



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ KASDIMERBA HOUGLA

Faculté des sciences appliquées

Département de Génie des procédés

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Industries Pétrochimiques

Spécialité: Génie Pétrochimique

Présenté Par

Berrekbia Mohammed Tahar Medaci Oussama

Thème

Élimination du benzène, toluène et composé phénolés à partir de l'eau usée industrielle: synthèse bibliographique

Soutenu publiquement le : 14/06/2023

Devant le jury composé de

Ghiaba Zineb	Professeur (UKMOuargla) Président
Chaib Hadjira	MCB(UKMOuargla) Examineur
Soulef Benabdesselam	MCA (UKMOuargla) Encadreur

Année Universitaire: 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents, ainsi qu'à ma très chère grand-mère qui ne cesse de
m'insuffler l'espoir dans la vie et de prier pour moi.

À mes chers frères qui m'ont toujours encouragé.

À toute ma chère famille Berrekbia.

À tous mes amis.

Et à tous ceux qui m'ont apporté leur aide de près ou de loin.

Votre soutien inconditionnel et votre encouragement ont été précieux tout au long
de mon parcours académique. Je vous suis profondément reconnaissant(e) pour
votre présence et votre soutien constants.

Berrekbia Med Tahar

Dédicace

Je souhaite dédier les résultats de mes efforts à deux êtres chers qui ont illuminé

ma vie

mon cher père et ma mère, une source de tendresse, d'amour et de sacrifices, qui

se sont dévoués chaque jour pour le bonheur de leurs enfants.

Je voudrais également dédier ce travail à mes frères et sœurs bien-aimés, ainsi qu'à

tous ceux qui m'ont encouragé,

offrant ainsi cette réussite humble en guise de gratitude.

Medaci Oussama

Remerciement

Que toute la louange soit à Allah pour Ses innombrables bienfaits et pour nous avoir accordé la capacité de réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers notre superviseur, **Madame Soulef Benabdessalam**, pour sa compétence et son encadrement qui ont toujours suscité notre respect. Nous tenons à vous remercier chaleureusement pour votre accueil et vos précieux conseils. Nous souhaitons vous témoigner ici notre gratitude et notre grande estime.

Nous souhaitons également adresser nos remerciements à tous les membres du jury, l'honorable Professeur **Ghiaba Zineb**(président) et Professeur **Choaib Hadjira**(Examineur)qui nous font l'honneur d'accepter de juger ce travail.

Nous voulons exprimer notre chaleureuse gratitude à tous nos proches et à tous ceux qui nous ont soutenus, que ce soit moralement ou financièrement, de près ou de loin. Votre sollicitude et votre soutien ont été d'une importance capitale pour mener à bien ce travail. Nous vous sommes profondément reconnaissants pour votre présence et votre soutien constants.

Résumé

Le benzène, le toluène, les composés phénoliques et autres composés aromatiques sont considérés comme des substances toxiques présentes dans les eaux industrielles. Un groupe de chercheurs s'est fortement intéressé à l'élimination de ces composés des solutions aqueuses en utilisant différentes techniques. La première partie de notre travail aborde de manière générale ces composés aromatiques, où nous découvrons leurs caractéristiques ainsi que les dommages qu'ils peuvent causer principalement à l'homme et à l'environnement. Quant à la deuxième partie, nous avons traité des études et des méthodes permettant d'éliminer ces composés et de réduire leur dangerosité dans les solutions aqueuses. Plusieurs techniques ont été développées pour atteindre cet objectif

Mots clé : élimination, benzène, toluène, composé phénolés, eaux industrielles.

Abstract

Benzene, toluene, phenolic compounds, and other aromatic compounds are considered toxic substances found in industrial wastewater. A group of researchers has shown great interest in the process of removing these compounds from aqueous solutions by employing various techniques. The first part of our work provides a general overview of these aromatic compounds, where we learn about their characteristics and the harm they can cause to humans and the environment primarily. In the second part, we discuss the studies and methods that can be used to extract these compounds and mitigate their hazards in aqueous solutions. Several techniques have been developed to achieve this

Keywords : elimination, benzene, toluene, phenolic compounds, industrial water.

ملخص

البنزين والطورلين والمركبات الفينولية وغيرها من المركبات العطرية تُعتبر مواد سامة وتتواجد في المياه الصناعية. تهتم مجموعة من الباحثين في هذا المجال بشكل كبير بعملية إزالة هذه المركبات من المحاليل المائية، وقد قاموا باستخدام تقنيات مختلفة لتحقيق ذلك. الجزء الأول من عملنا يتناول بشكل عام هذه المركبات العطرية، حيث نتعرف على خصائصها والضرر الذي قد يلحق بالإنسان والبيئة بشكل أساسي. أما الجزء الثاني، فقد تناولنا فيه الدراسات والطرق التي يمكن استخدامها لإزالة هذه المركبات والحد من خطورتها في المحاليل المائية. تم تطوير العديد من التقنيات لتحقيق ذلك

الكلمات المفتاحية : إزالة , البنزين , الطورلين , المركبات الفينولية , المياه الصناعية.

Liste des figures

Nombre	Titre	Page
Fig (I .1)	La molécule de benzene	2
Fig (I .2)	La molécule de toluene	5
Fig (II .1)	Le phenomene d'adsorption	14
Fig (II .2)	Structure cristalline: (a) graphite ; (b) charbon actif	17
Fig (II .3)	Représentation schématique des différents types de pores	18
Fig (II .4)	Représentation schématique de la surface interne et externe d'un adsorbant	19
Fig (II .5)	Diagramme schématique de processus de la production du charbon actif	20
Fig (II .6)	Charbon actif en poudre	20
Fig (II .7)	Charbon actif granulaire	21
Fig (II .8)	Schéma de l'adsorption physique de polluants par un charbon actif	22
Fig (II .9)	Procédé d'extraction liquide-liquide	29
Fig (II .10)	Schéma de séparation membranaire	37

Liste des tableaux

Nombre	Titre	Page
Tableau(I .1)	Propriétés physico-chimiques du benzène	3
Tableau(I .2)	Propriétés physico-chimiques du toluène	6
Tableau(I .3)	Certains composés phénoliques	8
Tableau (II .1)	Comparaison entre adsorption physique et chimique	16
Tableau (II .2)	Classification de la taille des différents pores selon l'IUPAC	18
Tableau (II .3)	donne une vue schématique des différentes applications de l'extraction liquide- liquide dans les industries	30
Tableau (II .4)	Rendement d'extraction des phénols par les alcools, les amines et les acides organiques	32
Tableau (II .5)	Désorption des phenols	36

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	
CHAPITRE I généralités sur le benzene, toluène et les composés phénoliques.....	1
I. 1 Introduction.....	2
I. 2 Généralités sur le benzène.....	2
I. 2. 1 Définition dubenzène	2
I. 2. 2 Propriétés physico-chimiques dubenzène	3
I. 2. 3 Utilisation du benzène.....	4
I. 2. 4 Productiondubenzène	4
I. 3 Généralités sur le toluène	5
I. 3. 1 Définition du toluène	5
I. 3. 2 Propriétés physico-chimiques du toluène	5
I. 3. 3 Utilisation du toluène	6
I. 3. 4 Production du toluène	7
I. 4 Généralité sur le composé phénoliques.....	7
I. 4. 1 Définition des composés phénoliques.....	7
I. 4. 2 Propriétés physico-chimiques du composés phénoliques	8
I. 4. 3 Utilisation des composés phénoliques	8
I. 4. 4 Production des composés phénoliques.....	9
I. 5 Risques et préventions d'utilisation des composé aromatiques	10
I. 5. 1 Toxicité et maladies professionnelles	10
I. 5. 2 Risques d'incendie, d'explosion et de réactivité.....	10
I. 5. 3 Risque pour l'environnemen.....	11

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés	12
II. 1 Introduction	13
II. 2 Importance de l'élimination du benzène de l'eau	13
II. 3 Méthodes d'élimination du benzène	14
II. 3. 1 adsorption sur charbon actif	14
II. 3. 1. 1 adsorption	14
a Définition.....	14
b Les types d'adsorption	15
c Description du mécanisme d'adsorption du benzène.....	16
d Utilisations de l'adsorption	17
e Facteurs affectant le phénomène d'adsorption.....	17
II. 3. 1. 2 charbon actif	17
a Définition.....	17
b Propretés physiques et chimiques du charbon actif.....	18
c Préparation du charbon actif.....	19
d Types de charbon actif	20
e Différentes applications du charbon actif.....	21
II. 3. 2 Processus d'adsorption du benzène sur charbon actif.....	22
II. 3. 3 Facteurs influençant l'efficacité de l'adsorption du benzène	23
II. 3. 4 Application d'adsorption de benzène à partir de solutions aqueuses sur charbon actif.....	23
II. 4 L'importance d'éliminer le toluène	25

II. 4. 1 Procédés d'oxydation avancés	26
II. 4. 2 Comment fonctionnent les processus d'oxydation avancés	26
II. 4. 3 Utilisations de procédés d'oxydation avancés	27
II. 4. 4 Application de la processus d'oxydation avancée pour éliminer le Toluène	27
II. 5 Importance de l'élimination des composés phénoliques de l'eau.....	29
II. 5. 1 Méthodes d'élimination des composés phénolique.....	29
II. 5. 1. 1 Extraction liquide-liquide	29
a Définition.....	29
b Le principe de l'extraction liquide-liquid	29
c Classification des différents systèmes d'extraction.....	31
d Propriétés de l'Extractant	32
e Mécanismes d'extraction liquide-liquide	32
f Application de l'extraction dans l'élimination des phénols	33
II. 6 Les techniques non destructives	34
II. 6. 1 La coagulation-floculation.....	34
II. 6. 2 Adsorption	35
a Principe de l'adsorption.....	35
b Les modèles cinétiques d'adsorption	35
c Application de l'adsorption pour l'élimination des phénols	36
II. 6. 3 procédés de séparation.....	37
a définition.....	37
b principe de la séparation membranaire.....	37
c Application de la pervaporation pour éliminer le phénol	38

II. 7 Les méthodes destructives	39
II. 7. 1 Le traitement biologique.....	39
a Principe.....	39
b Application du traitement biologique pour éliminer les phénols	40
II. 7. 2 L'oxydation	42
II. 7. 2. 1 L'oxydation chimique	42
II. 7. 2. 2 L'oxydation électro chimique	42
a Application de l'oxydation pour l'élimination des phénols	43
II. 8 Comparaison entre les différentes techniques	43
II. 8. 1 Comparaison entre l'adsorption et l'extraction liquide-liquide.....	43
II. 8. 2 Comparaison de la pervaporation avec la séparation par membranes solides.....	44
II. 8. 3 Comparaison de la pervaporation avec l'extraction liquide-liquide.....	44
II. 8. 4 Comparaison entre le traitement biologique et l'oxydation	45
conclusion.....	47
Références bibliographiques	48

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'élimination du benzène, du toluène et des composés phénoliques à partir des eaux usées industrielles est un sujet d'importance croissante dans le domaine de l'environnement et de la gestion des ressources hydriques. Ces composés organiques sont largement utilisés dans diverses industries, notamment l'industrie pétrochimique, la chimie fine, l'industrie pharmaceutique, et ils sont souvent présents dans les eaux usées générées par ces secteurs.

Le benzène, le toluène et les composés phénoliques sont des polluants toxiques et persistants, qui peuvent avoir des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine, même à de faibles concentrations. Par conséquent, leur élimination efficace des eaux usées industrielles est essentielle pour prévenir la pollution de l'eau et assurer sa qualité.

Dans cette synthèse bibliographique, nous examinerons les différentes méthodes et technologies utilisées pour éliminer le benzène, le toluène et les composés phénoliques des eaux usées industrielles. Nous aborderons les techniques de traitement conventionnelles telles que l'oxydation chimique, l'adsorption sur charbon actif, la biodégradation, ainsi que les approches plus récentes telles que les procédés d'oxydation avancée

Cette synthèse bibliographique vise à fournir un aperçu complet des méthodes disponibles pour l'élimination de ces polluants et à faciliter la prise de décision pour le choix de la technologie de traitement la plus appropriée en fonction des caractéristiques spécifiques des eaux usées industrielles et des contraintes environnementales.

Chapitre I

*Généralités sur le benzène , toluène et les
composés phénoliques*

I. 1 Introduction

Les composés aromatiques sont des composés organiques caractérisés par leur odeur agréable et distinctive, la plupart d'entre eux ayant des cycles aromatiques tels que le cycle du benzène. Ces composés comprennent par exemple les phénols, les aldéhydes, les cétones, les esters, les terpènes, les benzènes, etc.

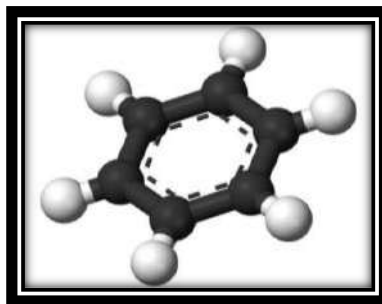
Les composés aromatiques sont présents naturellement dans de nombreuses matières végétales et animales, et peuvent être extraits de différentes manières telles que la distillation et l'extraction par solvant. Certains d'entre eux peuvent également être fabriqués de manière synthétique, et ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles que la fabrication de parfums, de détergents, de produits alimentaires, de médicaments et de pesticides.

Les composés aromatiques sont d'une grande importance dans l'industrie alimentaire et des boissons, où ils sont utilisés comme agents de goût et d'odeur dans de nombreux produits alimentaires et boissons tels que les desserts et les différentes variétés de thé et de café.

I. 2 Généralités sur le benzène

I. 2. 1 Définition du benzène

Le benzène est un composé organique simple constitué de six atomes de carbone et six atomes d'hydrogène disposés en cercle, avec la formule chimique C_6H_6 [1]. Un liquide incolore, avec une odeur caractéristique, volatil, inflammable et cancérigène. Il appartient à la famille des hydrocarbures aromatiques dérivés du pétrole.



Fig(1.1): La molécule de benzène [1]

CHAPITRE I Généralités sur le benzène , toluène et les composés phénoliques

I. 2. 2 Propriétés physico-chimiques du benzène

Le benzène est un liquide incolore, dont l'indice de réfraction est 1,50 (proche de celui du verre). Sa viscosité est plus faible que celle de l'eau. Il est très soluble dans les solvants organiques polaires, mais sa solubilité dans l'eau est assez faible. Il possède une odeur sucrée caractéristique, avec un seuil de détection de 1,5 à 900 mg·m⁻³ d'air. Le benzène possède des propriétés chimiques uniques qui permettent de nombreuses utilisations, telles que son utilisation comme solvant puissant pour de nombreuses substances organiques, comme agent de transition dans la fabrication de colorants, de caoutchouc, de plastiques et de médicaments. Le benzène est également utilisé dans la fabrication d'autres produits chimiques tels que le nylon, le polyester et le polyuréthane [2].

Il est connu que le benzène est une substance toxique et cancérigène pour l'homme, il est donc important de prendre des précautions lors de sa manipulation. Son utilisation et sa circulation sont strictement contrôlées par les autorités responsables de la sécurité sanitaire et environnementale. Le tableau (I.1) présente quelques propriétés du benzène.

Tableau (I.1). Propriétés physico-chimiques du benzène [2]

T° fusion	5.5°C
T° ébullition	80.01 °C
Solubilité	Dans l'eau à 25°C : 1.79g.L ⁻¹
Masse volumique	0.8787 g.cm ⁻¹ à 45°C
Masse molaire	78.11g/mol
T° d'auto inflammation	498 °C
Point d'éclair	-11°C
Viscosité dynamique	0.65 mPa .s a 20°C
Tension superficielle	28.88 × 10 ⁻³ N.m ⁻¹ à25°C
Point critique	288.9°C / 48.6 atm

CHAPITRE I Généralités sur le benzène , toluène et les composés phénoliques

I. 2. 3 Utilisation du benzène

Le benzène (C_6H_6) a de nombreuses utilisations dans l'industrie, principalement en tant que solvant pour diverses matières premières et produits finis. Voici quelques-unes des utilisations les plus courantes du benzène [3].

- Utilisé comme solvant, dans les colles, vernis, peintures, encres,
- Utilisé pour le nettoyage à sec.
- Utilisé pour le dégraissage des métaux.
- Utilisé pour la décaféination du café,
- Utilisé pour le nettoyage des circuits électroniques ou l'extraction en parfumerie,
- Intermédiaire dans la synthèse de composés chimiques organiques, les laboratoires de chimie en synthèse (recherche), l'industrie électronique, l'industrie chimique comme intermédiaire de synthèse (ex : synthèse du phénol, du styrène, de l'aniline, du nitrobenzène, du cyclohexane), les stations de vente de carburants, les utilisateurs et réparateurs de petits matériels à moteur thermique (ex : débroussailleuse, souffleur de feuilles...), l'industrie pétrochimique (les raffineries ont des installations automatisées mais peuvent induire des interventions manuelles sur réacteurs, tuyauteries, vannes...), Production de médicaments.

I. 2. 4 Production du benzène

Le benzène est généralement produit à partir de la combustion incomplète de matériaux riches en carbone. Il est produit naturellement à partir des volcans et des incendies de forêt. La demande croissante de benzène, a entraîné la nécessité de produire du benzène principalement par le craquage des hydrocarbures aromatiques dans le pétrole brut. Ce procédé consiste à chauffer le pétrole brut à haute température pour briser les molécules de plus grande taille en molécules plus petites, y compris le benzène. Le benzène peut également être produit à partir de la distillation du charbon et des huiles végétales. En outre, il peut être obtenu par craquage des cétones dérivées du charbon, du pétrole brut ou du gaz naturel [4].

I. 3 Généralités sur le toluène

I. 3. 1 Définition du toluène

Le toluène est un composé organique aromatique de formule chimique C_7H_8 . Il est également connu sous le nom de méthylbenzène car il est dérivé du benzène en remplaçant un atome d'hydrogène par un groupe méthyle ($-CH_3$). Le toluène est un liquide incolore, inflammable et volatil avec une odeur caractéristique de solvant.

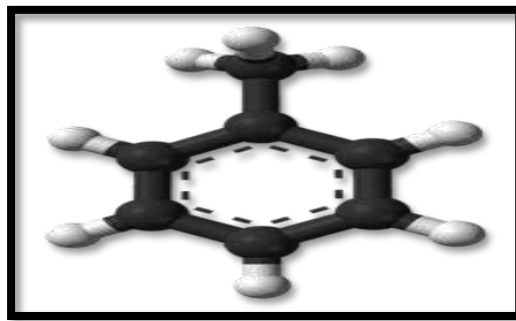


Fig (I.2): La molécule de toluène [1].

I. 3. 2 Propriétés physico-chimiques du toluène

Le toluène est un liquide transparent, incolore et qui dégage une odeur sucrée et piquante. Il s'agit d'un composé aromatique monocyclique dont un hydrogène du cycle benzénique a été remplacé par un groupe méthyle (formule moléculaire $C_6H_5CH_3$). Le toluène est un liquide volatil qui est inflammable, explosif et qui présente une tension de vapeur relativement élevée (3,7 kPa à 25 °C). Le toluène est modérément soluble dans l'eau (535 mg/L à 25 °C) et il est miscible avec la plupart des solvants organiques[5].

Tableau (I.2). Propriétés physico-chimiques du toluène [6].

Formule brute	C ₇ H ₈
Masse molaire	92.1384 g/mol
Moment dipolaire	0.375 D
Diamètre moléculaire	0.568 nm
T° fusion	-95 °C
T° ébullition	110.58 °C
Solubilité	0.53 g/L dans l'eau
Masse volumique	0.867 g/cm ³
T° inflammation	480 °C
Point d'éclair	4
Viscosité dynamique	0.59×10^{-3} Pa. S à 20°C
Viscosité cinématique	0.681×10^{-6} m ² /s

I. 3. 3 Utilisation du toluène

Le toluène est utilisé dans les formulations de pesticides, les mastics, dans les agents de nettoyage et pour les extractions chimiques, Intermédiaire de synthèse pour la fabrication de nombreux produits : benzène et xylènes, phénol, nitrotoluène, diisocyanate de toluène (TDI), chlorure de benzyle, caprolactame, benzaldéhyde, acide p-toluènesulfonique, vinyltoluène, Solvant pour peintures, vernis, encres d'imprimerie, caoutchouc, colles, cires, graisses, résines, Solvant d'ex traction dans l'industrie cosmétique, l'industrie pharmaceutique. Par ailleurs, le toluène est utilisé en mélange avec le benzène et les xylènes, comme additif de carburants pour en améliorer l'indice d'octane des essences sans plomb [7].

CHAPITRE I Généralités sur le benzène , toluène et les composés phénoliques

I. 3. 4 Production du toluène

Le toluène est principalement obtenu à partir du pétrole brut et du gaz naturel, par le processus de reformage catalytique. Cependant, il peut également être produit par d'autres processus de raffinage du pétrole, tels que la distillation et le craquage. En plus de sa production à partir des ressources fossiles, le toluène peut également être synthétisé chimiquement à partir de diverses matières premières telles que le méthanol, le benzène et le butadiène. Par ailleurs, le toluène peut également être présent dans l'environnement en raison de sources naturelles telles que les feux de forêt et les éruptions volcaniques. Cependant, dans ces cas, sa concentration est généralement très faible par rapport à ses sources industrielles et commerciales [5].

Le craquage désigne, en pétrochimie, la thermolyse du pétrole et de ses dérivés liquides. L'opération consiste à casser une molécule organique complexe en éléments plus petits, notamment des alcanes, des alcènes, des aldéhydes et des cétones. Les conditions de température et de pression, ainsi que la nature du catalyseur sont des éléments déterminants du craquage.

I. 4 Généralité sur le composé phénoliques

I. 4. 1 Définition des composés phénoliques

Les composés phénoliques sont des dérivés hydroxyle aromatiques non azotés. Il est constitué d'un ou plusieurs groupes hydroxyle (-OH), liés directement à un groupe hydrocarbure aromatique. Ils sont largement répandus dans la nature et peuvent être synthétisés à partir de différentes sources, notamment des plantes, des micro-organismes et des produits pétrochimiques. Les composés phénoliques ont une variété de propriétés chimiques et biologiques, ce qui les rend utiles dans de nombreux domaines, tels que la médecine, la chimie des matériaux, la cosmétique, l'industrie alimentaire et l'agriculture.

CHAPITRE I Généralités sur le benzène, toluène et les composés phénoliques

I. 4. 2 Propriétés physico-chimiques des composés phénoliques

Solubles dans l'eau, l'éthanol, l'acétone, l'éther, le chloroforme, le benzène et d'autres solvants organiques. Haute solubilité dans l'eau, point de fusion et de déversement bas, conductivité thermique et électrique élevée, Acides faibles, Ils s'ionisent bien avec les bases pour former les sel, Il interagissent bien avec les métaux, les cathodes et les anodes ferreuses. Ils réagissent fortement avec l'oxygène et une grande quantité de radicaux libres se forme lors de ces réactions [5].

Tableau (I.3). Certains composés phénoliques

Formule Chimique	Nom	T° ébullition(°C)	Point d'éclair°C	T° fusion°C	Masse molaire (g/mol)	Masse volumique.g.cm ⁻³
C ₆ H ₆ O	Phénol	182	79	43	94,11	1,073
C ₆ H ₆ O ₂	Pyrocatechol	245.5	127	105	110,11	1,3
C ₇ H ₈ O	Créosol	191	81	31	108.14	1.05
C ₆ H ₅ ClO	2-chlorophénol	174	85	9.8	128.55	1,257 3
C ₆ H ₆ O ₂	Résorcine	280	127	110	110.11	1.28

I. 4. 3 Utilisation des composés phénoliques

Les composés phénoliques ont de nombreuses utilisations en raison de leurs propriétés antioxydantes, antimicrobiennes et anti-inflammatoires. Les composés phénoliques sont utilisés dans la fabrication de divers produits industriels tels que les résines, les adhésifs, les plastiques, les caoutchoucs et les produits chimiques, Élimine les polluants de l'eau et de l'air en raison de sa capacité à décomposer les polluants organiques, Améliorer la croissance des plantes et contrôler les maladies et les ravageurs, Ils peuvent être utilisés pour traiter des affections telles que les maladies cardiaques, le diabète, les maladies inflammatoires de l'intestin et certains types de cancer, utilisés comme conservateurs naturels dans les aliments pour prévenir la croissance bactérienne et prolonger la durée de conservation des aliments [8].

I. 4. 4 Production des composés phénoliques

Dans la nature, les phénols sont des alcools aromatiques produits par les végétaux. Les phénols simples, déchets du métabolisme végétal, sont assemblés en polymères ou pseudo-polymères comme la lignine. Les sources courantes de composés phénoliques comprennent également les produits alimentaires transformés tels que les boissons alcoolisées, les produits de boulangerie, les céréales, les huiles et les graisses, les viandes, les produits laitiers et les aliments pour animaux. En outre, les composés phénoliques peuvent être produits synthétiquement à partir de diverses matières premières, notamment le benzène et le phénol[5].

Les composés phénoliques sont produits à grande échelle dans le monde entier, où ils sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles, telles que la production de plastiques, de médicaments et d'autres produits chimiques. Certains d'entre eux sont également utilisés dans la fabrication de colorants, de produits pharmaceutiques et de produits chimiques agricoles. Il peut être produit de plusieurs manières, dont la plus importante est:

- Production à partir de matières premières fossiles : le phénol peut être produit à partir de cumène, qui est un dérivé du pétrole brut, par un procédé appelé « voie cumène-phénol ».
- Production à partir de matières premières renouvelables : les composés phénoliques peuvent également être produits à partir de sources renouvelables telles que la lignocellulose, la biomasse et les résidus agricoles. Ces sources sont converties en produits chimiques par des processus de conversion tels que la pyrolyse, l'hydrolyse acide ou enzymatique, la gazéification et la fermentation.
- Production par synthèse chimique : les composés phénoliques peuvent également être synthétisés chimiquement à partir de réactifs de base tels que le benzène et l'oxyde de propylène.

I. 5 Risques et préventions d'utilisation des composé aromatiques

Les composés aromatiques présentent des propriétés toxiques communes à de nombreux autres solvants, en particulier pour les effets provoqués par de fortes concentrations

I. 5. 1 Toxicité et maladies professionnelles

L'exposition des travailleurs aux hydrocarbures aromatiques dans le cadre de leur activité professionnelle engendre de nombreux risques. L'exposition à de fortes doses agit sur le système nerveux central ce qui entraîne notamment des états de somnolence, des sensations d'ébriété et des maux de tête. Des expositions plus faibles mais prolongées peuvent altérer la mémoire et certaines capacités psychiques. Ils ont aussi une toxicité prouvée sur l'oreille interne pouvant entraîner une diminution de l'audition. Leur contact prolongé avec la peau ou les muqueuses aura une action dégraissante et desséchante se traduisant par des irritations ou des dermatoses. Dans certains cas, il peut être mortel s'il est avalé et pénètre dans les voies respiratoires, Les composés phénoliques, quant à eux, peuvent causer des irritations cutanées et oculaires, ainsi que des troubles respiratoires et des cancers.

Le benzène est le plus toxique de tous ces solvants, il se distingue par sa grande toxicité pour les cellules sanguines et les organes qui les produisent (moelle osseuse). Ceci se manifeste par une réduction des globules rouges, des globules blancs et des plaquettes. Les affections en résultant vont de la simple anémie à la survenue de cancers de sang liés à l'exposition répétée à des concentrations de quelques ppm pendant plusieurs années

I. 5. 2 Risques d'incendie, d'explosion et de réactivité

Ces composés sont inflammables, c'est l'un des risques technologiques importants lié à leur utilisation. a température ambiante, en présence d'une flamme nue, d'une étincelle ou d'une source de chaleur importante, ils s'enflammeront instantanément. Les vapeurs d'hydrocarbures aromatiques peuvent former avec l'air des mélanges explosifs.

Dans des conditions normales d'utilisation, les aromatiques sont des produits stables. Cependant, il faut être prudent lors de sa manipulation. Ils ne corrodent pas les métaux usuels mais attaquent certains caoutchoucs et matières plastiques telle que le polyéthylène, En outre, certains composés aromatiques peuvent réagir de manière violente avec d'autres produits chimiques, tels que les oxydants, les acides forts, les bases fortes, les halogènes et les métaux

CHAPITRE I Généralités sur le benzène , toluène et les composés phénoliques

alcalins. Ces réactions peuvent entraîner des incendies, des explosions et la libération de gaz toxiques ou corrosifs.

I. 5. 3 Risque pour l'environnement

La présence de hauts niveaux de composés aromatiques dans l'eau est un vrai problème dans les pays industrialisés. L'environnement est considéré pollué lorsqu'il renferme des substances dont les teneurs sont telles qu'elles présentent des risques pour la santé humaine ou un danger pour les humains et les écosystèmes.

Les hydrocarbures aromatiques, comme tous les solvants pétroliers, sont tous des composés organiques volatils (COV), leur vaporisation dans l'atmosphère contribue à la production d'ozone dans la troposphère augmentant ainsi les risques pour les personnes asthmatiques ou souffrant d'insuffisance respiratoire. Les composés aromatiques peuvent contaminer les eaux de surface et souterraines par le biais de fuites de réservoirs de stockage, de déversements accidentels ou de déchets industriels mal gérés. Certains composés, comme les phénols, peuvent être toxiques pour les organismes aquatiques à des concentrations élevées.

En cas de rejet des hydrocarbures aromatiques dans un milieu aquatique, une faible partie se dissoudra dans l'eau et le reste surnagera à la surface. Leur biodégradabilité est faible et les hydrocarbures aromatiques sont toxiques pour les organismes aquatiques. Il est donc important de gérer correctement les composés aromatiques pour minimiser leur impact sur l'environnement et la santé humaine. Cela peut inclure une gestion appropriée des déchets industriels, une surveillance de la qualité de l'air et de l'eau, et des mesures de prévention des déversements et des accidents.

Chapitre II

Techniques d'élimination du benzène,

Toluène et composés phénolés

II. 1 Introduction

L'élimination du benzène, du toluène et des composés phénoliques des eaux usées industrielles est un problème environnemental important, en raison de leurs propriétés toxiques et de leur présence dans les eaux usées qui peuvent avoir des effets négatifs sur les écosystèmes et les humains.

Les composés de benzène, de toluène et de phénol sont classés comme polluants organiques lourds et volatils, qui se forment généralement à la suite de processus de fabrication et de production dans diverses industries telles que les industries pétrolière, chimique et pharmaceutique. Lorsqu'il est rejeté dans les eaux usées industrielles, il peut contaminer les eaux de surface et souterraines et entraîner la contamination des sources d'eau.

Ces polluants posent un défi environnemental et sanitaire, car le benzène et le toluène sont toxiques pour l'homme et sont considérés comme des cancérigènes potentiels. De plus, le benzène, le toluène et les composés phénoliques sont naturellement non biodégradables, ce qui signifie qu'ils continuent à se former et à s'accumuler dans l'environnement.

L'élimination du benzène, du toluène et des composés phénoliques des eaux usées industrielles est d'une grande importance dans la recherche et le développement pour développer des technologies et des procédés efficaces et économiques pour éliminer ces polluants. Ces technologies impliquent de nombreux processus chimiques et physiques

II. 2 Importance de l'élimination du benzène de l'eau

L'élimination du benzène revêt une grande importance pour la protection de l'environnement et de la santé publique. Le benzène est un composé organique toxique et cancérigène qui peut contaminer l'eau et l'air. L'inhalation ou l'exposition à ce composé peut entraîner de graves problèmes de santé tels que le cancer, les maladies du sang, les troubles neurologiques et affecter différents organes du corps, tels que le système respiratoire et le foie. De plus, si le benzène se déverse dans les eaux souterraines, les eaux de surface ou est pulvérisé dans l'air, il peut contaminer les sources d'eau, les sols, les plantes et les animaux. Cela entraîne des effets néfastes sur les écosystèmes environnants et une pollution des ressources en eau. Il est donc essentiel de travailler activement à l'élimination du benzène de l'environnement et à la préservation de la pureté de l'eau et de l'air. Les méthodes d'élimination du benzène comprennent l'utilisation de techniques telles que la dégradation biologique, l'adsorption chimique et des procédés de purification efficaces tels que l'utilisation de charbon actif, la technologie de l'évaporation et la distillation. Les installations et industries qui

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

manipulent le benzène doivent se conformer aux normes environnementales spécifiées et prendre des mesures pour éliminer le benzène de manière efficace et sans danger pour l'environnement et la santé publique.

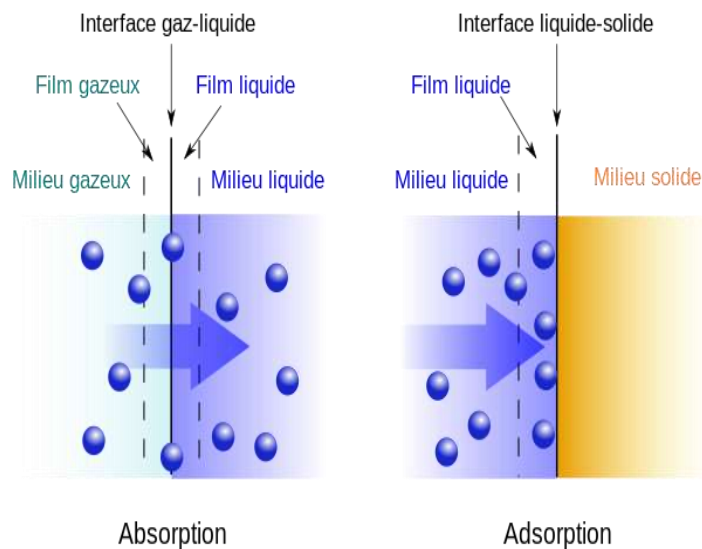
II. 3 Méthodes d'élimination du benzène

II. 3. 1 adsorption sur charbon actif

II. 3. 1. 1 adsorption

a Définition

L'adsorption est un processus chimique ou physique par lequel des molécules, des atomes ou des ions provenant d'une phase gazeuse ou liquide se fixent à la surface d'un solide ou d'un liquide, formant une couche adhérente. Cela se produit grâce à des forces d'attraction intermoléculaires, créant une concentration plus élevée de la substance adsorbée à la surface de l'adsorbant par rapport à sa phase d'origine. L'adsorption se produit généralement à la surface d'un matériau appelé adsorbant, tel que le charbon actif [9]



Fig(II .1.1): Le phenomene d'adsorption

b Les types d'adsorption

- **Adsorption physique**

L'adsorption physique, également connue sous le nom de physisorption, est un type d'adsorption dans lequel les molécules adsorbées sont liées à la surface d'un matériau adsorbant par des forces de van der Waals. Ces forces d'attraction intermoléculaires sont relativement faibles et se produisent entre les molécules adsorbées et les atomes de surface de l'adsorbant. Ce type d'adsorption s'accompagne de la formation de plusieurs couches moléculaires à la surface de l'adsorbant [10,11].

L'adsorption physique se distingue de l'adsorption chimique, dans laquelle une réaction chimique se produit entre les espèces adsorbées et l'adsorbant, entraînant la formation de liaisons chimiques plus fortes.

- **Adsorption chimique**

L'adsorption chimique est un type d'adsorption dans lequel les molécules adsorbées réagissent chimiquement avec la surface de l'adsorbant. Contrairement à l'adsorption physique (ou physisorption), l'adsorption chimique implique la formation de liaisons chimiques entre les molécules adsorbées et les atomes de surface de l'adsorbant [10,11]

L'adsorption chimique peut impliquer sur de nombreuses interactions, tels que des réactions d'oxydation, de réduction, d'acidité ou de complexation. Ces réactions chimiques conduisent à des changements significatifs dans la structure de la surface de l'adsorbant ainsi que dans les propriétés des molécules adsorbées.

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

Tableau (II .1). Comparaison entre adsorption physique et chimique [12]

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Température du processus	Relativement basse	Plus élevé
Chaleur d'adsorption	environ 5 Kcal/mol	environ 10 Kcal/mol
Liaison	Physique Van der Waals	Chimique
Cinétique	Rapide, réversible	Lente, irréversible
Spécificité	Processus non spécifique	Processus très spécifique
Désorption	Facile	Difficile
Couches formées	Mono ou multicouches	Uniquement monocouche

c Description du mécanisme d'adsorption du benzène

Le benzène, un composé organique aromatique, peut être adsorbé sur différents matériaux adsorbants tels que le charbon actif. Le mécanisme d'adsorption du benzène peut être décrit en deux étapes distinctes. Premièrement, le benzène peut subir une adsorption physique sur la surface de l'adsorbant. Cette adsorption repose principalement sur des forces de van der Waals, des interactions faibles mais non spécifiques. Les molécules de benzène sont attirées par les atomes de surface de l'adsorbant grâce à ces forces de van der Waals. L'adsorption physique du benzène est réversible, ce qui signifie que les molécules peuvent être libérées de la surface de l'adsorbant en modifiant les conditions expérimentales, comme en réduisant la pression ou en augmentant la température. Deuxièmement, le benzène peut subir une adsorption chimique sur la surface de l'adsorbant. Dans ce cas, des réactions chimiques se produisent entre le benzène et les atomes de surface de l'adsorbant, formant des liaisons chimiques plus fortes. Ces réactions d'adsorption chimique du benzène peuvent impliquer la formation de liaisons covalentes ou d'autres types de liaisons chimiques spécifiques. Contrairement à l'adsorption physique, l'adsorption chimique du benzène est généralement moins réversible et nécessite souvent des conditions spécifiques, telles que des températures élevées ou la présence de catalyseurs, pour favoriser la désorption.

d Utilisations de l'adsorption

L'adsorption est un processus largement utilisé dans de nombreuses applications. Parmi ces utilisations, on peut citer la purification de l'eau, pour éliminer les contaminants présents dans l'eau potable tels que les substances organiques, les produits chimiques, les métaux lourds et les composés indésirables. Des matériaux adsorbants tels que le charbon actif, les résines échangeuses d'ions et les membranes d'adsorption sont largement utilisés pour purifier l'eau à des fins domestiques, industrielles et environnementales [11].

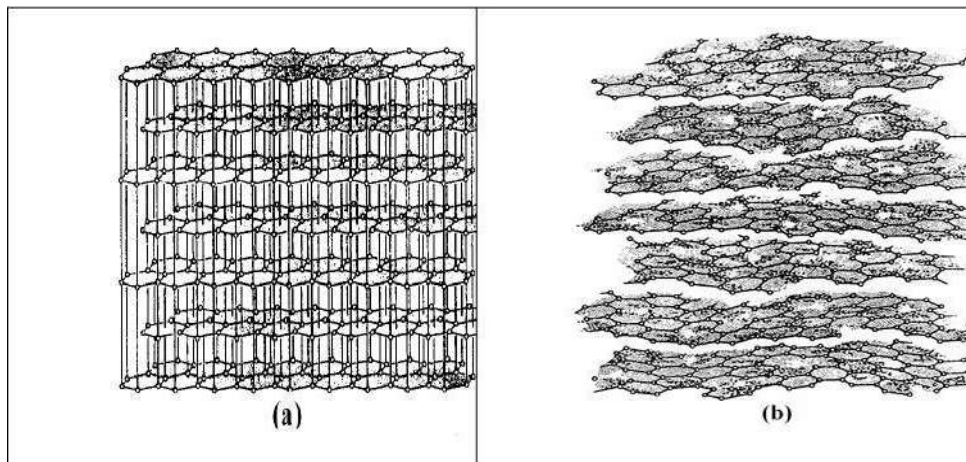
e Facteurs affectant le phénomène d'adsorption

les facteurs qui influencent le phénomène d'adsorption comprennent la température, le pH, la nature de l'adsorbant, la nature de l'adsorbat et le temps d'adsorption. Comprendre ces facteurs est essentiel pour optimiser les processus d'adsorption dans divers domaines, tels que la purification de l'eau, la séparation des gaz ou l'adsorption de substances dans l'industrie chimique [13;14].

II. 3. 1. 2 Charbon actif

a Définition

Le charbon actif est un matériau poreux dérivé du charbon, généralement de la houille, de la tourbe, de la coque de noix de coco ou d'autres matières organiques carbonées.

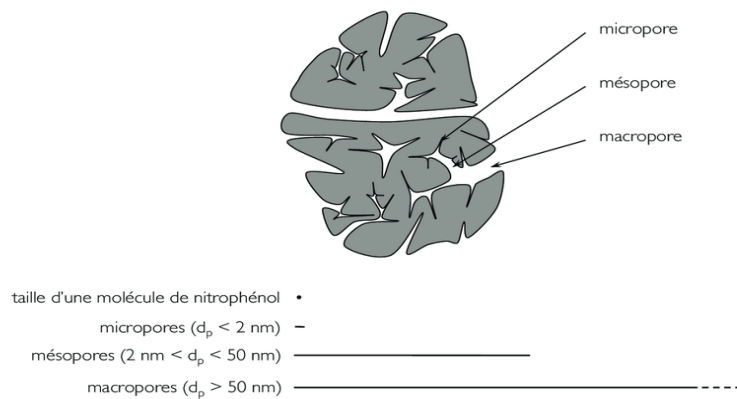


Fig(II .2):Structure cristalline: (a) graphite ; (b) charbon actif

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

Tableau (II .2).Classification de la taille des différents pores selon l'IUPAC

Pores	Diamètre (nm)	Volume poreux (cm ³ /g)
Macropores	Supérieur à 50	0,2 - 0,8
Mésopores	Comprise entre 2-50	0,02 - 0,1
Micropores	Inférieur à 2	0,2 - 0,6



Fig(II .3): Représentation schématique des différents types de pores

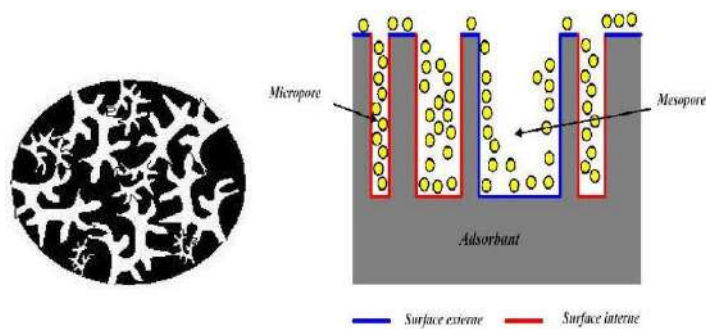
b Propriétés physiques et chimiques du charbon actif

Le charbon actif possède plusieurs propriétés physiques et chimiques qui en font un matériau efficace dans de nombreux processus d'adsorption et de purification.

Sur le plan physique, le charbon actif se caractérise par une grande surface spécifique. Sa structure poreuse développée lui confère une surface étendue, ce qui favorise une adsorption accrue des contaminants. De plus, il présente une porosité variée, comprenant des pores microscopiques et des macropores. Cette porosité permet une plus grande capacité d'adsorption et permet aux contaminants de pénétrer et d'être piégés dans les pores. Le charbon actif est disponible sous différentes formes, telles que des granules, des poudres ou des blocs, avec des tailles de particules variables selon l'application spécifique. Enfin, il a généralement une faible densité, ce qui facilite son utilisation dans les systèmes de filtration et de purification.

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

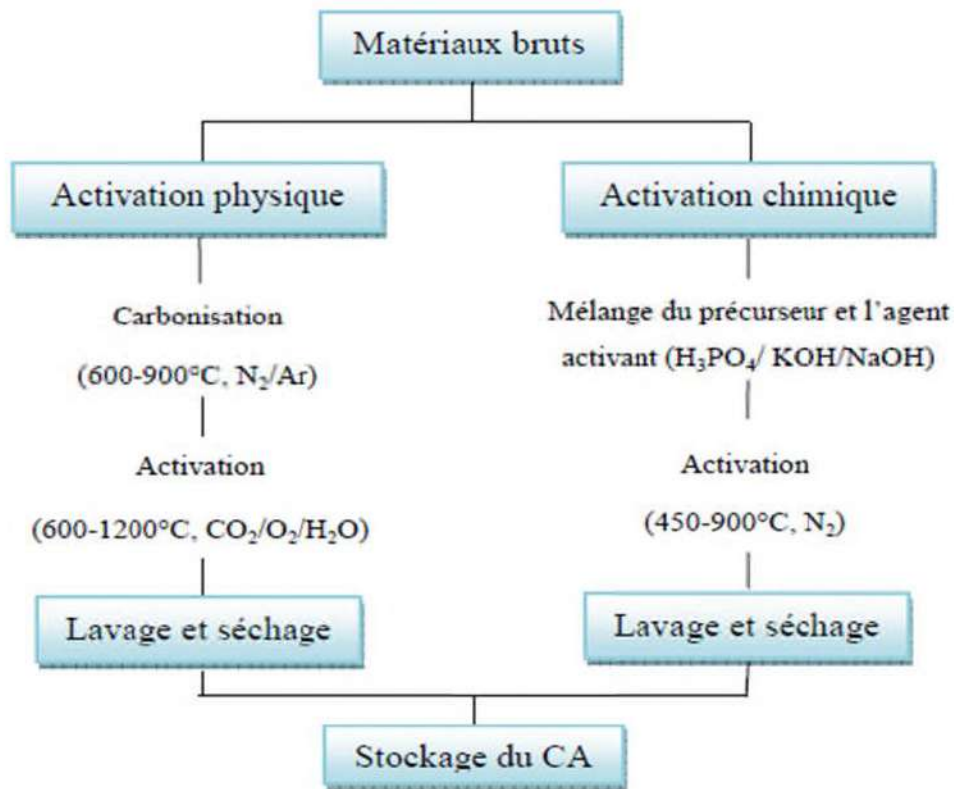
Du point de vue chimique, le charbon actif se distingue par sa capacité d'adsorption élevée. Il est capable de retenir diverses substances, notamment les contaminants, les produits chimiques organiques, les métaux lourds, les gaz et les odeurs indésirables. De plus, le charbon actif peut être modifié chimiquement pour améliorer sa sélectivité envers certains contaminants spécifiques. Des traitements chimiques peuvent le rendre plus sélectif envers les produits chimiques organiques ou les métaux. Il peut également présenter une certaine réactivité chimique, lui permettant de participer à des réactions d'oxydation ou de réduction avec certains contaminants. Enfin, le charbon actif est généralement stable thermiquement, ce qui signifie qu'il peut résister à des températures élevées sans se dégrader.



Fig(II .4): Représentation schématique de la surface interne et externe d'un adsorbant[15].

c Préparation du charbon actif

La préparation du charbon actif comprend plusieurs étapes pour créer une structure poreuse développée et une surface spécifique élevée. Tout d'abord, la matière première utilisée peut être de la houille, de la tourbe, de la coque de noix de coco, des résidus agricoles ou des déchets de biomasse. Cette sélection dépend des propriétés de la matière première et de l'application finale du charbon actif. La première étape est la carbonisation de la matière première. Cela implique de chauffer la matière première à des températures élevées (500-900 °C) en l'absence d'oxygène, ce qu'on appelle la pyrolyse. Ce processus permet d'éliminer les substances volatiles et de convertir le carbone présent en une structure carbonée. Ensuite, le charbon carbonisé obtenu peut subir une étape d'activation pour augmenter sa surface spécifique. Après l'activation, le charbon actif est lavé pour éliminer les impuretés et les résidus d'activation. Enfin, il est séché pour éliminer toute humidité résiduelle.



Fig(II .5):Diagramme schématisé de processus de la production du charbon actif [16]

d Types de charbon actif

Il existe différents types de charbon actif, qui se distinguent par leur origine, leur méthode de préparation, leur structure et leurs propriétés spécifiques.

- **Charbon actif en poudre**

Il se présente sous forme de poudre fine avec une taille de particules réduite. Le charbon actif en poudre est souvent utilisé dans les applications où une grande surface spécifique est requise, telles que la filtration de l'eau ou des gaz [16].



Fig(II .6):Charbon actif en poudre

- **Charbon actif granulaire**

Il se présente sous forme de granules de taille régulière. Le charbon actif granulaire est couramment utilisé dans les systèmes de filtration d'eau potable, les filtres à air et les colonnes d'adsorption [16].

Fig(II .7):Charbon actif granulaire



e Différentes applications du charbon actif

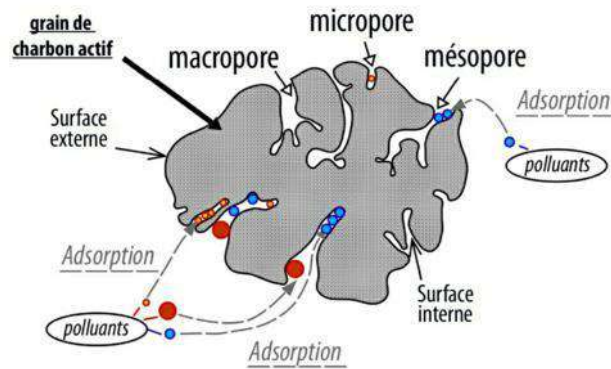
Le charbon actif est un matériau polyvalent qui trouve de nombreuses applications dans différents domaines. Il est largement utilisé pour la purification de l'eau, le traitement des eaux usées, la filtration de l'air, la décoloration et la désodorisation, la purification des gaz, ainsi que dans certaines applications médicales.

le charbon actif est utilisé pour éliminer les contaminants organiques, les produits chimiques, les métaux lourds, les polluants et les odeurs, améliorant ainsi la qualité de l'eau potable, de l'eau de piscine et de l'eau de processus industriel. Il est également largement utilisé dans le traitement des eaux usées pour éliminer les composés organiques, les pesticides, les solvants et autres contaminants présents dans les effluents industriels et municipaux.

Il est également utilisé dans les applications industrielles telles que la purification des gaz de procédé, la capture des gaz d'échappement et l'élimination des COV et des contaminants gazeux.

II. 3. 2 Processus d'adsorption du benzène sur charbon actif

Le processus d'adsorption du benzène sur le charbon actif implique plusieurs étapes. Tout d'abord, le benzène entre en contact avec le charbon actif, qui peut prendre différentes formes (granules, poudre, blocs). Ensuite, le benzène est adsorbé physiquement sur la surface du charbon actif grâce aux forces d'attraction, telles que les forces de Van der Waals. Il pénètre ensuite dans les pores du charbon actif, qu'ils soient microscopiques ou macropores, ce qui augmente la surface d'adsorption disponible. Une fois à l'intérieur des pores, le benzène est retenu grâce à des forces d'attraction plus fortes, telles que les interactions π - π (interactions π - π) et les interactions dipôle-dipôle entre le benzène et les sites de surface du charbon actif. Au fur et à mesure que le benzène est adsorbé, les sites d'adsorption se remplissent progressivement. La quantité de benzène adsorbé dépend de la concentration initiale de benzène et de la capacité d'adsorption du charbon actif. Une fois que le charbon actif est saturé en benzène, il peut être régénéré pour éliminer le benzène adsorbé. Cela peut se faire en chauffant le charbon actif à des températures élevées (régénération thermique) ou en utilisant des solvants appropriés pour extraire le benzène (régénération chimique).



Fig(II .8):Schéma de l'adsorption physique de polluants par un charbon actif [17].

II. 3. 3 Facteurs influençant l'efficacité de l'adsorption du benzène

L'efficacité de l'adsorption du benzène sur le charbon actif peut être influencée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, le temps de contact entre le benzène et le charbon actif est un facteur important. Un temps de contact plus long permet une interaction prolongée entre le benzène et le charbon actif, ce qui peut augmenter l'efficacité de l'adsorption. La concentration initiale de benzène dans la solution ou dans l'air est également un facteur clé. Une concentration plus élevée de benzène peut entraîner une saturation plus rapide des sites d'adsorption du charbon actif, réduisant ainsi l'efficacité globale de l'adsorption. De plus, la présence d'autres substances chimiques dans la solution ou dans l'air peut affecter l'adsorption du benzène. Certains composés peuvent interagir avec le charbon actif et potentiellement concurrencer l'adsorption du benzène, réduisant ainsi son efficacité. Il est donc important de considérer la composition chimique de la solution ou de l'air lors de l'évaluation de l'adsorption du benzène sur le charbon actif.

II. 3. 4 Application d'adsorption de benzène à partir de solutions aqueuses sur charbon actif

Wibowo et al. (2007) L'étude examine l'impact de la chimie de surface et du pH de la solution sur l'adsorption du benzène et du toluène sur différents types de charbon actif, y compris le charbon actif commercial F-400 et ses formes traitées à l'acide et à la chaleur. Le traitement à l'acide nitrique a introduit un nombre significatif de groupes acides oxygénés sur la surface du charbon, tandis que le traitement thermique a augmenté la basicité du matériau. Les caractéristiques des pores du charbon n'ont pas été considérablement modifiées après ces traitements. Les résultats mettent en évidence l'importance des interactions dispersives dans le processus d'adsorption. Le charbon actif présentant un faible nombre de groupes acides oxygénés (F-400Tox) a démontré la meilleure capacité d'adsorption. Ces résultats suggèrent que la chimie de surface du charbon actif joue un rôle essentiel dans l'adsorption du benzène et du toluène, et que la présence de groupes acides oxygénés peut améliorer l'efficacité de l'adsorption. Il est également noté que les interactions dispersives sont un facteur clé dans ce processus [15].

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

Derylo et al. (2011) ont réalisé une étude sur le processus d'adsorption de dérivés sélectionnés de benzène à partir d'une solution aqueuse sur deux matériaux carbonés présentant des propriétés de surface différentes, notamment en termes de quantité de groupes fonctionnels à base d'oxygène. Ils ont constaté que l'équation de Langmuir-Freundlich fournissait un ajustement satisfaisant pour les isothermes d'adsorption dans tous les cas [18]

Dans leur étude, Yakout et al. (2014) ont examiné la cinétique d'adsorption du benzène en utilisant du charbon actif activé par l'acide phosphorique, préparé à partir de la balle de riz. Ils ont constaté une absorption initiale rapide du benzène, qui est devenue presque constante après 40 minutes de contact. L'étude cinétique de l'adsorption du benzène sur le CBR a été réalisée en utilisant les modèles pseudo-premier ordre, pseudo-deuxième ordre, Elovich et diffusion intraparticulaire. Les données cinétiques d'adsorption ont suivi le modèle cinétique du pseudo-deuxième ordre, ce qui suggère une nature de chimisorption du processus. Le modèle de diffusion intraparticulaire a confirmé que la diffusion intraparticulaire n'est pas un mécanisme pleinement opérationnel, tandis que le modèle de Boyed a suggéré que la diffusion en film est l'étape limitante de la vitesse. Leurs résultats ont démontré que les carbones issus de la balle de riz sont des adsorbants efficaces pour le benzène, et ils ont souligné leur potentiel prometteur dans l'élimination du benzène lors du traitement des eaux usées. Yakout et al. (2014) ont réalisé une étude comparative sur l'adsorption du benzène, révélant que le charbon activé à base de balle de riz (CBR) présentait une capacité d'adsorption du benzène supérieure (365 mg/g) par rapport à d'autres adsorbants [19]

Arafat et al. (1999) ont étudié l'effet du KCl sur l'adsorption du phénol, du toluène et du benzène sur du charbon actif avec différents degrés d'oxygénation de surface. Ils ont observé différentes tendances d'effet du sel pour chaque composé. Les effets observés du KCl ont été interprétés en termes de neutralisation de la charge électrique à la surface du carbone et des molécules adsorbées, d'adsorption d'eau et d'effet de "salting out". Ils ont constaté que l'adsorption d'eau était cruciale pour réduire la capacité d'adsorption du charbon actif. L'influence de l'adsorption d'eau était plus prononcée sur les surfaces de carbone présentant des quantités plus élevées de groupes contenant de l'oxygène. Ces résultats ont été confirmés par des mesures réalisées à l'aide de la microcalorimétrie en flux [20].

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

Kong et al. (2014) ont préparé du charbon dérivé de boues poreuses par un nouveau processus pyrolytique en une seule étape avec des agents poreux de fabrication mixtes à base d'acide citrique et de $ZnCl_2$. Ce charbon a été utilisé comme adsorbant hybride à base de carbone pour quatre dérivés de benzène, dont le 4-chlorophénol, le phénol, l'acide benzoïque et l'acide 4-hydroxybenzoïque en solution aqueuse. Il s'est avéré efficace pour l'adsorption de nombreux types de dérivés de benzène en solution aqueuse [21]

Dans cette étude, l'objectif était de comprendre le mécanisme d'adsorption des composés aromatiques (benzène et nitrobenzène) sur une surface de carbone activé en introduisant et en éliminant des groupes fonctionnels acides. Les expériences d'adsorption ont été réalisées en utilisant des solutions aqueuses et des solutions de n-hexane pour obtenir les isothermes d'adsorption. Les résultats ont montré que la présence de groupes fonctionnels acides en solution aqueuse entravait significativement l'adsorption du benzène, tandis que l'adsorption du nitrobenzène sur les surfaces avec des groupes fonctionnels acides augmentait avec la concentration de la solution. En solution de n-hexane, l'adsorption du benzène était difficile en raison de son affinité élevée avec le solvant, tandis que le nitrobenzène était plus adsorbé sur les surfaces avec des groupes fonctionnels acides. Les cinétiques d'adsorption et de désorption du nitrobenzène ont montré des constantes de vitesse plus faibles sur les surfaces avec des groupes fonctionnels acides en raison de la perturbation de la diffusion. En résumé, cette étude a démontré que la structure et la polarité de surface du charbon actif, ainsi que la présence de groupes fonctionnels acides, jouent un rôle essentiel dans l'adsorption des composés aromatiques [22].

II. 4 L'importance d'éliminer le toluène

L'élimination du toluène est importante en raison des risques potentiels pour la santé et l'environnement associés à cette substance chimique. Le toluène est un composé organique volatil largement utilisé dans de nombreuses industries, notamment dans la fabrication de solvants, de peintures, de vernis, de colles et d'autres produits chimiques. Lorsqu'il est présent dans l'air, le toluène peut être inhalé et entraîner divers effets néfastes sur la santé humaine. Il peut causer des irritations des voies respiratoires, des maux de tête, des étourdissements, des nausées et une fatigue. Une exposition prolongée ou à des concentrations élevées peut entraîner des dommages au système nerveux central, des troubles du sommeil, des troubles cognitifs et des problèmes de développement chez les enfants. De plus, le toluène est également une substance préoccupante pour l'environnement. Lorsqu'il est déversé dans les eaux usées ou dans l'environnement, il peut contaminer les sources d'eau et les sols, entraînant une pollution. Cette

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

pollution peut avoir des effets néfastes sur les écosystèmes aquatiques et terrestres, perturbant la vie des organismes vivants et la biodiversité. Par conséquent, l'élimination du toluène est essentielle pour prévenir les risques pour la santé humaine et réduire l'impact négatif sur l'environnement. L'utilisation de méthodes telles que l'adsorption sur charbon actif, la distillation, la biofiltration ou l'oxydation catalytique peut permettre de retirer le toluène des eaux usées, des effluents industriels ou de l'air, contribuant ainsi à la protection de la santé publique et de l'environnement.

II. 4. 1 Procédés d'oxydation avancés

Les procédés d'oxydation avancés (AOP) ont été proposés pour la première fois pour le traitement de l'eau potable dans les années 1980, définis comme des processus redox qui impliquent la génération de radicaux hydroxyle (OH) en quantités suffisantes pour affecter la purification de l'eau, plus tard, le concept d'AOP a été élargi pour inclure l'oxydation Avec les radicaux sulfatés (SO_4^-), différents des oxydants courants comme le chlore et l'ozone qui ont un double rôle de décontamination et de désinfection, les AOP sont principalement utilisés pour détruire les polluants organiques ou inorganiques dans les eaux et les eaux usées, bien que l'inactivation des AOP ait été étudiée Pour les agents pathogènes et les indicateurs pathogènes, ils sont rarement utilisés pour la désinfection car les demi-vies de ces radicaux sont si courtes (de l'ordre de la microseconde), que les temps de rétention nécessaires à la désinfection sont prohibitifs en raison de concentrations en radicaux extrêmement faibles. appliqués pour le traitement des eaux usées, on s'attend à ce qu'ils fonctionnent Les radicaux, en tant qu'agent oxydant puissant, détruisent suffisamment les polluants des eaux usées, les convertissant en produits moins toxiques et même non toxiques, offrant ainsi une solution ultime pour le traitement des eaux usées.

II. 4. 2 Comment fonctionnent les processus d'oxydation avancés

Les systèmes AOP sont des méthodes d'oxydation en phase aqueuse composées d'espèces hautement réactives utilisées pour la destruction oxydative des contaminants cibles. L'AOP crée un oxydant secondaire plus puissant et moins sélectif, le radical hydroxyle, dans l'eau. Cet oxydant secondaire peut provoquer l'oxydation de la plupart des composés organiques. Comme le dioxyde de carbone et l'eau, le radical hydroxyle a un potentiel d'oxydation beaucoup plus élevé que l'ozone ou le peroxyde d'hydrogène et réagit généralement au moins un million de fois plus rapidement, ce qui réduit le temps de contact et l'empreinte.

II. 4. 3 Utilisations de procédés d'oxydation avancés

Les processus d'oxydation avancée sont largement utilisés pour le traitement des eaux usées et la dégradation de contaminants. Ils sont appliqués dans le traitement des eaux usées municipales, la dépollution des eaux souterraines, le traitement des effluents industriels, l'élimination des micropolluants et la dégradation des composés chlorés. Ces processus permettent de décomposer les contaminants organiques et inorganiques en produits moins toxiques, de convertir les composés réfractaires en substances plus facilement dégradables et de réduire l'impact environnemental des contaminants dans l'eau. Ils sont utilisés pour traiter une variété de substances telles que les produits pharmaceutiques, les produits chimiques industriels, les pesticides, les résidus chlorés, etc. Les processus d'oxydation avancée contribuent ainsi à améliorer la qualité de l'eau et à préserver les ressources en eau.

II. 4. 4 Application de la processus d'oxydation avancée pour éliminer le Toluène

Dans cette étude, une nouvelle approche a été utilisée pour dégrader le toluène gazeux en flux continu dans un système en batch, en utilisant le procédé UV/H₂O₂. Ce procédé a été comparé aux procédés UV/Fenton et Fenton. Les résultats de cette étude démontrent l'efficacité du procédé UV/H₂O₂ dans la dégradation du toluène dans un système en batch. La formation constante et modérée des radicaux ·OH à partir de ce procédé joue un rôle essentiel dans l'élimination améliorée des COV en flux continu, par rapport aux procédés Fenton et UV/Fenton. L'efficacité d'élimination du toluène a été maintenue à plus de 80% grâce au procédé UV/H₂O₂, sans perte d'efficacité, et la minéralisation du toluène a atteint un taux de 72,0%. L'analyse du bilan carbone et la détection d'intermédiaires ont suggéré que ce processus de dégradation implique principalement trois voies réactionnelles : abstraction d'atome d'hydrogène, addition d'·OH et isomérisation. Ces résultats indiquent que la méthodologie utilisée dans cette étude peut être efficace dans l'élimination d'autres COV en présence de radicaux ·OH. Des recherches supplémentaires sont en cours pour approfondir ces connaissances [23].

Dans leur étude, Rayaroth et al. (2023) ont passé en revue les processus d'oxydation avancée (POA) utilisés pour l'élimination des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans différents environnements. Les résultats ont montré que la plupart des POA étaient efficaces pour éliminer les HAP présents dans les milieux aquatiques. Une analyse comparative de la dégradation des différents HAP a révélé que l'efficacité de l'oxydation dépendait principalement du nombre de cycles aromatiques et des groupes fonctionnels attachés à ces cycles. Cependant, il a été observé que la présence d'ions chlorure, nitrite et nitrate dans les

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

eaux contaminées réelles pouvait entraîner la formation de dérivés halogénés et nitrés des HAP, ce qui constitue un défi lors de l'utilisation des POA dans des systèmes réels. L'oxydation des HAP par les POA a conduit à la formation de sous-produits tels que des composés phénoliques, des quinones, des alcools et des acides aliphatiques. Ces sous-produits sont générés par l'attaque des espèces réactives de l'oxygène (ERO) sur les sites riches en électrons des HAP. Les POA se sont avérés être une méthode adaptable pour l'élimination des HAP à partir de différentes matrices environnementales. Les POA à base de persulfate ont été utilisés avec succès pour l'oxydation des HAP présents dans le sol, permettant ainsi une dégradation chimique in situ. De plus, la combinaison de différents POA peut être une solution efficace pour éviter la formation de produits intermédiaires inattendus ou toxiques et permettre une oxydation plus rapide des HAP [24].

Il existe diverses sources d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui entraînent l'accumulation de HAP dans le sol et l'eau. Les processus d'oxydation avancée (POA) ont été utilisés avec succès pour éliminer les HAP des matrices aqueuses et du sol. Comparés à d'autres méthodes d'élimination telles que les méthodes physiques et biologiques, les POA présentent un taux de dégradation élevé, permettant une dégradation complète en peu de temps. De plus, ces processus peuvent être réalisés dans des conditions environnementalement pertinentes. On conclut que les POA à base de persulfate (PS) et les POA assistés par électrolyse (EAOP) sont efficaces pour éliminer les contaminants d'un milieu aqueux. Cependant, en raison de l'interaction forte entre les HAP et le sol, leur élimination de la matrice du sol est difficile. C'est pourquoi plusieurs méthodes utilisent l'oxydation assistée par un agent de solubilisation approprié, et dans ces cas, le persulfate est la première et la meilleure option. L'efficacité d'élimination des HAP dans les POA dépend également de leur structure. La réaction initiale des radicaux $\cdot\text{OH}$ avec les HAP conduit à la formation de composés phénoliques, suivie d'une réaction d'ouverture de cycle. De plus, diverses espèces réactives participent à la dégradation des HAP dans les POA. L'implication de radicaux superoxydes et d'oxygène singulet dans les POA tels que les POA à base de sulfate de réduction (SR-AOP) et la photocatalyse favorise une oxydation rapide, en particulier pour les dérivés aniline des HAP. Les dérivés quinone formés lors de l'oxydation des HAP sont d'importants activateurs du persulfate, ce qui favorise la génération d'espèces réactives dans le milieu. Les composés monoaromatiques subissent une oxydation plus rapide que les HAP de faible et de haute masse moléculaire, ainsi que leurs dérivés. De plus, l'efficacité d'élimination est affectée par diverses matrices, telles que les ions organiques et inorganiques. Les principaux constituants des matrices aqueuses, tels que les ions

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

bicarbonate et les espèces organiques, piègent les espèces réactives et réduisent l'efficacité d'élimination dans la plupart des cas. Cependant, pour certains dérivés hydroxylés et aminés des HAP, les radicaux carbonates améliorent l'efficacité d'élimination via un mécanisme de transfert d'électrons. Les ions halogénures et les ions nitrite ont également un impact négatif sur l'élimination et entraînent la formation de dérivés halogénés et nitro toxiques. De plus, les processus de dénitrification/halogénéation dans de nombreux dérivés des HAP respectifs génèrent de nombreux intermédiaires toxiques. Par conséquent, une attention particulière doit être accordée à l'élimination des dérivés des HAP [24].

II. 5 Importance de l'élimination des composés phénoliques de l'eau

L'élimination des composés phénoliques de l'eau revêt une grande importance en raison de ses impacts sur l'environnement et la santé humaine. Les composés phénoliques, tels que le phénol, le bisphénol A et les chlorophénols, sont des polluants toxiques persistants. Leur présence dans l'eau peut perturber les écosystèmes aquatiques, réduire la biodiversité et présenter des risques pour la santé humaine, notamment en termes de cancers et de troubles reproductifs. De plus, leur élimination est nécessaire pour se conformer aux réglementations environnementales et préserver les ressources en eau douce. En adoptant des méthodes de traitement efficaces, nous pouvons réduire les niveaux de ces contaminants et garantir la qualité de l'eau pour la protection de l'environnement et la santé de tous.

II. 5. 1 Méthodes d'élimination des composés phénolique

II. 5. 1. 1 Extraction liquide-liquide

a Définition

L'extraction liquide-liquide est un processus de séparation qui consiste à transférer sélectivement des composés solubles d'une phase liquide à une autre phase liquide immiscible. Il repose sur les différences de solubilité ou d'affinité des composés cibles entre les deux phases liquides.

b Le principe de l'extraction liquide-liquide

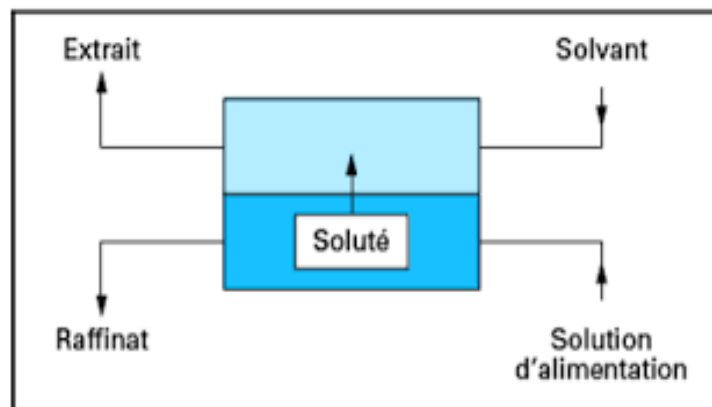
L'extraction liquide-liquide est l'une des méthodes de base du génie chimique. Il permet la séparation d'un ou plusieurs composants d'un mélange en profitant de leur répartition inégale entre deux liquides pratiquement non miscibles. Le système en deux étapes consiste en une solution aqueuse contenant une ou plusieurs solutions et une solution organique constituée d'un diluant non miscible à l'eau et d'un composé organique appelé extrait . Les méthodes

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

d'extraction sont basées sur le suivi de l'équilibre, et donc le transfert de masse ne peut être ignoré.

De manière générale, le procédé d'extraction liquide-liquide nécessite trois grands procédés successifs.

- Deux liquides immiscibles, généralement une phase aqueuse et une phase organique, sont préparés et mis en contact. Les deux phases sont mélangées et agitées pour permettre le transfert des composés cibles de la phase aqueuse vers la phase organique.
- Après une période d'agitation, les deux phases sont laissées au repos pour permettre leur séparation naturelle. Les phases se séparent en fonction de leur densité et de leur immiscibilité.
- La phase organique, qui contient les composés cibles, est récupérée séparément de la phase aqueuse. Des techniques supplémentaires telles que l'évaporation ou la distillation peuvent être utilisées pour concentrer et purifier les composés extraits



Fig(II .9): Procédé d'extraction liquide-liquide

Les utilisations industrielles de l'extraction liquide-liquide se développent rapidement depuis longtemps. Le premier procédé utilisé dans l'industrie pétrolière était le procédé EDLENU en 1907, et son objectif était d'éliminer les composés aromatiques des huiles de pétrole par traitement avec du dioxyde de soufre liquide.

L'extraction liquide-liquide offre l'avantage de pouvoir séparer efficacement les composés cibles de l'eau, en particulier lorsque les méthodes conventionnelles ne sont pas suffisamment efficaces. Elle est largement utilisée dans le domaine de la purification de l'eau, le traitement des effluents industriels et la séparation des substances chimiques.

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

Tableau (II .3).donne une vue schématique des différentes applications de l'extraction liquide- liquide dans les industries

Industrie	Applications	Activités
Pétrochimique	Production d'aromatiques Purification du pétrole Alkylation	Optimisation de procédés
Chimique	Synthèse de polymères, fibres Pesticides, herbicides	Optimisation et développement de procédés
Alimentaire et Pharmaceutique	Récupération des antibiotiques, et vitamines Purification des produits génétiques	Optimisation et développement de procédés
Hydrométallurgique	Récupération et purification des Métaux	Recherche de solvants plus efficaces
Nucléaire	Traitement des déchets	Développement de Procédés
Environnementale	Traitement des eaux polluées Récupération et recyclage de sous Produits Produits	Optimisation et développement de procédés

c Classification des différents systèmes d'extraction

Les différents systèmes d'extraction peuvent être classés en fonction de différents critères. Cependant deux systèmes prédominent. Le premier est présenté par Tremillon . et le second par Marcus et Kertes. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à ce dernier.

La classification de Marcus et Kertes est fondée sur le type de mécanisme mise en oeuvre lors de l'extraction. Les auteurs différencient les extractants selon leurs propriétés chimiques. Quatre systèmes d'extraction sont recensés .

- Extraction par échange de cations
- Extraction par échange d'anions
- Extraction par chélation
- Extraction par solvation

d Propriétés de l'Extractant

Le choix d'un extractant pour un procédé d'extraction liquide-liquide est une étape cruciale pour assurer une extraction efficace. Les propriétés de l'extractant, telles que son coefficient de distribution, sa masse volumique, sa viscosité, sa tension interfaciale, sa solubilité, sa stabilité, sa toxicité et sa sécurité, sont essentielles pour garantir l'efficacité et la sélectivité de l'extraction. Il est rare qu'un seul composé possède toutes ces propriétés simultanément, donc il est préférable de se concentrer sur une ou deux propriétés clés en fonction des exigences spécifiques de l'extraction. Dans certains cas, l'ajout d'un deuxième extractant ou d'un diluant peut compenser les propriétés moins favorables de l'extractant principal. En trouvant un compromis entre ces différents facteurs, il est possible de concevoir un procédé d'extraction économiquement compétitif, efficace et sûr. Cette approche permet de développer des solutions viables pour diverses applications industrielles et environnementales.

e Mécanismes d'extraction liquide-liquide

L'extraction liquide-liquide repose sur différents mécanismes, tels que la partition, la distribution sélective, l'extraction acido-basique, l'extraction par solvant spécifique et l'extraction par chélation. La partition est basée sur la différence de solubilité des composés entre les phases liquides, tandis que la distribution sélective repose sur les interactions chimiques spécifiques entre les composés et les solvants des phases. L'extraction acido-basique utilise des réactions chimiques pour convertir les composés en formes ioniques qui se distribuent différemment entre les phases acide et basique. Certains solvants sont spécifiquement conçus pour extraire certains composés en raison d'interactions particulières, tandis que l'extraction par chélation implique la formation de complexes stables entre des ligands chélatants et des ions métalliques. Le choix du solvant extractant, les conditions de mélange et d'autres facteurs peuvent influencer ces mécanismes et l'efficacité de l'extraction. Comprendre ces mécanismes est essentiel pour concevoir et optimiser les processus d'extraction liquide-liquide dans différentes applications.

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

f Application de l'extraction dans l'élimination des phénols

L'étude de Jiang et al. (2003) a porté sur l'élimination des phénols en utilisant des alcools, des amines et des acides organiques. Les chercheurs ont évalué l'efficacité de ces solvants dans l'extraction liquide-liquide des phénols présents dans une solution aqueuse [25]. Les résultats expérimentaux sont illustrés dans le tableau 4

Tableau (II .4).Rendement d'extraction des phénols par les alcools, les amines et les acides organiques[26]

R-OH	E%	R-NH2	E%	R-COOH	E%
C5h11	75.20	C9H19	73.50	C4H9	48.10
C6H13	77.00	C10H21	74.80	C5H11	45.20
C7H15	85.30	C11H23	78.30	C6H13	44.70
C8H17	93.80	C12H25	82.50	C7H15	43.90
C11H23	92.40	C13H27	88.00	C8H17	44.00
C12H25	91.40	C14H25	92.40	C10H21	43.40

Les travaux de Jiang et al. (2003) ont montré que l'efficacité d'extraction du phénol dépend de la nature des solvants utilisés. Ils ont observé que pour les alcools et les amines, l'efficacité d'extraction du phénol augmente avec l'allongement de la chaîne carbonée. Cependant, dans le cas des acides organiques, l'efficacité d'extraction diminue à mesure que la chaîne carbonée s'allonge. En utilisant le logiciel Gaussien 98, Jiang et al. (2003) ont pu conclure que les alcools présentent une efficacité d'extraction plus élevée que les amines et les acides carboxyliques pour l'élimination du phénol[25].

ces études mettent en évidence l'importance de la nature du solvant utilisé dans l'extraction du phénol. Les alcools, les amines et les acides organiques peuvent avoir des performances différentes en fonction de la chaîne carbonée et du contexte de l'extraction.

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

Une étude comparative menée par Olejniczak et al. (2005) a examiné l'extraction des phénols en utilisant trois solvants : l'hexane, le toluène et le diéthyl carbonate. Le diéthyl carbonate s'est avéré être le solvant le plus efficace en raison de la formation d'une liaison hydrogène entre le groupe hydroxyle du phénol et l'atome d'oxygène du diéthyl carbonate. L'efficacité de l'extraction dépend fortement de l'hydrophobicité du phénol, qui augmente avec l'augmentation du volume molaire. Ainsi, l'hydrophobicité du phénol est un facteur important qui influence l'efficacité de l'extraction [26]

Une étude réalisée par Palma et al. (2007) s'est intéressée à l'influence de la température, de la concentration de NaOH et de la vitesse d'agitation sur la récupération du phénol à l'aide d'une solution aqueuse de NaOH. Les chercheurs ont constaté que la température et la vitesse de rotation avaient un impact sur le coefficient de transfert de masse, tandis que la concentration de la solution NaOH n'avait pas d'effet significatif [27]

II. 6 Les techniques non destructives

Les techniques non destructives reposent sur l'utilisation de méthodes d'extraction qui se basent sur les propriétés chimiques ou physiques des composés, permettant ainsi une séparation sélective de un ou plusieurs composés d'un mélange.

Les méthodes physico-chimiques se sont révélées coûteuses et présentent des inconvénients inhérents, notamment la formation de composés secondaires toxiques tels que les phénols chlorés.

II. 6. 1 La coagulation-floculation

La coagulation-floculation est un procédé de traitement des eaux usées qui vise à éliminer les impuretés en favorisant la formation de floes. Ce procédé est de plus en plus reconnu pour sa capacité à rivaliser avec des méthodes plus coûteuses comme l'adsorption sur charbon actif ou l'oxydation à l'ozone. Il implique l'ajout rapide de produits chimiques, tels que des sels métalliques trivalents, qui neutralisent et déstabilisent les particules colloïdales, favorisant ainsi la formation de floes. Les floes agglomèrent les particules fines en suspension, facilitant leur élimination ultérieure par filtration. La coagulation-floculation peut éliminer diverses substances organiques et inorganiques, notamment les graisses, les huiles, le phosphore, la matière en suspension (MES) et les métaux lourds. Toutefois, une approche spécifique adaptée à chaque type d'effluent est nécessaire pour optimiser le procédé. Les quantités d'agents coagulants requises dépendent de facteurs tels que le pH, l'alcalinité, la concentration en phosphate et le point d'injection du coagulant. Une fois le procédé terminé, le

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

précipité de micro-flocs peut être séparé de l'effluent liquide par filtration ou centrifugation. Les boues résultantes peuvent être traitées de différentes manières, comme l'enfouissement direct, la déshydratation, l'incinération, l'oxydation chimique ou le traitement biologique. Pour améliorer l'efficacité de purification, la coagulation-floculation peut être combinée à d'autres méthodes de traitement. Le choix du coagulant ou du floculant approprié dépendra de son efficacité et de son coût par rapport aux autres alternatives disponibles [26]

II. 6. 2 L'adsorption

L'adsorption est un processus par lequel les molécules ou les particules d'une substance se lient à la surface d'un autre matériau. L'adsorption peut être réalisée à travers différentes interactions chimiques telles que les forces électrostatiques, les forces de Van der Waals, et les interactions hydrophobes. Plusieurs études ont été faites pour l'élimination des phénols en utilisant plusieurs adsorbants comme les charbons actifs, les zéolites, les gels de silice activés, l'alumine activée et l'argile naturelle (bentonite) ...etc.

a Principe de l'adsorption

L'étude de l'adsorption implique généralement la mesure de la concentration en solution à différents moments pour déterminer la quantité d'adsorbât adsorbée à l'équilibre. Cependant, cette approche ne permet pas de comprendre les mécanismes sous-jacents de l'adsorption. Pour cela, des techniques complémentaires telles que la spectroscopie infrarouge, la spectrométrie de masse, la microscopie électronique à balayage et la modélisation moléculaire peuvent être utilisées. Ces techniques fournissent des informations sur les interactions entre l'adsorbât et l'adsorbant, les sites d'adsorption préférentiels et les changements structuraux. En combinant les mesures expérimentales avec ces techniques d'analyse avancées, il est possible de mieux comprendre les mécanismes d'adsorption, d'optimiser les conditions d'adsorption et de développer des matériaux adsorbants plus efficaces. Cela contribue à améliorer les procédés d'élimination des polluants et de purification de l'eau, ainsi que d'autres applications liées à l'adsorption.

b Les modèles cinétiques d'adsorption

Les modèles cinétiques d'adsorption sont utilisés pour étudier la vitesse à laquelle se produit le phénomène d'adsorption. Ils se basent sur des équations qui décrivent le transfert de matière à l'interface liquide-solide, prenant en compte les résistances au transfert de matière. L'équation fondamentale de ces modèles stipule que le flux d'adsorption est proportionnel à la différence entre la quantité adsorbée à un instant donné (q_t) et la quantité adsorbée à l'équilibre

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

(qe). Ainsi, un écart plus important entre ces deux quantités entraîne un flux d'adsorption plus élevé. Différents modèles cinétiques ont été développés pour étudier le mécanisme d'adsorption. Parmi eux, on trouve le modèle cinétique du pseudo-premier ordre (modèle Lagergren), le modèle cinétique du deuxième ordre, le modèle de diffusion intra-particulaire proposé par Weber et Morris, ainsi que le modèle d'Elkovich. Ces modèles permettent de décrire et de prédire le comportement cinétique de l'adsorption en fonction du temps.

c Application de l'adsorption pour l'élimination des phénols

Des études réalisées par Huang et al ont porté sur l'utilisation de l'adsorption pour l'élimination des phénols de solutions aqueuses [26] Ils ont examiné l'adsorption du phénol en utilisant des rectorites modifiées avec des tensioactifs tels que le chlorure de dodécyle diméthyle benzyle d'ammonium, le bromure d'hexadécyle triméthyle d'ammonium et le bromure d'octadécyle triméthyle d'ammonium. Les résultats de ces études ont montré que l'adsorption du phénol, présent dans une solution aqueuse de pH 6, se produisait spontanément à température ambiante. La quantité de phénol adsorbée dépendait étroitement de la quantité d'adsorbant utilisée.

L'adsorption sur charbon actif offre une excellente capacité d'adsorption du phénol, selon les travaux de Jia et Lua (2009). Le charbon actif présente des caractéristiques favorables telles qu'une grande surface spécifique, une distribution de taille des pores bien équilibrée et une résistance mécanique élevée, ce qui lui confère une capacité d'adsorption élevée pour les polluants organiques. De plus, il offre la possibilité d'être régénéré par combustion ou par pyrolyse [28].

Dans une étude réalisée par Riaz et al. (2002), l'adsorption du phénol sur du charbon actif a été examinée pour des concentrations variant entre 200 et 400 mg/L. Les chercheurs ont observé que le temps d'équilibre était atteint rapidement, en seulement 5 minutes. Ils ont également conclu que le pourcentage d'adsorption augmentait avec l'augmentation de la masse d'adsorbant, ce qui suggère une relation directe entre la quantité d'adsorbant utilisée et l'efficacité de l'adsorption. De plus, les résultats obtenus étaient en accord avec l'isotherme de Langmuir, une relation mathématique qui décrit l'adsorption d'un soluté sur une surface solide. Cela suggère que le processus d'adsorption du phénol sur le charbon actif peut être décrit par ce modèle théorique [29].

Dans le même contexte, Vasu (2008) a utilisé principalement du charbon actif comme adsorbant pour éliminer le phénol et l'o-crésol. Ses observations ont révélé que le pH n'avait

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

pas une grande influence sur le pourcentage d'adsorption. Une légère diminution de la quantité adsorbée a été observée avec l'augmentation du pH (en raison de la solubilité accrue du phénol dans un milieu alcalin). Vasu a également démontré que le modèle de Redlich-Peterson présentait une bonne corrélation (0,9976 pour le phénol et 0,9999 pour l'o-crésol) et que la cinétique suivait une loi de pseudo-second ordre. La désorption a été réalisée en utilisant des acides tels que l'acide acétique (0,1M) et l'acide chlorhydrique (0,1M) [30].

Tableau (II .5).Désorption des phénols

<i>Adsorbats</i>	<i>% Désorption avec</i>		
	<i>Eau</i>	<i>CH₃COOH</i>	<i>HLC</i>
<i>Phénol</i>	25,49	55,28	71,25
<i>O-crésol</i>	24,05	51,29	70,28

Il convient de noter que la désorption maximale est obtenue avec l'acide chlorhydrique (HCl). Cependant, cela ne signifie pas que la molécule de phénol est adsorbée par un mécanisme d'échange d'ions. Cette désorption est plutôt due à la solubilité élevée du phénol dans un milieu acide.

II. 6. 3 procédés de séparation

a Définition

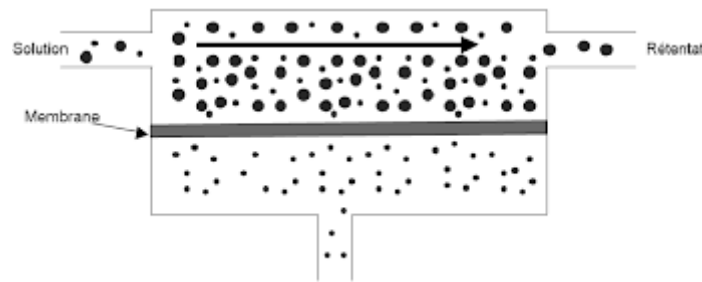
Les procédés de séparation par membranes sont largement utilisés dans le traitement des eaux. Ces procédés sont classés en fonction du type de membranes utilisées (solides, liquides ou gazeuses) et de la force motrice qui les anime. Comparés aux procédés classiques, les séparations par membrane offrent plusieurs avantages significatifs. Ils permettent une réduction des coûts d'investissement, une consommation d'énergie réduite, et des coûts d'installation moindres grâce à leur conception modulaire et leur fonctionnement simplifié [26].

b principe de la séparation membranaire

Le principe de la séparation membranaire repose sur l'utilisation de systèmes polyphasés composés d'un fluide à traiter, d'un fluide traité et d'une membrane. La membrane agit comme une barrière et constitue l'interface entre les deux phases liquides. Elle permet ou bloque le

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

transfert de certaines espèces entre ces deux milieux. Son rôle est d'assurer une sélectivité appropriée tout en offrant une résistance au transfert réduite et une résistance mécanique adéquate. Dans le cas du traitement des effluents contenant du phénol, deux techniques de séparation membranaire couramment utilisées sont la pervaporation et l'ultrafiltration. Ces techniques membranaires offrent des avantages tels qu'une haute sélectivité, une efficacité énergétique, une capacité de traitement élevée et une faible consommation de produits chimiques. Elles sont donc largement utilisées dans le traitement des effluents contenant du phénol, permettant ainsi de réduire sa concentration dans l'eau et de préserver l'environnement.



Fig(II .10):Principe de l'ultrafiltration [31].

Le fluide à traiter, qui peut être un liquide ou un gaz contenant des composants à séparer, est introduit d'un côté de la membrane. La membrane agit comme une barrière sélective, permettant le passage sélectif de certains composants tout en bloquant d'autres. Les composants qui traversent la membrane et sont récupérés de l'autre côté sont appelés le fluide traité. Ces composants peuvent être plus purs, débarrassés des impuretés ou des substances indésirables présentes dans le fluide à traiter. La séparation membranaire peut être basée sur différents mécanismes, tels que la filtration par taille (comme dans l'ultrafiltration), l'adsorption sélective (comme dans la pervaporation) ou la diffusion sélective (comme dans l'osmose inverse).

c Application de la pervaporation pour éliminer le phénol

La pervaporation a attiré beaucoup d'attention pour la récupération du phénol présent dans les eaux usées. Dans ce contexte, les membranes à base de polymères sont couramment utilisées

L'utilisation d'une membrane en PEBA (Polyéther bloc amide), constituée de copolymères, a démontré une bonne sélectivité envers le phénol lors du traitement d'un mélange contenant jusqu'à 8% de phénol en masse. Les performances s'améliorent lorsque la membrane est fabriquée à partir de PEBA 2533. À une température de 80°C, pour des flux de phénol

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

variant entre 0,017 et 0,26 kg.m⁻²h⁻¹ et des concentrations de phénol comprises entre 3,102 et 8,103 mg.L⁻¹, un facteur d'enrichissement de 20% à 60% peut être atteint [32 ;33]

La pervaporation présente de nombreux avantages : une consommation d'énergie minimale, l'absence de besoin de régénération et l'absence de contamination secondaire. Cependant, son principal inconvénient est le faible flux par rapport aux autres procédés de séparation membranaire [26].

II. 7 Les méthodes destructives

Les méthodes destructives sont des approches utilisées pour traiter les substances toxiques présentes dans les eaux résiduaires en les transformant en d'autres produits ou en les détruisant complètement. Ces méthodes visent à altérer la nature des polluants afin de réduire leur toxicité.

II. 7. 1 Le traitement biologique

Le traitement biologique est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour la purification des eaux polluées. Il est généralement utilisé en tant que dernière étape d'une série de processus de traitement. Cette méthode permet une élimination partielle des composés organiques totaux (COT), cependant, les micro-organismes présents dans le traitement biologique ont une tolérance limitée aux concentrations de produits toxiques, qui sont généralement comprises entre 1 et 5 ppm.

Le traitement biologique est en constante évolution, et l'une des priorités de la recherche actuelle est de développer de nouvelles bactéries spécifiques à un produit, dans le but d'améliorer considérablement l'élimination des composés organiques totaux (COT). Ces recherches visent à trouver des micro-organismes capables de dégrader de manière efficace et sélective les polluants organiques présents dans les eaux polluées, permettant ainsi une purification plus complète et plus efficace.

a Principe

Le traitement biologique est une méthode utilisée pour éliminer les contaminants de l'eau en utilisant des micro-organismes, tels que des bactéries, des champignons ou des algues, pour dégrader les composés organiques présents dans l'eau. Il repose sur le principe de la biodegradation, où les micro-organismes utilisent les contaminants comme source de nourriture et les décomposent en produits plus simples, tels que le dioxyde de carbone, l'eau et la biomasse.

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

Le traitement biologique peut se faire de différentes manières, notamment par biofiltration, boues activées, lagunage, lits bactériens ou cultures fixes, selon les caractéristiques spécifiques de l'eau à traiter et les objectifs du traitement.

Dans un système de traitement biologique, les micro-organismes sont maintenus dans des conditions favorables à leur croissance et à leur activité métabolique. Ces conditions comprennent des facteurs tels que la température, le pH, la disponibilité des nutriments et de l'oxygène.

Le traitement biologique présente plusieurs avantages. Il est généralement moins coûteux que les méthodes physico-chimiques, il est efficace pour éliminer les composés organiques et il peut être utilisé pour traiter de grandes quantités d'eau. De plus, il est respectueux de l'environnement car il utilise des processus naturels de dégradation. Cependant, le traitement biologique peut présenter certaines limitations. Certains contaminants peuvent être difficiles à dégrader biologiquement, ce qui peut nécessiter l'utilisation de techniques complémentaires. De plus, il peut être sensible aux fluctuations des conditions environnementales, ce qui peut affecter l'efficacité du traitement. Enfin, le traitement biologique peut nécessiter un temps de réaction plus long par rapport aux méthodes physico-chimiques.

b Application du traitement biologique pour éliminer les phénols

Plusieurs espèces de bactéries sont connues pour leur capacité à dégrader le phénol, telles que *Alcaligenes* sp, *Acromobacter* sp, *Rhodococcus* sp, *Rhodococcus erythropolis*, *Acinetobacter* sp, *Candida tropicalis*, *Candida maltosa*, *Pseudomonas putida*, *Bacillus thermoleovorans*, ainsi que certains champignons tels que *Fusarium* sp, *Aspergillus* sp, *Penicillium* sp et *Graphium* sp [34].

La dégradation aérobie du phénol par ces micro-organismes repose principalement sur les processus d'ortho-oxydation et de méta-oxydation. Au cours de la première étape de la dégradation, une enzyme appelée hydroxylase du phénol utilise de l'oxygène moléculaire pour ajouter un deuxième groupe hydroxyle à la position ortho- par rapport au groupe hydroxyle déjà présent, formant ainsi du catéchol. Le catéchol peut ensuite être dégradé par l'intermédiaire des voies d'ortho-oxydation ou de méta-oxydation. Il convient de noter que la plupart de ces études impliquent des espèces microbiennes déjà présentes dans l'environnement [34].

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

L'utilisation de boues activées est une solution plus attrayante pour le traitement des eaux usées en raison de ses nombreux avantages. Ce procédé repose principalement sur un traitement aérobie dans lequel les matières organiques présentes dans les eaux usées sont oxydées en dioxyde de carbone, en eau et en biomasse. L'oxygène nécessaire à ce processus est fourni par l'aération, soit par diffusion d'air, soit par un système mécanique. Les micro-organismes présents dans les boues activées se développent et forment des floccs biologiques qui sont ensuite séparés des eaux traitées dans un clarificateur secondaire [34].

Le traitement par boues activées offre plusieurs avantages. Tout d'abord, il permet une élimination efficace des matières organiques, y compris le phénol, présent dans les eaux usées. De plus, il est relativement simple à mettre en œuvre et nécessite un équipement moins complexe que d'autres méthodes de traitement. De plus, ce procédé génère une quantité limitée de boues résiduelles, ce qui réduit les coûts associés à leur élimination. Enfin, les boues activées peuvent être facilement adaptées pour traiter différents types de contaminants présents dans les eaux usées, ce qui en fait une méthode polyvalente et largement utilisée dans le traitement des eaux usées.

Lors du traitement de solutions phénoliques à forte charge organique, plusieurs problèmes peuvent survenir, notamment lors de l'utilisation de différents types de réacteurs tels que les réacteurs à films suspendus, les lits fixes ou les lits panier.

Le réacteur biologique séquentiel (SBR) est un système adapté pour l'élimination du phénol, mais son efficacité peut varier en fonction du taux de charge organique. Des études ont montré que le SBR est particulièrement efficace pour des taux de charge modérés de phénol. Cependant, pour des charges élevées en phénol, les systèmes SBR classiques peuvent présenter une faible efficacité et entraîner des problèmes opérationnels tels que la production excessive de boues.

Une étude spécifique a été réalisée en utilisant un réacteur discontinu séquentiel SBR ensemencé avec une culture de halophile et des solutions de phénol avec une concentration initiale de 120 mg.L⁻¹. Les résultats ont montré une élimination de 99,5% du phénol dans cette configuration particulière.

En milieu anaérobie, le phénol peut être dégradé par différents organismes, tels que les organismes méthanogènes, les bactéries du fer et les bactéries sulfato-réductrices. Parmi les

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

voies de dégradation anaérobie étudiées, la voie la plus courante est la dégradation du phénol par le biais du benzoyl-CoA.

Cependant, il est important de noter que l'efficacité des processus de biodégradation anaérobie du phénol n'est généralement pas élevée. C'est pourquoi, dans de nombreux cas, la biodégradation du phénol en milieu aérobie est préférée.

II. 7. 2 L'oxydation

II. 7. 2. 1 L'oxydation chimique

L'oxydation avancée est une méthode utilisée lorsque les processus biologiques traditionnels sont inefficaces pour éliminer les contaminants de l'eau. Elle implique l'utilisation d'oxydants puissants pour décomposer les composés organiques et inorganiques présents dans l'eau. Certains oxydants couramment utilisés dans les procédés d'oxydation avancée incluent le chlore, l'hypochlorite de sodium, le dioxyde de chlore, l'ozone et le peroxyde d'hydrogène. Le chlore, l'hypochlorite de sodium et le dioxyde de chlore sont utilisés comme oxydants dans le traitement de l'eau, généralement dans un milieu légèrement acide. Cependant, la formation de dérivés chlorés toxiques peut être un inconvénient majeur de cette technique. L'ozone est considéré comme l'un des oxydants les plus puissants, capable de détruire divers composés organiques. Cependant, son utilisation économique est limitée aux eaux fortement réfractaires et fortement diluées. Le peroxyde d'hydrogène possède un pouvoir oxydant supérieur à celui de l'acide hypochloreux. Son utilisation en présence d'ions ferreux comme catalyseurs permet d'obtenir des produits de réaction non toxiques et biodégradables.

Il est important de noter que chaque oxydant a ses avantages et ses inconvénients, et le choix de l'oxydant dépendra des caractéristiques spécifiques de l'eau à traiter et des objectifs de traitement.

II. 7. 2. 2 L'oxydation électrochimique

Le traitement par oxydation électrochimique est une méthode efficace et une alternative pour résoudre les problèmes de pollution de l'eau. Il est utilisé en complément des méthodes biologiques et physico-chimiques, notamment dans le traitement des effluents industriels contenant des composés organiques toxiques, réfractaires ou difficilement dégradables par des méthodes conventionnelles.

L'oxydation électrochimique est un procédé efficace pour traiter les composés organiques réfractaires. Il présente une grande flexibilité d'application, adaptée à différents

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

types d'eaux usées, et peut fonctionner dans des conditions variables de pH et de température. Cependant, il est important de noter que ce procédé peut consommer beaucoup d'énergie et entraîner des coûts opérationnels importants, ce qui doit être pris en compte lors de sa mise en œuvre à grande échelle.

a Application de l'oxydation pour l'élimination des phénols

Dans l'étude menée par Alnaizy et al. (2000), il a été démontré que la concentration de peroxyde d'hydrogène joue un rôle crucial dans le procédé H₂O₂/UV. En effet, une augmentation de la concentration de peroxyde d'hydrogène favorise généralement une augmentation du taux de destruction du phénol ou de la vitesse à laquelle il est éliminé. Cependant, il a été observé qu'au-delà d'une certaine limite, le peroxyde d'hydrogène peut avoir un effet inhibiteur sur l'oxydation du polluant. Il est important de trouver un ratio optimal entre la concentration de phénol et celle de peroxyde d'hydrogène dans le procédé H₂O₂/UV. Selon les résultats de l'étude, ce ratio optimal se situe généralement entre 0,004 et 0,02, ce qui signifie que la concentration de peroxyde d'hydrogène doit être maintenue dans cette plage pour obtenir une efficacité maximale dans la destruction du phénol. Au-delà de cette plage, une concentration plus élevée de peroxyde d'hydrogène peut entraîner une diminution de l'efficacité du procédé. Ces informations sont essentielles pour optimiser les conditions de réaction du procédé H₂O₂/UV dans le but d'obtenir les meilleurs résultats en termes de dégradation du phénol [35].

Dans l'étude menée par Trong (1999) sur l'oxydation électrochimique du phénol, il a été constaté que l'utilisation d'une anode en charbon actif granulé (CAG) permettait d'atteindre une élimination de 95% du phénol en seulement 30 minutes, tandis qu'une anode Ti/IrO₂ n'éliminait que 30% du phénol sur une période de quatre heures. Cela met en évidence l'importance du choix de l'anode dans le procédé d'oxydation électrochimique du phénol [26]

II. 8 Comparaison entre les différentes techniques

II. 8. 1 Comparaison entre l'adsorption et l'extraction liquide-liquide

L'adsorption est une méthode efficace pour traiter les eaux usées contenant de faibles concentrations de phénol, et elle présente généralement peu de problèmes. Cependant, en raison du coût élevé du charbon actif, cette technique ne peut pas être utilisée pour traiter des eaux résiduaires ou des rejets industriels contenant des concentrations élevées de phénol [26]. En revanche, l'extraction joue un rôle important dans certains secteurs industriels pour la récupération du phénol. Cette méthode présente des avantages par rapport à d'autres techniques,

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

notamment sa capacité à traiter des eaux usées contenant des concentrations élevées de phénol, généralement supérieures à 3 103 mg/L. Elle devient même rentable lorsque la concentration en phénol dépasse 104 mg/L [27].

II. 8. 2 Comparaison de la pervaporation avec la séparation par membranes solides

La pertraction est un procédé de séparation qui utilise des membranes liquides plutôt que des membranes solides. Il présente plusieurs différences clés par rapport aux méthodes classiques [26].

- **Sélectivité des membranes :** Les membranes liquides utilisées en pertraction offrent généralement une sélectivité plus élevée que les membranes solides. Cette sélectivité est basée sur les différences de solubilité des solutés dans le liquide membranaire. De plus, l'ajout de transporteurs mobiles dans la phase membranaire peut améliorer la sélectivité en favorisant le transport des solutés insolubles dans la membrane liquide.
- **Conditions opératoires :** La pertraction fonctionne à des conditions opératoires moins contraignantes. Cela comprend des températures ambiantes, des pressions de travail très faibles voire nulles, etc. De plus, le risque de colmatage des membranes est pratiquement inexistant, ce qui permet un fonctionnement en continu, sauf pour les membranes émulsionnées.

la pertraction se distingue des méthodes classiques de séparation par l'utilisation de membranes liquides, offrant une sélectivité plus élevée et des conditions opératoires moins contraignantes. Ces caractéristiques font de la pertraction une option attrayante pour diverses applications de séparation.

II. 8. 3 Comparaison de la pervaporation avec l'extraction liquide-liquide

La pertraction liquide est une technique qui combine l'extraction liquide/liquide avec la récupération des solutés dans un même contacteur. Elle présente deux avantages principaux par rapport à l'extraction classique [26].

- **Force motrice maximale :** La pertraction maintient une force motrice élevée tout au long du processus grâce à la régénération continue du solvant et aux réactions auxiliaires. Cela permet un transfert efficace des substances et réduit le nombre d'étapes nécessaires pour atteindre la séparation souhaitée.
- **Capacité du solvant:** Contrairement à l'extraction classique, où la capacité du solvant est un facteur limitant pour l'extraction de solutés, la pertraction utilise

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

la phase membranaire comme intermédiaire temporaire. Ainsi, la capacité du solvant n'est pas un critère restrictif. La régénération continue du solvant permet l'utilisation d'un large éventail d'extractants (solvants), y compris des produits moins coûteux et moins toxiques, offrant ainsi une plus grande flexibilité dans le choix des solvants.

la pertraction liquide combine l'extraction liquide/liquide et la récupération des solutés dans un seul processus. Ses avantages comprennent une force motrice maximale grâce à la régénération continue du solvant et une capacité de solvant plus flexible. Cela en fait une technique prometteuse pour l'extraction et la concentration efficaces des solutés, offrant des possibilités d'amélioration de l'efficacité et de l'utilisation de solvants plus respectueux de l'environnement.

II. 8. 4 Comparaison entre le traitement biologique et l'oxydation

Le traitement biologique présente un inconvénient majeur lorsqu'il s'agit de traiter les eaux usées contenant du phénol. En effet, le phénol a des effets inhibiteurs sur les micro-organismes actifs, ce qui limite l'efficacité du processus de dégradation. La toxicité élevée du phénol peut entraîner une inhibition des processus biologiques, une diminution de la capacité de décantation et une croissance limitée des micro-organismes. Les concentrations élevées de phénol dans les effluents sont particulièrement problématiques, car le phénol n'est pas facilement dégradé biologiquement à des concentrations supérieures à 200 mg/L. Lorsque les concentrations de phénol sont élevées, les micro-organismes peuvent cesser de se développer et de dégrader les composés organiques présents dans l'eau, ce qui entraîne une inefficacité du traitement biologique. Par conséquent, le traitement biologique seul n'est souvent pas adapté pour le traitement des eaux usées contenant du phénol à des concentrations élevées. Des stratégies complémentaires ou des prétraitements peuvent être nécessaires pour réduire la concentration de phénol avant d'appliquer le traitement biologique, ou d'autres méthodes de traitement plus spécifiques peuvent être envisagées pour traiter efficacement les eaux usées phénoliques [26].

L'oxydation électrochimique est une méthode de traitement des eaux usées qui présente des avantages tels que l'utilisation d'une source d'énergie non polluante, la facilité d'automatisation et la réduction de la nécessité d'équipements volumineux. Cependant, son utilisation à grande échelle dans le traitement des eaux usées municipales ou industrielles est limitée en raison du coût élevé des équipements, de la nécessité de compétences spécialisées et

CHAPITRE II Techniques d'élimination du benzène, Toluène et composés phénolés

des conditions de fonctionnement spécifiques. Malgré ces limitations, la recherche continue dans le domaine de l'oxydation électrochimique pour améliorer son efficacité et sa faisabilité économique. Des progrès sont attendus dans le développement de nouvelles technologies et l'utilisation plus répandue de cette méthode dans le futur.

Actuellement, deux approches sont utilisées pour traiter les eaux contenant du phénol : la destruction et la récupération. Les méthodes de destruction incluent l'oxydation chimique et les traitements biologiques, tandis que les techniques de récupération comprennent l'adsorption, la pervaporation, l'ultrafiltration et l'extraction par membrane liquide. Ces méthodes visent à réduire la concentration de phénol dans les eaux usées afin de protéger la santé humaine et les écosystèmes. La récupération du phénol peut également présenter des avantages économiques et environnementaux en permettant sa réutilisation ou sa séparation des autres composants de l'eau.

Conclusion

L'élimination du benzène, du toluène et des composés phénolés de l'eau usée industrielle est un sujet d'importance croissante dans le domaine de la gestion environnementale. La présence de ces contaminants organiques dans les effluents industriels représente un risque pour la santé humaine et l'écosystème. Au fil des années, de nombreuses études ont été réalisées pour développer des techniques efficaces de traitement de ces polluants.

Les méthodes de traitement les plus couramment utilisées incluent l'adsorption sur charbon actif, l'extraction liquide-liquide, l'oxydation chimique, l'oxydation avancée et l'électrochimie. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des limites, et le choix de la méthode appropriée dépend des caractéristiques spécifiques de l'eau usée, des exigences réglementaires et des considérations économiques.

Les études ont montré que l'adsorption sur charbon actif est une méthode efficace pour éliminer ces composés de l'eau usée. Cependant, elle nécessite une régénération régulière du charbon et la gestion appropriée des déchets. L'extraction liquide-liquide, en utilisant des solvants spécifiques, s'est également révélée prometteuse, mais elle nécessite une attention particulière à la sélection du solvant et à la gestion des phases liquides.

L'oxydation chimique, telle que l'utilisation de peroxyde d'hydrogène ou d'ozone, peut être efficace pour dégrader ces composés, mais elle peut également conduire à la formation de sous-produits toxiques. L'oxydation avancée, qui implique l'utilisation de réactifs puissants tels que le persulfate ou le peroxyde de peroxydisulfate, offre des possibilités d'élimination plus complète des contaminants, mais elle nécessite une évaluation approfondie des sous-produits formés.

L'électrochimie, en particulier l'oxydation électrochimique, émerge comme une solution prometteuse pour l'élimination de ces polluants. Les études ont montré que les électrodes spécifiques, telles que les électrodes de plomb ou d'oxyde de plomb, peuvent offrir une dégradation complète des composés phénol

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Zaiz, T., Lanez, H., & Kechida, B. (2013). Aspen hysys simulation and comparison between organic solvents (sulfolane and DMSO) used for benzene extraction. *International Journal of Chemical and Petroleum Sciences*, 2(1), 10-19.
- [2] DE, M., & L'AIR, E. D. D. D. D'EXPOSITION PROFESSIONNELLE.
- [3] Gérin, M. (2002). *Solvants industriels: Santé, sécurité, substitution*. Masson.
- [4] <https://lelementarium.fr/product/benzene-toluene-xylenes/>
- [5] International Agency for Research on Cancer. (1988). Some organic solvents, resin monomers and related compounds, pigments and occupational exposures in paint manufacture and painting. *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans*, 47.
- [6] Vos, J. H., & Bodar, C. W. M. (2008). Environmental risk limits for toluene. RIVM Letter report 601782005.
- [7] https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_74
- [8] https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_15
- [9] N.I. Levine, *Physical Chemistry*, 3rd edition, McGraw-Hill, Singapore, 1988.
- [10] Desjardins R. *Le traitement des eaux 2ème édition revue* (1990).
- [11] Au, W. W., Cantelli-Forti, G., Hrelia, P., & Legator, M. S. (1990). Cytogenetic assays in genotoxic studies: somatic cell effects of benzene and germinal cell effects of dibromochloropropane. *Teratogenesis, carcinogenesis, and mutagenesis*, 10(2), 125-134.
- [12] BOUAZZA Fayza, *Elimination des polluants organiques par des argiles naturelles et modifiées*, univ-tlemcen.dz, 01/2012
- [13] Cardot C. *Génie de l'environnement les traitements de l'eau procédés physicochimique est biologique, cours et problèmes résolus*. Edition ellipses (1999).
- [14] A. Talidi, *Etude de l'élimination du chrome et du bleu de méthylène en milieu aqueux par adsorption sur la pyrophyllite traitée et non traitée*, thèse doctorat, Université Mohammed V-Agdal Rabat (2006)

- [15] Wibowo, N., Setyadhi, L., Wibowo, D., Setiawan, J., & Ismadji, S. (2007). Adsorption of benzene and toluene from aqueous solutions onto activated carbon and its acid and heat treated forms: influence of surface chemistry on adsorption. *Journal of hazardous materials*, 146(1-2), 237-242.
- [16] Gupta, V. K. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review. *Journal of environmental management*, 90(8), 2313-2342.
- [17] Morin-Crini, N., Crini, G., & Roy, L. (2017). *Eaux industrielles contaminées*. Presses universitaires de Franche-Comté. *materials*, 146(1-2), 237-242.
- [18] Derylo-Marczewska, A., Buczek, B., & Swiatkowski, A. (2011). Effect of oxygen surface groups on adsorption of benzene derivatives from aqueous solutions onto active carbon samples. *Applied surface science*, 257(22), 9466-9472.
- [19] Yakout, S. M. (2014). Removal of the hazardous, volatile, and organic compound benzene from aqueous solution using phosphoric acid activated carbon from rice husk. *Chemistry Central Journal*, 8(1), 1-7.
- [20] Arafat, H. A., Franz, M., & Pinto, N. G. (1999). Effect of salt on the mechanism of adsorption of aromatics on activated carbon. *Langmuir*, 15(18), 5997-6003.
- [31] Kong, L., Xiong, Y., Sun, L., Tian, S., Xu, X., Zhao, C., ... & Liu, H. (2014). Sorption performance and mechanism of a sludge-derived char as porous carbon-based hybrid adsorbent for benzene derivatives in aqueous solution. *Journal of hazardous materials*, 274, 205-211
- [22] Goto, T., Amano, Y., Machida, M., & Imazeki, F. (2015). Effect of polarity of activated carbon surface, solvent and adsorbate on adsorption of aromatic compounds from liquid phase. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 63(9), 726-730.
- [23] Liu, G., Ji, J., Huang, H., Xie, R., Feng, Q., Shu, Y., ... & Leung, D. Y. (2017). UV/H₂O₂: An efficient aqueous advanced oxidation process for VOCs removal. *Chemical Engineering Journal*, 324, 44-50.
- [24] Rayaroth, M. P., Marchel, M., & Boczkaj, G. (2023). Advanced oxidation processes for the removal of mono and polycyclic aromatic hydrocarbons—A review. *Science of The Total Environment*, 857, 159043
- [25] Jiang, H., Fang, Y., Fu, Y. et Guo, Q.-X., 2003. Studies on the extraction of phenol in wastewater., s.l.: s.n.

- [26] S.ZIBOUCHE, Les composés phénoliques Origine, toxicité et voies d'élimination, Mémoire de MASTER Génie Chimique, Ecole Nationale Polytechnique, 2015
- [27] Palma, M., J.L. P., M, Z. et A, C., 2007. Batch phenol removal from methyl isobutyl ketone by liquid–liquid extraction with chemical reaction., s.l.: Chemical Engineering and Processing 46 (2007) 764–768.
- [28] Jia, Q. et Lua, A. C., 2009. Adsorption of phenol by oil-palm-shell activated carbons in a fixed bed., s.l.: Chemical Engineering Journal 150(2-3): 455-461.
- [29] Riaz, Q., Hammed, R., Chem et J., T., 2002. Active carbon-Adsorption of organics phase, Ann Arbor Science publisher Inc., s.l.: 26,357-361. P.C.Singer and Y.chen., Michigan, 1,167.
- [30] Vasu, A. E., 2008. Removal of Phenol and o-Cresol by Adsorption onto Activated Carbon., s.l.: EJournal of Chemistry 05: 224-232.
- [31] METAICHE, M. (2014). Technologie Membranaire génie civil ssa metaiche mehdi.
- [32] Kujawski, W., Warszawski, A., Ratajczak, W. et Porebski, T., 2004a. Removal of phenol from wastewater by different separation techniques., s.l.: Desalination 163(1-3): 287-296.
- [33] Hao, X., Pritzker, M. et Feng, X., 2009. Use of pervaporation for the separation of phenol from dilute aqueous solutions., s.l.: Journal of Membrane Science 335(1-2): 96-102.
- [34] Tziotzios, G., Economou, C. N., Lyberatos, G. et Vayenas, D. V., 2007. Effect of the specific surface area and operating mode on biological phenol removal using packed bed reactors.. Desalination 211(1-3): 128-137.: s.n.
- [35] Alnaizy.R et Akgerman, A., 2000. Advanced oxidation of phenolic compounds., s.l.: Advances in Environmental Research 4, 233.