REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

ECOLE SUPÉRIEURE DES TECHNOLOGIES AVANCÉES D'ALGER

المدرسة العليا للتقنيات المتقدمة بالجزائر

Département du second cycle

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme

DE MASTER Académique

-Filière-

GENIE DES PROCEDES

-Spécialité-

TRAITEMENT DES EAUX

-Thème-

Etude de l'impact de la cavitation ultrasonore sur le traitement de lixiviat

Réalisé par **MEDDAH Kheira**

Soutenues publiquement le 24/06/2024 devant les membres de jury :

Mme ZEMMOURI Hassiba	**Professeur**	**ENSTA**	**Présidente**
Mme SMAIL Fatima	**MAA**	**ENSTA**	**Examinateur**
Mme CHEIKH Assira	**MCB**	**ENSTA**	**Promotrice**

Année universitaire 2023-2024

Dédicace

En ce moment spécial où je clôture ce chapitre important de ma vie, je souhaite exprimer ma gratitude à ceux qui m'ont soutenu de près et de loin. À ma mère Nouria, mon pilier de force, Elle m’a donné tout son amour. et à mon père Mohamed, qui m'a toujours encouragé à poursuivre mes rêves, je vous dédie ce projet avec tout mon amour et ma reconnaissance infinie.

À mes frères, Hadj, Ben Salem et Islem, ainsi qu'à mes sœurs, Amel et Imen, votre soutien inconditionnel a été ma motivation constante. À ma belle-sœur Imen, merci pour votre gentillesse et votre soutien continu.

À les enfants de ma famille , Abdeilah, Israa, Salsabile, Sefiane et Djawad, vous êtes ma plus grande fierté. Chacun de vous m'a inspiré à donner le meilleur de moi-même.

À tous mes amis et à ceux qui m'ont encouragé tout au long de ce parcours, vos mots d'encouragement et votre présence ont été un véritable soutien.

Votre amitié est un cadeau précieux que je chérirai toujours.vous avez été mes piliers dans les moments difficiles et dans la joie des succès. Ce projet de fin d’études est pour vous autant que pour moi. Merci pour tout ce que vous avez fait et continuez à faire pour moi.

Avec tout mon amour et ma reconnaissance éternelle.



Remerciements

Nous tenons par la présente à exprimer notre profonde gratitude envers notre encadrante Dr CHEIKH Assira, Votre vision, Votre soutien logistique et votre engagement envers l'excellence académique ont créé un environnement propice à l'apprentissage et à l'épanouissement intellectuel.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers Les membres de jury : Pr ZEMMOURI Hassiba et Mme SMAIL Fatima pour leur précieux temps et leurs précieuses contributions lors de l'évaluation de notre travail, Leur expertise et leurs commentaires ont été inestimables.

Par ailleurs, Nous souhaiterons d'adresser nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, à l'ingénieur du laboratoire Mme NADI Souad , et à toute l'équipe qui nous avons travaillé ensemble.

Nous voulons aussi d'adresser nos remerciements les plus sincères à nos enseignants à l'ECOLE NATIONAL SUPÉRIEURE DES TECHNOLOGIES AVANCÉES - BAB EL OUED (Ex : ESSA), dont l'expertise, le dévouement et les conseils ont été d'une importance capitale tout au long de ce parcours académique. Votre soutien infaillible, vos encouragements constants et vos retours constructifs nous ont permis de mener à bien cette étude avec confiance et rigueur.

Ce mémoire est le fruit de notre persévérance et de notre travail acharné. Nous avons surmonté les défis et les obstacles avec courage et ténacité. Chaque étape franchie, chaque problème résolu, est une victoire personnelle et collective qui mérite d'être célébrée.

Merci à nous pour notre engagement sans faille, pour ne jamais avoir abandonné même lorsque les moments étaient difficiles. Ce document est une preuve tangible de notre capacité à relever des défis complexes et à atteindre nos objectifs.

ملخص

تتناول الدراسة تأثير التجويف بالموجات فوق الصوتية على معالجة العصارة، وهي السوائل الناتجة عن تسرب المياه عبر النفايات في المكبات. يعتمد التجويف بالموجات فوق الصوتية على استخدام الموجات فوق الصوتية لتشكيل فقاعات تتسبب في حدوث ظروف قصوى تؤدي إلى تحلل الملوثات العضوية وغير العضوية. تُظهر النتائج التجريبية تحسناً واضحاً في فعالية معالجة العصارة مقارنةً بالطرق التقليدية. تتأثر هذه الفعالية بشكل رئيسي بشدة الموجات فوق الصوتية، ومدة المعالجة، وطبيعة التركيب الكيميائي للعصارة. هناك حاجة لإجراء المزيد من الأبحاث لتحسين معايير المعالجة وتقييم التكاليف المرتبطة بتطبيق هذه التكنولوجيا على نطاق واسع، رغم أنها واعدة. يوفر التجويف بالموجات فوق الصوتية إمكانيات واعدة لإدارة مستدامة لمياه الصرف.

الكلمات المفتاحية: التجويف، الموجات فوق الصوتية، الملوثات الثابتة.

Résumé

L'étude examine l'impact de la cavitation ultrasonore sur le traitement des lixiviats, des effluents liquides issus de la percolation de l'eau à travers les déchets des décharges. La cavitation ultrasonore, qui consiste en l'utilisation d'ultrasons pour former des bulles implosives créant des conditions extrêmes, permet de décomposer les polluants organiques et inorganiques. Les résultats expérimentaux démontrent une nette amélioration de l'efficacité du traitement des lixiviats par rapport aux procédés traditionnels. Cette efficacité est principalement influencée par l'intensité des ultrasons, la durée du traitement et la nature chimique des lixiviats. Il est nécessaire de faire des recherches supplémentaires pour optimiser les paramètres de traitement et évaluer les coûts associés à l'application à grande échelle de cette technologie, même si elle est prometteuse. La cavitation ultrasonore présente des possibilités prometteuses pour une gestion durable des eaux usées.

Mots-clés : Cavitation , Les ultrasons, polluants persistants

Abstract

The study examines the impact of ultrasonic cavitation on the treatment of leachate, which are liquid effluents resulting from the percolation of water through landfill waste. Ultrasonic cavitation, which involves the use of ultrasound to form implosive bubbles creating extreme conditions, facilitates the breakdown of organic and inorganic pollutants. Experimental results demonstrate a significant improvement in the efficiency of leachate treatment compared to traditional methods. This efficiency is primarily influenced by the intensity of the ultrasound, the duration of the treatment, and the chemical nature of the leachate. Further research is needed to optimize treatment parameters and assess the costs associated with large-scale application of this technology, even though it is promising. Ultrasonic cavitation offers promising possibilities for sustainable wastewater management.

Keywords: Cavitation, Ultrasound, Persistent pollutants.

Table des matières

Dédicace ii
Remerciements iii
Table des matières vi
Liste des abréviations viii
Liste des figures ix
Introduction Générale 1

Chapitre 1 Généralité sur lixiviat

1.1 Définition et composition des lixiviats 3
1.1.1 Définition 3
1.1.2 Composition 3
1.2 Impacte du lixiviat sur l'environnement et la santé humaine 4
1.3 Traitement du lixiviat 4
1.4 Procédés d'oxydation sonochimiques 5

Chapitre 2 Ultrasons et génération de cavitation

2.1 Principe de fonctionnement des ultrasons 7
2.2 Bulles de cavitation ultrasonore 8
2.2.1 Définition de la cavitation 8
2.2.2 Mécanismes de formation des bulles de cavitation 8
2.2.3 Types des bulles de cavitation 9
2.2.4 Les paramètres influençant la cavitation 9
2.3 Différents bacs à ultrasons 10
2.3.1 Sondes 10
2.3.2 Bain 11

Chapitre 3 Etudes de la cavitation ultrasonore dans le traitement des lixiviats

3.1 Implications pour le traitement des lixiviats 13
3.1.1 Mécanismes de dégradation des contaminants 13
3.1.2 Effets sur la biodégradabilité des résidus organiques 13
3.1.3 Influence sur les paramètres physico-chimiques des lixiviats 14

3.2 Avantages et inconvénients du traitement des lixiviats par cavitation ultrasonore .. 14
3.2.1 Avantage 14
3.2.2 Inconvénients 15
Conclusion 16
Bibliographie 17

Liste des abréviations

NO_3^- : ions des Nitrates

NO_2^- : ions des Nitrite

SO_4^{-2} : ions des Sulfates

PO_4^{3-} : ions des Ortho phosphates

POA: Procédés d'Oxydation Avancée

NH_4^+ : azote ammoniacal

UV : ultraviolet

TiO_2 : dioxyde de titane

H_2O_2 : peroxyde d'hydrogène

O_3 : ozone

Fe^{3+} : ion ferrique

OH° : radical hydroxyle

Liste des figures

Figure 1-1 Les procédés d'oxydation avancée 5
Figure 2-1 diagramme évolution des différents états en fonction de la température et de la pression, ... 7
Figure 2-2 phénomène de cavitation pour nettoyage par cavitation ultrasonore 9
Figure 2-4 Bain à Ultrason 11

Introduction Générale

Les déchets solides et les déchets industriels constituent un enjeu majeur pour les entreprises contemporaines, compte tenu de leurs conséquences potentielles sur l'environnement et la santé publique. L'un des problèmes environnementaux les plus urgents est le traitement des lixiviats, des liquides produits par la percolation de l'eau dans les décharges. Des techniques de traitement efficaces sont nécessaires pour réduire l'impact environnemental de ces effluents riches en contaminants organiques et inorganiques.

À cet égard, la cavitation ultrasonore apparaît comme une technologie prometteuse pour le traitement des lixiviats. Des ultrasons de grande intensité peuvent provoquer la cavitation, qui se traduit par la formation, la croissance et l'implosion violente de bulles dans un liquide. Les conditions locales sont extrêmes de température et de pression, ce qui favorise la dégradation des polluants présents dans les lixiviats.

L'objet de cette thèse est l'effet de la cavitation ultrasonore sur le traitement des lixiviats. Afin de mieux comprendre le sujet, ce mémoire se divise en trois chapitres :

Le chapitre premier concerne la généralité du lixiviat.

Les caractéristiques des lixiviats seront présentées dans ce chapitre, y compris leur formation, leur composition chimique et les difficultés liées à leur traitement. Nous évoquerons aussi les différentes techniques traditionnelles de traitement des lixiviats, en mettant en évidence leurs points forts et leurs faiblesses.

Chapitre 2 : Ultrasons et cavitation artificielle

Les principes fondamentaux des ultrasons et de la cavitation sont étudiés dans ce chapitre. Nous expliquerons comment les ultrasons sont générés et quelles sont les conditions de formation de la cavitation. Les paramètres qui influencent l'efficacité de la cavitation seront particulièrement pris en compte, tels que la fréquence et l'intensité des ultrasons

Chapitre 3 : Analyses de la cavité ultrasonore pour le traitement des lixiviats*

La cavitation ultrasonore est utilisée pour le traitement des lixiviats dans le dernier chapitre de ce mémoire. Les résultats expérimentaux obtenus seront analysés, les facteurs qui influencent l'efficacité du traitement discutés et comparés à la technique classique. Il sera également question des perspectives d'amélioration et des perspectives futures de cette technologie.

Chapitre 1

Généralité sur lixiviat

Chapitre 1

Généralité sur lixiviat

1.1 Définition et composition des lixiviats

1.1.1 Définition

Le lixiviat est une évacuation liquide issue de la percolation de l'eau à travers les déchets, que ce soit les eaux de pluie et/ou l'eau présente dans les déchets. On obtient un lixiviat lorsque la concentration d'humidité dépasse la valeur maximale de rétention, qui correspond à la quantité de liquide que peut retenir un milieu poreux sans produire de percola. Les déchets et les sous-produits de la dégradation des déchets sont très riches en matières en suspension et en composants solubles, ce qui les rend particulièrement chargés (Moustafa 2021).

1.1.2 Composition

On sait que les lixiviats provenant de déchets non dangereux renferment plusieurs polluants importants répartis en quatre catégories (Christensen, Kjeldsen et al. 2001). Les composants organiques dissous (COT, acides gras volatils (AGV), composés réfractaires tels que les acides humiques et fulviques) sont présents dans le groupe 1. Les macro-composants inorganiques présents dans le groupe 2 sont le Ca, Mg, Na, K, NH_4^+, Fe, Mn, Cl^-, SO_4^{2-} et les ions HCO_3^- (Toklo, Josse et al. 2015). Les éléments traces métalliques (ETM) tels que le Cd, Cr, Cu, Pb, Ni et Zn sont présents dans le groupe 3 (Xaypanya, Takemura et al. 2018). Enfin, le quatrième groupe contient les composés organiques xénobiotiques tels que les HAP, les Me-HAP, les PCB, les phtalates, les résidus de médicaments, les bisphénols et bien d'autresencore (Sui, Zhao et al. 2017) .
D’autres éléments traces peuvent être présents en très faibles quantités dans les lixiviats, à savoir le B, l’As, le Se, la Be, le Li, le Hg et le Co (Christensen, Kjeldsen et al. 2001). En même temps, on estime que les microorganismes pathogènes présents dans les lixiviats sont l'un des principaux polluants, tels que E.coli, les coliformes thermo tolérants, Salmonella et Shigella (El Kadiri, Bencheban et al. 2015)

1.2 Impacte du lixiviat sur l’environnement et la santé humaine

Les lixiviats enfouis de manière incorrecte peuvent engendrer des perturbations physiques et chimiques dans les milieux récepteurs, ce qui entraîne une dégradation de la qualité des sols et de l'eau. Il arrive fréquemment que le lixiviat renferme différentes substances toxiques, comme des métaux lourds, des composés organiques et des produits chimiques dangereux. Si l'on les rejette directement dans l'environnement naturel, sans passer par un système de traitement spécifique, ils peuvent pénétrer dans le sol et contaminer les eaux souterraines. S'il se jette dans les rivières ou les lacs, il peut aussi contaminer les sources d'eau de surface, avoir un impact sur la faune aquatique et compromettre la qualité de l'eau potable. Ainsi, ils peuvent présenter des risques pour l'environnement et la santé humaine, voire entraîner des épidémies graves (Guerrero-Rodríguez, Sánchez-Yáñez et al. 2014) , (Moustafa 2021).

1.3 Traitement du lixiviat

Comme les lixiviats sont complexes, il est difficile d'appliquer un traitement standard à n'importe quel type de rejet. Il est essentiel d'effectuer une étude préliminaire afin de déterminer leurs catégories. Cela permet de repérer les méthodes capables de diminuer de manière efficace les divers agents polluants. Une station de traitement des lixiviats est généralement constituée de divers équipements physico-chimiques et biologiques (Rautenbach and Mellis 1994).

Les lixiviats sont généralement traités de manière biologique pour les effluents jeunes et biodégradables (lagunage, aération, etc...) et physico-chimique pour les effluents plus anciens et peu ou pas biodégradables (comme la coagulation-floculation, l'électrocoagulation, l'oxydation, la précipitation, l'adsorption et la filtration, etc..)(Millot 1986).

Des études récentes révèlent l’émergence de méthodes mises en œuvre pour l’élimination des colorants, les procédé d’oxydation avancée (POA) est appliqué favorablement à détruire les contaminants résistants. Les principaux POA sont représentés dans la (figure I.1.)

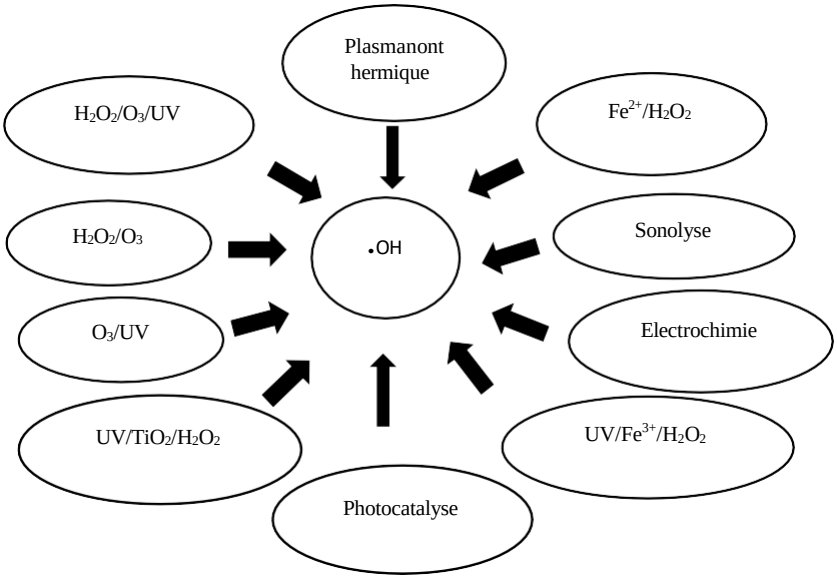


Figure 1-1 Les procédés d'oxydation avancée

L'objectif recherché n'estpas forcément la minéralisation complète des composés réfractaires. Il peut s'agir en effet de faciliter la dégradation biologique en prétraitant les effluents. Les matières organiques sont d'abord oxydées chimiquement jusqu'à ce que des produits intermédiaires biodégradables se forment.

Si on veut obtenir une oxydation totale et une minéralisation plus complète des polluants organiques, on peut compléter le processus oxydatif par une activation catalytique et/ou photochimique. La minéralisation permet alors de transformer les substances réfractaires en produits inorganiques, en eau et en dioxyde de (Hermosilla, Merayo et al. 2015).

1.4 Procédés d'oxydation sonochimiques

La sonochimie, l'utilisation des ultrasons en chimie, est rentrée dans les années 1970. Les ultrasons sont simplement définis comme des bruits dont la fréquence est trop élevée pour être captée par l'oreille humaine, généralement supérieure à 20 kHz.

Les ultrasons de puissance sont une source d'énergie différente de celle habituellement utilisée par les chercheurs en sonochimie, tels que la chaleur, la lumière et la pression. Un phénomène physique appelé cavitation permet à ces ultrasons de modifier les réactions chimique (Hua, Hoffmann et al. 1997).

Chapitre 2

Ultrason et génération de cavitation

Chapitre 2

Ultrasons et génération de cavitation

2.1 Principe de fonctionnement des ultrasons

Les ondes acoustiques sont des ondes mécaniques longitudinales qui se propagent dans un environnement solide, liquide ou gazeux. La longueur d'onde, la fréquence, la période et l'amplitude sont les caractéristiques de ces ondes. D'après Peter (2021), les ondes sonores peuvent être classées en infrasonores (<20 Hz), soniques (20-20 000 Hz) et ultrasoniques (>20 000 Hz). Dans le domaine de la sonochimie, la fréquence joue un rôle essentiel dans la formation, l'oscillation, la taille et l'effondrement des bulles de cavitation.

En milieu liquide, les ondes ultrasonores se déplacent de manière sinusoïdale (figure 2), ce qui entraîne la formation de vagues de compression/dépression. Pendant la compression, les molécules du liquide sont poussées ensemble, augmentant temporairement la pression locale. Pendant la raréfaction, les molécules sont éloignées les unes des autres, créant des zones de basse pression.Les ultrasons respectent ainsi les lois générales concernant les ondes sinusoïdales propagation, atténuation et réflexion (Cravotto, Gaudino et al. 2013).

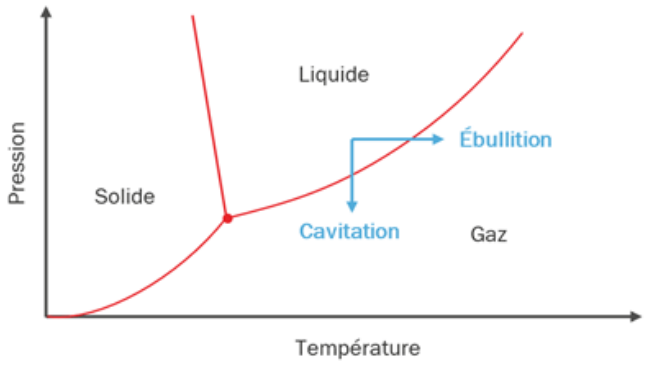


Figure 2-1 diagramme évolution des différents états en fonction de la température et de la pression,

2.2 Bulles de cavitation ultrasonore

2.2.1 Définition de la cavitation

La cavitation est le processus par lequel de petites cavités ou bulles de vapeur (ou de gaz) se forment dans un liquide, généralement en raison d'une baisse locale de la pression en dessous de la pression de vapeur du liquide. Ces bulles se forment lorsque la pression statique dans le liquide diminue, permettant ainsi à des zones de basse pression de se transformer en bulles de vapeur (Cheeke 2010).

2.2.2 Mécanismes de formation des bulles de cavitation

- **Pression de vapeur du liquide** : Chaque liquide a une pression de vapeur spécifique à une température donnée, au-dessus de laquelle il se vaporise. Lorsque la pression locale d'un liquide diminue en dessous de sa pression de vapeur, il peut former des bulles de vapeur (Lauterborn and Kurz 2010).
- **Effet des ultrasons** : Dans le contexte de la cavitation ultrasonore, les ultrasons génèrent des zones de haute et de basse pression à travers le liquide. Pendant la phase de raréfaction d'une onde ultrasonore, la pression locale peut chuter suffisamment pour atteindre ou même dépasser le point de vapeur, permettant ainsi la formation de bulles de cavitation (Hao and Prosperetti 1999).
- **Noyaux de cavitation** : Les bulles de cavitation peuvent se former autour de particules solides, de gaz dissous ou d'impuretés présentes dans le liquide. Ces particules agissent comme des sites d'initiation où la pression du liquide peut localement chuter en dessous de la pression de vapeur, facilitant ainsi la formation de bulles (Kim 2020).
- **Croissance et implosion des bulles** : Une fois formées, les bulles de cavitation peuvent croître en taille pendant les phases de raréfaction des ultrasons. Lorsque ces bulles entrent dans une zone de compression, elles implosent rapidement. L'implosion génère des ondes de choc, des jets de liquide à grande vitesse et des températures élevées localement, créant ainsi des conditions extrêmes qui peuvent être utilisées pour des applications telles que le nettoyage, la désinfection ou le traitement des eaux (Marusic and Broomhall 2021).

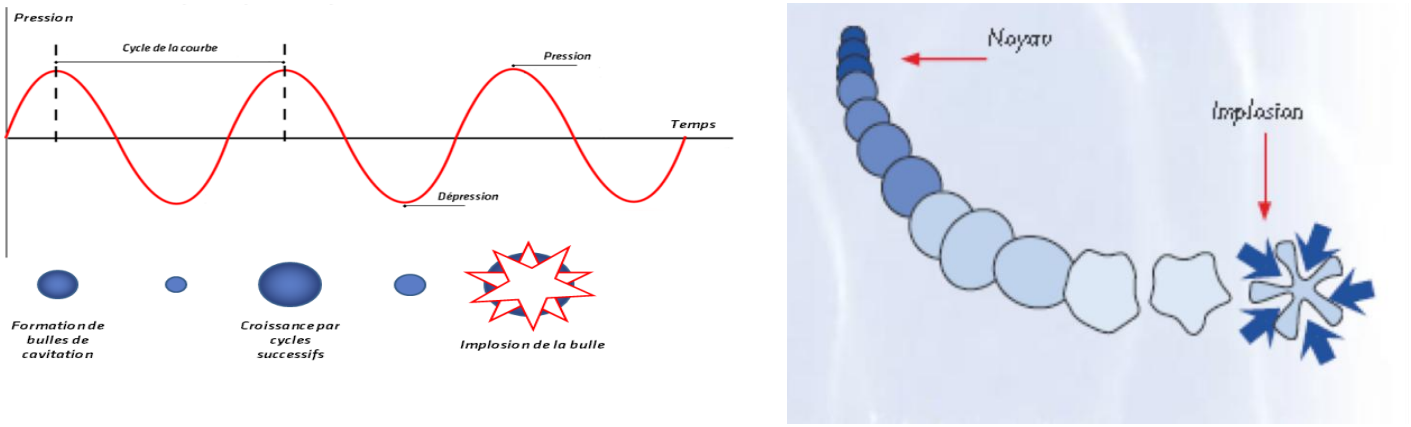


Figure 2-2 phénomène de cavitation pour nettoyage par cavitation ultrasonore

2.2.3 Types des bulles de cavitation

- Cavitation de basse fréquence ou acoustique : Ce type de cavitation ultrasonore se produit généralement à des fréquences inférieures (moins de 100 kHz) et est utilisé dans des applications telles que le nettoyage et la désinfection par ultrasons (Katsanevakis 1994).
- Cavitation acoustique haute fréquence : Ce type de cavitation ultrasonore se produit à des fréquences plus élevées (généralement supérieures à 100 kHz) et est souvent utilisé pour des applications plus spécifiques telles que la sonochimie et la sonoluminescence(Leighton 2017).
- Croissance constante : La formation de bulles de cavitation qui oscillent de manière stable sous l'influence des ondes ultrasonores est la caractéristique de ce type de cavitation ultrasonore. Ces bulles sont fréquemment utilisées dans des réactions chimiques contrôlées car elles peuvent rester stables pendant de longues périodes (Rosales Pérez and Esquivel Escalante 2024).
- La cavitation peut être temporaire ou implosive. Ce type de cavitation ultrasonore se produit lorsque les bulles de cavitation croissent rapidement pendant la phase de raréfaction de l'onde ultrasonore, puis implosent violemment pendant la phase de compression. Cela génère des températures et des pressions locales élevées, utilisées pour la dégradation des contaminants ou le traitement des eaux (Mason 1990) , (Vorobiev, Boussetta et al. 2023).

2.2.4 Les paramètres influençant la cavitation

Il existe différents types de cavitation. La cavitation accoustique est provoquée par un son de forte intensité. Les ultrasons de puissance utilisés pour le nettoyage sont caractérisés par une forte intensité et une faible fréquence. Le phénomène de cavitation se produit lorsque l'énergie produite est capable de vaincre les forces de cohésion du liquide.

Les principaux facteurs qui influencent la cavitation sont :

• la puissance : la puissance minimale requise pour que se développe le phénomène de cavitation est appelé seuil de cavitation. L'effet des ultrasons augmente avec la puissance jusqu'à un certain seuil du fait de la création d'un bouclier de bulles se développant sur la surface émettrice. Si l'équipement ne dispose pas de variateur de puissance, il est possible d'augmenter artificiellement cette dernière en réduisant le volume du bain (Dalvi-Isfahan, Hamdami et al. 2016).

• la fréquence : les basses fréquences sontreconnues pour favoriser les effets physiques. Une fréquence inférieure à 50 KHz est recommandée pour le nettoyage (Laugier 2007).

• la température : l'augmentation de température diminue l'efficacité des ultrasons. Du fait d'une augmentation de la T° par les ultrasons eux-mêmes,une T° de 20°C parait optimale lors de la préparation de la solution et du remplissage du bac.

Les propriétes du liquide vont également influencer l'effet des ultrasons : tension de vapeur, tension interfaciale et viscosité. Comme pour la température une augmentation de la tension de vapeur du liquide facilite l'apparition du phénomène de cavitation mais réduit les pressions et les températures atteintes dans la bulle lors de son implosion (Laugier 2007)

2.3 Différents bacs à ultrasons

Il existe aujourd'hui plusieurs dispositifs pour la transmission des ultrasons. Chacun possède des caractéristiques particulières qui ont un impact sur le mode de transmission et l'efficacité de la transmission.

2.3.1 Sondes

Une sonde ultrasonique est utilisée pour une grande quantité de réactions ultrasoniques à basse fréquence (20 kHz), ce qui engendre une intensité acoustique plus importante que dans d'autres types de matériel ultrasonique. Les forces mécaniques sont fortes grâce à cette intensité, ce qui est très utile pour des actions telles que la réduction de la taille des particules ou l'émulsion. Néanmoins, concentrer toute l'énergie présente un grand désavantage pour ce système (Mason and Peters 1991).

2.3.2 **Bain**

le bain ultrasonique est l'appareillage que l'on retrouve le plus souvent au niveau du laboratoire, car il est simple et peu coûteux. Le plus souvent utilisé à des fréquences entre 40 et 50 kHz , La plupart du temps, il offre la possibilité de contrôler la température du fluide dans le bain.

Contrairement aux sondes, un bain ultrasonique est souvent composé de plusieurs transducteurs répartis sous le fond du bain, qui permettent un traitement plus homogène du milieu. Cependant, cette configuration vient limiter les volumes de traitement 29



Figure 2-3 Bain à Ultrason

2.3.2.1 Système à circulation continue ou « sonotube »

Les systèmes à flux continu, aussi connus sous le nom de sonotube, sont utilisés à l'échelle industrielle pour traiter de grands volumes et des fluides plus visqueux que de l'eau. Généralement, il s'agit d'un tube ultrasonique extra-réacteur, par lequel le milieu réactionnel est pompé. L'uniformité du traitement est assurée. Les appareils sont souvent équipés d'échangeurs de chaleur pour contrôler la température de réaction et certaines propriétés du milieu (Mason 1999).

Chapitre 3

Etudes de la cavitation ultrasonore dans le traitement des lixiviats

Chapitre 3

Etudes de la cavitation ultrasonore dans le traitement des lixiviats

3.1 Implications pour le traitement des lixiviats

3.1.1 Mécanismes de dégradation des contaminants

La cavitation ultrasonore induit des conditions extrêmes locales dans les liquides, ce qui favorise plusieurs mécanismes de dégradation des contaminants présents dans les lixiviats (Rosales Pérez and Esquivel Escalante 2024):

- **Oxydation avancée :** L'implosion des bulles de cavitation génère des radicaux hydroxyle (•OH•OH•OH), qui sont des espèces réactives d'oxygène. Ces radicaux peuvent oxyder efficacement les composés organiques polluants, même ceux qui sont récalcitrants aux méthodes conventionnelles de traitement des eaux usées.
- **Désorption et décomposition :** Les forces de cisaillement et les ondes de choc créées par la cavitation peuvent désorber les contaminants adsorbés sur les particules solides présentes dans les lixiviats. De plus, les bulles de cavitation peuvent imploser près des surfaces solides, aidant à décomposer les contaminants fixés.
- **Augmentation de la biodisponibilité :** La cavitation peut également augmenter la biodisponibilité des contaminants en facilitant leur libération des matrices organiques ou minérales complexes dans lesquelles ils sont piégés.

3.1.2 Effets sur la biodégradabilité des résidus organiques

- **Amélioration de la biodégradabilité :** En réduisant la taille des particules et en augmentant la surface spécifique des substrats organiques, la cavitation ultrasonore peut rendre les résidus organiques plus accessibles aux micro-organismes décomposeurs. Cela accélère la biodégradation des composés organiques présents dans les lixiviats.
- **Réduction de la toxicité :** La dégradation des contaminants par la cavitation peut souvent conduire à la formation de produits finaux moins toxiques ou plus facilement biodégradables,

réduisant ainsi l'impact environnemental global des lixiviats traités (Vorobiev, Boussetta et al. 2023).

3.1.3 Influence sur les paramètres physico-chimiques des lixiviats

- **Changements de pH et de température :** La cavitation ultrasonore peut provoquer des changements locaux de pH et de température dans les lixiviats, en particulier près des bulles de cavitation. Ces variations peuvent influencer la solubilité des composés organiques et inorganiques, ainsi que l'activité des micro-organismes présents dans le milieu.
- **Réduction de la matière organique :** En dégradant les composés organiques complexes, la cavitation peut réduire la charge organique des lixiviats, améliorant ainsi la qualité globale de l'eau traitée.
- **Modification de la composition ionique :** La cavitation peut également induire des processus de désorption des ions présents dans les lixiviats, modifiant ainsi leur composition ionique et leur potentiel d'adsorption (Czarnotaa 2011).

3.2 Avantages et inconvénients du traitement des lixiviats par cavitation ultrasonore

3.2.1 Avantage

- Dégradation efficace des contaminants : Les conditions locales extrêmes créées par la cavitation ultrasonore sont des températures élevées, des pressions et des forces de cisaillement élevées. Cela favorise une dégradation efficace des substances polluantes organiques et inorganiques présentes dans les eaux de ruisselle (Okitsu, Cavalieri et al. 2018).
- Pas besoin d'ajout de produits chimiques : À la différence d'autres technologies qui impliquent souvent l'incorporation de réactifs chimiques, la cavitation ultrasonore utilise principalement de l'eau ou des solutions aqueuses comme milieu de traitement, ce qui permet de diminuer les dépenses opérationnelles et les conséquences environnementales liées aux produits chimiques(Vorobiev, Boussetta et al. 2023).
- Traitement rapide et continu : Contrairement à d'autres technologies qui nécessitent fréquemment l'ajout de réactifs chimiques, la cavitation ultrasonore utilise principalement de l'eau ou des solutions aqueuses comme milieu de traitement, ce qui permet de réduire les coûts opérationnels et les impacts environnementaux des produits chimiques (Czarnotaa 2011).

- Réduction de la taille des particules et des solides : Outre la dégradation des substances polluantes, la cavitation ultrasonore a la capacité de fragmenter les solides et de réduire la taille des particules organiques présentes dans les lixiviats, ce qui facilite leur traitement ultérieur par d'autres techniques ou leur biodégradation naturelle (Czarnotaa 2011).

3.2.2 **Inconvénients**

- Coûts d'investissement initiaux élevés : La mise en place d'appareils ultrasonores et la gestion de l'énergie requise peuvent engendrer des dépenses initiales importantes. En outre, la maintenance régulière afin d'assurer le bon fonctionnement de l'équipement peut également engendrer une charge financière constante (Chen and Smirniotis 2002).
- Sélectivité limitée des contaminants : Malgré son efficacité pour une grande variété de contaminants, la cavitation peut être moins sélective que certaines technologies particulières comme l'adsorption sur charbon actif ou la filtration membranaire, qui visent des contaminants spécifiques avec une plus grande efficacité (Badmus, Tijani et al. 2018).
- Besoin de contrôler les conditions opérationnelles : Il est essentiel de maintenir des conditions opérationnelles optimales pour maximiser l'efficacité de la cavitation ultrasonore, comme la puissance ultrasonore, la fréquence et la température du liquide, ce qui peut exiger une gestion et un ajustement précis (Mason 1997).

Conclusion

Les lixiviats issus des décharges posent un problème important dans le domaine de la gestion des déchets. Il est nécessaire d'explorer des technologies alternatives pour traiter les lixiviats, même si les méthodes conventionnelles sont efficaces à certains égards. Notre étude porte sur l'utilisation de la cavitation ultrasonore pour le traitement des lixiviats, proposant ainsi une nouvelle approche pour améliorer la dégradation des contaminants.

La complexité des lixiviats, qui contiennent une variété de polluants organiques et inorganiques, a été mise en lumière dans cette recherche, rendant leur traitement difficile. Les caractéristiques principales des lixiviats ainsi que les difficultés liées à leur gestion ont été identifiées, ce qui a permis de définir les critères essentiels pour une méthode de traitement efficace.

L'utilisation des ultrasons pour créer de la cavitation s'est montrée prometteuse. Par la formation et l'implosion de bulles dans le liquide, la cavitation ultrasonore génère localement des températures et des pressions extrêmes. La dégradation des contaminants est facilitée par ces conditions, ce qui rend cette méthode particulièrement efficace pour traiter les lixiviats complexes.

Les résultats expérimentaux de cette étude ont montré que la cavitation ultrasonore peut améliorer considérablement la dégradation des polluants contenus dans les lixiviats. Les paramètres de l'efficacité de ce traitement (intensité des ultrasons, durée de traitement, composition chimique des lixiviats) ont été étudiés et optimisés. Par rapport aux méthodes classiques, la cavitation ultrasonore présente des avantages significatifs, tels qu'une dégradation plus rapide et plus complète des polluants.

En conclusion, cette étude a démontré que la cavitation ultrasonore est une méthode innovante et efficace pour le traitement des lixiviats. Les résultats obtenus permettent de développer de nouvelles applications de cette technologie dans le domaine de la gestion des déchets liquides. Cependant, une adoption à grande échelle nécessite des études complémentaires visant à améliorer les paramètres de traitement et à évaluer les coûts économiques et environnementaux associés. Il est envisageable d'intégrer la cavitation ultrasonore à d'autres techniques de traitement pour améliorer encore l'efficacité et la durabilité des solutions de gestion des lixiviats.

Bibliographie

Badmus, K. O., et al. (2018). "Treatment of persistent organic pollutants in wastewater using hydrodynamic cavitation in synergy with advanced oxidation process." Environ Sci Pollut Res Int **25**(8): 7299-7314.

Cheeke, J. D. N. (2010). Fundamentals and applications of ultrasonic waves, CRC press.

Chen, Y.-C. and P. Smirniotis (2002). "Enhancement of Photocatalytic Degradation of Phenol and Chlorophenols by Ultrasound." Industrial & Engineering Chemistry Research - IND ENG CHEM RES **41**.

Christensen, T. H., et al. (2001). "Biogeochemistry of landfill leachate plumes." **16**(7-8): 659-718.

Cravotto, G., et al. (2013). "On the mechanochemical activation by ultrasound." **42**(18): 7521-7534.

Czarnotaa, G. J. J. N. (2011). "Ultrasound contrast microbubbles: in vivo imaging and potential therapeutic applications." 267.

Dalvi-Isfahan, M., et al. (2016). "The principles of high voltage electric field and its application in food processing: A review." **89**: 48-62.

El Kadiri, A., et al. (2015). "Physicochemical and Bacteriological Characterization of a Leachate of a Controlled Discharge." (24): 77-84.

Guerrero-Rodríguez, D., et al. (2014). "Phytotoxic effect of landfill leachate with different pollution indexes on common bean." **225**: 1-7.

Hao, Y. and A. J. P. o. f. Prosperetti (1999). "The dynamics of vapor bubbles in acoustic pressure fields." **11**(8): 2008-2019.

Hermosilla, D., et al. (2015). "The application of advanced oxidation technologies to the treatment of effluents from the pulp and paper industry: a review." **22**: 168-191.

Hua, I., et al. (1997). "Optimization of ultrasonic irradiation as an advanced oxidation technology." **31**(8): 2237-2243.

Katsanevakis, A. N. (1994). Performance parameters for boiling and gassed stirred tank reactors, University of Surrey (United Kingdom).

Kim, B. (2020). Investigation of Sonochemical Treatment of Ultrasound-assisted Cavitation of Heavy Hydrocarbon, Schulich School of Engineering.

Laugier, F. (2007). Les ultrasons en procédés polyphasiques: transfert Gaz-Liquide, réaction Liquide-Liquide.

Lauterborn, W. and T. J. R. o. p. i. p. Kurz (2010). "Physics of bubble oscillations." **73**(10): 106501.

Leighton, T. (2017). "Climate change, dolphins, spaceships and antimicrobial resistance: the impact of bubble acoustics."

Marusic, I. and S. J. A. R. o. F. M. Broomhall (2021). "Leonardo da Vinci and fluid mechanics." **53**: 1-25.

Mason, T. J. (1999). Advances in sonochemistry, Elsevier.

Mason, T. J. and D. Peters (1991). Practical sonochemistry, Elsevier.

Mason, T. J. J. C. S. R. (1997). "Ultrasound in synthetic organic chemistry." **26**(6): 443-451.

Mason, T. J. R., Cambridge (1990). "The uses of ultrasound in chemistry." 20-56.

Millot, N. (1986). Les lixiviats de décharge contrôlée:-caractérisation analytique:-étude des filières de traitement, Lyon, INSA.

Moustafa, A. (2021). Caractérisation chimique (minérale et organique) des lixiviats issus de la décharge des déchets à Tripoli-Liban, Université de Lille.

Okitsu, K., et al. (2018). Sonochemical production of nanomaterials, Springer.

Rautenbach, R. and R. J. D. Mellis (1994). "Waste water treatment by a combination of bioreactor and nanofiltration." **95**(2): 171-188.

Rosales Pérez, A. and K. J. C. Esquivel Escalante (2024). "The Evolution of Sonochemistry: From the Beginnings to Novel Applications." e202300660.

Sui, Q., et al. (2017). "Pharmaceuticals and personal care products in the leachates from a typical landfill reservoir of municipal solid waste in Shanghai, China: Occurrence and removal by a full-scale membrane bioreactor." **323**: 99-108.

Toklo, R. M., et al. (2015). "Caractérisation physico-chimique des lixiviats d'une décharge: cas du lieu d'enfouissement sanitaire de Ouèssè-Ouidah (sud Bénin)/[Physico-chemical characterization of the leachates of a discharge: case of sanitary burying place of Ouèssè-Ouidah (South of Benin)]." **13**(4): 921.

Vorobiev, E., et al. (2023). Processing of Food Products and Wastes with High Voltage Electrical Discharges, Elsevier.

Xaypanya, P., et al. (2018). "Characterization of landfill leachates and sediments in major cities of indochina peninsular countries—heavy metal partitioning in municipal solid waste leachate." **5**(6): 65.