**

La catégorie B regroupe divers résidus issus de traitements industriels. Elle inclut notamment les boues et sous-produits générés lors de l'épuration des effluents et des eaux de process, les déchets solides contenant des résidus de peintures, vernis ou résines, ainsi que les sols contaminés ou matériaux imprégnés de substances toxiques. Elle comprend également les rebuts provenant du recyclage d'accumulateurs et de batteries, intégrant des déchets complexes tels que les résidus d'amiante, les matériaux réfractaires usés et d'autres éléments minéraux altérés ou souillés.

1.6.2 CET de Classe 2

Les centres d'enfouissement technique sont conçus pour recevoir les déchets ménagers ainsi que ceux présentant des caractéristiques similaires. Les types de déchets admissibles dans ces installations incluent notamment :

- Les ordures issues des ménages ;
- Les déchets volumineux d'origine domestique ;
- Les déblais, gravats et résidus de chantiers ;
- Les déchets générés par les activités commerciales, artisanales ou industrielles à condition qu'ils soient comparables aux ordures ménagères en termes de nature ;
- Les déchets agricoles ne représentant aucun risque sanitaire ni environnemental ;

- Les pneumatiques usagés ;
- Les cendres et sous-produits de traitement thermique issus de l'incinération des déchets ménagers, après refroidissement ;
- Les boues issues des systèmes d'assainissement.

1.6.3 CET de Classe 3

Ces installations de stockage sont spécifiquement destinées aux déchets inertes. Les décharges de classe III sont conçues pour accueillir uniquement des déchets ne subissant aucune transformation physique, chimique ou biologique notable. Elles reçoivent principalement des déchets inertes d'origine domestique, tels que les résidus issus d'activités de bricolage, ainsi que des matériaux inertes comme les déblais et gravats. Ces derniers peuvent également être admis dans les décharges de classe II. En outre, ces sites sont aptes à recevoir les déchets générés par les travaux de chantiers et l'exploitation de carrières.

1.7 Objectifs du CET

Le Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T) a pour objectif d'accueillir les déchets ménagers et assimilés en vue de leur enfouissement, dans le but de [4] :

- Éliminer les sites de dépôt sauvage,
- Réduire l'impact environnemental des déchets,
- Promouvoir la récupération des matières valorisables et réduire ainsi les pertes en ressources naturelles ;
- Réduire les volumes à éliminer afin d'optimiser la gestion des flux de déchets ;
- Favoriser le développement d'activités industrielles liées au recyclage et contribuer à la création d'emplois locaux.

1.8 Analyse des impacts du centre d'enfouissement technique sur l'environnement

1.8.1 Impacts liés aux rejets liquides

La pollution des eaux de surface peut provenir du débordement ou de l'écoulement des bassins de stockage des lixiviats vers le réseau hydrographique. Cela représente un vecteur potentiel de transmission de maladies hydriques telles que le choléra ou la typhoïde. Au sein du Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T), les lixiviats sont collectés dans des bassins de lagunage conçus selon les normes réglementaires. Pour prévenir tout débordement, notamment durant les épisodes pluvieux, ces eaux sont systématiquement pompées vers les casiers d'enfouissement. Grâce à l'application rigoureuse de ces mesures, l'impact des lixiviats sur la pollution des eaux de surface reste particulièrement faible.

En ce qui concerne les eaux souterraines, la pollution résulte de l'infiltration et de la diffusion des lixiviats à travers un sous-sol perméable ou fissuré. Ce processus d'infiltration peut entraîner une contamination chimique et bactériologique des nappes [5].

La dégradation des déchets par fermentation génère des éléments indésirables tels que les ions sodium (Na^+), ammonium (NH_4^+), chlorure (Cl^-), potassium (K^+) et fer ferreux (Fe^{2+}), ce qui altère la qualité des lixiviats. En l'absence de dispositifs de sécurité efficaces pour contrôler l'évolution de ces eaux toxiques, une pollution significative des nappes souterraines peut se produire.

1.8.2 Impacts liés aux rejets atmosphériques

L'exploitation d'un Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T) destiné aux déchets ménagers entraîne la formation de biogaz, issu de la dégradation de la fraction organique des déchets. Ce biogaz est principalement composé de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2) accompagnés de plus faibles quantités d'azote (N_2) et de vapeur d'eau. Le méthane, en présence d'air, peut présenter un risque d'explosion lorsque sa concentration dans le mélange gazeux se situe entre 5 % et 15 %, ce qui constitue un danger potentiel important à prendre en compte dans la gestion des installations.

Par ailleurs, la manipulation des déchets et la fermentation des matières organiques au sein des casiers et des centres de tri dégagent des odeurs désagréables, en grande partie dues aux émanations de méthane. Ces odeurs nauséabondes représentent une nuisance olfactive marquée et peuvent affecter la santé des travailleurs. Elles sont susceptibles de provoquer un état de stress, des troubles du sommeil, une sensation de fatigue persistante, des irritations des voies respiratoires ainsi qu'un inconfort général.

En plus des odeurs, l'exploitation du site génère des envols de poussières et de déchets, particulièrement lors des phases de déversement, de transport ou de manipulation des ordures dans les casiers. Ces particules en suspension contribuent à la dégradation de la qualité de l'air et nuisent à l'esthétique de l'environnement environnant. Cette pollution particulière représente également un risque sanitaire pour les employés exposés de manière continue à ces conditions de travail [5].

1.8.3 Impacts liés au bruit

La circulation des camions ainsi que les opérations de déchargement, de compactage, d'épandage et de recouvrement des déchets constituent des sources directes de nuisances sonores pour les travailleurs. À long terme, cette exposition au bruit peut entraîner diverses perturbations physiologiques, telles que [5] :

- Déficits auditifs ;
- Effet cardio-vasculaire ;
- L'augmentation de la tension artérielle ;
- Compromettre la qualité du travail,
- La gêne.

1.8.4 Impacts socio-économiques

Il s'agit de la création de postes d'emplois directs et indirects, ainsi que du développement de filières de recyclage pour les produits valorisables [5].

Lixiviat : Le lixiviat est un effluent complexe généré par l'infiltration de l'eau à travers les déchets stockés dans les centres d'enfouissement. Riche en polluants organiques, minéraux et parfois métalliques, il constitue une menace sérieuse pour le milieu naturel. Sa composition variable et sa charge toxique en font un enjeu majeur en matière de gestion environnementale des déchets.

1.9 Définition des lixiviats

Le lixiviat, aussi appelé percolât dans certains contextes scientifiques, est un liquide résiduel formé lorsque de l'eau s'infiltre à travers un matériau et en dissout partiellement les constituants. Ce matériau peut être constitué de particules solides, poreuses ou faiblement solubles, comme des poudres ou des mélanges hétérogènes contenant des phases solides, liquides et gazeuses. Dans le domaine de la gestion des déchets, le terme désigne plus spécifiquement les liquides produits « jus » par la percolation de l'eau à travers des déchets stockés, des composts, des cendres ou des décharges [6]. Sur le plan de la composition, le lixiviat regroupe plusieurs classes de polluants, parmi lesquelles on distingue principalement [7] :

- La charge organique dissoute, majoritairement issue de la dégradation des matières organiques ;
- Les composés organiques d'origine anthropique, tels que les hydrocarbures aromatiques, les phénols ou encore certains solvants chlorés ;
- Les principaux ions minéraux, dont le calcium Ca^{2+} , le magnésium Mg^{2+} , le potassium K^+ , le sodium Na^+ , l'ammonium NH_4^+ , le fer Fe^{2+} et le manganèse Mn^{2+}
- Les métaux lourds (Zn , Cd , Cr , Cu , Ni , Pb . . .) à l'état de traces.

1.10 Types de lixiviats

Le lixiviat évolue avec le temps, en fonction du stade de dégradation des déchets dans le CET. On distingue généralement trois types :

1.10.1 Lixiviats jeune

Ces lixiviats âgés de moins de cinq ans présentent généralement une charge organique élevée et relativement biodégradable, comme en témoigne un rapport DBO_5/DCO supérieur à 0,3. Cette fraction organique est principalement constituée d'acides gras volatils [8].

En raison de leur pH relativement acide (inférieur à 6,5), ces lixiviats peuvent également contenir des concentrations significatives en métaux, pouvant atteindre $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Ils sont caractéristiques des premières phases d'évolution d'une décharge, correspondant à des stades pré-méthanogènes [9].

1.10.2 Lixiviats intermédiaires

À mesure que la décharge atteint un stade plus avancé de maturation et que les déchets se stabilisent, la teneur en matière organique des lixiviats tend à diminuer. Parallèlement,

la proportion d'acides gras volatils se réduit, ne représentant plus que 20 à 30 % de la charge organique, au profit de composés organiques plus complexes et à haut poids moléculaire. Cette transformation s'accompagne d'une baisse notable de la biodégradabilité du lixiviat, comme en témoigne un rapport DBO_5/DCO compris entre 0,1 et 0,3.

Ces lixiviats d'un âge entre 5 et 10 ans après l'enfouissement, sont représentatifs de la phase stable dite méthanogène.

1.10.3 Lixiviats stabilisés

Les lixiviats ayant un âge supérieur à dix ans présentent une charge organique globalement faible, majoritairement constituée de composés humiques de haut poids moléculaire, tels que les acides fulviques et humiques. Leur DCO reste élevée, excédant généralement $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, mais leur faible rapport DBO_5/DCO ($< 0,1$) traduit une biodégradabilité très réduite. Ces caractéristiques sont représentatives des lixiviats issus de la phase de maturation des déchets en décharge. [8]

Le tableau ci-dessous porte une comparaison entre les lixiviats selon l'âge de la décharge :

Tableau 1.2: Comparaison des caractéristiques des lixiviats selon l'âge de la décharge

Caractéristiques	Lixiviats jeunes	Lixiviats intermédiaires	Lixiviats stabilisés
Âge (années)	< 5	5 - 10	> 10
Charge organique	Élevée	Moyenne	Faible
DBO_5/DCO	> 0.3	0.1 - 0.3	< 0.1
pH	< 6.5	Neutre	Neutre
Type de composés	Acides gras volatils	Composés organiques complexes	Acides fulviques et humiques
DCO ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Variable	Variable	> 3000

1.11 Formation des lixiviats

Les lixiviats se forment principalement par l'infiltration des eaux de pluie et de ruissellement à travers les déchets entreposés dans les installations de stockage, processus au cours duquel l'eau lessive les constituants des déchets [10]. Cette mobilisation s'opère à la fois par dissolution des composés solubles et par entraînement mécanique de particules en suspension, de colloïdes et d'autres éléments particuliers. Les réactions chimiques impliquées dans la formation des lixiviats sont en grande partie activées par l'activité microbienne, et la dynamique de leur évolution dépend essentiellement de la nature des transformations biologiques en cours dans la masse de déchets. Il est généralement reconnu que la composition des lixiviats varie en fonction de l'âge de la décharge.

Il existe six étapes caractéristiques de l'évolution d'une décharge [11] :

- **Hydrolyse des composés organiques complexes :**

Cette première étape consiste en la dégradation des macromolécules organiques (protéines, polysaccharides, lipides) par des enzymes extracellulaires produites par des microorganismes aérobies et aérobies facultatifs. Les composés hydrolysés, devenus solubles, peuvent alors être assimilés par les cellules microbiennes.

- **Dégradation aérobie initiale :**

Immédiatement après l'enfouissement, une phase transitoire aérobie s'installe, durant laquelle les substances hydrolysées sont rapidement oxydées par les bactéries

aérobies. Cette activité entraîne une consommation rapide de l'oxygène résiduel dans les interstices, ce qui conduit à une transition vers des conditions anaérobies.

- **Phase d'acidogenèse :**

À mesure que l'oxygène s'épuise, la dégradation devient strictement anaérobie. Les produits solubilisés lors des étapes précédentes (tels que les sucres et acides aminés) sont convertis par les bactéries acidogènes en acides gras volatils (AGV), alcools, ammoniac, et autres composés organiques intermédiaires. Cette accumulation d'AGV entraîne une acidification du milieu, abaissant le pH des lixiviats et favorisant la solubilisation de minéraux présents dans les déchets.

- **Phase d'acétogenèse :**

Les acides gras volatils formés précédemment sont ensuite transformés, sous l'action de microorganismes acétogènes, en acétate, hydrogène (H_2) et dioxyde de carbone (CO_2). Cette étape est marquée par une remontée progressive du pH.

- **Phase de méthanogenèse :**

Les produits issus de l'acétogenèse, notamment l'acétate, l'hydrogène, le dioxyde de carbone, ainsi que d'autres intermédiaires tels que le méthanol et l'acide formique, sont convertis en méthane (CH_4) par les archées méthanogènes. Selon Millot (1986), cette étape marque la transition vers la phase de maturation de la décharge.

- **Phase de maturation :**

À ce stade, les processus de dégradation anaérobie ralentissent considérablement. La matière organique devient de plus en plus stable, la production de biogaz décroît et l'oxygène peut réapparaître dans certains secteurs du massif. Les composés réfractaires, tels que les substances humiques et fulviques à haut poids moléculaire, peuvent encore subir une lente transformation biologique.

Le tableau suivant présente les principales étapes de dégradation des déchets en décharge :

Tableau 1.3: Les principales étapes de dégradation des déchets en décharge

Étape	Processus principal	Produits formés / Effets	Conditions
1. Hydrolyse	Dégradation enzymatique des macromolécules (protéines, glucides, lipides) par des microorganismes aérobies ou facultatifs	Composés solubles (sucres, acides aminés, acides gras, etc.)	Aérobie / facultatif
2. Dégradation aérobie	Oxydation rapide des composés solubles par des bactéries aérobies	CO ₂ , chaleur, consommation d'oxygène	Aérobie transitoire
3. Acidogenèse	Dégradation anaérobie des produits solubilisés en alcools, AGV, H ₂ , NH ₃	Acides gras volatils, alcools, baisse du pH, solubilisation des minéraux	Anaérobie, pH acide
4. Acétogenèse	Conversion des AGV en acétates, H ₂ et CO ₂ par des bactéries acétogènes	Acétate, hydrogène, dioxyde de carbone, remontée progressive du pH	Anaérobie
5. Méthanogenèse	Transformation du H ₂ , CO ₂ , acétate, méthanol et acide formique en méthane par des archées méthanogènes	CH ₄ (méthane), CO ₂	Anaérobie strict, pH neutre à basique
6. Maturation	Stabilisation de la matière organique résiduelle, dégradation lente de composés réfractaires	Faible production de gaz, substances humiques et fulviques, réapparition possible d'oxygène	Anaérobie ralenti / partiellement aérobie

1.12 Composition de lixiviat

Les lixiviats issus des centres de stockage présentent une composition chimique et biochimique à la fois complexe et dynamique, tant sur le plan temporel que spatial. En effet,

plus de 200 familles de composés organiques ont été identifiées dans ces lixiviats, à la suite de multiples études de caractérisation. Parmi ces composés, on retrouve une grande variété de structures, telles que des cycliques ou aromatiques, des composés benzéniques, ainsi que des alcools, éthers, cétones, acides, phénols, phtalates, furanes, ainsi que des composés azotés, soufrés et phosphorés. Certains d'entre eux, tels que le chloro- et dichlorobenzène, le toluène, le styrène, le naphthalène et les xylènes, sont considérés comme des polluants prioritaires et posent une menace sérieuse pour l'environnement [12].

La composition globale des lixiviats est généralement déterminée à l'aide d'analyses physico-chimiques, adaptées des méthodes utilisées pour le traitement des eaux. Cette composition dépend de nombreux facteurs, notamment [12, 13, 14] :

- Le mode d'exploitation du site (gestion, topographie, situation géographique, et degré de compaction des déchets),
- Les variations climatiques saisonnières (précipitations, humidité, évapotranspiration, etc.),
- La nature des déchets entreposés et le stade d'évolution des casiers de déchets (âge).

La composition moyenne d'un lixiviat est donc difficile à déterminer en raison de la combinaison de nombreux facteurs influents. Toutefois, on identifie généralement quatre grandes catégories de polluants présents dans ces effluents :

- **La matière organique dissoute ou en suspension** : issue de la biomasse, généralement quantifiée par la Demande Chimique en Oxygène (DCO). Cela inclut les acides gras volatils (AGV), ainsi que les substances humiques et fulviques [15, 16].
- **Les micropolluants organiques** : tels que les hydrocarbures et les composés organohalogénés [12].
- **Les composés minéraux majeurs** : présents sous forme ionique (Ca, Mg, Na, K, NH_4^+ , Fe, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}), ainsi que d'autres éléments tels que les borates et sulfites [12].
- **Les cations métalliques lourds** : présents à l'état de traces, généralement sous forme complexée avec des ligands minéraux (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) ou organiques (macromolécules humiques et fulviques) [12, 17].

Les deux tableaux suivants regroupent l'ensemble des paramètres des lixiviats :

Tableau 1.4 : Paramètres physico-chimiques des lixiviats [18].

Paramètre	Unité	Plage de valeurs
pH	–	4,5 – 9
Conductivité	µS/cm	2500 – 35000
COT (Carbone organique total)	mg/L	30 – 29 000
DCO (Demande chimique en oxygène)	mg/L	1700 – 10000
DBO5 (Demande biologique en oxygène)	mg/L	50 – 20000
Azote inorganique	mg/L	14 – 2500
Phosphore total	mg/L	0,1 – 23
Chlorure	mg/L	150 – 4500
Sulfate	mg/L	8 – 7750
Sodium	mg/L	70 – 7700
Potassium	mg/L	50 – 3700

Tableau 1.5 : Métaux et éléments traces présents dans les lixiviats [18].

Paramètre	Unité	Plage de valeurs
Ammonium	mg/L	50 – 2917
Calcium	mg/L	10 – 7200
Magnésium	mg/L	30 – 15000
Fer	mg/L	3 – 5500
Arsenic (As)	mg/L	0,01 – 1
Cadmium (Cd)	mg/L	0,0001 – 0,4
Chrome (Cr)	mg/L	0,02 – 1,5
Cobalt (Cb)	mg/L	0,005 – 1,5
Cuivre (Cu)	mg/L	0,005 – 10
Plomb (Pb)	mg/L	0,001 – 5
Mercure (Hg)	mg/L	0,00005 – 0,16
Nickel (Ni)	mg/L	0,015 – 13
Zinc (Zn)	mg/L	0,03 – 1000

1.13 Paramètres influant sur les lixiviats

La génération de lixiviats, ainsi que leur qualité, dépend de nombreux facteurs environnementaux et techniques, parmi lesquels ::

- Le climat : les précipitations, leur fréquence et répartition dans le temps et l'espace, l'évaporation, l'ensoleillement et la température jouent un rôle majeur.
- La nature des déchets : leur composition chimique, leur taux d'humidité et leur comportement lors du compactage influencent fortement la production de lixiviats.
- Le système de couverture : qu'il soit temporaire ou définitif, il peut comprendre une végétation, une couche de sol, un dispositif drainant ou de protection, etc..
- La densité des déchets : plus les déchets sont denses, plus leur comportement hydrodynamique peut varier.
- Le ruissellement : il est conditionné par la pente de recouvrement et les caractéristiques de la surface exposée.
- Les pertes d'eau par évaporation : notamment via les réactions biologiques produisant du biogaz..
- L'accumulation ou non de l'eau : qui dépend du drainage interne et de la structure du site.
- La profondeur du site d'enfouissement et les caractéristiques géologiques du fond : influencent aussi la rétention ou l'écoulement du lixiviat.

Enfin, il est essentiel de noter que, même sans infiltration extérieure, une faible quantité de lixiviat peut se former à cause des réactions biochimiques internes à la masse de déchets.

La figure ci-dessous représente les différentes compositions des lixiviats :

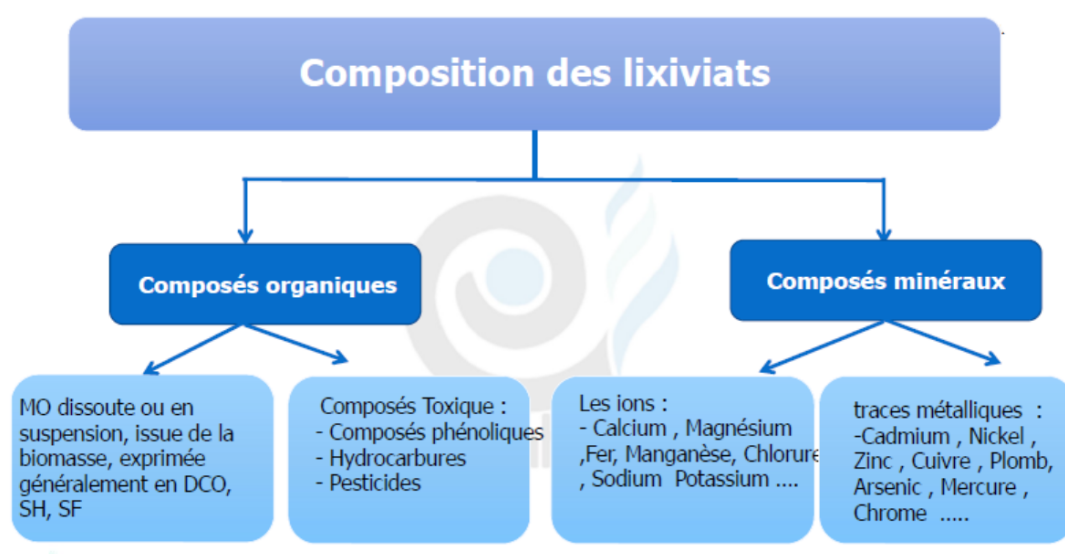


FIG. 1.2: la composition des lixiviats

1.14 Impact du lixiviat sur l'environnement et la santé humaine

1.14.1 Sur l'environnement

Les lixiviats générés dans les centres de stockage, issus de l'infiltration des eaux de pluie à travers les déchets solides, présentent plusieurs menaces environnementales et techniques lorsqu'ils sont mal maîtrisés. Les principaux risques sont les suivants :

- **Pollution des ressources hydriques** : En raison de leur composition complexe, les lixiviats peuvent contenir des substances organiques et inorganiques potentiellement dangereuses telles que des métaux lourds, des composés organiques volatils, des agents pathogènes ou encore des résidus chimiques. Si les bassins de confinement sont mal conçus ou subissent des défaillances, ces éléments peuvent migrer vers les nappes souterraines ou les eaux de surface, engendrant des conséquences sanitaires et écologiques sérieuses.
- **Émissions de gaz à effet de serre** : La fermentation anaérobie des matières organiques présentes dans les lixiviats peut produire des gaz comme le méthane (CH_4) et le dioxyde de carbone (CO_2). En l'absence de système de captage et de traitement, ces gaz peuvent s'échapper dans l'atmosphère, contribuant ainsi au réchauffement climatique.
- **Pollution olfactive** : Les lixiviats peuvent dégager des odeurs fortes et désagréables dues à la présence de composés soufrés et d'autres substances odorantes. Ces nuisances peuvent affecter négativement les riverains et altérer la qualité de vie dans les zones avoisinantes.
- **Risque microbiologique** : Du fait de leur richesse en nutriments, les lixiviats peuvent favoriser la prolifération de micro-organismes pathogènes (bactéries, virus, etc.), posant un risque sanitaire, notamment si les bassins ne sont pas correctement entretenus ou sécurisés.
- **Défaillance des infrastructures** : Les ouvrages de confinement des lixiviats doivent être conçus pour résister aux aléas climatiques extrêmes et aux contraintes géotechniques. Un affaissement, une rupture ou une surcharge hydraulique peuvent provoquer un déversement accidentel, entraînant une contamination grave du sol et des eaux environnantes.

1.14.2 Sur la santé humaine

Les lixiviats issus des centres d'enfouissement technique peuvent présenter de graves risques pour la santé humaine lorsqu'ils ne sont pas correctement collectés et traités. En effet, ces liquides contiennent souvent des substances toxiques comme les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium), des composés organiques volatils, des résidus pharmaceutiques ou encore des micro-organismes pathogènes. Si ces polluants atteignent les nappes phréatiques ou les sources d'eau potable, ils peuvent provoquer des maladies graves telles que [19] :

- des troubles neurologiques (plomb, mercure),

- des malformations congénitales (exposition prolongée aux métaux lourds),
- des affections rénales et hépatiques (cadmium, solvants organiques),
- des maladies gastro-intestinales ou infectieuses liées aux bactéries ou virus présents dans les lixiviats.

L'exposition peut se faire de façon directe (contact avec l'eau contaminée, inhalation de gaz) ou indirecte (consommation de produits agricoles irrigués avec une eau polluée).

Le tableau suivant présente les nuisances créées par les décharges :

Tableau 1.6: : Nuisances créées par une décharge [20].

Sources de nuisance	Conséquences directes	Conséquences indirectes
Lixiviats	Contamination : <ul style="list-style-type: none"> • du sol • de la nappe phréatique • des cours d'eau • des mers 	<ul style="list-style-type: none"> • Intoxications par l'eau de consommation • Épidémies • Destruction de la faune et de la flore
Biogaz	<ul style="list-style-type: none"> • Odeurs • Explosions • Incendies • Pollution atmosphérique 	<ul style="list-style-type: none"> • Intoxications • Asphyxie • Effet de serre • Maladies type cancers
Animaux errants	<ul style="list-style-type: none"> • Parasites de la décharge • Destruction de la faune et de la flore 	<ul style="list-style-type: none"> • Vecteurs de maladies • Épidémies • Infections dues aux morsures et griffes
Déchets solides	<ul style="list-style-type: none"> • Éboulements • Déchets volants • Blessures sur objets coupants • Tassement 	<ul style="list-style-type: none"> • Infections
Aspect visuel, charroi...	Sécurité dans les villages	<ul style="list-style-type: none"> • Impact sur le tourisme • Opposition de citoyens

1.15 Réglementation sur les lixiviats

La gestion des lixiviats est soumise à un cadre réglementaire rigoureux visant à prévenir leurs effets nuisibles sur l'environnement et la santé humaine. À l'échelle européenne, la **Directive 1999/31/CE du Conseil**, en date du 26 avril 1999, relative à la mise en décharge des déchets, établit des obligations précises à l'attention des exploitants de centres d'enfouissement technique (CET), notamment [21] :

- collecter les lixiviats produits sur le site,
- les traiter conformément aux normes environnementales avant tout rejet,
- surveiller en continu la qualité des eaux souterraines à proximité du CET.

La réglementation fixe des valeurs seuils à ne pas dépasser pour plusieurs indicateurs liés aux lixiviats, notamment le **pH**, la demande biologique en oxygène sur 5 jours (**DBO**), la demande chimique en oxygène (**DCO**), ainsi que les concentrations en **métaux lourds**. Elle prévoit également l'obligation d'installer des dispositifs techniques adaptés, tels que des systèmes de drainage, d'étanchéité et de traitement, dont les spécifications dépendent du type de déchets stockés. L'objectif fondamental de ces mesures est de prévenir toute pollution des sols et des ressources hydriques.

En **Algérie**, la gestion des lixiviats issus des déchets est encadrée par le **Décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006**, qui définit les valeurs limites des rejets d'effluents liquides industriels. Le décret en question exige que toute installation générant des effluents liquides industriels, y compris les lixiviats, soit équipée d'un système de traitement adéquat. Ce dispositif doit permettre de réduire la charge polluante des rejets et de garantir le respect des seuils réglementaires fixés pour le rejet dans le milieu naturel.

Les valeurs limites spécifiques pour divers paramètres tels que la DBO, la DCO, les métaux lourds, les hydrocarbures, les matières en suspension, le pH, entre autres, sont détaillées dans l'annexe. Ces normes s'appliquent aux rejets directs dans le milieu naturel, notamment les eaux de surface et les eaux souterraines, et concernent également les lixiviats produits par les centres d'enfouissement technique (CET) [22].

1.16 Paramètres Physico-Chimiques caractérisant les lixiviats

Les lixiviats produits par les Centres d'Enfouissement Technique (CET) constituent des effluents liquides fortement polluants, générés par la percolation de l'eau à travers les déchets entreposés. Leur composition dépend de plusieurs facteurs, notamment l'ancienneté de la décharge, la nature des déchets enfouis, ainsi que les conditions climatiques et géologiques du site. Afin d'évaluer leur impact potentiel sur l'environnement et de déterminer les techniques de traitement les plus appropriées, il est indispensable d'analyser un ensemble de paramètres physico-chimiques. Ces derniers sont généralement encadrés par la réglementation algérienne, en particulier le Décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006, ainsi que par des références scientifiques reconnues, ces paramètres sont regroupées comme suit :

1.16.1 Paramètres physiques

- **Température** : Varie selon les conditions climatiques et biologiques internes de la décharge. Elle influence fortement les processus microbiens et physico-chimiques.
- **Couleur** : Souvent brun foncé à noir, indiquant une forte concentration en matière organique et en composés dissous.
- **Odeur** : Odeur nauséabonde caractéristique des composés organiques volatils (COV) et du soufre.
- **Turbidité** : Mesure la présence de particules en suspension.
- **Conductivité électrique** : Reflète la charge ionique du lixiviat. Des valeurs élevées ($>10\,000$ $\mu\text{S}/\text{cm}$) traduisent une forte minéralisation [23].

1.16.2 Paramètres chimiques

- **pH** : Variable selon le stade de la décharge.
 - Phase jeune : pH acide (4,5 – 6,5), en raison de la fermentation acide.
 - Phase stabilisée : pH neutre à basique (6,5 – 8,5) [18, 22].
- **Demande Chimique en Oxygène (DCO)** : La demande chimique en oxygène (DCO) correspond à la quantité d'oxygène requise pour l'oxydation complète de la matière organique présente dans un échantillon liquide. Dans le cas des lixiviats, cette valeur peut varier considérablement, se situant généralement entre 2 000 et 60 000 mg/L selon le stade d'évolution du site d'enfouissement. [23].
- **Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours (DBO₅)** : Indique la fraction biodégradable de la matière organique. Sa valeur typique dans les lixiviats varie généralement entre 100 à 30 000 mg/L [24].
- **Rapport DBO₅/DCO** :
 - 0,5 : lixiviat jeune (biodégradable).
 - $< 0,1$: lixiviat mature (moins biodégradable) [24].
- **Matières en Suspension (MES)** : Résidus solides non dissous dans le lixiviat. Peuvent varier entre 100 et 1 000 mg/L [25].
- **Azote total (NTK), ammoniacal (NH₄⁺)** : Très abondants dans les lixiviats, l'azote ammoniacal peut dépasser 1 000 mg/L, témoignant d'une forte activité organique [18].
- **Ions inorganiques** :
 - Chlorures (Cl⁻) : très solubles et indicateurs de pollution organique.
 - Sulfates (SO₄²⁻), nitrates (NO₃⁻), potassium (K⁺), calcium (Ca²⁺), sodium (Na⁺) : présents à des concentrations variables selon la nature des déchets [24].
- **Matière organique dissoute (MOD)** : Responsable de la couleur et de l'odeur, elle contient souvent des composés aromatiques et volatils.

1.16.3 Métaux lourds

Même en faibles concentrations, les métaux lourds sont toxiques et posent un problème majeur de pollution des eaux :

- Fer (Fe), Zinc (Zn), Cuivre (Cu), Nickel (Ni), Cadmium (Cd), Plomb (Pb), Mercure (Hg), Chrome (Cr) : Leur présence dépend des types de déchets enfouis (batteries, appareils électroniques, etc.) [23].

1.16.4 Composés spécifiques

- **Composés Organiques Volatils (COV)** : Benzène, toluène, xylènes, etc.
- **Phénols** : Composés aromatiques toxiques.
- **Hydrocarbures totaux (HT)** : Liés aux déchets industriels ou huiles usagées.

1.17 Procédés de traitement des lixiviats

1.17.1 Traitement par voie biologique

Le traitement biologique occupe une place essentielle dans les procédés classiques de gestion des lixiviats, car il permet de réduire simultanément la charge organique et l'azote présents dans ces effluents. Ce traitement repose sur l'action de micro-organismes capables de décomposer la matière organique. En présence d'oxygène (milieu aérobie), cette dégradation génère principalement du dioxyde de carbone (CO_2) et des boues, tandis qu'en l'absence d'oxygène (milieu anaérobie), elle conduit à la formation d'un biogaz composé essentiellement de méthane (CH_4) et de CO_2 .

Ce type de traitement est particulièrement adapté aux lixiviats jeunes et non stabilisés, caractérisés par une charge organique dominée par des acides carboxyliques facilement biodégradables. À l'inverse, l'efficacité de la biodégradation diminue dans le cas des lixiviats stabilisés, en raison de la présence prédominante de composés organiques réfractaires.

Les procédés biologiques se répartissent en deux grandes catégories, selon la disponibilité en oxygène : les traitements aérobies et les traitements anaérobies. Ces procédés peuvent également être classés en deux types selon leur mode de fonctionnement :

- Les procédés naturels : tels que le lagunage, qui reposent sur des mécanismes épuratoires extensifs ;
- Les procédés contrôlés : tels que les systèmes à boues activées ou les lits bactériens, plus intensifs et adaptés à des flux plus concentrés.
- **Traitement aérobie**

Les procédés biologiques en milieu aérobie s'appuient sur l'action de micro-organismes présents naturellement dans l'environnement, capables de décomposer les polluants organiques. L'apport en oxygène, indispensable à leur activité, peut être assuré soit par des mécanismes naturels comme le vent ou des systèmes de ruissellement en cascade comme dans certaines lagunes de petite taille soit par des dispositifs mécaniques, tels que des turbines ou des diffuseurs de fines bulles, utilisés dans les installations de type boues activées. [26].

Les micro-organismes intervenant dans les traitements biologiques aérobies peuvent se présenter sous différentes formes : en suspension dans l'eau (comme dans les procédés à boues activées ou le lagunage), fixés sur un support (dans les lits bactériens, les filtres plantés, les filtres à sable ou les biofiltres), ou encore sous forme de biodisques.

Bien que les traitements biologiques aérobies aient prouvé leur efficacité dans la réduction des composés organiques et de l'azote ammoniacal, plusieurs limitations ont été identifiées, justifiant l'orientation vers des alternatives technologiques plus performantes.

les principaux désavantages de ces procédés incluent [26] :

- Un temps d'aération relativement long requis pour une dégradation complète ;
- Une consommation énergétique élevée, accompagnée d'une production importante de boues résiduelles ;
- Le risque d'inhibition de l'activité microbologique, particulièrement en présence de concentrations élevées en ammonium.

• Traitement anaérobies

Contrairement au traitement aérobie, la digestion anaérobie présente l'avantage d'une faible consommation énergétique et d'une production réduite de résidus solides. De plus, le méthane (CH_4) généré durant le processus peut être valorisé pour chauffer le digesteur, généralement maintenu à une température d'environ 35 °C. Toutefois, le principal inconvénient de ce procédé est sa sensibilité aux substances toxiques [27].

En résumé, le tableau ?? met en évidence de manière synthétique les avantages et les limites des systèmes anaérobies par rapport aux procédés aérobies.

Tableau 1.7 : Comparaison entre traitements biologiques aérobies et anaérobies [28]

Critères	Traitement anaérobie	Traitement aérobie
Consommation énergétique	Faible (pas d'aération requise)	Élevée (nécessite une aération continue)
Production de boues	Faible	Élevée
Production de biogaz (valorisable)	Oui (CH_4 , CO_2)	Non
Température de fonctionnement	Optimale à 35–37°C (peut nécessiter un chauffage)	Température ambiante
Efficacité sur la DBO/DCO élevée	Moins efficace sur les composés facilement biodégradables	Très efficace sur la DBO, surtout pour les jeunes lixiviats
Sensibilité aux composés toxiques	Plus sensible	Moins sensible
Adapté aux lixiviats	Mieux adapté aux lixiviats stabilisés	Mieux adapté aux lixiviats jeunes ($\text{DBO}/\text{DCO} > 0,5$)
Maintenance et gestion	Moins fréquente, mais nécessite un contrôle strict du pH et des inhibiteurs	Plus de flexibilité opérationnelle

1.17.2 Procédés chimiques

La plupart des procédés physico-chimiques appliqués au traitement des lixiviats sont utilisés comme étapes de prétraitement ou de polissage final, visant soit à optimiser l'efficacité globale de la filière, soit à cibler l'élimination de polluants spécifiques (par exemple : le stripping pour la réduction de l'azote ammoniacal).

Les méthodes chimiques les plus utilisées sont :

- L'oxydation par l'ozone.
- La coagulation-floculation.
- L'oxydation Fenton.
- La précipitation chimique.

1.17.2.1: Coagulation floculation

La coagulation-floculation est une méthode relativement simple et éprouvée, utilisée avec succès pour le traitement des lixiviats issus d'anciennes décharges [29]. Cette technique est fréquemment appliquée en tant qu'étape de prétraitement, notamment avant l'osmose inverse ou les procédés biologiques, ou encore comme traitement final destiné à éliminer la matière organique difficilement biodégradable. Parmi les coagulants les plus fréquemment utilisés figurent le sulfate d'aluminium, le sulfate ferreux, le chlorure ferrique ainsi que le chloro-sulfate ferrique [30].

L'objectif principal de cette technique est de neutraliser les charges électriques des particules colloïdales présentes dans l'effluent, afin de favoriser leur agglomération en flocs plus volumineux, ce qui facilite leur séparation ultérieure du liquide [31]. Bien que cette méthode soit efficace pour clarifier les lixiviats, elle présente toutefois certaines limites, notamment la production importante de boues à traiter et l'augmentation possible des teneurs en aluminium ou en fer dans l'eau traitée. [29].

1.17.2.2: Précipitation chimique

La précipitation chimique est couramment utilisée comme étape de prétraitement dans le traitement des lixiviats, en particulier pour l'élimination des métaux lourds et de l'azote ammoniacal [32]. Elle repose sur l'ajout de réactifs spécifiques qui induisent la précipitation des composés indésirables présents dans le lixiviats. Parmi les précipitants les plus utilisés, on trouve la chaux Ca(OH)_2 , qui permet de précipiter les métaux sous forme d'hydroxydes, ainsi qu'un mélange de chlorure de magnésium et de di-sodium hydrogénophosphate pour éliminer l'ammonium sous forme de struvite (phosphate ammoniac-magnésien) [33].

Cette technique est largement appliquée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de sa capacité à traiter de grandes quantités de lixiviats et de son faible coût économique. Toutefois, elle présente certaines limites, notamment la nécessité d'utiliser d'importants volumes de réactifs, la production considérable de boues secondaires, une efficacité d'élimination limitée de la DCO, ainsi qu'une forte dépendance au contrôle du pH du milieu [32].

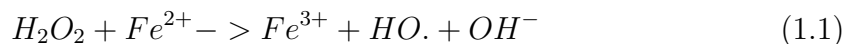
1.17.2.3: Oxydation par l’ozone

L’ozone constitue un oxydant particulièrement puissant, apte à dégrader les composés organiques réfractaires présents dans les lixiviats. Son efficacité dépend à la fois de sa concentration et des conditions opératoires. Ce procédé présente également l’avantage de transformer une partie des polluants en substances plus facilement biodégradables, facilitant ainsi leur traitement biologique ultérieur.

Par ailleurs, l’ozone est fréquemment utilisé en combinaison avec d’autres agents, tels que les rayonnements ultraviolets (UV), le peroxyde d’hydrogène (H_2O_2) ou divers catalyseurs, dans le cadre de procédés d’oxydation avancée, afin d’intensifier les réactions et d’améliorer l’efficacité globale de la dépollution [34].

1.17.2.4: Procédé d’électron Fenton (EF)

Le réactif de Fenton a été initialement appliqué à l’acide tartrique par Fenton en 1894. Depuis cette découverte, ce procédé est largement utilisé pour la dégradation de divers composés organiques présents dans les eaux usées. Dans sa forme classique, le procédé de Fenton repose sur la réaction entre le peroxyde d’hydrogène (H_2O_2) et l’ion ferreux (Fe^{2+}), générant ainsi des radicaux hydroxyles ($HO\cdot$), des agents oxydants très puissants et peu sélectifs (potentiel d’oxydoréduction 2,73V) :

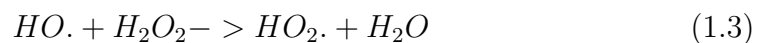


En dehors de la réaction principale de Fenton, le processus repose sur une série de réactions complexes regroupées en trois phases principales : l’initiation, la propagation et la terminaison.

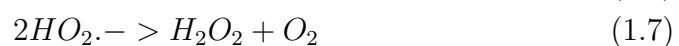
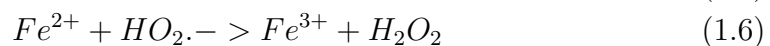
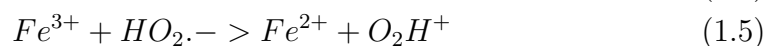
– **Initiation :**



– **Propagation :**



– **Terminaison :**



Bien que la formation du radical hydroxyle dans la réaction (1) présente une cinétique relativement rapide ($k \approx 70 \text{ M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), ce radical réagit très rapidement avec le peroxyde d’hydrogène et les ions ferreux. En effet, les constantes de vitesse de ces réactions sont particulièrement élevées : $k \approx 3,3 \times 10^7 \text{ M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour $H_2O_2 + HO\cdot$ et $k \approx 3,2 \times 10^8 \text{ M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ pour $Fe^{2+} + HO_2\cdot$ (équations 3 et 4) [35].

Par ailleurs, la régénération du fer(II) à partir du fer(III) par le peroxyde d’hydrogène (réaction 2) est caractérisée par une cinétique beaucoup plus lente, avec des constantes de vitesse comprises entre 10^{-3} et $10^{-2} \text{ M}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ [36].

Ces dynamiques réactionnelles limitent la concentration effective de $HO\cdot$ disponible en solution, ce qui réduit l'efficacité globale du procédé de Fenton pour la dégradation des polluants. En outre, les quantités importantes de Fe^{2+} et de H_2O_2

nécessaires au maintien d'une production optimale de radicaux hydroxyles peuvent induire une surproduction de boues d'hydroxydes ferriques, issue de la coagulation des colloïdes sous l'action du Fe^{3+} [37].

1.17.3 Méthode physique

1.17.3.1 Procédé d'adsorption :

L'adsorption est considérée comme l'une des méthodes les plus efficaces pour éliminer la matière organique et l'azote ammoniacal présents dans les lixiviats de décharges. Le charbon actif est l'adsorbant le plus couramment utilisé à cette fin. Cette technique est souvent intégrée à d'autres traitements physico-chimiques, tels que la coagulation ou le procédé Fenton, en tant qu'étape de prétraitement ou de post-traitement. Dans des conditions optimales, elle permet d'atteindre un taux d'élimination de la DCO pouvant aller jusqu'à 80 %. Toutefois, ses principaux inconvénients résident dans la nécessité de régénérer le charbon actif ainsi que dans la consommation élevée d'adsorbant [32].

1.17.4 Méthodes membranaires

1.17.4.1 La nanofiltration :

La nanofiltration s'est avérée être une méthode efficace pour l'élimination des composés organiques récalcitrants ainsi que des métaux lourds contenus dans les lixiviats. Elle repose sur l'utilisation de membranes en polymères dotées d'une structure dense qui permet de retenir sélectivement certains polluants [31]. Grâce à leur structure plus serrée, les membranes de nanofiltration sont capables de retenir les molécules organiques dont le poids moléculaire est inférieur à 300 Da, ce qui les rend particulièrement adaptées au traitement des lixiviats [38].

Ce procédé permet d'obtenir des performances intéressantes, avec une réduction de la demande chimique en oxygène (DCO) de l'ordre de 60 à 70 %, ainsi qu'une diminution de la concentration en ammoniac pouvant atteindre 50 % [39]. En outre, la nanofiltration présente l'avantage de produire un perméat de haute qualité tout en fonctionnant à des pressions plus faibles que celles requises pour l'osmose inverse, ce qui contribue à limiter les coûts d'exploitation [40].

1.17.4.2 L'osmose inverse :

L'osmose inverse figure parmi les méthodes les plus performantes pour le traitement des lixiviats de décharges [41]. Il s'agit d'un procédé physico-chimique particulièrement adapté au traitement des lixiviats stabilisés, capable de rejeter entre 98 % et 99 % des contaminants organiques et inorganiques. Cette technique permet notamment l'élimination des métaux lourds, des colloïdes en suspension et des solides

dissous contenus dans les lixiviats [31]. Le procédé génère deux flux distincts : un perméat, constitué d'eau traitée, et un concentrât, riche en polluants. Toutefois, les performances de l'osmose inverse peuvent être limitées par certains facteurs, notamment la production d'un concentrât fortement chargé en matières polluantes et la propension au colmatage des membranes [42]. En outre, cette technologie reste coûteuse en raison de la nécessité de traitements en amont et en aval, ainsi que d'une consommation énergétique élevée [38].

Le tableau suivant présente une comparaison entre les procédés classiques de traitement :

Tableau 1.8 : Une comparaison entre les procédés classiques de traitement

Procédés	Caractéristiques	Avantages	Inconvénients
Biologique	Utilisation de culture bactérienne	Peu onéreux Éliminent NH_3 , NH_4^+ , le fer et la matière organique biodégradable	Production importante de boues Inefficaces en présence de polluants toxiques et non biodégradables
Physiques (filtration sur charbon actif, membrane)	Non dégradatifs	Séparation des polluants particuliers ou dissous	Coût d'investissement et énergétique élevé Génération des concentrats
Physico-chimiques	Fixation des polluants par coagulation et séparation des flocs formés	Séparation des polluants en suspension et des particules colloïdales	Utilisation de produits chimiques Formation de boues
Chimiques	Utilisation d'un oxydant (Cl_2 , ClO_2 , O_3)	Oxydation chimique des polluants	Oxydation partielle (formation d'intermédiaires) Gestion des oxydants

Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons examiné les principaux aspects liés à la nature des déchets ainsi qu'à la formation des lixiviats dans les centres d'enfouissement technique. Il ressort que la diversité des déchets, combinée aux conditions d'exploitation, influence de manière significative la quantité et la composition des lixiviats produits. Ces derniers constituent une source de pollution environnementale majeure lorsqu'ils ne sont pas correctement pris en charge. Cette analyse met en évidence la nécessité de bien caractériser les paramètres physico-chimiques des lixiviats, condition indispensable pour guider le choix des procédés de traitement les plus adaptés.

Chapitre 2

MATERIELS ET METHODES

Introduction

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés à l'étude des lixiviats générés par le Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Ahnif, situé dans la wilaya de Bouira.

2.1 Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située à l'Est de la wilaya de Bouira, à une distance d'environ 41 km de la ville de Bouira. La commune concernée (Ahnif) s'étend sur une superficie de 159 km² [5]. Elle est délimitée comme suit :

- **Au Nord** : par la commune de M'chedellah.
- **Au Sud** : par les communes de Harraza et Sidi Brahim, relevant de la wilaya de Bordj Bou Arreridj.
- **À l'Est** : par la commune d'Ath Mansour.
- **À l'Ouest** : par les communes d'El Adjiba et d'Ouled Rached.



FIG. 2.1: Localisation administrative de la zone d'étude

2.1.1 Délimitation du site de la zone d'étude

Le site est situé au sud de la commune, à environ 4 km de la ville d'Ahnif, occupant une superficie de 14 ha [5].

Les coordonnées Lambert sont :

- Latitude : 36°18'23.95"N
- Longitude : 4°14'42.50"E

Il est limité :

- Au Nord par la forêt ;
- Au Sud par la forêt ;
- À l'Est par une carrière et la RN n°11 ;
- À l'Ouest par la forêt.

L'accès au site est assuré à partir de la route nationale RN 11, puis en empruntant une piste d'environ 1 km.



FIG. 2.2: : Délimitation de site du C.E.T d'AHNIF

2.1.2 Choix du site :

Le centre d'enfouissement technique répond aux besoins de la commune d'Ahnif. Le site est d'une superficie d'environ 14 hectares. Il lui permettra de réduire au maximum les décharges sauvages, les dépôts noirs et d'inclure dans l'exploitation, la valorisation des déchets recyclables qui sont une source d'apport financier et de bénéfice continu [?]

2.2 Activités actuelles du Centre d'enfouissement technique d'Ahnif

Le Centre d'Enfouissement Technique (CET) en activité dispose d'un casier de stockage d'une capacité estimée à 350 000 m³. L'installation comprend également trois bassins de lagunage aussi un poste de contrôle, un pont-bascule pour le pesage

des déchets, un bâtiment administratif, une loge de gardiennage ainsi qu'un atelier de maintenance , Bâche à eau, Citerne à gasoil groupe électrogène et transfo électrique. Le début de la réception des déchets ménagers est en Juin 2015 pour les communes Ahnif, M'chedallah, Chorfa et Ath Mansour avec une capacité estimatif de 20 Tonnes/j [5].

L'équipe administrative des centres d'enfouissement technique de BOUIRA gère tous les CET dans la Wilaya (Bouira, Ahnif et Ain Bessam), la déchèterie de Sour el Ghazelane, les décharges contrôlés (Maamoura, Hadjra Zerga et Bordj Khris) et la décharge sauvage de Lakhdaria. Le siège administratif se trouve au chef-lieu de la commune de Bouira.

L'équipe permanente du C.E.T d'Ahnif est assez réduite, elle est composée de :

- 01 Chef de Centre
- 01 Chef d'exploitation casier
- 01 Assistante administrative
- 21 Ouvrier (trieurs, gardiens, chauffeurs et aiguilleurs)

Les camions passent par un pont bascule, les déchets sont enregistrés manuellement dans le système. Tous les camions passent directement au casier. Le contrôle des déchets est effectué sur site même. Depuis 2015, le C.E.T est ouvert 24/24 et 7/7 pour tous les camions des APC. Admis au C.E.T et les autres camions privés. Le pont bascule est vérifié et étalonné chaque 06 mois.

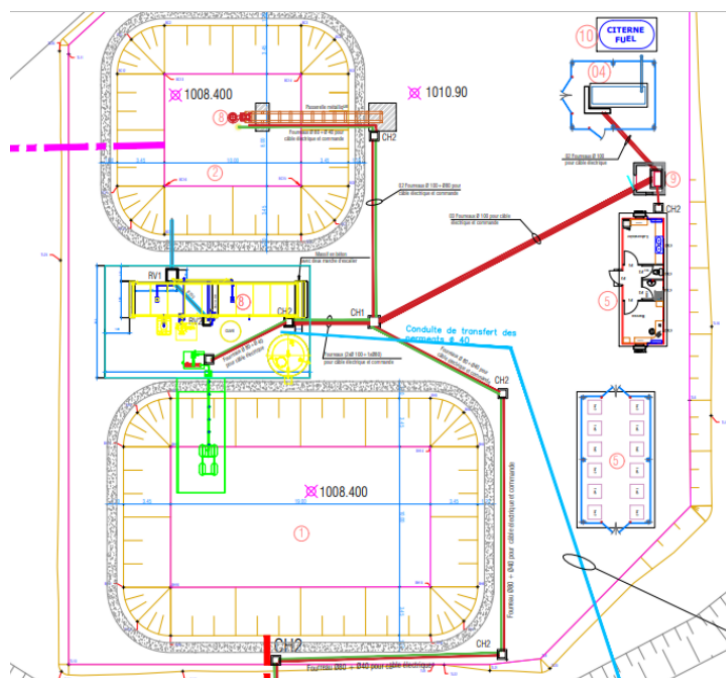


FIG. 2.3: Plan d'implantation du CET AHNIF

(1) : Bassin d'homogénéisation.	(6) : Laboratoire.
(2) : Bassin de stockage du concentrat.	(7) : Pompe d'aspiration du lixiviat.
(3) : Contenaire de traitement.	(8) : Pompe de refoulement du concentrat.
(4) : ABRI groupe électrogène.	(9) : NICH armoire électrique.
(5) : ABRI CUVE de stockage des réactifs.	
(10) : citerne à gasoil.	

2.3 Estimation de la production moyenne en déchets

Le bilan quantitatif des déchets ménagers produits au niveau de la zone d'étude est estimé à 30 T/j pour l'année 2019. Le per capita est estimé à 0,7 kg/hab./jour pour les communes concerné par le C.E.T. Ces valeurs peuvent fluctuer dans le temps selon les saisons, les fêtes religieuses et le mois de ramadan ou les traditions alimentaires changent d'où leur incidence sur la composition et le poids de la poubelle ménagère devient très significatif [5].

L'estimation quantitatif des déchets ménagers au niveau des 10 communes : Ahnif, M'chedallah, Chorfa, Ath Mansour, Bechloul, Aghbalou, El Adjiba, Tazmalt, Ighil Ali, Ahl el ksar, est effectué à partir des différents investigations sur terrain et l'état des lieux au niveau de ces communes.

Tableau 2.1 : Les quantités des déchets générés [43]

Commune	Population 2020	Quantité (Kg/j)	Quantité (T/j)	Quantité (T/an)	Volume (m ³)
Ahnif	11 083	3 407	3.407	1 243,86	3 769,27
M'Chedallah	29 149	13 763	13.763	5 023,52	15 222,78
Chorfa	18 464	6 814	6.814	2 487,17	7 536,87
Ath Mansour	11 532	4 278	4.278	1 561,72	4 732,48
Bechloul	13 507	4 634	4.634	1 691,41	5 125,66
Aghbalou	22 229	5 911	5.911	2 157,86	6 538,96
El Adjiba	21 054	1 946	1.946	710,50	2 153,03
Ighil Ali	10 849	105	0.105	38,36	116,14
Ahl el Ksar	15 373	639	0.639	233,40	707,27
Tazmalt (W. Béjaïa)	32 905	385	0.385	140,62	426,12
Divers	—	8 673	8.673	3 166	9 594

La quantité totale de déchets ménagers produite et enfouie dans le casier du CET d'Ahnif est estimée à **55 923 m³** [43].

Classé en **catégorie II**, le Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Ahnif est destiné à accueillir des déchets **non dangereux**. À ce titre, les types de déchets admis dans ce centre sont :

- les ordures ménagères ;
- les déchets de la voirie ;
- les déchets industriels et commerciaux assimilables aux déchets ménagers.

Le site est accessible par une piste utilisée pour le passage des véhicules et des camions durant la phase d'exploitation. Les **voies de circulation internes** existantes permettent la circulation des véhicules et assurent la liaison entre l'entrée du site et la zone d'exploitation.

2.4 Le casier

Le casier présente un **volume utile de 350 000 m³**, destiné à la réception des déchets dans le cadre de l'exploitation du Centre d'Enfouissement Technique (CET) d'Ahnif [5]. La figure [2.4] représente casier de CET d'AHNIF.



FIG. 2.4: Casier de CET d'AHNIF.

2.4.1 Exploitation du casier

Le casier est entré en exploitation depuis le **04/06/2015**. Les déchets ménagers et assimilés admis sont traités par **enfouissement**, et les odeurs sont minimisées par un **recouvrement en terre végétale**. Une récupération des déchets d'emballage est également effectuée au niveau du casier par des **récupérateurs**.

2.4.2 Mise en place d'un système de drainage et traitement des lixiviats

Le réseau de drainage des lixiviats du casier est composé de drains en **PEHD**, déposés au fond du casier, au-dessus de l'étanchéité active, et recouverts d'un massif de

matériaux drainants non évolutifs. Ces drains sont connectés à un **drain principal** débouchant en aval hydraulique dans un **regard de visite**.

Ce système de drainage comprend les éléments suivants :

- des drains non perforés en **PEHD** de **400 mm** de diamètre ;
- un drain perforé en **PEHD** de **300 mm**, traversant la plate-forme longitudinalement avec une pente minimale de l'ordre de **3%** ;
- des **regards de visite** pour le système d'évacuation ;
- le fond de forme et les talus du bassin de lixiviat sont recouverts par une **géomembrane en PEHD de 2 mm**.

Comme le montre la figure .5, la **double barrière d'étanchéité** est constituée de plusieurs couches assurant la protection du sol et du sous-sol.

Pour la collecte des lixiviats, **trois (03) bassins de lagunage** sont aménagés afin d'assurer un **traitement naturel**. Ces bassins sont protégés par une étanchéité **active et passive** afin d'éviter toute nuisance au milieu naturel.

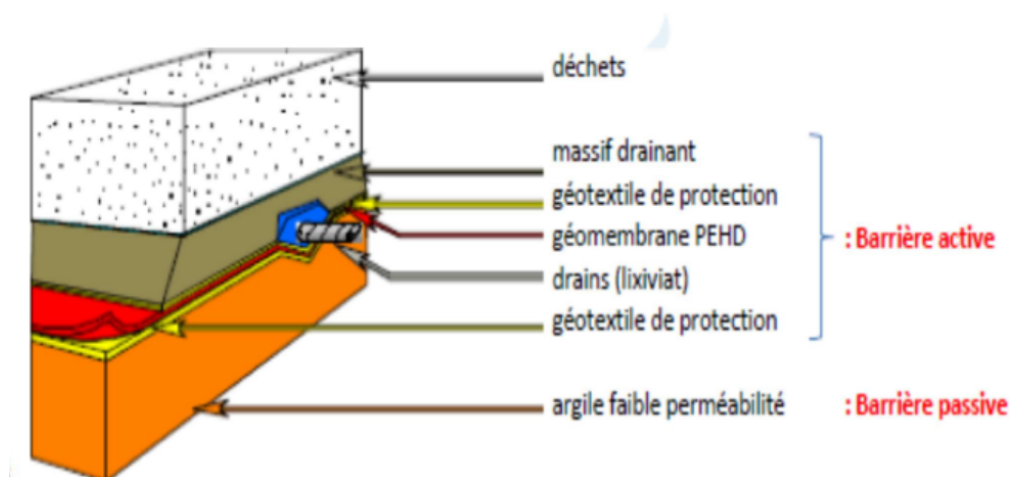


FIG. 2.5: la structure en coupe de la double barrière d'étanchéité mise en place au sein du CET.

La figure ci-après illustre la configuration typique d'un casier d'enfouissement après son remplissage complet. Elle permet de visualiser les principales composantes techniques assurant l'étanchéité, la gestion des lixiviats et la surveillance environnementale

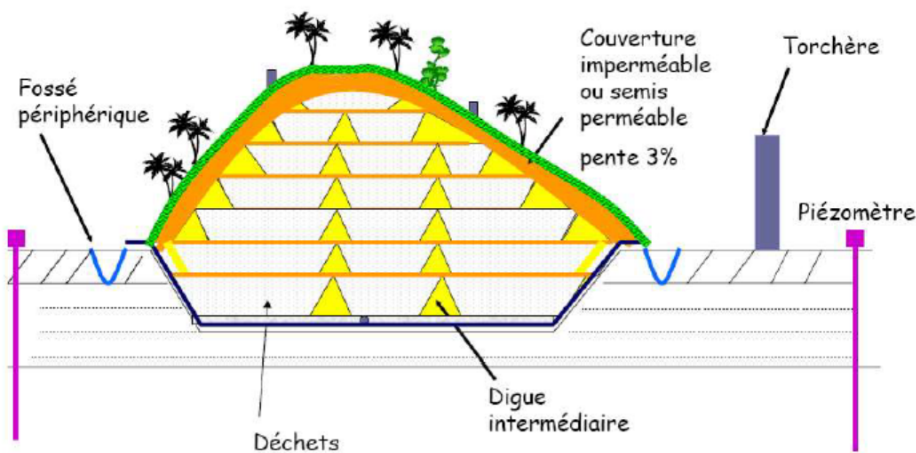


FIG. 2.6: fin de casier d'enfouissement

2.5 Biogaz

Le C.E.T d'Ahnif ne dispose pas d'un système de dégazage. Il est prévu de forer des **puits de dégazage** après la clôture du casier. Actuellement, les émissions de **biogaz** ne sont ni captées ni contrôlées [5].

2.6 Centre de tri

Le C.E.T dispose d'un **centre de tri** réalisé en **2015**. Celui-ci permet le tri des déchets ménagers et assimilés, en séparant les **déchets recyclables en mono-matériaux**, tandis que le reste est dirigé vers l'enfouissement.

La capacité de tri du centre est d'environ **200 tonnes par jour**. Cependant, le centre est à l'**arrêt depuis sa première mise en service en 2015**.

La figure ci-dessous montre le centre de tri du C.E.T d'Ahnif : ‘



FIG. 2.7: Centre de tri de CET AHNIF

2.7 Clôture

Le site est clôturé par une structure légère de type **Zimmerman**. Cette clôture est nécessaire pour :

- freiner l’envol des déchets légers emportés par le vent durant les opérations de déchargement et d’enfouissement ;
- délimiter clairement le périmètre du site.

Le bâtiment d’exploitation comprend :

- un poste de contrôle ;
- une loge de gardien ;
- un pont bascule ;
- un bloc sanitaire ;
- un atelier de maintenance.

Alimentation en eau potable

L’alimentation en eau du site est assurée par une **bâche à eau**, destinée à couvrir les besoins du C.E.T.

≠ Réseau d’assainissement

Les eaux usées du C.E.T sont drainées gravitairement vers une **fosse septique**. Le drainage des eaux pluviales s'effectue par des **caniveaux** conduisant vers le milieu naturel.

La **durée de vie** du CET d'Ahnif a été estimée à **20 ans** [5].

Dans le cadre du traitement des lixiviats, le CET d'Ahnif applique une **technologie de pointe basée sur l'osmose inverse à double étage**. Ce processus vise à réduire la charge polluante des effluents avant leur rejet dans le milieu naturel.

Pour évaluer son efficacité, des **échantillons** ont été prélevés en amont et en aval du traitement, puis soumis à des **analyses physico-chimiques** portant sur plusieurs indicateurs clés de pollution : DCO, DBO₅ et matières en suspension.

Les paramètres sensibles à l'évolution rapide (pH, température, conductivité) ont été mesurés **in situ**, tandis que les autres analyses ont été réalisées en laboratoire selon les **méthodes normalisées en vigueur** pour l'analyse des eaux usées.

2.8 Traitement des lixiviats par osmose inverse

2.8.1 Phénomène d'osmose inverse

L'**osmose inverse** est un procédé de séparation physique par membrane semi-perméable permettant d'extraire l'eau pure d'un liquide fortement chargé en polluants. Contrairement à l'osmose naturelle, où l'eau migre spontanément d'un milieu peu concentré vers un milieu plus concentré pour équilibrer les concentrations, l'osmose inverse inverse ce phénomène en appliquant une pression supérieure à la pression osmotique du fluide à traiter (par exemple, le lixiviat). Sous cette pression, seules les molécules d'eau traversent la membrane, tandis que les polluants dissous (sels, composés organiques, métaux, etc.) sont retenus. Le processus permet ainsi de séparer le lixiviat en deux fractions distinctes : le perméat, une eau purifiée, et le concentrât, un résidu fortement concentré en contaminants [44].

Afin de mieux appréhender la logique du procédé d'osmose inverse appliqué au traitement des lixiviats, la figure (2.8) présente une comparaison schématique entre le phénomène naturel d'osmose et le processus d'osmose inverse, basé sur l'application d'une pression externe pour inverser le flux naturel de l'eau

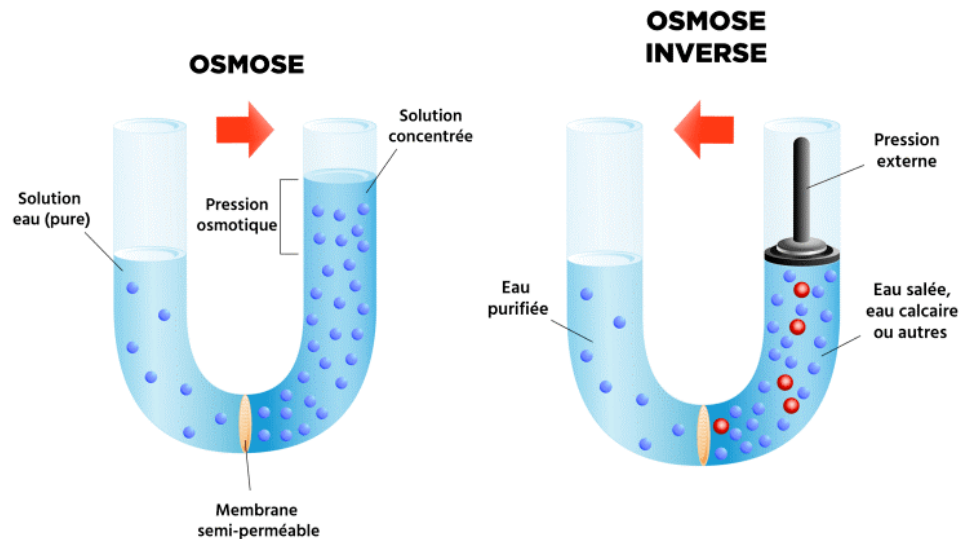


FIG. 2.8: Comparaison entre l'osmose et l'osmose inverse

2.8.2 Membrane d'osmose inverse

Une membrane dite semi-sélective est un dispositif qui permet le passage préférentiel de certaines substances entre deux milieux, tout en bloquant ou limitant le transfert d'autres composés, en fonction de leurs propriétés physico-chimiques. La figure suivante illustre un module de membrane spiralée, technologie centrale dans les systèmes modernes d'osmose inverse. Grâce à cette configuration en spirale, le flux de la solution est dirigé de manière optimisée vers le tube central perforé, où le perméat est collecté, tandis que les concentrats sont rejetés.

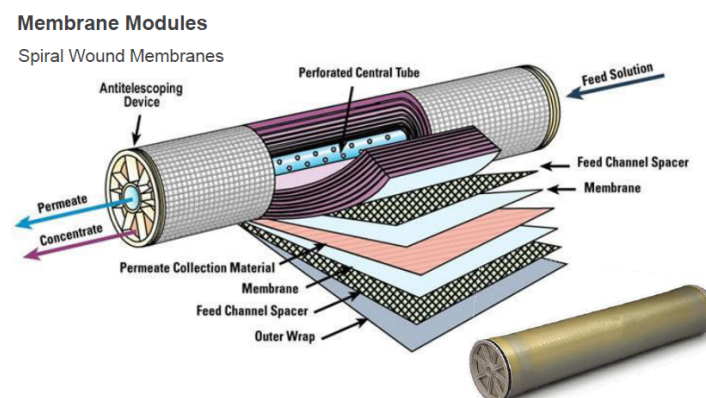


FIG. 2.9: Structure d'un module de membrane spirale pour filtration par osmose inverse.

Les membranes utilisées

Les membranes utilisées au niveau du Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T) sont constituées de **polyamide**. Elles sont d'abord fabriquées sous forme plane, puis **enroulées autour d'un collecteur central** pour constituer des **modules spirals**, spécialement adaptés aux systèmes d'osmose inverse.

Dans le cadre de cette étude, les membranes suivantes ont été retenues :

- **Membrane de 1^{er} étage** : INDUSTRIAL RO5 8040F50 de marque **GE**.
- **Membrane de 2^e étage** : SW30HRLE-370/34i de marque **DOW-FILMTEC**.

2.8.3 Processus de traitement des lixiviats par osmose inverse à deux étages

Les lixiviats issus de la lagune de stockage sont transférés par pompage vers une cuve dédiée à la régulation du pH, dans laquelle est injecté de l'acide sulfurique. Cette étape vise à abaisser le pH de la solution alimentant le système d'osmose inverse (OI), afin de prévenir les phénomènes d'entartrage (« scaling ») liés à la précipitation de sels sur la surface membranaire en conditions alcalines.

Le pH est finement ajusté dans une plage comprise entre 5,5 et 6,5, ce qui permet la conversion des espèces carbonatées en dioxyde de carbone (CO_2) à l'état gazeux. Grâce à la pompe de recirculation installée, ce gaz est libéré directement dans la cuve de régulation plutôt que dans le circuit de tuyauterie, ce qui évite l'effet de cavitation, prolonge la durée de vie des équipements de pompage et optimise la stabilité hydraulique du système. Le CO_2 généré est ensuite extrait de manière contrôlée à l'aide de ventilateurs assurant une évacuation vers l'extérieur.

À partir de la cuve de régulation du pH, le lixiviat est acheminé vers un filtre à sable pour éliminer les matières en suspension. Des concentrations élevées en matières en suspension peuvent entraîner le colmatage de l'espaceur d'alimentation des membranes spirales utilisées en osmose inverse, réduisant ainsi l'efficacité du procédé. Pour prévenir ce phénomène, le filtre à sable est régulièrement soumis à un rétro lavage automatique, permettant de maintenir ses performances de filtration et de garantir la protection des membranes en aval.

Le lixiviat passe ensuite à travers des filtres de sécurité (filtres à poche et filtres à cartouche) pour protéger les membranes de tous les solides en suspension restants.

Un système de nettoyage du filtre à sable est assuré par l'action combinée d'une pompe centrifuge et d'un compresseur. Ce dispositif permet d'effectuer un lavage à l'air ainsi qu'un lavage à contre-courant à l'eau afin de nettoyer le matériau filtrant.

Le procédé d'OI proposé est un système à 2 étages. Cela signifie que chaque litre d'eau usée est filtré 2 fois par une membrane d'osmose inverse. Le lixiviat prétraité est introduit sous pression dans les modules du premier étage d'osmose inverse. À ce stade, le perméat, c'est-à-dire l'eau purifiée, est collectée dans un réservoir commun, puis transféré vers le deuxième étage pour un affinage supplémentaire.

Le concentrât (résidu concentré en polluants) généré au niveau du premier étage est extrait du système et dirigé vers un circuit d'élimination adapté.

Quant au concentrât produit lors du deuxième étage, il est recyclé partiellement vers l'entrée du système, ce qui permet d'optimiser le rendement global du traitement [45].

- Le premier module d’OI est conçu pour fonctionner à une pression qui peut aller jusqu’à environ 65 bars.
- Le deuxième module est conçu pour fonctionner à une pression maximale d’environ 25 bars.
- La pression de fonctionnement peut être plus faible, ceci est principalement en fonction de la concentration des solides dissous dans le lixiviat et du degré de la pollution à la surface des membranes. Elle peut être ajustée à l’aide d’une vanne de régulation de pression pour atteindre le flux requis de perméat.
- Afin d’éviter une diminution du débit durant la filtration, une pompe d’appoint assure un écoulement tangentiel suffisamment élevé à travers les membranes pour éliminer la couche de tartre et éviter la concentration-polarisation.

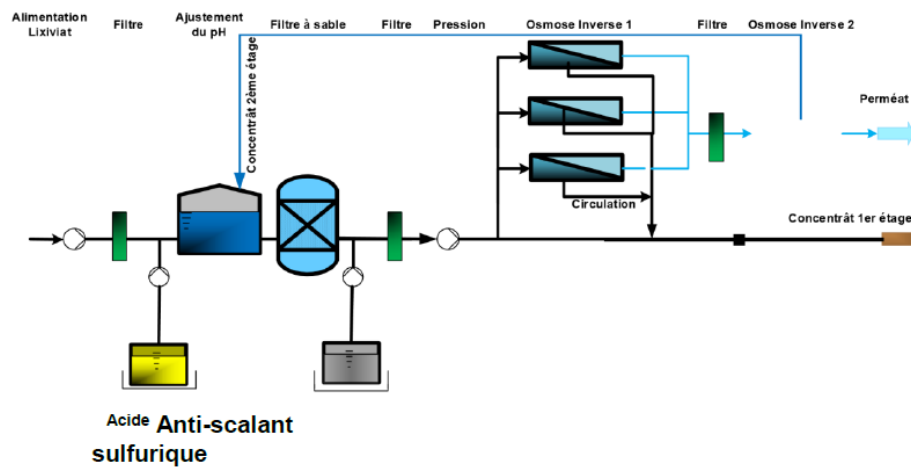


FIG. 2.10: Schéma explicatif de la station de traitement de lixiviat par OI double étage d’AHNIF

Le système de contrôle et d’acquisition de données (SCADA) (anglais : *Supervisory Control And Data Acquisition*, sigle : SCADA) de l’installation permet le contrôle de toutes les fonctions de base. Pour les utilisateurs avancés, il est possible d’effectuer un réglage détaillé de tous les paramètres du procédé. Les opérateurs peuvent commander à distance l’unité.

2.8.4 Liste des composants principaux de traitement du lixiviat par osmose inverse à deux étages

Supervision et contrôle

- Tous les paramètres du procédé sont supervisés.
- L’unité est télécommandée à distance par les opérateurs.

Prétraitement

- Bassin d’homogénéisation : 600 m³, muni de deux aérateurs à vis en inox.
- Pompe d’alimentation vers la cuve d’ajustement de pH :

- * Pompe à vis excentrée (5–6 m³/h, 2.5–3 bars).
- * Variateur de vitesse.
- Filtre de sécurité : à poche 0,6 mm, en PVC-U.
- Instrumentation : mesures de pression, niveau, pH, température, conductivité.

Ajustement du pH

- Cuve : 2 m³ en PE.
- Pompe de circulation : centrifuge (2–3 m³/h, 1.5 bar).

Traitement principal – Osmose inverse

Filtration

- Filtre à sable : 500–700 L, remplissage à base de sable et anthracite.
- Pompe de lavage : centrifuge (10–20 m³/h, 3–4 bars).
- Compresseur : à palettes pour nettoyage par air.



FIG. 2.11: bassin d'homogénéisation



FIG. 2.12: filtre à sable

Osmose Inverse – 1er étage (OI1)

- Pompe HP : piston (4.5-5 m³/h, 60-65 bars).
- Pompe de circulation : centrifuge (46 m³/h, 3-3.5 bars).
- Tubes haute pression : 3 tubes (D=8, L= 6 m), avec 18 membranes spiralées.
- Filtres de sécurité : à poche/cartouche (50 et 5 µm).

Osmose Inverse – 2ème étage (OI2)

- Pompe HP : centrifuge (4-5 m³/h, 20-25 bars).
- Pompe de circulation : centrifuge (10 m³/h, 3.2 bars).
- Tubes haute pression : 1 tube (8", 5-6 m), avec 6 membranes spiralées.



FIG. 2.13: filtre à poche



FIG. 2.14: filtre à cartouche

- Filtre de sécurité : cartouche 5 μm .
- Rendement global : 75%.
- **Système de lavage**
 - * Pompe de lavage / alimentation OI2 : centrifuge (4-4.5 m^3/h).
 - * Cuve de lavage chauffée : 1 m^3 , PE-HD.
- **Stockage**
 - * Perméat :
 - Colonne de dégazage (3 m^3 , PE).
 - Surpresseur : 1 unité.
 - * Concentrât :
 - Bassin de 300 m^3/h .
 - Pompe de refoulement (100 l/s).
- **Systèmes de dosage**
 - * Anti scalant : pompe à membrane (1 unité).
 - * Acide sulfurique : pompe à membrane (1 unité).
 - * Cuve d'acide : 8 m^3 , PE-HD, installée à l'extérieur.



FIG. 2.15: bassin de concentrât

Infrastructure complémentaire

- Local stockage produits chimiques.
- Laboratoire.
- Groupe électrogène.

Armoire électrique

- Disjoncteur principal.
- Ventilation, éclairage, climatisation.
- Répartiteurs, transformateurs 24 VAC.
- Variateurs de vitesse.
- Écran tactile couleur.
- Automate SIEMENS S7 300.
- Arrêt d'urgence.
- Fusibles, bornes de jonction.

2.9 Objectifs du traitement

Le traitement des lixiviats vise à réduire significativement la charge polluante de l'effluent, notamment en matière de demande chimique en oxygène (DCO), de demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO_5), ainsi que de concentration en azote ammoniacal (NH_4^+-N).

Les performances attendues en sortie de la station d'osmose inverse, telles que spécifiées dans le cahier des charges, sont synthétisées dans le tableau suivant :



FIG. 2.16: Acide sulfurique



FIG. 2.17: Anti Scalant

Tableau 2.2: Objectifs de performance du traitement des lixiviats

Paramètres	Unités	Rendement
DCO	mg O ₂ /L	95 %
DBO ₅	mg O ₂ /L	95 %
NH ₄ -N	mg/L	50 **

2.10 Prélèvement des lixiviats

Dans le cadre de cette étude, des prélèvements de lixiviats ont été effectués au cours des mois de février, mars et avril 2025, en vue d'une analyse physico-chimique. Les échantillons ont été collectés conformément aux protocoles standards de conservation, dans des récipients en polyéthylène d'une capacité de 20 litres adaptés aux besoins de l'étude. Une fois les contenants remplis, ils ont été transportés au laboratoire, puis conservés à une température de 4 °C afin de limiter toute activité biologique avant analyse.

2.11 Mesure des paramètres de la pollution

L'analyse correcte des résultats nécessite à la fois une maîtrise des mécanismes de traitement des effluents et une compréhension approfondie de la composition, de l'origine et des types de polluants impliqués. Pour apprécier globalement la qualité d'un effluent, plusieurs paramètres sont généralement retenus comme indicateurs clés : la demande chimique en

oxygène (DCO), la demande biologique en oxygène sur cinq jours (DBO), la concentration en azote ammoniacal, le pH, la conductivité électrique, le rapport DBO /DCO, ainsi que la température de l'échantillon.

Avant d'entamer la phase analytique, il est essentiel de sélectionner les tests en cuve LCK appropriés à chaque paramètre à mesurer.

2.11.1 Préparation analytique : dilution, gestion des consommables et sélection des tests LCK

Avant de procéder aux analyses, le choix des types de cuves LCK (identifiées par des codes spécifiques accompagnés de notices d'utilisation) doit être fait en fonction des caractéristiques des échantillons à analyser. Ci-dessous, un exemple de choix de cuves :

- **LCK514** : DCO, plage de mesure 100–2000 mg/L O₂ – utilisée pour les lixiviats bruts.
- **LCK314** : DCO, plage de mesure 15–150 mg/L O₂ – adaptée aux lixiviats traités.

Il est crucial d'adapter la plage de mesure des LCK à la concentration des échantillons. En cas d'incompatibilité (plage de mesure insuffisante), le spectrophotomètre indiquera que la concentration est supérieure à la limite détectable. Dans ce cas, deux solutions sont envisageables :

Deux solutions sont envisageables :

- **Changer la plage de mesure** : utiliser des cuves LCK dont la plage est adaptée aux caractéristiques de l'échantillon.
- **Effectuer une dilution** : diluer l'échantillon jusqu'à obtenir une concentration comprise dans la plage de mesure des cuves disponibles.

Par exemple : pour mesurer un échantillon de lixiviat dont la concentration est estimée à 4000 mg/L, alors que la gamme disponible est celle des cuves **LCK514** (DCO, plage 100–2000 mg/L), une dilution s'impose. Le calcul peut se faire comme suit :

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2$$
$$2000 \times 1 = 4000 \times V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{2000}{4000} = 0,5 \text{ L}$$

Ainsi, pour une analyse correcte :

- Prendre 0,5 L de lixiviat (échantillon concentré),
- Ajouter 0,5 L d'eau distillée (solvant),
- Ce qui donne un volume total de 1 L à une concentration adaptée.

La figure suivante illustre le principe fondamental de la dilution, qui consiste à diminuer la concentration d'une solution par ajout d'un solvant :

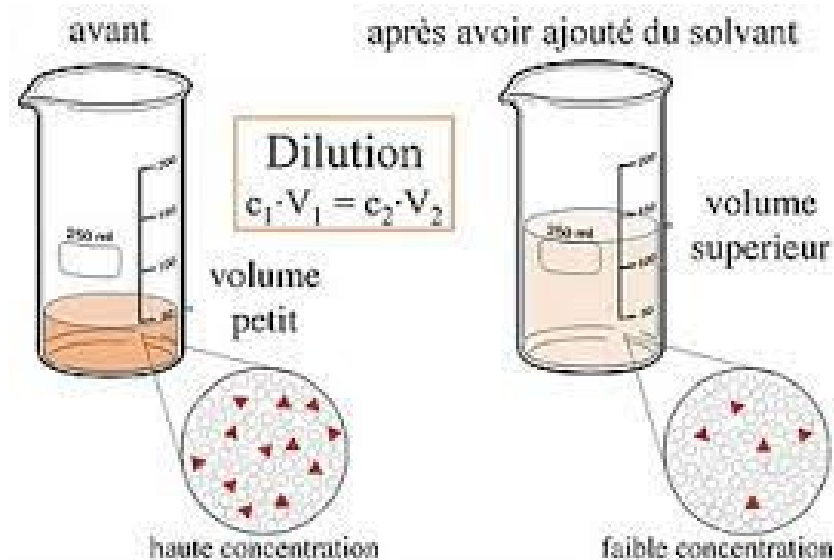


FIG. 2.18: le principe de la dilution

2.11.2 Équipements de laboratoire et méthodes d'analyse

Nous présentons dans le tableau ci-dessous les principaux équipements de laboratoire, accompagnés des méthodes d'analyse associées, lesquelles seront détaillées au fur et à mesure dans les sections suivantes.

Tableau 2.3 : Les principaux équipements de laboratoire

Élément	Équipements utilisés	Méthode
pH	pH-mètre	Méthode Hach / ISO 6060:1989 ; DIN 38409-H41-H44
Température	Sonde	ISO 7027
Conductivité	Conductimètre	NF EN 27888
Turbidité	Turbidimètre	ISO 7027:1999 (F)
MES (Matières en Suspension)	Centrifugeuse	Méthode HACH
DCO (mg/L O ₂)	Spectrophotomètre + Réacteur DCO	Méthode Hach / ISO 7150-1 ; DIN 38406 E5-1
DBO ₅ (mg/L O ₂)	DBO-mètre + Incubateur	Méthode Hach
N-NH ₄ (mg/L)	Spectrophotomètre DR3900	Méthode Hach / ISO 7150-1 ; DIN 38406 E5-1

2.11.3 Méthode de fonctionnement du spectrophotomètre avec tubes LCK

Les tubes LCK (Lange Cuvette Kits) sont des réactifs prêts à l'emploi, conçus pour réagir avec les composés spécifiques à mesurer (DCO, ammonium, etc.). Après réaction, la coloration produite est proportionnelle à la concentration, et est mesurée par le spectrophotomètre.



FIG. 2.19: les tubes LCK



FIG. 2.20: un spectrophotomètre

Demande Chimique en Oxygène

a) Appareillage et Réactifs utilisés

- LCK314 : Plage de mesure 15–150 mg/L O₂ (lixiviat épuré)
- LCK514 : plage de mesure 100–2000 mg/L O₂ – utilisée pour les lixiviats bruts.
- Portoir pour tubes DCO
- Spectrophotomètre DR 3900
- Pipette jaugée 2.00 mL
- Béchers

b) Mode opératoire

- Filtrer l'échantillon si nécessaire.
- Diluer l'échantillon si la concentration en DCO dépasse la plage de mesure du test.
- Prendre un tube LCK 314 et on le mélange doucement en le faisant tourner.
- À l'aide d'une pipette propre, ajouter 2 mL de l'échantillon dans le tube LCK 314.
- Refermer le tube et mélanger de nouveau doucement pendant une minute.
- Chauffer pendant 2 heures à 148 °C (Méthode classique) ou chauffer pendant 15 minutes à haute température (Méthode rapide (HT200S)).
- Laisser refroidir le tube à température ambiante (entre 18 et 20 °C).
- Essuyer l'extérieur de la cuvette pour enlever toute trace de réactif ou d'humidité.
- Insérer le tube dans le spectrophotomètre Hach (modèle DR3900).
- Le code-barres du tube assure l'auto-calibration de l'appareil.
- Lire directement la concentration en DCO (mg/L O₂) affichée.

Mesure de l'ammonium (NH₄⁺) avec le tube LCK303

a) Appareillage et Réactifs utilisés

- LCK303 : Plage 0,015 – 2,0 mg/L NH₄⁺-N
- LCK302 : Plage 47 – 130 mg/L NH₄⁺-N
- Portoir pour tubes
- Spectrophotomètre DR 3900
- Pipette jaugée 2.00 mL
- Béchers

b) Mode opératoire

- Filtrer l'échantillon si nécessaire.
- Ajuster le pH si besoin (le pH doit généralement être supérieur à 4).
- Retirer le bouchon du tube avec précaution.
- Préparer le tube pour l'introduction de l'échantillon.
- À l'aide d'une micropipette propre et calibrée, ajouter 0,2 mL de l'échantillon dans le tube.
- Fermer le tube avec le bouchon contenant les réactifs.
- Retourner le tube 2 à 3 fois en agitant doucement.
- Attendre environ 3 secondes entre chaque retournement pour assurer un bon mélange.
- Laisser reposer le tube pendant 15 minutes à température ambiante ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) afin de permettre la réaction chimique.
- Essuyer soigneusement l'extérieur du tube avec un chiffon doux et sec.
- Placer le tube dans un spectrophotomètre Hach DR3900 (ou tout appareil compatible).
- Le code-barres présent sur le tube est automatiquement lu pour appliquer les paramètres de mesure.
- Lire directement le résultat, exprimé en $\text{mg/L NH}_4^+\text{-N}$.

Précautions générales

- Bien respecter la notice spécifique de chaque LCK (température, volume exact, temps de réaction).
- Utiliser des gants et manipuler sous hotte si nécessaire.
- Éliminer les tubes usagés comme déchets chimiques dangereux.

Mesure de pH (potentiel hydrogène)

Le but c'est de déterminer la nature du milieu, car la détermination de pH permet d'avoir une idée générale sur les éléments qui peuvent être présents dans l'eau.

La mesure du pH repose sur la différence de potentiel entre :

- une électrode de verre (sensible aux ions H^+) et une électrode de référence.

Cette différence génère une tension électrique proportionnelle à l'activité ionique des ions H^+ , mesurée par le pH-mètre.

a) Matériel utilisé

- pH-mètre (calibré)
- Électrode de mesure pH
- Électrode de température (souvent intégrée)
- Bécher (propre et rincé à l'eau distillée)
- Eau distillée

b) Mode opératoire

- Verser le lixiviat à analyser dans un bécher propre, préalablement rincé à l'eau distillée.
- Rincer l'électrode pH avec de l'eau distillée.
- L'essuyer délicatement avec un papier absorbant doux sans frotter ni endommager la membrane.
- Plonger l'électrode dans le bécher contenant l'échantillon.
- Attendre quelques secondes jusqu'à la stabilisation de la lecture.
- Lire directement la valeur du pH sur l'écran du pH-mètre, exprimée en unités de pH.

Mesure de la Conductivité Électrique

La conductivité mesure la capacité d'un liquide à conduire l'électricité, ce qui dépend de la concentration en ions dissous.

a) Matériel utilisé

- Conductimètre
- Cellule de mesure de conductivité (avec électrodes en platine)
- Bécher (propre)
- Eau distillée
- Barreau magnétique et agitateur

b) Mode opératoire

- Utiliser de la verrerie rigoureusement propre.
- Rincer plusieurs fois la cellule de conductivité avec de l'eau distillée.
- Verser l'échantillon de lixiviat dans un bécher propre.
- Rincer la cellule une première fois avec une petite quantité de l'échantillon.

- Plonger complètement la cellule dans un deuxième bécher contenant l'échantillon.
- Vérifier que les électrodes sont entièrement immergées.
- Agiter doucement l'échantillon à l'aide d'un barreau magnétique pour homogénéiser la solution et éliminer les bulles d'air.
- Lire directement la valeur de la conductivité sur l'écran du conductimètre, généralement exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou mS/cm selon l'échelle de mesure.

Conclusion

En résumé, le traitement des lixiviats du CET d'Ahnif repose sur une succession rigoureuse d'étapes de prétraitement et d'osmose inverse, assurant une épuration efficace. La vérification en laboratoire des paramètres physico-chimiques du perméat permet de garantir la conformité aux normes de rejet en vigueur.

Chapitre 3

RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

Dans cette étude, nous nous intéressons à l'évaluation de l'efficacité d'un procédé de traitement avancé basé sur l'osmose inverse à double étage. L'objectif principal est de mesurer la capacité de ce procédé à réduire les charges polluantes présentes dans les lixiviats du CET d'AHNIF, à travers l'analyse de plusieurs paramètres physico-chimiques tels que la DCO, le pH, la conductivité, l'azote ammoniacal et la DBO. L'efficacité du traitement sera appréciée en comparant les caractéristiques des lixiviats bruts à celles du perméat obtenu, en lien avec les normes réglementaires en vigueur.

3.1 Caractérisation des lixiviats bruts de CET AHNIF

Les analyses physico-chimiques que nous avons effectuées sur les lixiviats bruts de la décharge de CET AHNIF sont représentées dans le Tableau suivant :

TAB. 3.1: Valeurs des paramètres physico-chimiques du Lixiviat brute du CET AHNIF à trois périodes de prélèvement

Paramètres	DCO (mgO ₂ /l)	NH ₄ -N (mg/l)	pH	Conductivité (mS/cm)	Température (°C)
Lixiviat brute (25/02/2025)	12000	2100	8,3	2,83	16,4
Lixiviat brute (26/03/2025)	12500	851	8.25	2,5	16,2
Lixiviat brute (05/04/2025)	1043	3630	8,27	2,73	23,5
Norme exigée	120	30	6,5–8,5	0,2	30

Les analyses réalisées sur les lixiviats bruts issus du CET révèlent une charge polluante particulièrement importante, caractéristique des lixiviats issus de déchets ménagers en phase de stabilisation avancée. Les principaux paramètres physico-chimiques ont été analysés à trois dates différentes (février, mars et avril 2025), permettant d'établir une première évaluation du niveau de pollution et des variations possibles au cours du temps.

– DCO (Demande Chimique en Oxygène) :

La *DCO* est un indicateur global de la matière organique biodégradable et réfractaire présente dans le lixiviat. Les résultats obtenus sont présentés dans l'histogramme ci-dessous (Figure . 1) qui permet de visualiser clairement l'évolution des concentrations et de comparer les différentes campagnes de mesure :

Ces concentrations, largement supérieures à la norme réglementaire de 120 mgO₂/l, traduisent une présence massive de composés organiques dans le lixiviat, en particulier lors des deux premiers prélèvements.

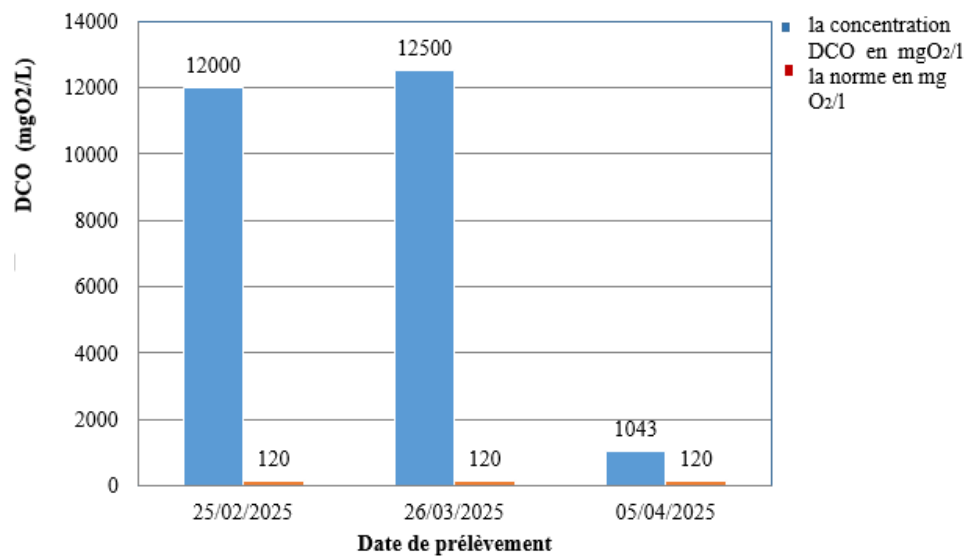


FIG. 3.1: Histogramme des concentrations en *DCO* mesurées lors des campagnes de prélèvement

– Azote ammoniacal

Les résultats obtenus sont présentés dans l'histogramme ci-dessous (Figure 3.2) qui permet de visualiser clairement l'évolution des concentrations et de comparer les différentes campagnes de mesure :

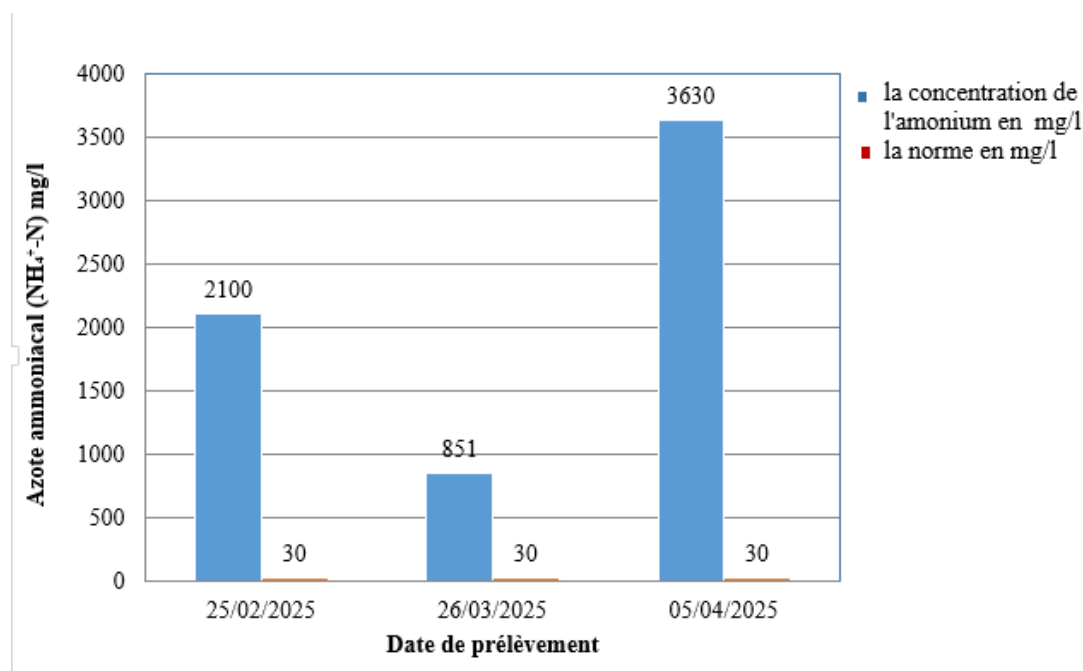


FIG. 3.2: Histogramme des concentrations en $(NH_4 - N)$ mesurées lors des campagnes de prélèvement

Les teneurs en ammonium sont extrêmement élevées : 2 100, 851, et 3 630 mg/l, alors que la norme est de 30 mg/l. Ceci indique une pollution azotée importante, probablement due à la décomposition de la matière organique azotée.

Le pic observé en avril (3 630 mg/l) pourrait être lié à un processus de biodégradation plus actif (température plus élevée).

– pH :

Le pH est resté relativement stable au cours des trois prélèvements, avec des valeurs comprises entre 8,25 et 8,3, ce qui est conforme à la plage réglementaire (6,5–8,5). Ce pH légèrement alcalin est généralement associé à des lixiviats anciens ou semi-stabilisés. Il peut également favoriser la transformation de NH_4^+ en NH_3 , ce qui renforce l'importance du contrôle des autres paramètres comme la température.

– Conductivité :

Les conductivités mesurées (2,83 ; 2,5 ; 2,73 mS/cm) sont supérieures à la limite de 1,2 mS/cm. Cela reflète une forte concentration en sels dissous et ions, ce qui peut poser des problèmes pour le traitement membranaire (colmatage des membranes).

– Température :

Les températures des échantillons de lixiviat varient entre 16,2°C et 23,5°C, avec une moyenne de 21,6°C. Ces valeurs montrent que les lixiviats sont influencés par la température ambiante, car les prélèvements ont été faits en surface. Cette température reste favorable à l'activité des bactéries. Cependant, comme elle n'est ni trop basse ni très élevée, cela peut indiquer que le lixiviat est déjà en phase de stabilisation, donc avec une activité biologique réduite.

– **Couleur du lixiviat :**

- * La couleur du lixiviat est généralement foncée, allant de brun à noir.
- * Cette teinte est due à la présence de matières organiques fortement décomposées, appelées acides humiques et fulviques.
- * Ces composés proviennent de la dégradation lente de la matière organique contenue dans les déchets (restes alimentaires, végétaux, papiers, etc.).
- * Plus le lixiviat est ancien, plus sa couleur est sombre et stable, ce qui indique une maturité ou une stabilisation.

– **Odeur du lixiviat :**

- * L'odeur est généralement très forte, désagréable, souvent décrite comme nauséabonde ou putride.
- * Cette odeur provient de la dégradation anaérobie (sans oxygène) des déchets, qui produit :
 - des composés soufrés (comme le sulfure d'hydrogène, H_2S) — odeur d'œuf pourri,
 - des acides gras volatils,
 - de l'ammoniac (NH_3) — odeur piquante.

Le tableau 3.2 présente l'origine de la couleur et de l'odeur des déchets en décomposition.

TAB. 3.2: Origine de la couleur et de l'odeur des déchets en décomposition

Caractéristique	Description	Origine
Couleur	Brun foncé à noir	Acides humiques et fulviques (décomposition organique)
Odeur	Nauséabonde, soufrée, ammoniacale	Dégradation anaérobie (gaz, ammoniac, acides volatils)

3.2 Caractérisation du lixiviat après traitements

Dans le but d'évaluer les performances de la station de traitement par membranes du site d'AHNIF, des prélèvements de perméat ont été soumis à des analyses spécifiques. Ces données permettent d'apprécier l'efficacité du système en les confrontant aux normes réglementaires et aux exigences techniques prévues dans le cahier des charges. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau ci-après :

TAB. 3.3: : Valeurs des paramètres physico-chimiques du perméat du CET AHNIF à trois périodes de prélèvement

Paramètres	DCO (mgO ₂ /l)	NH ₄ -N (mg/l)	pH	Conductivité (mS/cm)	Température (°C)
Perméat (25/02/2025)	46	19	6,11	0,0311	17
Perméat (26/03/2025)	84,1	17,3	6,2	0,0289	16,8
Perméat (05/04/2025)	48,3	19,1	6,53	0,0295	20,1
Norme exigée	120	30	6,5–8,5	0,22	30

Perméat

Les analyses du perméat prélevé à trois dates différentes (février, mars et avril 2025) mettent en évidence l'efficacité globale du traitement membranaire mis en œuvre à la station AHNIF.

Demande Chimique en Oxygène (DCO) :

L'histogramme présenté ci-après illustre l'évolution des concentrations en Demande Chimique en Oxygène (DCO), exprimées en mg O₂/L, mesurées lors des prélèvements effectués aux dates du 25 février, 26 mars et 5 avril 2025. Ces valeurs sont comparées à la norme de rejet fixée à 120 mg O₂/L.

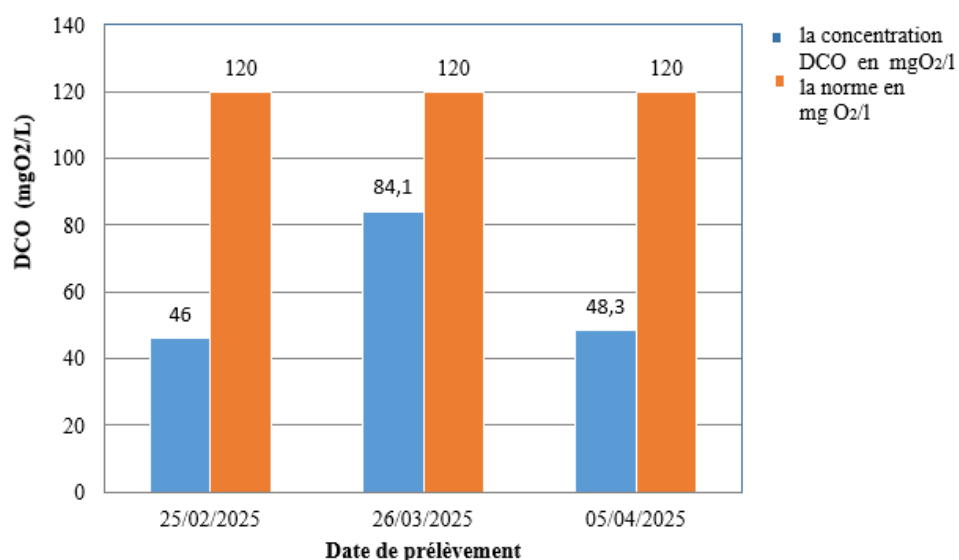


FIG. 3.3: Histogramme des concentrations en DCO_5 mesurées lors des campagnes de prélèvement après traitement

Demande Chimique en Oxygène (DCO) :

Les valeurs de DCO dans le perméat sont de 46 mg/L (25/02), 84,1 mg/L (26/03) et 48,3 mg/L (05/04), soit toutes inférieures à la norme exigée de 120 mg/L. Cela reflète une élimination efficace de la matière organique oxydable par osmose inverse. La légère augmentation observée en mars pourrait être due à une variation de la composition du lixiviat brut, ou à une saturation temporaire ou un colmatage partiel des membranes.

Azote ammoniacal (NH_4^+-N) :

Les résultats des concentrations en azote ammoniacal (NH_4^+-N), exprimées en mg/L et relevées lors des échantillons prélevés à différentes dates, sont résumés dans l'histogramme ci-dessous, en comparaison avec la norme de rejet fixée à 30 mg/L.

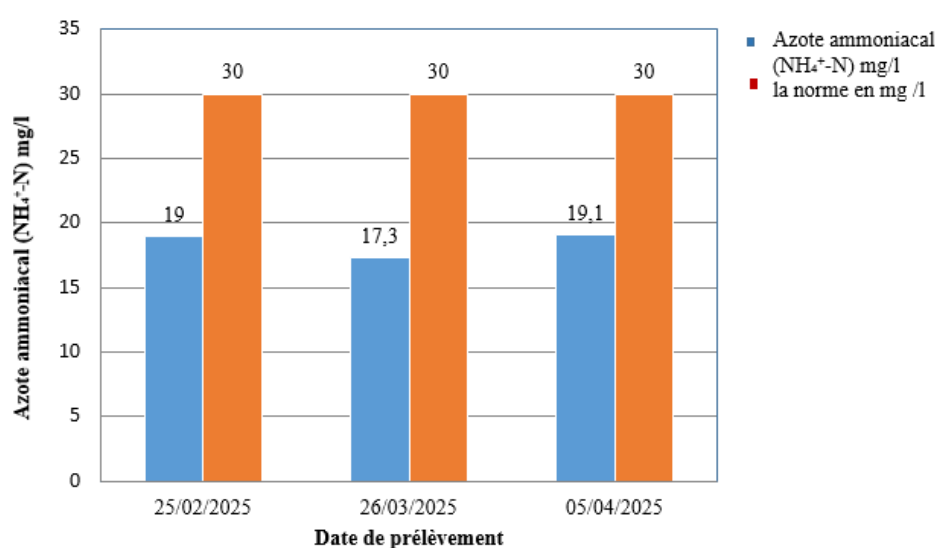


FIG. 3.4: Histogramme des concentrations en NH_4^+-N mesurées lors des campagnes de prélèvement après traitement.

Les valeurs mesurées pour l'azote ammoniacal (NH_4^+-N) dans le perméat sont nettement inférieures à la norme exigée de 30 mg/L, indiquant une élimination efficace et complète de cet élément présent dans le lixiviat brut.

La faible teneur en NH_4^+ témoigne du bon fonctionnement du procédé de traitement, probablement basé sur un couplage entre osmose inverse et traitement biologique ou physico-chimique préalable, permettant une réduction significative de l'ammoniac dissous.

Ce résultat traduit une stabilisation avancée du lixiviat traité, rendant le perméat compatible avec les standards environnementaux, et limite les risques de toxicité pour les milieux aquatiques en cas de rejet.

pH :

Le pH des échantillons varie entre 6,11 et 6,53, ce qui reste globalement dans la plage acceptable (6,5–8,5), sauf pour l'échantillon du 25 février (légèrement en dessous). Cette légère acidité pourrait être due à la présence résiduelle d'acides organiques ou de CO₂ dissous, caractéristiques des lixiviats même après traitement.

Conductivité :

Les valeurs de conductivité sont très faibles (environ 0,03 mS/cm), ce qui traduit une élimination importante des sels dissous et témoigne de la bonne performance de l'osmose inverse en matière de déminéralisation. Ces valeurs confirment une réduction significative de la charge ionique, un des objectifs principaux du traitement.

Température :

Les températures mesurées (16,8 à 20,1 °C) sont inférieures à la limite de 30 °C, ce qui est attendu pour des prélèvements réalisés dans un environnement modéré. La température n'influence pas directement la conformité, mais elle peut affecter la performance des membranes, notamment en termes de flux et de rétention.

Une couleur transparente avec faible odeur et une température idéale sont obtenues à la sortie du second étage d'osmose inverse.

Concentrât : caractéristiques et gestion

Le concentrât issu du traitement par osmose inverse présente des valeurs très élevées en DCO, DBO₅ et conductivité, traduisant une forte concentration en matières organiques et en sels dissous. Sur le plan sensoriel, ce résidu liquide se caractérise par une teinte brun foncé prononcée ainsi qu'une odeur fortement désagréable, témoignant de sa charge polluante.

Ce concentrât, qui représente environ 25 % du volume d'entrée, contient la quasi-totalité des éléments retenus par la membrane semi-perméable. De ce fait, il est impropre à tout usage direct.

Sa gestion suit un circuit de recyclage interne : il est redirigé vers le bassin de lixiviat brut où il est mélangé aux nouveaux apports afin de subir un nouveau cycle de traitement.

En cas de saturation du bassin de lixiviat, une évacuation contrôlée vers le centre de traitement des déchets est prévue, assurant ainsi l'absence de rejet dans l'environnement naturel.

3.3 Conclusion

L'analyse des paramètres physico-chimiques du perméat, après traitement par osmose inverse à double étage, met en évidence une réduction significative des polluants organiques (DCO), azotés (NH_4^+) et minéraux (conductivité). Les résultats respectent les normes environnementales en vigueur, traduisant ainsi l'efficacité et la fiabilité du procédé membranaire utilisé.

Le rendement épuratoire global, estimé à environ 99 %, confirme la performance du système d'osmose inverse mis en place à la station d'AHNIF. Ce rendement élevé démontre la capacité du procédé à assurer une élimination efficace des charges polluantes, même dans un effluent complexe tel que le lixiviat.

Ce niveau de traitement permet d'envisager, selon les cas, un rejet sécurisé dans le milieu récepteur ou une valorisation du perméat dans des usages non potables, sous réserve d'une vérification complémentaire de certains paramètres spécifiques.

Conclusion générale

La problématique des lixiviats issus des centres d'enfouissement technique constitue aujourd'hui une réelle menace pour l'environnement, en particulier en ce qui concerne la pollution des sols, des eaux souterraines et de surface. L'Algérie, à travers la mise en place de Centres d'Enfouissement Techniques (CET), a adopté une solution structurée pour la gestion des déchets ménagers. Toutefois, la réussite de ces dispositifs repose en grande partie sur la capacité à traiter efficacement les lixiviats produits. Dans ce contexte, le CET d'Ahnif s'est doté d'une unité de traitement par procédé membranaire, basé sur une Osmose Inverse à double étage, associée à un système de prétraitement comprenant filtre à sable, filtre à poche et filtre à cartouche. Cette configuration a permis d'atteindre des rendements élevés en matière d'élimination des polluants, tout en respectant les exigences du décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006 relatif aux rejets industriels. Les résultats obtenus à l'issue de notre étude montrent que les principaux paramètres physico-chimiques du lixiviat traité (perméat) respectent pleinement les normes en vigueur : • DCO : 99,95 • Azote ammoniacal ($\text{NH}_4\text{-N}$) : 97,94 soit des performances largement supérieures aux exigences initiales du cahier des charges. Le perméat peut ainsi être rejeté directement dans le milieu naturel ou réutilisé à des fins internes. Toutefois, le concentrât, chargé en polluants, doit faire l'objet d'un suivi rigoureux, notamment via un stockage sécurisé ou une recirculation contrôlée dans le système. Ce mémoire confirme que la technologie d'osmose inverse à double étage constitue une solution technique performante, fiable et applicable pour le traitement des lixiviats issus des CET, à condition de disposer d'un prétraitement adapté et d'un suivi environnemental rigoureux. Sur le plan personnel, cette étude nous a permis de consolider nos connaissances théoriques, de développer des compétences pratiques en traitement des eaux usées, et de nous familiariser avec les contraintes et les enjeux environnementaux d'une unité industrielle de traitement. Ce travail constitue une expérience enrichissante dans le domaine de l'ingénierie environnementale appliquée à la valorisation et à la sécurisation des déchets.

Bibliographie

- [1] Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- [2] Brahim Djemaci. La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité. Sciences de l'environnement. Université de Rouen, 2012.
- [3] Mezouari, G. (2011). Conception et exploitation des centres de stockage des déchets en Algérie. Thèse de doctorat, Université de Limoges.
- [4] ZENASNI, M. A. (s.d.). Centre d'Enfouissement Technique (CET). École nationale des ingénieurs de la ville de Tlemcen.
- [5] Audit environnemental du centre d'enfouissement technique pour déchets ménagers et assimilés d'AHNIF.
- [6] Agence nationale des déchets (AND).
- [7] C. Berthe, « Étude de la Matière Organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés », Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2006.
- [8] D. Kilikowsa, E. Klimiuk, The effect of landfill age on municipal leachate composition, *Bioresource. Technol.* 99: 5981-5985, 2008.
- [9] Institut de Veille Sanitaire, Stockage des Déchets et santé publique. Synthèse et recommandation. Rapport, 2004.
- [10] Obbard, J. P. (1999). Landfill leachate : Characterization and biology of treatment in Hong Kong. *Research in Environmental Biotechnology*, 2, 235–248.
- [11] Millot, N. (1986). Les lixiviats de décharges contrôlées : Caractérisation analytique et études des filières de traitement. Thèse de doctorat, INSA Lyon.
- [12] Poulain S., Rena S., Givaudan J.G.G., 2008. Procédé des traitements des lixiviats. Brevet FR 2904622 A1.
- [13] Billard H., 2001. Centres de stockage des déchets - exploitation. Technique de l'ingénieur.
- [14] Keck G., Vernius E., 2000. Déchets et risques pour la santé. Technique de l'ingénieur.
- [15] Berthe C., 2006. Étude de la matière organique contenue dans les lixiviats issus de différentes filières. Thèse de Doctorat, Université de Limoges.
- [16] Wang F., 2004. Advanced oxidation treatment of aged raw and biologically treated landfill leachate. Thèse de Doctorat, Université d'Edmonton.

- [17] Aina M.P., 2006. Expertises des centres d'enfouissement dans les PED : élaboration d'un guide méthodologique. Thèse, Université de Limoges.
- [18] Kjeldsen et al., 2002; Hassan, M., et al., 2017; Wang, Z., et al., 2019.
- [19] BAPE (2010). Agrandissement du lieu d'enfouissement technique de Saint-Nicéphore – Étude d'impact, Québec, Canada.
- [20] IFDD (2005). Guide pratique sur la gestion des déchets ménagers dans les pays du Sud. Institut de la Francophonie.
- [21] Directive 1999/31/CE du 26 avril 1999 relative à la mise en décharge des déchets.
- [22] Décret exécutif n° 06-141 du 19 avril 2006 sur les rejets d'effluents liquides industriels.
- [23] Tchobanoglous et al. (1993).
- [24] Christensen et al. (2001). Biogeochemistry of landfill leachate plumes.
- [25] Décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006 ; Abdel-Rahman et al. (2013).
- [26] S. Trabelsi, 2011. Traitement des lixiviats tunisiens par AOP. Thèse, Université Paris-Est.
- [27] Sung M., Chang D., Lee H.Y. (1997). Anaerobic leachate treatment system, *Water Sci. Technol.*, 36, 333–340.
- [28] Renou, S. et al. (2008). Landfill leachate treatment : Review. *J. Hazard. Mater.*, 150(3), 468–493.
- [29] Silva, A. C. et al. (2004). Treatment and detoxification of landfill leachate. *Chemosphere*, 55(2), 207–214.
- [30] Amokrane, A. et al. (1997). Coagulation-flocculation des lixiviats. *Water Research*, 31(11), 2775–2782.
- [31] Ben Cherif, H. (2022). Coagulation-flocculation des lixiviats du CET de Bordj Bou Arreridj. Mémoire Master.
- [32] Teng, C. et al. (2021). Landfill leachate : A review. *Water Research*, 203, 117525.
- [33] Renou, S. et al. (2008). Filières classiques de traitement des lixiviats. *L'Eau, l'industrie, les nuisances*, 311, 66–73.
- [34] Y. Medkour (2012). Lixiviats du CET d'Ouled Fayet. Mémoire de Magister, ENP.
- [35] Buxton G.V. et al. (1988). Review on hydrated electrons, radicals. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 17, 513–886.
- [36] Walling C., Goosen A. (1973). Ferric ion catalyzed decomposition of H_2O_2 . *J. Am. Chem. Soc.*, 95, 2987–2991.
- [37] D. Oumar et al. (2016). Revue sur les procédés électrochimiques de traitement des lixiviats. *Revue des Sciences de l'eau*.
- [38] Trebouet, D. et al. (2001). Nanofiltration pour lixiviats stabilisés. *Water Research*, 35(12), 2935–2942.
- [39] Anqi, T. et al. (2020). Review of landfill leachate treatment methods. *IOP Conf. Ser.*, 565(1), 12038.

- [40] Chaudhari, L.B., Murthy, Z.V.P. (2010). Nanofiltration des lixiviats. J. Environ. Manag., 91(5), 1209–1217.
- [41] Ushikoshi, K. et al. (2002). Leachate treatment by reverse osmosis. Desalination, 150(2), 121–129.
- [42] Benradi, F. et al. (2013). Épaississement des concentrats d’osmose inverse. J. Mater. Environ. Sci., 4(6), 832–839.
- [43] EPWG. CET NADHIF BOUIRA.
- [44] Tchobanoglous, G. et al. (2014). Wastewater Engineering : Treatment and Resource Recovery (5th ed.), McGraw-Hill.
- [45] Mohamed, A. M. (2021). Dimensionnement et simulation de la station de traitement de lixiviat d’Ouled Fayet.

Annexe

Valeurs limites des paramètres de rejets d'effluents liquides industriels [22]

N°	Paramètre	Unité	Valeur limite
1	Température	°C	30
2	pH	–	6,5 – 8,5
3	Matières en suspension (MES)	mg/l	35
4	Azote Kjeldahl	mg/l	30
5	Phosphore total	mg/l	10
6	Demande chimique en oxygène (DCO)	mg/l	120
7	Demande biologique en oxygène sur 5 jours (DBO ₅)	mg/l	35
8	Aluminium	mg/l	3
9	Substances toxiques bioaccumulables	mg/l	0,005
10	Cyanures	mg/l	0,1
11	Fluor et composés	mg/l	15
12	Indice de phénols	mg/l	0,3
13	Hydrocarbures totaux	mg/l	10
14	Huiles et graisses	mg/l	20
15	Cadmium	mg/l	0,2
16	Cuivre total	mg/l	0,5
17	Mercure total	mg/l	0,01
18	Plomb total	mg/l	0,5
19	Chrome total	mg/l	0,5
20	Étain total	mg/l	2
21	Manganèse	mg/l	1
22	Nickel total	mg/l	0,5
23	Zinc total	mg/l	3
24	Fer	mg/l	3
25	Composés organiques chlorés	mg/l	5