

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE 20 AOÛT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE PÉTROCHIMIE



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Industries pétrochimiques

Spécialité : Génie pétrochimique

Adsorption d'un composé organique  
sur charbon actif magnétique

Soutenu le ...../07/2025

Réalisé par :

KARED Rania

CHEBLI Douaa

Encadré par :

Pr. BOUGDAH Nabil

Année Universitaire 2024- 2025

## **Remerciements**

**Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.**

**Nous exprimons notre sincère reconnaissance à notre encadrant BOUGDAH Nabil pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.**

**Nos remerciements vont également à l'ensemble des enseignants du département de Génie Pétrochimique, pour la qualité de l'enseignement reçu durant toutes ces années.**

## Dédicace

**Ceux qui ont été une lumière éclairant mon chemin, à ceux qui ont été un soutien et un appui à chaque étape, à ceux qui ne m'ont jamais abandonné et qui n'ont jamais cessé de m'encourager :**

**À mon cher père Nacer , toi qui m'as appris les valeurs de la patience et du combat, toi qui as toujours été ma source de force et de fierté. Merci pour chaque moment passé avec moi, pour chaque conseil donné, pour ton amour sans limites. Je prie Dieu de te protéger et de te donner une longue vie. À ma chère mère Fatima, toi qui as été et qui restes la source de l'amour et de la tendresse, toi qui m'as enveloppé de tes mains douces et de ton cœur chaleureux. Merci pour tes sacrifices, pour les nuits blanches, pour chaque mot aimable qui m'encourage.**

**À mes frères et sœurs Linda , Nour et Farah , Yousra, ma sœur née du ventre de la vie, "tous les autres Amine , chawki Abdelalli et Anes , vous avez été et vous restez la source de joie dans ma vie, merci pour votre soutien infailible, pour votre courage qui m'a donné de la force, pour votre amour qui m'a toujours fait sentir que je n'étais jamais seul.**

**À mes amies de toujours, Hanine et Marwa et Manar Vous n'êtes pas seulement mes amies, mais mes sœurs de cœur. Merci d'avoir marché à mes côtés dans ce voyage, main dans la main, entre rires, larmes et souvenirs inoubliables.**

**À ma collègue et amie CHEBLI Douaa , avec qui j'ai partagé ce travail dans un esprit de collaboration, d'engagement et de solidarité.**

**Enfin, à tous ceux qui ont cru en moi, à tous ceux qui ont soutenu mon parcours, à tous ceux qui m'aiment et que j'aime, je vous dédie ce travail avec fierté et gratitude, car c'est grâce à vous qu'il a pu voir le jour**

**KARED Ranya**

# **Dédicace**

**Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.**

**Louange à Allah pour Sa grâce infinie, pour la patience et la force qu'Il m'a accordées tout au long de mon parcours universitaire, et pour m'avoir guidée jusqu'à l'aboutissement de ce travail.**

**Je dédie ce mémoire :**

**À moi-même, pour ma persévérance, ma patience et ma détermination face aux difficultés.**

**À ceux qui ont toujours été là pour moi :**

**À ma chère mère, source d'amour inconditionnel et de prières sincères,**

**À mon père bien-aimé, mon premier soutien et ma force,**

**À mon frère, Mohamed Taher, mon compagnon de route et ma fierté,**

**À ma sœur Magda, au cœur tendre et à l'amour profond,**

**À mes grands-parents, lumière de notre foyer et symbole de bénédiction.**

**À ma collègue et amie KARED Rania, avec qui j'ai partagé ce travail dans un esprit de collaboration, d'engagement et de solidarité.**

**Et à toutes les personnes qui m'ont soutenue de près ou de loin, par un mot, un geste ou une prière... merci du fond du cœur**

**CHEBLI Douaa**

## Résumé

L'adsorption est une technique efficace et largement utilisée pour l'élimination des polluants grâce à la fixation de substances à la surface de matériaux solides.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'adsorption de phénol par le charbon actif.

Différentes variables expérimentales ont été analysées : le temps d'équilibre, la masse de l'adsorbant et la concentration initiale de phénol le  $pH$  initial et la force ionique. La capacité d'adsorption a été déterminée en utilisant les isothermes de Langmuir et de Freundlich. La cinétique d'adsorption de phénol a été étudiée en utilisant les équations de pseudo-premier ordre, pseudo-deuxième ordre et la diffusion intra-particulaire. Le modèle de pseudo premier ordre s'est avéré être le meilleur pour la modélisation cinétique, tandis que pour l'isotherme, le modèle de Langmuir était le plus adapté.

Mots-clés : adsorption, phénol, charbon actif.

## Abstract

Adsorption is an effective and widely used technique for the removal of pollutants through the attachment of substances onto the surface of solid materials.

The objective of this study is to investigate the adsorption of phenol using activated carbon.

Various experimental variables were analyzed: equilibrium time, adsorbent mass, initial phenol concentration, initial  $pH$ , and ionic strength.

The adsorption capacity was determined using Langmuir and Freundlich isotherms.

Phenol adsorption kinetics were studied using pseudo-first order, pseudo-second order, and intra-particle diffusion models.

The pseudo-first-order model was found to best fit the kinetic data, while the Langmuir model was the most suitable for the isotherm.

Keywords: adsorption, phenol, activated carbon.

## ملخص

الامتزاز هو تقنية فعّالة وشائعة تُستخدم لإزالة الملوثات، وذلك من خلال تثبيت المواد على سطح مواد صلبة. يهدف هذا العمل إلى دراسة امتزاز مادة الفينول باستخدام الفحم النشط. تمت دراسة عدة عوامل تؤثر على عملية الامتزاز، مثل: زمن التوازن، كمية الفحم المستخدم، التركيز الابتدائي للفينول، الرقم الهيدروجيني ( $pH$ ) الابتدائي، والقوة الأيونية. تم حساب قدرة الامتزاز باستخدام نماذج لانغموير وفرويندليش. كما تمت دراسة الحركية ( $kinetics$ ) باستخدام معادلات الرتبة الأولى شبه الحقيقية، الرتبة الثانية شبه الحقيقية، ونموذج الانتشار داخل الجزيئات. أظهرت النتائج أن نموذج الرتبة الأولى هو الأفضل لتمثيل حركية الامتزاز، بينما نموذج لانغموير كان الأنسب لوصف الإيزوثيرم (منحنى الامتزاز). الكلمات المفتاحية: الامتزاز، الفينول، الفحم النشط.

## Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les composés organiques</b>	
I.1. Introduction	<b>03</b>
I.2. Définition	<b>03</b>
I.3. Historique	<b>04</b>
I.4. Différences entre les composés organiques et inorganiques	<b>04</b>
I.4.1. Nombre de composés	<b>04</b>
I.4.2. Points de fusion et d'ébullition	<b>04</b>
I.4.3. Solubilité	<b>04</b>
I.4.4. Inflammabilité et conductivité	<b>04</b>
I.4.5. Réactivité chimique	<b>04</b>
I.4.6. Origine	<b>04</b>
I.4.7. Formation de sels	<b>05</b>
I.4.8. Présence d'éléments chimiques	<b>05</b>
I.4.9. Liaisons caractéristiques	<b>05</b>
I.5. Classification des composés organiques	<b>05</b>
I.5.1. Hydrocarbures aromatiques	<b>05</b>
I.5.2. Hydrocarbures aliphatiques	<b>05</b>
I.5.3. Composés hétérocycliques	<b>06</b>
I.5.4. Composés organométalliques	<b>06</b>
I.6.1. Les métaux lourds	<b>06</b>
I.6.2. Les composés organiques de synthèse	<b>07</b>
I.6.3. Les hydrocarbures	<b>07</b>
I.7. Le phénol	<b>07</b>
I.7.1. Définition	<b>07</b>
I.7.2. Historique	<b>08</b>
I.7.3. Classification des phénols	<b>08</b>
I.7.3.1. Les phénols simples	<b>08</b>
I.7.3.2. Les polyphénols	<b>08</b>
I.7.4. Propriétés physico-chimiques	<b>09</b>
I.7.5. Spectroscopie UV-Visible	<b>09</b>
I.7.6. Domaine d'application du phénol	<b>10</b>
I.7.7. Principe de production du phénol	<b>10</b>
I.7.8. Comportement du phénol dans l'environnement	<b>11</b>
I.7.9. La concentration limite du phénol dans l'environnement	<b>11</b>
I.7.10. Différentes techniques de traitement des eaux polluées par le phénol	<b>12</b>
I.7.10.1. Les techniques destructives	<b>12</b>

I.7.10.2. Les techniques non destructives	<b>13</b>
<b>Chapitre II : Généralités sur l'Adsorption</b>	
II.1. Introduction	<b>14</b>
II.2. Historique	<b>14</b>
II.3. Définition de l'adsorption	<b>14</b>
II.4. Type d'adsorption	<b>15</b>
II.4.1. L'adsorption physique	<b>15</b>
II.4.2. L'adsorption chimique	<b>15</b>
II.5. Mécanisme d'adsorption	<b>16</b>
II.6. Les Facteurs influant sur le phénomène d'adsorption	<b>17</b>
II.7. Les isothermes d'adsorption	<b>19</b>
II.7.1. Classification des isothermes d'adsorption	<b>19</b>
II.7.2. Modélisation des isothermes d'adsorption	<b>20</b>
II.7.2.1. Isotherme de Langmuir	<b>21</b>
II.7.2.2. Isotherme de Freundlich	<b>22</b>
I.8. Modèles de la cinétique d'adsorption	<b>23</b>
I.8.1. Modèle cinétique de pseudo-premier-ordre	<b>23</b>
I.8.2. Modèle cinétique de pseudo-deuxième-ordre	<b>23</b>
I.8.3. Modèle de diffusion intra- particulaire	<b>24</b>
II.9. Domaine d'application de l'adsorption	<b>24</b>
<b>Chapitre III : Généralités sur charbon actif</b>	
III.1. La biomasse	<b>25</b>
III.1.1. Définition	<b>25</b>
III.1.2. La constitution de la biomasse	<b>25</b>
III.1.3. L'utilisation de la biomasse	<b>25</b>
III.2. Charbon actif	<b>26</b>
III.2.1. Définition	<b>26</b>
III.2.2. Origine	<b>26</b>
III.3. Procède de fabrication du charbon actif	<b>27</b>
III.3.1. Carbonisation	<b>27</b>
III.3.2. Activation	<b>27</b>
III.4. Caractéristiques physico-chimique du charbon actif	<b>28</b>
III.4.1. La granulométrie	<b>28</b>
III.4.2. La dureté	<b>28</b>
III.4.3. La masse volumique	<b>28</b>
III.4.4. Le taux de cendres	<b>28</b>
III.4.5. Les fonctions de surface	<b>28</b>
III.5. Les différentes formes du charbon actif	<b>29</b>
III.5.1. Le charbon actif en poudre (CAP)	<b>29</b>

III.5.2. Le charbon actif en grains (CAG)	29
III.5.3. Le charbon actif extrudé	30
III.6. Utilisation de charbon actif	31
III.7. Les charbons actifs ferromagnétique	32
III.7.1. Introduction	32
III.7.2. Définition	32
III.7.3. Importance des matériaux poreux magnétiques	32
III.7.4. Types et effet magnétisme dans les matériaux	33
III.7.4.1. Magnétiques non ordonnés	33
III.7.4.2. Magnétiques ordonnés	34
III.8. L'utilisation du magnétisme pour le traitement des eaux	34
<b>Chapitre IV : Adsorption de phénol sur charbon actif magnétique</b>	
IV.1. Introduction	36
IV.2. Matériels et appareillages	36
IV.2.1. Matériels	36
IV.3. Préparation de charbon actif magnétique	36
IV.3.1. Préparation les coquilles de pistache	36
IV.2.2. Appareillages	36
IV.3.2. Préparation charbon actif magnétique à partir les coquilles de pistache	37
IV.4. Les effets de certain paramètre sur l'adsorption du phénol	37
IV.4.1. L'influence du temps sur l'adsorption	37
IV.4.2. L'influence de la masse de l'adsorbant sur l'adsorption	39
IV.4.3. L'influence de la concentration initiale sur l'adsorption	40
IV.4.4. L'influence de pH sur l'adsorption	41
IV.4.5. L'influence de la force ionique sur l'adsorption	41
IV.5. Modélisation de la cinétique d'adsorption	42
IV.5.1. Modèle cinétique de pseudo-premier-ordre	43
IV.5.2. Modèle cinétique de pseudo-deuxième-ordre	44
IV.5.3. Diffusion intra- particulaire	45
IV.6. Modélisation des isothermes d'adsorption	46
IV.6.1. Modèle de Langmuir	46
IV.6.2. Modèle de Freundlich	47
<b>Conclusion générale</b>	<b>50</b>

## Table des figures

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
Figure I.1	Structure moléculaire du phénol.	<b>08</b>
Figure I.2	Spectre UV-Visible du phénol.	<b>10</b>
Figure II.1	Adsorbtion phisique et l'adsorption chimique.	<b>16</b>
Figure II.2	Mécanisme de diffusion de l'adsorbat vers l'adsorbant.	<b>17</b>
Figure II.3	Les formes d'isothermes d'adsorption.	<b>21</b>
Figure II.4	Représentation l isotherme de lanfmuir.	<b>21</b>
Figure III.1	Charbon actif poudre.	<b>30</b>
Figure III.2	Charbon actif en grain.	<b>30</b>
Figure III.3	Charbon actif extrudé.	<b>31</b>
Figure IV.1	L'influence du temps sur la quantité adsorbée du phénol.	<b>38</b>
Figure IV.2	Effet de la masse de charbon actif magnétique sur le rendement d'adsorption.	<b>39</b>
Figure IV.3	Influence de la concentration initiale sur la quantité adsorbée.	<b>40</b>
Figure IV.4	Influence de PH sur la quantité adsorbée.	<b>41</b>
Figure IV.5	Influence de la force ionique sur la quantité adsorbée.	<b>42</b>
Figure IV.6	Modélisation de la cinétique d'adsorption de phénol sur le charbon actif magnétique par le modèle pseudo- premier -ordre.	<b>43</b>
Figure IV.7	Modélisation de la cinétique d'adsorption de phénol sur le charbon actif magnétique par le modèle pseudo- deuxième -ordre.	<b>44</b>
Figure IV.8	Modélisation de la cinétique d'adsorption de phénol sur le charbon actif magnétique par le modèle diffusion intra –particulaire	<b>45</b>

Figure IV.9	Isotherme d'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique selon le modèle de Langmuir.	<b>47</b>
Figure IV.10	Isotherme d'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique selon le modèle de Freundlich.	<b>48</b>

## **Table des tableaux**

Tableau I.1	Propriétés chimiques de phénol.	<b>09</b>
Tableau II.1	Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimiques.	<b>16</b>
Tableau IV.1	Les paramètres des modèles pseudo-premier-ordre, deuxième ordre et diffusion intra-articulaire.	<b>46</b>
Tableau IV.2	Résultats des valeurs des paramètres de Langmuir et Freundlich.	<b>49</b>

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Au fil des dernières décennies, la pollution de l'eau est devenue l'une des préoccupations environnementales majeures à l'échelle mondiale. Parmi les sources les plus préoccupantes figurent les effluents industriels, souvent riches en composés organiques toxiques, rejetés directement dans les milieux aquatiques sans traitement adéquat. Ces rejets, notamment dans les zones côtières, contribuent gravement à la dégradation des écosystèmes marins et mettent en danger la santé humaine et la biodiversité.

Parmi ces composés, le phénol se distingue par sa toxicité élevée, sa solubilité dans l'eau et sa persistance dans l'environnement. Présent dans les rejets des industries pétrochimiques, pharmaceutiques, du plastique ou encore des teintureries, il est classé comme polluant prioritaire par de nombreuses agences environnementales. Par conséquent, le développement de procédés efficaces, économiques et durables pour l'éliminer est devenu une nécessité urgente.

Dans ce contexte, l'adsorption émerge comme une technique de choix grâce à sa simplicité, son efficacité et sa capacité à éliminer des contaminants à faibles concentrations. Récemment, l'intérêt s'est porté sur les adsorbants d'origine naturelle, notamment ceux issus de la biomasse, pour leur caractère écologique et leur faible coût. Plus encore, l'ajout d'une propriété magnétique à ces matériaux permet une séparation aisée après traitement, améliorant ainsi leur applicabilité à grande échelle.

Ce travail s'inscrit dans cette dynamique et vise à développer un adsorbant magnétique à base de coques de pistache, un résidu agricole abondant et sous-exploité, pour l'élimination du phénol dans les eaux industrielles. Le but est de concevoir un matériau à la fois performant, économique et respectueux de l'environnement, capable de contribuer à la valorisation des déchets biomasse tout en réduisant la pollution des eaux rejetées en mer.

Ce travail est présenté sous forme de quatre chapitres:

Dans le premier chapitre quelques généralités sur les composés organiques.

Le deuxième chapitre donne une synthèse bibliographique qui vise premièrement, à décrire le phénomène d'adsorption et les différents types d'adsorption ainsi que les isothermes utilisées.

Dans le troisième chapitre. Nous avons d'écrit des généralités sur le charbon actif, définir le charbon actif, son mode de fabrication et son utilisation, un adsorbant de choix, son origine, ses propriétés physiques et chimiques et son utilisation étendue dans différents domaines.

Le quatrième chapitre de cette étude est consacré à la partie expérimentale, porte sur la valorisation des déchets organiques ensuite l'application de ce charbon actif préparé pour la rétention du phénol.

Enfin, ce manuscrit se termine par une conclusion qui rappelle les principaux résultats obtenus dans ce travail.

# Chapitre I : généralités sur les composés organiques

## **I.1. Introduction**

Les composés organiques occupent une place fondamentale en chimie, car ils sont à la base de la vie et de nombreux produits de notre quotidien. Ils sont définis comme des composés contenant principalement du carbone lié à d'autres éléments tels que l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le soufre ou le chlore. La chimie organique, qui les étudie, est une branche vaste et dynamique de la science chimique.

La richesse des composés organiques réside dans la capacité unique du carbone à former des chaînes et des cycles, permettant une grande diversité de structures et de propriétés. Ces composés sont présents dans les médicaments, les plastiques, les carburants, les colorants, les vêtements, ainsi que dans les molécules biologiques comme les glucides, les protéines, les lipides et les acides nucléiques.

## **I.2. Définition**

Les composés organiques sont des substances chimiques contenant principalement des atomes de carbone liés entre eux ainsi qu'à d'autres éléments tels que l'hydrogène, l'oxygène et l'azote, par des liaisons covalentes. La capacité du carbone à former quatre liaisons covalentes lui permet de générer une grande variété de structures, notamment des chaînes longues et complexes comme celles observées dans les hydrocarbures et les protéines. Ces composés jouent un rôle fondamental dans les réactions biochimiques au sein des cellules des êtres vivants, fournissant l'énergie nécessaire à des fonctions vitales telles que la nutrition, la reproduction et d'autres processus essentiels à la vie. Des éléments en traces comme le soufre, le phosphore, le fer et le cuivre peuvent également intervenir dans certaines réactions spécifiques [1].

## **I.3. Historique**

La première synthèse significative d'un composé organique à partir de matériaux inorganiques fut une découverte accidentelle de Friedrich Wöhler, un chimiste allemand. Travaillant à Berlin en 1828, Wöhler mélangea deux sels (le cyanate d'argent et le chlorure d'ammonium) dans le but de fabriquer la substance inorganique cyanate d'ammonium. À sa grande surprise, il obtint un produit ayant la même formule moléculaire que le cyanate d'ammonium, mais qui était en réalité le composé organique bien connu, l'urée. À partir de ce résultat fortuit, Wöhler conclut correctement que les atomes pouvaient s'agencer en molécules de différentes manières, et que les propriétés des molécules résultantes dépendaient de manière critique de leur architecture moléculaire. (Le composé inorganique cyanate d'ammonium est aujourd'hui reconnu comme un isomère de l'urée ; les deux contiennent le même type et nombre d'atomes, mais dans des arrangements structurels différents.)

Encouragés par la découverte de Wöhler, d'autres réussirent à synthétiser des composés organiques simples à partir de composés inorganiques, et vers 1860, il fut généralement admis qu'une force vitale n'était pas nécessaire à la synthèse et à l'interconversion des composés organiques [2].

#### **I.4. Différences entre les composés organiques et inorganiques**

##### **I.4.1. Nombre de composés**

Le nombre de composés organiques est considérablement plus élevé que celui des composés inorganiques. Cette diversité s'explique par la capacité unique de l'atome de carbone à former des chaînes linéaires, ramifiées, cycliques et d'autres architectures moléculaires complexes. À ce jour, plus de 10 millions de composés organiques ont été identifiés, contre un nombre beaucoup plus restreint de composés inorganiques [3].

##### **I.4.2. Points de fusion et d'ébullition**

Les composés organiques présentent généralement des points de fusion et d'ébullition plus faibles que les composés inorganiques, en raison de leurs liaisons covalentes plus faibles et des forces intermoléculaires plus faibles (forces de Van der Waals). Cependant, des exceptions existent selon la structure et la polarité des molécules [3].

##### **I.4.3. Solubilité**

La solubilité des composés organiques dans l'eau est en général faible, surtout pour les composés non polaires. En revanche, les composés inorganiques sont souvent solubles dans l'eau, car ils sont fréquemment ioniques ou polaires [3].

##### **I.4.4. Inflammabilité et conductivité**

Les composés organiques sont généralement plus inflammables en raison de leur richesse en carbone et hydrogène. Par ailleurs, ils sont de mauvais conducteurs de chaleur et d'électricité, contrairement aux composés inorganiques qui peuvent être d'excellents conducteurs, notamment s'ils sont ioniques ou métalliques [3].

##### **I.4.5. Réactivité chimique**

Les composés organiques ont souvent des réactions chimiques plus lentes et complexes, avec la formation de multiples produits. Les composés inorganiques tendent à réagir plus rapidement, souvent par des mécanismes simples et directs [3].

##### **I.4.6. Origine**

Les composés organiques proviennent majoritairement des êtres vivants ou de processus biologiques, bien que certains soient synthétisés artificiellement. Les composés inorganiques sont généralement d'origine minérale, formés par des processus géologiques ou fabriqués en

laboratoire. La synthèse de l'urée par Friedrich Wöhler a toutefois montré que cette distinction n'est pas absolue [3].

#### **I.4.7. Formation de sels**

Contrairement aux composés inorganiques qui forment facilement des sels par liaison ionique, les composés organiques ne forment pas de sels classiques, car leurs liaisons sont majoritairement covalentes [3].

#### **I.4.8. Présence d'éléments chimiques**

Les composés organiques contiennent toujours du carbone, souvent associé à de l'hydrogène, tandis que les composés inorganiques contiennent une grande variété d'éléments, y compris de nombreux métaux [3].

#### **I.4.9. Liaisons caractéristiques**

Les liaisons carbone-hydrogène (C–H) sont une caractéristique fondamentale des composés organiques. Ces liaisons sont absentes dans les composés inorganiques, qui présentent des liaisons ioniques, covalentes, ou métalliques [3].

### **I.5. Classification des composés organiques**

Les composés organiques forment une vaste et diverse catégorie de substances chimiques, généralement caractérisées par la présence d'atomes de carbone liés entre eux et à d'autres éléments. Leur classification repose sur la structure moléculaire, la nature des liaisons, et la présence d'éléments spécifiques dans la molécule. Voici une description détaillée des principales classes :

#### **I.5.1. Hydrocarbures aromatiques**

Ces composés sont définis par des structures cycliques comprenant un ou plusieurs anneaux benzéniques, où les liaisons carbone-carbone alternent entre simples et doubles selon un système de résonance délocalisée. Cette conjugaison confère une stabilité chimique et une planéité particulières aux molécules [4]. Les composés organiques aromatiques jouent un rôle essentiel dans les industries chimiques, où ils sont largement utilisés comme matières premières et solvants dans divers procédés de fabrication. Toutefois, ces substances sont classées parmi les agents inflammables, toxiques, cancérigènes et/ou mutagènes, ce qui en fait des polluants dangereux. Leur présence, même à de faibles concentrations, dans les effluents aqueux constitue une menace sérieuse pour l'environnement et soulève d'importantes préoccupations en matière de santé publique [5].

#### **I.5.2. Hydrocarbures aliphatiques**

Contrairement aux aromatiques, ces composés ont des chaînes carbonées ouvertes (linéaires ou ramifiées) ou cycliques qui ne possèdent pas de système de résonance. Ils peuvent être

saturés (alcools) ou insaturés (alcènes, alcynes) selon la présence de liaisons simples, doubles ou triples. Leur réactivité et propriétés physiques varient largement, ce qui en fait des intermédiaires majeurs dans la synthèse chimique industrielle [4].

### **I.5.3. Composés hétérocycliques**

Cette catégorie regroupe les composés cycliques dans lesquels un ou plusieurs atomes de carbone sont substitués par des hétéroatomes tels que l'azote (N), le soufre (S), ou l'oxygène (O). Ces modifications structurales modifient profondément les propriétés électroniques et réactives de la molécule, leur conférant des rôles essentiels en biochimie (ex. bases azotées de l'ADN) et en pharmacologie [4].

### **I.5.4. Composés organométalliques**

Ces substances sont caractérisées par la liaison covalente directe entre un ou plusieurs atomes de carbone et un atome métallique (souvent un métal de transition). Ces composés sont au cœur de nombreuses réactions catalytiques en chimie organique synthétique, notamment dans les couplages croisés et les transformations spécifiques difficiles à obtenir autrement [4].

### **I.5.5. Polymères**

Ce sont de macromolécules constituées par la répétition en chaîne de monomères via des liaisons covalentes. Les polymères peuvent être naturels (ex. protéines, cellulose) ou synthétiques (ex. nylon, polyester). Leur architecture (linéaire, ramifiée, réticulée) influence fortement leurs propriétés mécaniques, thermiques et chimiques, déterminant leur utilisation dans de multiples applications industrielles [4].

## **I.6. Les composés organiques polluants**

Les composés organiques polluants représentent une préoccupation majeure en écotoxicologie en raison de leurs effets toxiques sur la vie aquatique et terrestre. Issus de sources variées, notamment des rejets industriels et agricoles, ils se retrouvent dans l'ensemble des compartiments de l'environnement. Face à cette situation, d'importants efforts sont déployés pour développer des méthodes analytiques efficaces afin d'étudier leur toxicité et de mieux comprendre les mécanismes de leur migration et accumulation au sein de la biosphère [6].

### **I.6.1. Les métaux lourds**

Les métaux lourds tels que le mercure, le cuivre ou le cadmium représentent une menace environnementale majeure lorsqu'ils contaminent les ressources en eau. Leur toxicité affecte gravement les organismes aquatiques, et leur accumulation progressive tout au long de la chaîne alimentaire peut entraîner des conséquences sérieuses sur la santé humaine, ce qui en fait des polluants particulièrement préoccupants [7].

### **I.6.2. Les composés organiques de synthèse**

L'utilisation des composés organiques de synthèse, notamment les produits phytosanitaires, a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, en grande partie en raison de l'intensification des activités agricoles. La présence de concentrations élevées de pesticides dans certaines ressources en eau complique les procédés de production d'eau potable, à l'instar des nitrates. De plus, ces substances ont la capacité de s'accumuler progressivement tout au long de la chaîne alimentaire [7].

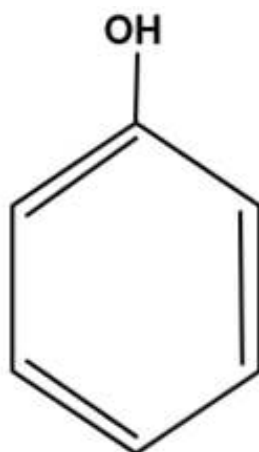
### **I.6.3. Les hydrocarbures**

Les hydrocarbures peuvent contaminer les ressources en eau par différents moyens tels que les rejets industriels, les eaux usées des garages et des stations-service, le ruissellement des chaussées ou encore les effluents domestiques. Ils comprennent plusieurs types de composés : les hydrocarbures aliphatiques (comme les alcanes et les alcènes), les hydrocarbures aromatiques monocycliques (tels que le benzène, le toluène et les xylènes), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les hydrocarbures halogénés (comme les solvants chlorés, les chlorobenzènes, les dioxines et les furanes), ainsi que les hydrocarbures oxygénés (acides, esters, aldéhydes, alcools) et ceux contenant de l'azote ou du soufre [7].

## **I.7. Le phénol**

### **I.7.1. Définition**

Le phénol est un composé organique aromatique constitué d'un noyau benzénique auquel est rattaché un groupe hydroxyle ( $-OH$ ). Bien qu'il possède une fonction alcool, il ne fait pas partie de la famille des alcools en raison de ses propriétés particulières. Sa structure est relativement simple : le groupe hydroxyle est directement lié à un atome de carbone du cycle aromatique, comme le montre la Figure I.1. On trouve le phénol naturellement dans de nombreuses plantes. En laboratoire, il est fréquemment utilisé comme réactif chimique dans diverses applications. Il peut être disponible sous forme commerciale pure ou préparé dans des mélanges de laboratoire. Actuellement, le phénol est principalement produit par le procédé Hock, qui consiste à oxyder l'isopropylbenzène avec le dioxygène de l'air. Cette réaction génère également un sous-produit important : la propanone (ou acétone), largement utilisée comme solvant. Une fois la réaction terminée, le phénol est séparé de l'acétone [8].



**Figure I.1:** Structure moléculaire du phénol [8].

### **I.7.2. Historique**

Le phénol a été découvert pour la première fois en 1650 par le chimiste allemand Johann Rudolf Glauber, qui l'a extrait de manière impure à partir de la distillation du goudron de houille. Il le décrivait comme une « huile vive de couleur rouge sang capable de sécher et de soigner les ulcères humides ». Ce n'est qu'au XIX<sup>e</sup> siècle que son compatriote Friedrich Ferdinand Runge réussit à l'isoler sous forme pure et lui donna le nom d'« acide carbolique » [9].

### **I.7.3. Classification des phénols**

Il existe une dizaine de familles de phénols, mais nous nous limiterons à la classification selon les deux principes suivants :

#### **I.7.3.1. Les phénols simple**

Les phénols simples regroupent l'ensemble des composés comportant un noyau phénolique portant un ou plusieurs groupements hydroxyles, ainsi que divers substituants. Cette catégorie inclut un grand nombre de molécules telles que le phénol lui-même, les chlorophènes, les alkyl phénols, les acides hydroxy benzoïques, les nitrophénols, etc. [10].

#### **I.7.3.2. Les polyphénols**

Les polyphénols sont une large catégorie de composés chimiques naturels largement distribués dans les plantes. En tant que métabolites secondaires, ils ne participent pas directement aux processus métaboliques essentiels. Ces composés se trouvent dans diverses substances naturelles, notamment les anthocyanines dans les fruits rouges, les proanthocyanidines dans le chocolat, les acides caféoylquinique et féruloylquinique dans le café, les flavonoïdes dans les agrumes, les catéchines comme l'épigallocatechine gallate dans le thé vert, ainsi que la quercitrine dans les pommes [11].

#### I.7.4. Propriétés physico-chimiques

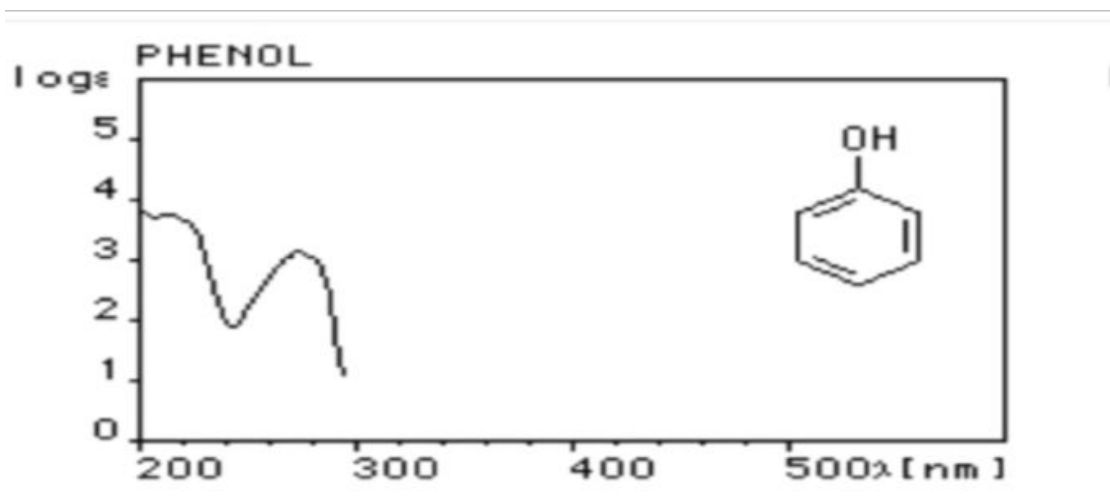
À température et pression normales, le phénol possède une constante cryoscopique molaire de  $6,84\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg/mol}$  et une constante ébullioscopie molaire de  $3,54\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{kg/mol}$ . À l'état pur, le phénol est de couleur blanche, mais il a tendance à s'oxyder lentement au contact de l'air, formant des traces de quinones qui le colorent d'abord en rose, puis en rouge. À  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , le phénol est modérément soluble dans l'eau (environ  $80\text{ g/L}$ ) et devient complètement soluble à partir de  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Il est également très soluble dans de nombreux solvants organiques courants tels que l'acétone, l'éthanol et l'oxyde d'éthyle. Le phénol réagit vivement avec des oxydants puissants, et ses réactions avec plusieurs substances comme le chlorure d'aluminium, le nitrobenzène ou le nitrate de sodium peuvent être violentes. À chaud, le phénol liquide attaque certains métaux tels que le plomb, le zinc et l'aluminium, ainsi que certains plastiques, notamment le polyéthylène. Le phénol est un produit modérément inflammable (point d'éclair en coupelle fermée à  $79\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) dont les vapeurs peuvent former des mélanges explosifs avec l'air dans une plage de concentrations allant de  $1,7\%$  à  $8,6\%$  en volume [12].

**Tableau I-1 : propriétés physiques de phénol.**

Formule	$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$
Masse molaire	$94\text{g/mol}$
Densité	$1,073\text{ g/cm}^3$
Température de fusion	$43\text{ }^{\circ}\text{C}$
Température d'ébullition	$182\text{ }^{\circ}\text{C}$
Solubilité	$76,04\text{ g/l d'eau}$

#### I.7.5. Spectroscopie UV-Visible

Le phénol présente une absorption dans la région des ultraviolets, et ses solutions sont généralement incolores. Lors de la déprotonation du groupement hydroxyle, le phénol se transforme en ion phénolate, ce qui entraîne un déplacement bathochrome (déplacement de la bande d'absorption vers des longueurs d'onde plus élevées) ainsi qu'un effet hyperchrome (augmentation de l'intensité d'absorption). La longueur d'onde d'absorption maximale ( $\lambda_{\text{max}}$ ) est de  $271\text{ nm}$ .



**Figure I.2 : Spectre UV-Visible du phénol.**

### **I.7.6. Domaine d'application du phénol**

Le phénol représente l'un des principaux intermédiaires utilisés dans l'industrie chimique. Chaque année, environ deux millions de tonnes sont consommées au sein de l'Union européenne. Il entre dans la composition de nombreux produits industriels, avec un usage prédominant en synthèse organique. Parmi ses principales applications, on peut citer [13]:

- Le traitement et le raffinage du pétrole.
- La fabrication de polymères et plastiques tels que les phénoplastes, les résines époxy et les polycarbonates.
- L'industrie pharmaceutique, notamment dans la production d'antiseptiques, d'analgésiques comme l'aspirine et le paracétamol.
- La fabrication d'explosifs, comme la mélinite dérivée de l'acide picrique.
- La production de détergents, de pesticides, de colorants et d'autres produits chimiques spécialisés.

### **I.7.7. Principe de production du phénol**

La production industrielle du phénol repose principalement sur deux procédés. Le plus utilisé est le procédé Höck, qui représente environ 93 % de la production mondiale. Il se déroule en trois étapes :

- Alkylation du benzène avec le propène pour former du cumène (iso propylbenzène).
- Oxydation du cumène en hydro peroxyde de cumène.
- Décomposition de ce composé pour obtenir du phénol et de l'acétone.

Le second procédé, appelé procédé Dow, consiste à oxyder le toluène pour former de l'acide benzoïque, suivi d'une décarboxylation oxydante permettant d'obtenir le phénol.

Une faible quantité de phénol est également obtenue à partir de la distillation du goudron de houille, utilisée comme source secondaire [14].

### **I.7.8. Comportement du phénol dans l'environnement**

Le phénol, notamment sous sa forme synthétique, est plus toxique que les composés naturels, ce qui rend nécessaire une réduction de ses émissions. Dans l'environnement, son comportement varie selon le milieu. Dans les eaux de surface stagnantes, environ 90 % des dérivés phénoliques se dégradent en sept jours.

- Dans le sol, la microflore permet une dégradation en un jour, et dans les suspensions terreuses, la dégradation complète survient après deux jours.
- Dans le milieu aquatique, le phénol est très soluble dans l'eau, formant des solutions toxiques qui peuvent contaminer les sources d'eau potable en aval des zones de rejet. Même à de faibles concentrations, il altère le goût et l'odeur de l'eau. Des études ont montré sa capacité à s'accumuler dans les poissons, provoquant des effets toxiques et des dommages génétiques, notamment à une concentration de 2 mg/L. La concentration maximale admissible dans la chair de poisson est de 35 mg/kg .
- Dans l'atmosphère, le phénol est un composé organique volatil (COV) qui peut contribuer à la formation de l'ozone troposphérique et au smog photochimique. Ses vapeurs, plus lourdes que l'air, peuvent former des mélanges explosifs en présence de chaleur. Il s'oxyde à l'air, un processus accéléré par la lumière ou par des impuretés à effet catalytique [16].

### **I.7.9. La concentration limite du phénol dans l'environnement**

En Algérie, la concentration maximale autorisée de phénol dans les rejets industriels est réglementée par le Décret exécutif n°06-141 du 19 avril 2006 (correspondant au 20 Rabie El Aouel 1427). Cette réglementation fixe des valeurs limites qui varient selon le type d'industrie. Par exemple, pour l'industrie de raffinage du pétrole, la limite est de 0,25 g/t, tandis qu'elle est de 0,5 g/t pour l'industrie mécanique [15]. En comparaison, la norme française impose une concentration maximale de 0,05 mg/L dans les effluents avant leur déversement dans les cours d'eau. Par ailleurs, l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a fixé la limite de concentration du phénol dans l'eau potable à 0,001 mg/L [17].

### **I.7.10. Différentes techniques de traitement des eaux polluées par le phénol**

Le phénol est un polluant particulièrement gênant dans les eaux usées en raison de sa toxicité et de son odeur désagréable. Plusieurs techniques de traitement ont été développées pour éliminer ce composé, regroupées en deux grandes catégories : destructives et non destructives.

#### **I.7.10.1. Les techniques destructives**

Ces méthodes visent à décomposer chimiquement ou biologiquement le phénol afin de l'éliminer complètement.

- **Les réactions d'oxydation** : Ce procédé repose sur l'utilisation d'oxydants puissants, comme dans la réaction de Fenton, qui utilise du peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) en présence d'un catalyseur. Ce système permet d'oxyder efficacement le phénol dans un milieu homogène, en produisant des radicaux capables de casser les liaisons de la molécule.
- **Les réactions photocatalytiques** ; Cette technique exploite l'action de la lumière sur des semi-conducteurs pour produire des radicaux libres très réactifs, comme les ions superoxydes, capables d'attaquer et d'oxyder les molécules organiques. Elle permet également de désinfecter l'eau et d'éliminer d'autres substances nocives.
- **Les traitements biologiques** : Ce type de traitement utilise des micro-organismes naturels – tels que des bactéries, des champignons ou des levures – pour dégrader le phénol. En conditions aérobies, l'oxygène est utilisé pour entamer la décomposition du noyau aromatique. En conditions anaérobies, la fermentation génère du méthane. Des espèces comme *Pseudomonas putida*, *Candida tropicalis*, *Fusarium* ou *Rhodococcus* sont particulièrement efficaces.

#### **I.7.10.2. Les techniques non destructives**

Ces procédés ne détruisent pas le phénol mais permettent de le séparer physiquement ou chimiquement de l'eau.

- **L'adsorption** ; Méthode simple et économique, elle consiste à fixer les molécules de phénol à la surface d'un matériau adsorbant. Elle est particulièrement adaptée aux faibles concentrations de polluant et se distingue par sa fiabilité et sa facilité de mise en œuvre.
- **L'extraction liquide-liquide** : Elle repose sur le transfert du phénol de l'eau vers un solvant organique. Cette technique est couramment utilisée dans

l'industrie pour traiter les eaux contenant des concentrations en phénol supérieures à 3,1 mg/L, notamment pour sa récupération ou sa valorisation [16].

# **Chapitre II : généralités sur l'adsorption**

## II.1. Introduction

L'adsorption est un phénomène de surface où il y a fixation ou bien accumulation des molécules de fluide à la surface d'un solide.

L'adsorption est une technique efficace de séparation des mélanges gazeux ou liquides dont les constituants sont différents par leur structure chimique, elle est largement utilisée pour la dépollution et la purification dans des domaines très variés comme les industries pétrolières, pétrochimiques et chimiques, aux applications environnementales et pharmaceutiques

Le solide est appelé adsorbant et la substance qui s'adsorbe est l'adsorbat que nous l'appellerons plus couramment soluté afin d'éviter toute confusion avec l'adsorbant [18].

## II.2. Historique

Le phénomène d'adsorption a été observé pour la première fois dans des liquides par LOWITZ en 1785. Quelques années plus tard, sa première application industrielle a eu lieu dans une raffinerie de canne à sucre, où il a été utilisé pour décolorer les sirops. En 1860, le charbon de bois a été employé pour éliminer les goûts et les odeurs de l'eau. Par la suite, au début du XXe siècle, les techniques d'adsorption se sont développées grâce aux avancées scientifiques.

L'adsorption est une technique utilisée depuis l'Antiquité, où les propriétés adsorbantes de certaines substances comme les argiles ou le charbon étaient déjà exploitées, notamment pour purifier des huiles ou désaliniser l'eau. Les premières mesures quantitatives des substances adsorbées remontent aux années 1770, tandis que les premières mesures de chaleur d'adsorption datent de 1854. Ce n'est qu'en 1881 que le terme « adsorption » est introduit par Kayser, lorsque le lien entre la quantité adsorbée sur un solide et la pression ambiante est établi. C'est également à cette époque que naît le concept d'« isotherme d'adsorption », qui décrit la quantité adsorbée en fonction de la pression à température constante.

En 1907, Freundlich propose la première relation mathématique pour décrire une courbe d'adsorption. Par la suite, plusieurs théories viennent enrichir la compréhension du phénomène : celles de Zsigmondy (1911), Polanyi (1914), et Langmuir (1916). Ce dernier introduit le concept fondamental d'une couche monomoléculaire adsorbée, qui sert de base à la détermination de la surface spécifique d'un solide. Ses travaux ouvrent la voie à ceux de Brunauer, Emmett et Teller (1938), qui étendent sa théorie [19].

## II.3. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène de surface qui consiste de transfert d'une substance d'un liquide vers une surface solide.

Ce processus peut se produire sous l'effet de forces physiques ou de liaisons chimiques. Il est généralement réversible (le processus inverse est appelé désorption).

La substance qui se fixe à l'adsorbant est appelée adsorbat, tandis que le matériau solide sur lequel se déroule le processus d'adsorption est désigné comme l'adsorbant. Ce phénomène spontané résulte de la présence de forces non compensées à la surface du matériau solide. Il s'exprime notamment par une variation de la concentration à l'interface entre deux phases non miscibles, telles qu'un gaz et un solide ou un liquide et un solide.

L'un des procédés utilisés pour le traitement de l'eau consiste à éliminer les matières organiques non biodégradables dissoutes dans la phase liquide ou gazeuse, ainsi qu'à extraire les métaux lourds susceptibles de s'y dissoudre [20].

#### **II.4. Type d'adsorption**

Selon les différents mécanismes d'interaction entre l'adsorbant (la surface) et l'adsorbat (les molécules adsorbées). On distingue deux types principaux d'adsorption :

- Physiosorption (ou adsorption physique)
- Chimisorption (ou adsorption chimique)

##### **II.4.1. L'adsorption physique**

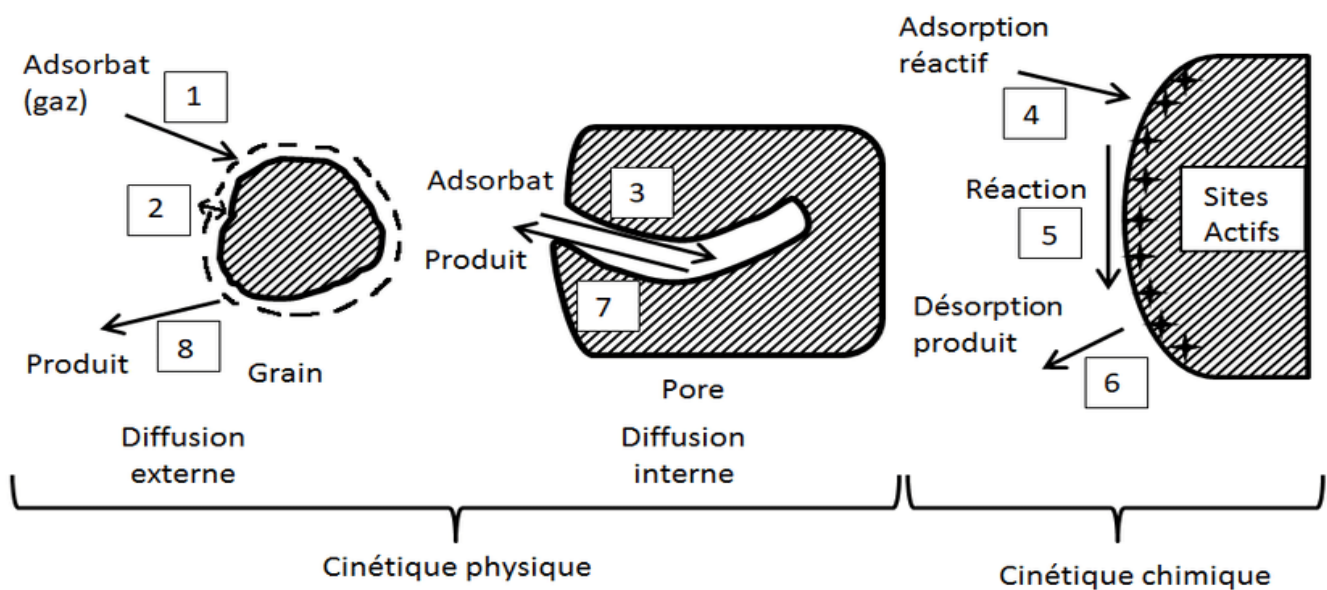
L'adsorption physique, la fixation des molécules d'adsorbat sur la surface d'adsorbant se fait essentiellement grâce aux forces de Van der Waals et aux forces dues aux interactions électrostatiques de polarisation, dipôle et quadrupole pour les adsorbants ayant une structure ionique. L'adsorption physique se produit sans modification de la structure moléculaire et est parfaitement réversible (c'est-à-dire que les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées en diminuant la pression ou en augmentant la température).

##### **II.4.2. l'adsorption chimique**

L'adsorption chimique, le processus résulte d'une réaction chimique avec formation de liaisons chimiques entre les molécules d'adsorbat et la surface d'adsorbant. L'énergie de liaison est beaucoup plus forte que dans le cas de l'adsorption physique et le processus est beaucoup moins réversible et même parfois irréversible [21].

**Tableau II.1** : Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Température du processus	Relativement basse à la température débilitions de l'adsorbat	Plus élevés
Chaleur d'adsorption	1 à 10 K Cal / mol	Supérieur à 10 K Cal / mol
Liaison	Physique de van der Waals	Chimique
Cinétique	Rapide	Lente
Formation de couche	Formation de multicouches	Formation de monocouche



**Figure II.1** : Adsorption physique et l'adsorption chimique

### II.5. Mécanisme d'adsorption

Lors de l'adsorption, les molécules se déplacent de la phase fluide vers le centre de l'adsorbant, en traversant plusieurs étapes à l'intérieur d'un grain d'adsorbant [22].

- **Étape 1 : Diffusion vers la surface**

L'adsorbat, qu'il soit en phase gazeuse ou liquide, diffuse à travers la couche limite située autour des particules de l'adsorbant.

Ce déplacement peut être influencé par la diffusion du soluté dans la solution, dans les pores de l'adsorbant, ou sur sa surface.

- **Étape 2 : Liaison à la surface**

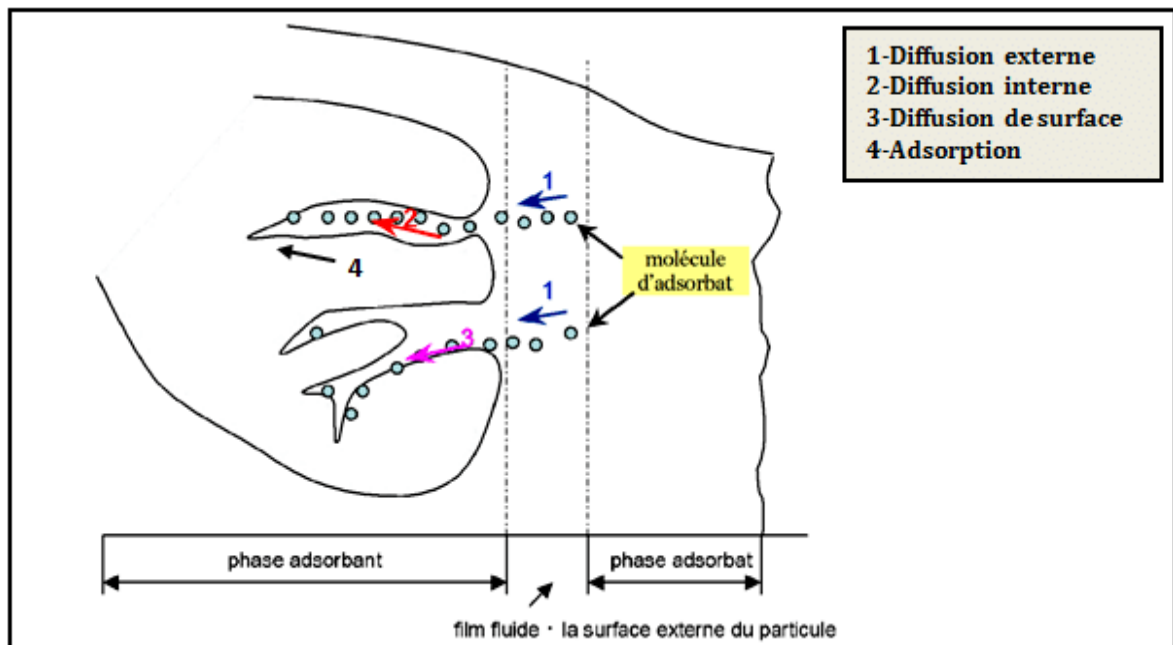
Une fois à la surface, l'adsorbat s'attache à l'adsorbant grâce à des forces de liaison.

Ces forces peuvent être des forces de van der Waals (physisorption) ou des liaisons chimiques (chimisorption).

La physisorption est généralement moins forte et plus facile à inverser, tandis que la chimisorption est plus forte et peut impliquer une modification des atomes.

▪ **Étape 3 : Désorption (facultative)**

Dans certains processus, l'adsorbat peut se désorber, c'est-à-dire qu'il peut se détacher de la surface de l'adsorbant et retourner dans la phase mobile.



**Figure II.2 :** Mécanisme de diffusion de l'adsorbat vers l'adsorbant.

**II.6. Les Facteurs influant sur le phénomène d'adsorption**

L'adsorption dépend de nombreux facteurs dont les principaux sont :

- **Les caractéristiques d'adsorbant :** polarité, volume poreux, surface spécifique et fonction superficielles.
- **Les caractéristiques de l'adsorbat :** polarité, solubilité et poids moléculaire.
- **Les paramètres physico-chimiques du milieu :** température et pH.
- **La nature de l'adsorbant :** La capacité d'adsorption est en relation directe avec la surface spécifique du matériau adsorbant. La cinétique de réaction est affectée par la taille des pores, leur forme et leur répartition.
- **L'effet de l'adsorption :** Pour obtenir une bonne adsorption il faut réaliser une affinité entre le solide et le soluté en général, les solides polaires adsorbent de

préférence les autres objets polaires, et inversement le solide apolaire adsorbe de préférence les composés apolaires.

- **Les dimensions des pores :** Les dimensions des pores sont très importantes lors de l'adsorption des corps dissous par rapport aux corps gazeux, car les dimensions des particules dissoutes peuvent changer dans de larges limites par rapport aux dimensions des particules gazeuses.
- **La surface spécifique :** Le mouvement d'adsorption est lié à l'éloignement de la surface externe des particules et est indispensable à l'utilisation de l'adsorbant. Cette surface externe représente une petite partie de la surface totale disponible pour l'adsorption. La surface totale d'adsorption augmente avec le broyage de la masse solide.
- **Effet de la température :** Les procédés d'adsorption simples sont des réactions chimiques qui dégagent toujours de la chaleur. Lorsque la température s'élève, le phénomène d'adsorption devient dominant. Au contraire, pour l'adsorption active, l'atteinte de l'état d'équilibre d'adsorption est lente et donc l'augmentation de la température favorise l'adsorption.
- **Effet du pH :** Le pH a une grande influence sur les propriétés d'adsorption et dans la plupart des cas les meilleurs résultats sont obtenus à la valeur de pH la plus basse, cette propriété s'applique particulièrement à l'adsorption de substances acides [33].
- **L'effet de la fonction acidité :** L'effet de la fonction acidité sur la capacité d'adsorption diffère selon les surfaces adsorbants et la nature du matériau adsorbant, comme des modifications de la fonction acidité qui conduisent à une augmentation de la solubilité de l'adsorbant dans la solution réduisent la quantité d'adsorption, au contraire, des changements qui conduisent à une diminution de la solubilité des particules adsorbées. En outre, dans le cas de surfaces contenant des sites polarisés ou chargés, la quantité d'adsorption augmente si la surface acquiert une charge contraire à la charge des particules adsorbées par l'effet de l'acidité, et inversement, la quantité d'adsorption diminue si la surface ou les particules adsorbées acquièrent une charge similaire.
- **L'effet du solvant :** Le solvant affecte le comportement du processus d'adsorption par son interférence avec le soluté dans la solution, et chaque fois que la substance est moins soluble dans le solvant, sa force d'adsorption augmente à la surface de l'adsorbant, et le solvant interfère avec La surface adsorbant et l'interférence

dépendent de la composition chimique des deux, et le solvant interfère également avec le soluté dans la couche adsorbant sur la surface adsorbant.

- **Effet de la concentration :** En général, la quantité d'adsorbant de la solution augmente avec l'augmentation de sa concentration. Dans certains cas, le processus d'adsorption s'arrête lorsqu'une seule couche d'adsorbant se forme à la surface, mais il peut continuer dans d'autres cas. Pour former plusieurs couches d'adsorbant à la surface de l'adsorbant, et alors la quantité d'adsorbant est supérieure à l'adsorption monocouche. La figure qui montre la relation entre la quantité d'adsorbant et la concentration à l'équilibre est appelée isotherme d'adsorption, et à partir de la forme de l'isotherme, nous pouvons prédire la relation entre la quantité d'adsorbant et la concentration de l'adsorbant dans la solution [22].

## II.7. Les isothermes d'adsorption

Sont des courbes expérimentales représentant les variations (masse ou volume) de l'adsorbant adsorbé (gaz ou liquide) par poids d'adsorbant en fonction de la concentration (en phase liquide) ou de la pression (en phase gazeuse).

Elles sont exprimées généralement sous formes d'équations mathématiques, non cinétiques, les quelles sont obtenues à partir d'expériences réalisées en réacteur statique. Elles permettent essentiellement :

- De déterminer le taux de recouvrement de la surface d'un support par un substrat.
- D'identifier le type d'adsorption pouvant se produire.
- De choisir l'adsorbant qui conviendrait le mieux à la rétention de l'adsorbant.

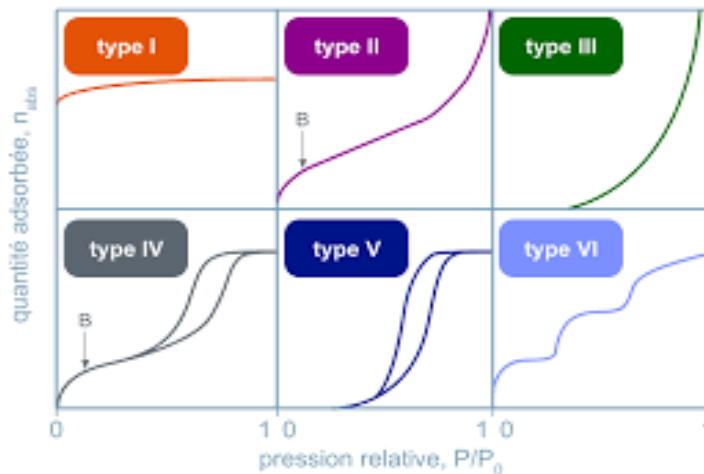
### II.7.1. Classification des isothermes d'adsorption :

Les mesures expérimentales des quantités adsorbées  $V$  en fonction de la pression  $P$  à température constante  $T$ , peuvent être représentées sous la forme de courbes isothermes d'adsorption  $V = f(P)$ , ou  $m = f(p/p_0)$  [23].

- **Isotherme de type I :** Isotherme de Langmuir, faible surface externe, adsorption monocouche à saturation, Ce type d'isotherme se rencontre lorsque le solide adsorbe une seule couche d'adsorbant (adsorption chimique).
- **Isotherme de type II :** Isotherme en S, physisorption, adsorption multicouche sur des solides non (ou peu) poreux.
- **Isotherme de type III :** Elle est caractéristique des adsorptions où la chaleur d'adsorption de l'adsorbant est inférieure à la chaleur de liquéfaction,

donc il y a formation de multicouches dès le début de l'adsorption, de plus, la surface du solide n'est pas homogène.

- **Isotherme de type IV et V** : Caractérisent bien la présence de pores et de capillaires dans l'adsorbant : les parties inférieures de ces courbes sont analogues à celles des types II et III, et ceci pour les mêmes raisons, mais leurs parties supérieures pourraient s'expliquer par le remplissage des capillaires, qui est terminé à une pression inférieure à la pression saturante.
- **Isotherme de type VI** : Présente plusieurs "marche" : processus d'adsorption par couche, surface non poreuse uniforme, hauteur de la marche représente la capacité de la monocouche.



**Figure II.3** : Les formes d'isothermes d'adsorption

### II.7.2. Modélisation des isothermes d'adsorption

Plusieurs lois ont été proposées pour l'étude de l'adsorption. Elles expriment la relation existant entre le développement de l'adsorption et la pression du gaz à adsorber à une température donnée.

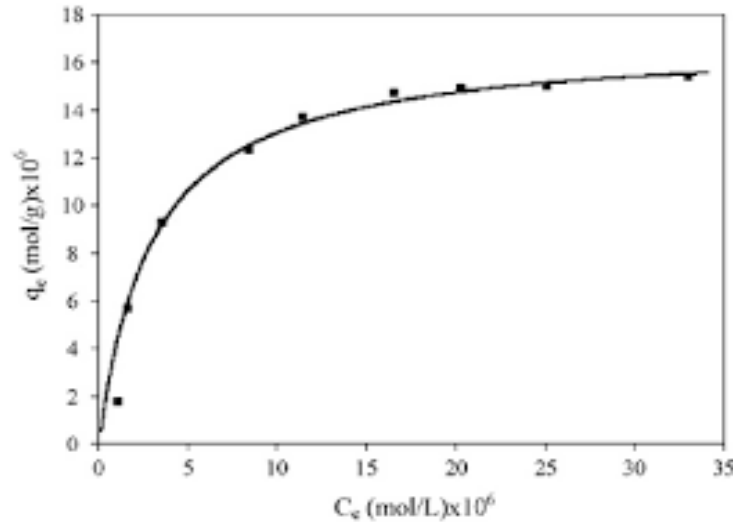
Nous rappellerons ci-dessous les principales lois utilisées.

#### II.7.2.1. Isotherme de Langmuir

La théorie de Langmuir (1918) a permis l'étude de l'adsorption de molécules de gaz sur des surfaces métalliques. Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- La surface du solide est uniforme, tous les sites sont identiques.
- Chaque site ne peut fixer qu'une seule molécule, donc l'adsorption est localisée et l'enthalpie d'adsorption demeure constante quel que soit le taux de recouvrement.
- Il n'y a pas d'interaction entre les molécules adsorbées à la surface.

- La réaction est réversible (c'est-à-dire qu'il y a équilibre entre l'adsorption et la désorption).
- L'adsorption se produit en monocouche.



**Figure II.4 :** Représentation l'isotherme de Langmuir.

Il est décrit par l'expression suivante [22]::

$$q_e = q_{\max} \times \frac{b \times C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (\text{II.1})$$

Où :

$C_e$  : concentration à l'équilibre (mg/l) ;

$q_{\max}$  : quantité d'adsorption maximale en (mg/g) ;

$b$  : paramètre de Langmuir ;

La linéarisation de l'équation donne :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max} \cdot K_L} \quad (\text{II.2})$$

Nous avons déterminé les paramètres de Langmuir à savoir  $q_{\max}$  et  $K_L$ ; et déterminé aussi le facteur de séparation  $R_L$  défini par :

$$R_L = \frac{1}{1 + C_0 K_L} \quad (\text{II.3})$$

Où

$R_L$  : facteur de séparation (adimensionnel).

$K_L$  : constante de Langmuir (L/mg)

Selon les valeurs de obtenues le procédé d'adsorption est jugé comme :

- Non favorable : si  $R_L > 1$
- Linéaire : si  $R_L = 1$
- Favorable : si  $0 < R_L < 1$
- Irréversible : si  $R_L = 0$

### II.7.2.2. Isotherme de Freundlich

Le modèle de Freundlich est une relation empirique proposée par Herbert Freundlich en 1909. Il permet de représenter la charge d'un adsorbant en substance visée en équilibre avec la concentration de cette substance (ou sa pression partielle si c'est un gaz) dans le milieu environnant.

Il est utilisable de préférence aux faibles valeurs de concentration ou pression, loin des valeurs de saturation.

Le modèle empirique de Freundlich est basé sur l'adsorption sur des surfaces hétérogènes [24] :

$$q_e = K_f \cdot C_e^{1/n} \quad (\text{II.4})$$

Où :

$C_e$ : concentration à l'équilibre (mg/l).

$q_e$  : quantité du produit adsorbé par unité de masse d'adsorbant (mg/g) ;

$K_f, n$ : des constantes de Freundlich ;

La linéarisation de cette équation implique un passage des termes sous forme logarithmique :

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (\text{II.5})$$

## I.8. Modèles de la cinétique d'adsorption

L'étude de la cinétique d'adsorption revêt une importance pratique majeure pour l'optimisation de l'utilisation d'un adsorbant dans un processus d'adsorption.

L'objectif de la modélisation de la cinétique d'adsorption, qui se réfère à l'évolution de la quantité de soluté adsorbée sur un support solide au fil du temps, est d'identifier les mécanismes régissant la vitesse d'adsorption.

On identifie parmi ces modèles les modèles du pseudo-premier, pseudo-second ordre et diffusion intra-particulaire.

### I.8.1. Modèle cinétique de pseudo-premier-ordre

C'est le plus ancien des modèles cinétiques, il a été proposé par Lagergren en 1898. Son expression est de pseudo-premier ordre pour l'adsorption dans un système liquide :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t) \quad (\text{II.6})$$

Où :

$K_1$ : Constante de vitesse pour une cinétique de premier ordre ( $\text{min}^{-1}$ ) ;

$q_e$  : Quantité d'adsorption à l'équilibre (mg/g) ;

$q_t$  : Quantité d'adsorption à l'instant t (mg/g).

L'équation (II.6) permet la détermination de la constante de vitesse d'adsorption des solutés. La forme linéarisée de cette équation est obtenue par intégration entre l'instant initial et l'instant t.

L'intégration de l'équation donne :

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log } q_t - \frac{K_1}{2.303} t \quad (\text{II.7})$$

### I.8.2. Modèle cinétique de pseudo-deuxième-ordre

La vitesse d'adsorption de pseudo second ordre, établi par Blanchard, dépend de la quantité adsorbée à l'équilibre, Il est représenté par la formule suivante :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2 (q_e - q_t)^2 \quad (\text{II.8})$$

Où :

$k_2$  : la constante de vitesse pour une cinétique du deuxième ordre

$q_t$  : la capacité d'adsorption à l'instant t

$q_e$  : la capacité d'adsorption à l'équilibre

L'intégration de l'équation (II.8) donne:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \times q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (\text{II.9})$$

### I.8.3. Modèle de diffusion intra- particulaire

Dans de nombreux procédés d'adsorption, la diffusion à l'intérieur des particules est souvent l'étape qui limite, en particulier dans un réacteur fermé agité. Weber et Morris ont proposé la possibilité de diffusion au sein des particules.

$$q_t = K_{\text{int}} \times t^{\frac{1}{2}+C} \quad (\text{II.10})$$

Où:

$K_{\text{int}}$ : la constante de la diffusion intra-particule en ( $\text{mg} / \text{g} \text{ min}^{1/2}$ ).

### **II.9. Domaine d'application de l'adsorption**

L'adsorption est largement utilisée dans de nombreux secteurs industriels et environnementaux en raison de son efficacité à séparer, purifier ou capter certaines substances. Voici les principaux domaines d'application :

- Traitement des eaux
- Traitement de l'air et des gaz
- Industrie chimique et pétrochimique
- Industrie pharmaceutique
- Agroalimentaire
- Énergie et environnement
- Biotechnologie

# **Chapitre III : généralités sur charbon actif**

### **III.1. La biomasse**

#### **III.1.1. Définition**

La biomasse désigne l'ensemble des résidus organiques d'origine alimentaire ou biologique, tels que les écorces, feuilles, écailles, noyaux, aiguilles, cadavres d'animaux, bactéries et champignons. Elle peut se présenter sous différentes formes : solide (comme les sciures ou les granulés de bois), liquide (tels que les biocarburants et les huiles), ou gazeuse (comme le biogaz). La biomasse constitue une source d'énergie renouvelable et joue un rôle important dans la valorisation et la gestion durable des déchets [25].

#### **III.1.2. La constitution de la biomasse**

La biomasse d'origine végétale est principalement constituée de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, d'azote, ainsi que d'autres éléments chimiques dont la proportion peut varier en fonction du type de culture. Elle est essentiellement formée de trois composants majeurs : la cellulose, l'hémicellulose et la lignine [25]:

- La cellulose : il s'agit d'un polysaccharide linéaire composé d'unités de D-glucose liées entre elles par des liaisons  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4). La présence de nombreuses liaisons hydrogène intramoléculaires confère à la cellulose une grande stabilité thermique.
- L'hémicellulose : c'est un polysaccharide ramifié constitué de divers monosaccharides. Contrairement à la cellulose, elle possède une structure amorphe et est plus facilement dégradable.
- La lignine : c'est un polymère tridimensionnel complexe, composé d'unités de phénylpropane reliées entre elles par des liaisons de type ester, carbone-carbone et éther. Elle assure la rigidité et la résistance des parois cellulaires végétales.

#### **III.1.3. L'utilisation de la biomasse**

L'utilisation de la biomasse connaît un intérêt croissant dans divers procédés industriels, en raison de ses propriétés avantageuses ainsi que de la facilité de son stockage. Ses domaines d'application varient en fonction des besoins [25]:

- Elle constitue une source d'énergie renouvelable majeure, notamment dans les centrales électriques.
- Elle est exploitée dans l'extraction d'huiles végétales, utilisées dans la fabrication de produits cosmétiques et de biocarburants liquides.
- Elle intervient dans la production de biocarburants solides, liquides ou gazeux.

- Elle est également utilisée dans la fabrication de revêtements biodégradables et de films d'emballage, entre autres usages. Grâce à son abondance naturelle, son caractère écologique et son efficacité démontrée dans de nombreuses études, la biomasse est de plus en plus valorisée comme ressource durable, en particulier dans le traitement des eaux usées et dans d'autres secteurs industriels.

## **III.2. Charbon actif**

### **III.2.1. Définition**

Les charbons actifs sont des matériaux très utilisés pour leurs excellentes propriétés adsorbantes, ce qui les rend indispensables dans divers domaines tels que les industries alimentaire, pharmaceutique, chimique, pétrolière, métallurgique et automobile. Leur succès grandissant s'explique par la possibilité d'augmenter considérablement leur surface spécifique, pouvant atteindre 1000 à 2000 m<sup>2</sup>/g, grâce à des procédés d'activation chimique ou physique. Cette grande surface favorise une capacité d'adsorption élevée, ce qui les rend également utiles dans le domaine de la catalyse, où ils servent souvent de supports pour les réactions chimiques [1]. Les charbons actifs sont constitués de petites cristallites de graphite, disposées de manière désordonnée. Grâce à cette structure particulière, ils sont largement employés dans diverses applications, telles que la récupération des vapeurs de solvants et d'hydrocarbures, la décoloration des solutions sucrées, la purification de l'eau ainsi que l'élimination des mauvaises odeurs [26].

### **III.2.2. Origine**

La fabrication du charbon actif passe impérativement par l'identification et la sélection de la matière première. Cette dernière peut provenir de nombreux matériaux riches en carbone, répartis selon leur origine comme suit :

#### **Origine végétale**

Une grande variété de matières d'origine végétale peut être utilisée dans la synthèse des charbons actifs, et ce sous différentes formes, telles que : le bois, les noyaux de jujubes, les coquilles d'arachide, la bagasse, le bambou, les tiges de coton, les écorces d'orange, le grignon d'olive, le marc de café ainsi que le marc de raisin.

#### **Origine animale**

Les charbons actifs peuvent être obtenus à partir de matières d'origine animale, principalement les os, mais également, dans une moindre mesure, à partir de la chair.

### **Origine minérale**

Les charbons activés peuvent également être produits à partir de matières premières minérales combustibles, notamment le charbon minéral (houille), les résidus pétroliers, le coke ou encore la tourbe [27].

## **III.3. Procède de fabrication du charbon actif**

### **III.3.1. Carbonisation**

La carbonisation est une étape fondamentale dans la fabrication du charbon actif. Elle consiste à chauffer un matériau carboné (comme le bois ou les coques de fruits secs) à une température d'environ 700 °C, sous une atmosphère inerte, c'est-à-dire en absence d'oxygène, afin d'éviter toute combustion. Ce traitement thermique provoque l'élimination des éléments non carbonés, principalement l'oxygène et l'hydrogène, ce qui entraîne une augmentation de la teneur en carbone du matériau. Sous l'effet de la chaleur, la structure du précurseur évolue progressivement vers une forme plus ordonnée, proche de celle du graphite. Les atomes de carbone restants s'organisent en réseaux aromatiques, formant des feuillets disposés de manière irrégulière. Cette organisation donne naissance à la porosité primaire, qui est essentielle pour le développement ultérieur des propriétés adsorbantes du charbon actif.

### **III.3.2. Activation**

L'activation est l'étape suivante après la carbonisation, visant à développer davantage la surface spécifique et la structure poreuse du matériau carbonisé. On distingue deux méthodes principales :

#### **Activation physique**

Elle consiste à exposer le matériau carbonisé à un agent oxydant gazeux tel que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) ou l'oxygène, à haute température (entre 800 °C et 1000 °C), pendant une durée allant de 24 à 72 heures. Cette méthode permet d'augmenter considérablement la surface spécifique du charbon actif, passant de 5–6 m<sup>2</sup>/g à plus de 600 voire 2000 m<sup>2</sup>/g.

#### **Activation chimique**

Utilisée principalement pour le bois, cette méthode implique l'imprégnation du précurseur avec une solution concentrée d'un agent chimique oxydant ou déshydratant (comme l'acide phosphorique ou le chlorure de zinc). Ensuite, le matériau est soumis à une pyrolyse entre 400 et 800 °C en atmosphère inerte. Le produit est ensuite lavé et séché. Cette méthode permet

d'obtenir le charbon actif en une seule étape. Les conditions d'activation (température, durée, type d'agent chimique) influencent fortement la porosité finale. De plus, l'activation chimique permet une réduction significative des goudrons et composés volatils, ce qui améliore le rendement global de production [27].

#### **III.4. Caractéristiques physico-chimique du charbon actif**

Le charbon actif se présente sous différentes formes, notamment en poudre ou en grains. Cette diversité influence considérablement ses propriétés physiques. Les conditions d'utilisation du charbon peuvent être définies en fonction de ces caractéristiques [28, 29] :

##### **III.4.1. La granulométrie**

La taille des grains conditionne la vitesse de diffusion ; plus les grains sont fins, plus la diffusion vers le centre est rapide.

##### **III.4.2. La dureté**

Elle reflète la résistance du charbon actif à l'abrasion, au tassement, à l'attrition ainsi qu'aux vibrations. C'est un paramètre essentiel dans la conception du système de traitement et dans l'estimation de sa durée de vie. Elle permet également d'évaluer la formation éventuelle de fines particules pouvant nuire au bon fonctionnement des installations (colmatage du lit, dépôts dans les vannes et les conduites). Cette propriété dépend à la fois de la matière première utilisée et du degré d'activation.

##### **III.4.3. La masse volumique**

C'est une donnée importante à considérer lors du remplissage des équipements de traitement.

##### **III.4.4. Le taux de cendres**

Il indique la qualité du charbon ; un taux faible signifie une faible teneur en matières inorganiques, amorphes ou inertes. Les cendres sont en général constituées de sels de calcium et d'oxydes métalliques.

##### **III.4.5. Les fonctions de surface**

Celles-ci varient selon la méthode d'activation. On peut y retrouver des éléments tels que l'azote, l'oxygène, l'hydrogène, le chlore et le soufre. Ces hétéroatomes forment des groupes fonctionnels organiques (appelés fonctions pendantes), tels que les cétones, éthers, amines et phosphates, situés à la périphérie des cristallites de charbon. Ces groupes influencent l'acidité ou la basicité du matériau, peuvent modifier ses propriétés catalytiques et parfois gêner l'adsorption des molécules non polaires.

### III.5. Les différentes formes du charbon actif

Le charbon actif se décline en plusieurs formes adaptées à ses différentes applications, notamment sous forme de fibres, de poudre, ou de grains. Voici les principales formes utilisées :

#### III.5.1. Le charbon actif en poudre (CAP)

Cette forme se compose de particules très fines, similaires à de la poudre. Selon la norme ASTM D5158, un charbon est classé comme poudreux si 95 à 100 % de ses particules passent à travers un tamis dont les mailles ont une ouverture inférieure ou égale à 0,177 mm.

Le CAP est couramment utilisé dans le traitement des eaux, grâce à sa grande surface spécifique qui favorise une adsorption rapide et efficace.



**Figure III.1** : Charbon actif poudre.

#### III.5.2. Le charbon actif en grains (CAG)

Ce type de charbon peut se présenter sous forme granulée ou extrudée. Il est classé selon la taille des grains, en fonction de l'application :

En phase liquide : tailles typiques comme 8×20, 20×40, ou 8×30. En phase gazeuse : tailles comme 4×6, 4×8, ou 4×10 [6]. Par exemple, un charbon 20×40 est constitué de particules qui passent à travers un tamis américain standard N° 20 (0,84 mm) mais sont retenues par un tamis N°40 (0,42mm).

Le CAG est apprécié pour sa facilité de manipulation, sa durabilité, et son adaptabilité dans les systèmes à lit fixe ou fluidisé.



**Figure III.2 :** charbon actif en grain.

### III.5.3. Le charbon actif extrudé

Ce type de charbon est obtenu par un procédé d'extrusion qui lui donne une forme cylindrique régulière, avec un diamètre variant de 0,8 mm à 5 mm. Il est principalement utilisé en phase gazeuse, en raison de plusieurs avantages [30]:

- ✚ Faible perte de charge (permet une circulation fluide des gaz).
- ✚ Excellente résistance mécanique (ne se casse pas facilement).
- ✚ Très faible production de poussière, ce qui le rend adapté aux installations sensibles.



✚ **Figure III.3 :** Charbon actif extrudé.

### III.6. Utilisation de charbon actif [27]

- **Traitement de l'eau** : Il est couramment utilisé pour améliorer la qualité de l'eau domestique et industrielle en :
  - éliminant les mauvaises odeurs, la couleur et le goût désagréable,
  - retirant les polluants organiques indésirables restants après les traitements classiques.
- **Récupération des solvants** : Dans certaines industries, le charbon actif permet de récupérer des solvants utilisés dans les procédés de production, réduisant ainsi les pertes et l'impact environnemental.
- **Purification de l'air** : Il est efficace pour assainir l'air dans les espaces très fréquentés comme :
  - Les restaurants,
  - Les hôpitaux, où il contribue à éliminer les odeurs et divers composés volatils.
- **Lutte contre la pollution atmosphérique** : Le charbon actif sert à filtrer les gaz et vapeurs toxiques, participant ainsi à la réduction de la pollution de l'air, notamment dans les zones industrielles.
- **Industrie sucrière** : Il est utilisé pour :
  - Purifier la solution sucrée,
  - Éliminer les impuretés et la coloration, ce qui permet d'obtenir des cristaux de sucre plus purs, essentiels pour les étapes de séparation et de cristallisation.
- **Séparation de composés chimiques** : Par exemple, il peut être employé pour éliminer l'ammoniac.
- Contenu dans une solution d'acide acétique, facilitant ainsi la purification de ce dernier.

### III.7. Les charbons actifs ferromagnétique

#### III.7.1. Introduction

Au cours des dernières décennies, les composites carbone-magnétiques issus de matériaux carbonés (notamment la biomasse résiduelle, le carbone poreux et le graphène) ont suscité un vif intérêt dans les applications environnementales, grâce à leur facilité de séparation dans les solutions aqueuses et à leur efficacité prometteuse dans l'élimination des polluants. Diverses

méthodes ont été développées pour introduire des particules magnétiques dans les matrices carbonées, telles que : La coprécipitation hydrothermale, l'irradiation micro-ondes, Et la carbonisation simultanée. Cependant, la coprécipitation hydrothermale génère des phases magnétiques instables en milieu acide, et ces techniques restent souvent complexes et chronophages.

La méthode de carbonisation simultanée, quant à elle, consiste à pyrolyser thermiquement une biomasse imprégnée de fer (Fe), permettant de former des composites carbone-magnétiques. Toutefois, cette approche montre des limites en termes de développement de porosité et de surface spécifique, en raison des effets inhibiteurs des phases magnétiques sur la structure poreuse du matériau obtenu, ce qui freine son application à grande échelle, notamment dans la valorisation des déchets biomasse [28].

### **III.7.2. Définition**

Les charbons actifs ferromagnétiques sont des matériaux carbonés poreux présentant des propriétés ferromagnétiques. L'incorporation de nanoparticules magnétiques dans le squelette de la structure carbonée confère au charbon actif des propriétés magnétiques permanentes, facilitant ainsi grandement sa récupération dans le milieu d'utilisation par simple application d'un champ magnétique. Les premiers matériaux poreux magnétiques ont été développés à partir de polymères ou de silice, mais ceux à base de carbone, appelés charbons actifs ferromagnétiques, ont été mis au point plus récemment en raison des avantages du carbone, notamment sa meilleure stabilité thermique et ses propriétés chimiques intéressantes par rapport aux polymères et aux silices [29].

### **III.7.3. Importance des matériaux poreux magnétiques**

Les matériaux poreux magnétiques jouent un rôle essentiel dans plusieurs domaines d'application, notamment en tant que catalyseurs dans certaines réactions chimiques, ou encore comme adsorbants pour l'élimination de divers composés organiques, des métaux lourds et autres polluants. L'intérêt majeur des charbons actifs ferromagnétiques réside dans la facilité de leur récupération en solution après traitement, grâce à l'utilisation de séparateurs magnétiques. De plus, cette technologie permet d'éviter les problèmes de colmatage des filtres, fréquemment observés avec l'usage des charbons actifs traditionnels en poudre. Lorsqu'ils présentent une homogénéité dans leurs propriétés magnétiques, ces charbons peuvent être utilisés sous forme de poudre fine, optimisant ainsi la surface de contact avec le milieu à traiter. La séparation magnétique constitue une technologie récente et prometteuse dans le domaine du traitement des eaux usées. Elle suscite un intérêt croissant en raison de son efficacité, de sa rapidité et de sa simplicité, comparativement à d'autres méthodes comme

la filtration ou la décantation. Elle permet d'éliminer rapidement les contaminants adsorbés dans le milieu aqueux par simple application d'un champ magnétique externe. Les charbons actifs ferromagnétiques peuvent être aisément récupérés même en présence de fortes concentrations de matières solides, contrairement aux charbons actifs classiques dont la récupération par filtration est souvent difficile à mettre en œuvre. En effet, dans les procédés traditionnels, le charbon actif en poudre est généralement perdu et non récupérable, tandis que les charbons ferromagnétiques peuvent, eux, être récupérés et réutilisés efficacement [28].

#### **III.7.4. Types et effet magnétisme dans les matériaux**

Les matériaux magnétiques se répartissent en deux catégories principales : les matériaux magnétiques durs, qui conservent leur aimantation après exposition à un champ magnétique intense, et les matériaux magnétiques doux, qui ne gardent que peu ou pas de magnétisme résiduel. Ces derniers sont couramment utilisés dans la fabrication d'électroaimants, où une démagnétisation rapide est nécessaire, ainsi que dans les circuits magnétiques en courant alternatif tels que les transformateurs et les machines électriques, afin de réduire les pertes d'énergie liées à l'hystérésis. De manière plus générale, les solides peuvent également être classés, du point de vue magnétique, en deux grandes familles : les matériaux à magnétisme non ordonné (ou magnétisme non coopératif) et ceux à magnétisme ordonné (ou magnétisme coopératif).

##### **III.7.4.1. Magnétiques non ordonnés**

Les matériaux magnétiques non ordonnés se caractérisent par des interactions faibles entre les atomes au sein du réseau cristallin, ce qui empêche l'établissement d'un ordre magnétique à longue distance. En conséquence, ces matériaux ne présentent pas d'aimantation spontanée à l'échelle macroscopique. On distingue principalement deux types de comportements dans cette catégorie : le diamagnétisme, qui est une propriété fondamentale de la matière et se manifeste par une susceptibilité magnétique négative ; et le paramagnétisme, qui résulte de la présence d'électrons non appariés dans les ions ou d'électrons libres dans les métaux. Des matériaux comme le mica, la pyrite, la pouzzolane ou encore certains alliages fer/terres rares (par exemple le néodyme) sont classés comme paramagnétiques, tandis que des substances comme l'aluminium sont considérées comme amagnétiques, c'est-à-dire qu'elles ne présentent pratiquement aucune réponse au champ magnétique.

### III.7.4.2. Magnétiques ordonnés

Les matériaux magnétiques ordonnés sont des substances dans lesquelles les moments magnétiques des électrons s'organisent spontanément, même en l'absence d'un champ magnétique externe. Cette organisation régulière résulte d'une interaction électrostatique appelée interaction d'échange, responsable de l'alignement des spins électroniques. Selon le type d'agencement, on distingue trois formes d'ordre magnétique : un alignement parallèle des moments dans le cas du ferromagnétisme, un alignement antiparallèle avec compensation totale dans le cas de l'antiferromagnétisme, et un alignement antiparallèle partiellement compensé dans le cas du ferrimagnétisme. Cet ordre à longue portée n'est cependant stable que jusqu'à une certaine température critique, au-delà de laquelle l'agitation thermique devient suffisante pour désorganiser l'alignement spontané. Cette température est appelée température de Curie ( $T_c$ ) pour les ferromagnétiques, et température de Néel ( $T_n$ ) pour les antiferromagnétiques et ferrimagnétiques. Au-dessus de ces seuils, le matériau perd son aimantation spontanée et adopte un comportement paramagnétique [29].

La classification des types de magnétisme repose sur la manière dont les moments magnétiques individuels des atomes ou ions s'orientent lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué. Le comportement magnétique d'un matériau dépend donc de cette orientation spécifique. Les matériaux ferromagnétiques et paramagnétiques, par exemple, acquièrent une aimantation lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique. En les classant selon l'alignement des moments magnétiques individuels en présence d'un champ extérieur [29].

### III.8. L'utilisation du magnétisme pour le traitement des eaux

La séparation magnétique en dépollution repose sur l'ajout de particules magnétiques qui absorbent différents polluants (qu'ils soient organiques ou inorganiques), puis l'extraction de ces particules à l'aide d'un gradient de champ magnétique.

Il est possible d'améliorer considérablement l'efficacité de la séparation des déchets des effluents en utilisant le magnétisme dans les processus de traitement de l'eau, ce qui demeure un défi à résoudre actuellement. Par exemple, Yano et al a réalisé une étude qui a comparé l'efficacité de la séparation magnétique à champ élevé (HGMS) à celle d'un filtre à sable. Il a été observé que la vitesse d'écoulement requise pour  $150 \text{ mg.L}^{-1}$  de déchets solides à travers un filtre à sable est de  $8,10^{-1} \text{ m.s}^{-1}$ , contrairement à  $6,10^{-2} \text{ m.s}^{-1}$ .

Cette méthode a été développée pour introduire des particules d'oxyde de fer dans des eaux contenant des métaux lourds. Ces particules agissent comme des noyaux autour desquels les oxydes des cations à séparer se condensent.

De plus en plus de chercheurs s'efforcent de créer des adsorbants magnétiques extrêmement performants. Les oxydes de fer magnétiques les plus largement reconnus, notamment la maghémite  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  et la magnétite  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , peuvent être facilement synthétisés par Co-précipitation alcaline.

Ils peuvent être utilisés individuellement ; par exemple : les nanoparticules magnétiques ont été utilisées par A. Ngomsik et al. pour adsorber divers métaux, notamment  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Eu}^{3+}$  et  $\text{La}^{3+}$ .

Pour optimiser l'adsorption des colorants anioniques, H. Tavallali et A. Danechyar ont réussi à accrocher des tensioactifs cationiques à la surface de nanoparticules en les associant à des oxydes de fer.

**Chapitre IV :  
adsorption de phénol  
sur charbon actif**

## **IV.1. Introduction**

Ce chapitre est réalisé au laboratoire pédagogique de département de génie pétrochimie à l'université 20 août 1955-Skikda, tout d'abord nous avons préparé le charbon actif à partir de coque de pistache, ensuite, nous avons fait une étude expérimentale sur les différents paramètres qui jouent un grand rôle sur l'adsorption de phénol en solution aqueuse sur les adsorbants.

## **IV.2. Matériels et appareillages**

### **IV.2.1. Matériels**

- Verre de montre.
- Balances analytique type "Kern".
- Tubes à essais.
- Spatule cuillère de laboratoire.
- Eprouvette graduée (10 ml, 50 ml)
- Fiole jaugée (100ml, 500 ml, IL).
- Béchers (500 ml).
- Pipette graduée.

### **IV.2.2. Appareillages**

- Spectrophotométrie UV-visible

Les spectres d'adsorption en UV-visible (ou spectroscopie UV-Vis) sont utilisés pour analyser l'absorption de la lumière par une substance dans la gamme des ultraviolets (200–400 nm) et du visible (400–800 nm)

- **Un agitateur magnétique**

Un agitateur magnétique est un dispositif de laboratoire utilisé pour mélanger ou agiter des liquides, souvent dans un bécher ou un ballon, de manière silencieuse, efficace et sans contact direct.

- **Four à moufle**

Les fours à moufle sont des fours où les objets sont chauffés sans être directement exposés à la flamme du four.

- **Balance analytique**

Nous utilisons la balance analytique pour peser de petites quantités dans notre étude expérimentale avec une grande précision, de la marque Shimadzu

- **pH-mètre.**

### **IV.3. Préparation de charbon actif magnétique**

#### **IV.3.1. Préparation les coquilles de pistache**

- **Lavage**

Cette opération consiste à laver abondamment les coquilles pour éliminer les impuretés, poussières et matières organiques résiduelles.

- **Séchage**

Sécher à l'air libre ou dans un four à 70 °C pendant plusieurs heures jusqu'à élimination de l'humidité.

- **Le Broyage**

Le broyage a été effectué dans le but d'obtenir des matériaux homogènes adaptés aux études en laboratoire, en réduisant les particules à une petite taille à l'aide d'un robot électrique

#### **IV.3.2. Préparation charbon actif magnétique à partir les coquilles de pistache**

Dans notre travail, le charbon actif magnétique (CAM) a été synthétisé en utilisant une version modifiée de la méthode décrite par Yin et al. La procédure de préparation est détaillée comme suit :

Dans une solution comprenant 100 ml d'eau déminéralisée, 25 g de  $ZnCl_2$  et 6,25 g de  $FeCl_3 \cdot 6H_2O$  ont été uniformément mélangés. Ensuite, 25 g du coquille de pistache préparé ont été ajoutés à la solution. Le mélange résultant a été mélangé pendant 2 heures, suivi d'une période d'immersion de 24 heures et enfin séché dans une étuve à 80°C.

Les particules obtenues ont été introduites dans un four à moufle à 400 °C et maintenues pendant 1 heure. Il est à noter que la température de pyrolyse a un impact important sur le volume des pores et la surface du charbon, avec des températures plus élevées qui améliorent la teneur en carbone. Après pyrolyse, l'échantillon a été laissés refroidir naturellement à température ambiante, lavés avec de l'eau déminéralisée pour les neutraliser et séchés à 105 °C pendant 24 heures. Par la suite, l'échantillon a été conservé dans un dessiccateur dans des conditions hermétiques et sèches, à l'abri de la lumière et de l'humidité.

### **IV.4. Les effets de certain paramètre sur l'adsorption du phénol**

#### **IV.4.1. L'influence du temps sur l'adsorption**

Pour déterminer le temps de contact optimal, une masse déterminée de charbon actif magnétique est introduite dans une solution aqueuse de phénol dont la concentration initiale est de 5 mg/L. Le mélange est maintenu à température ambiante et agité à l'aide d'un agitateur magnétique afin d'assurer une bonne homogénéisation.

À intervalles de temps réguliers, des échantillons sont prélevés à l'aide d'une seringue, puis analysés par spectrophotométrie UV-Visible à la longueur d'onde maximale  $\lambda_{max} = 271$  nm,

afin de suivre l'évolution de la concentration en phénol dans la solution. Ce suivi se poursuit jusqu'à stabilisation de la concentration, indiquant l'atteinte de l'équilibre.

La capacité d'adsorption du phénol à l'instant t et à l'équilibre sont calculés à l'aide des relations appropriées :

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e).V}{m} \quad (IV.1)$$

Où :

$q_t$  : La quantité adsorbée au temps t (mg/g) ;

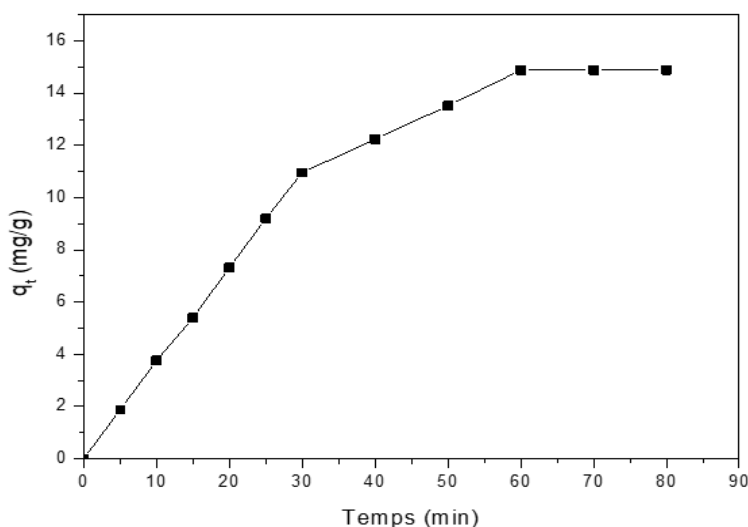
$C_0$  : Concentration initiale en soluté en phase liquide (mg/g) ;

$C_t$  : Concentration du soluté en phase liquide au temps t (mg/l) ;

V : Volume de solution (l) ;

m : La masse de l'adsorbant (g).

Les résultats sont présentés sur la figure ci-dessous :



**Figure IV.1 :** L'influence du temps sur la quantité adsorbée du phénol.

D'après la figure V.1 qui représente l'effet du temps de contact sur l'adsorption de phénol sur le charbon actif magnétique.

Nous remarquons que la quantité adsorbée augmente avec le temps de contact jusqu'à l'obtention d'un palier, celui-ci indique que l'équilibre est atteint. L'équilibre est atteint au bout de 60 min. La rapidité d'adsorption initiale s'explique par le grand nombre de sites actifs disponibles à la surface des adsorbants au début de l'adsorption.

#### IV.4.2. L'influence de la masse de l'adsorbant sur l'adsorption

Dans une série de béchers de 500 ml, série d'expérience a été réalisée à différentes masses charbon actif magnétique à une concentration initiale égale à 5 mg/l pour phénol. En utilisant les masses de charbon actif (25; 50; 125; 200; 300 ; 400 mg). Puis agiter dans l'agitateur (jar-test) à une température ambiante, pendant 60 min. On effectue des prélèvements et analysés par UV-visible à une longueur d'onde  $\lambda_{\max}=271$  nm.

Le rendement d'adsorption du phénol est calculé par la relation suivante :

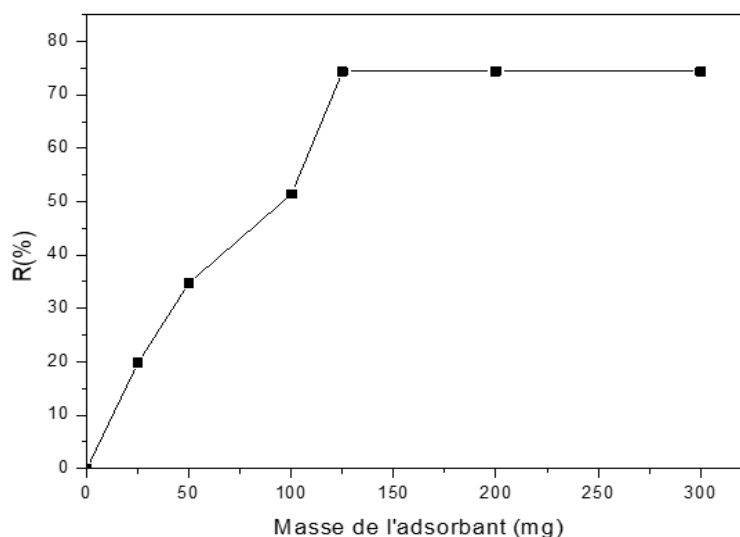
$$R\% = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \cdot 100 \quad (IV.2)$$

Où :

$C_0$  : La concentration initiale en colorant (mg/l) ;

$C_t$ : La concentration en colorant au cours du temps (mg /l).

Les résultats sont portés sur la figure suivante



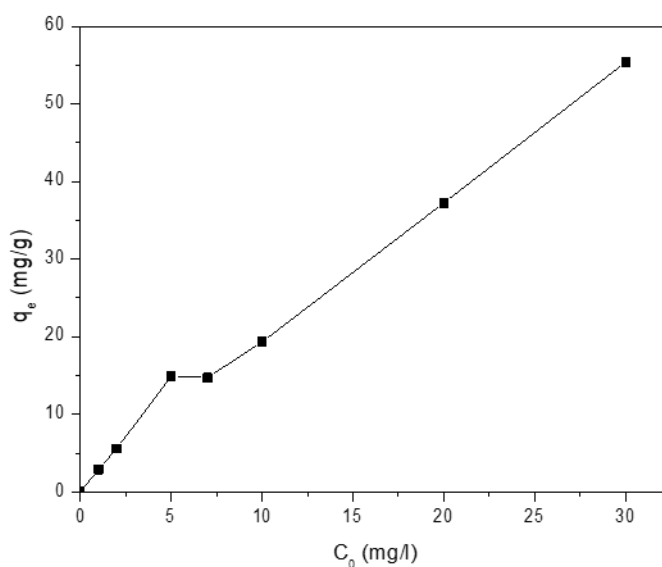
**Figure IV.2 :** Effet de la masse de charbon actif magnétique sur le rendement d'adsorption.

D'après la figure IV.2, on observe que l'efficacité d'adsorption du phénol augmente progressivement avec l'augmentation de la masse de charbon actif magnétique jusqu'à un maximum d'efficacité à partir de 125 mg. Cette augmentation s'explique par la multiplication des sites d'adsorption disponibles lorsque la masse de l'adsorbant augmente, ce qui permet de retirer une plus grande quantité de phénol.

#### IV.4.3. L'influence de la concentration initiale sur l'adsorption

Dans cette partie, on étudie l'effet de la concentration initiale du phénol sur le charbon actif magnétique. On prend 500 ml de solutions aqueuses avec des concentrations différentes de phénol (01, 02, 07, 10, 20 et 30 mg/l). On y introduit une quantité d'adsorbant  $m=125$  mg (charbon actif magnétique). Le mélange est agité pendant 60 min

Les résultats sont portés sur la figure suivante :



**Figure IV.3:** Influence de la concentration initiale sur la quantité adsorbée.

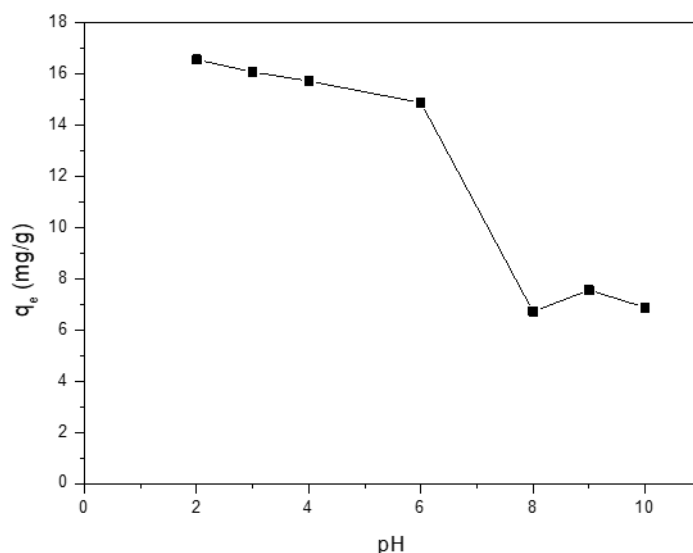
D'après la courbe obtenue on constate que la quantité adsorbée augmente avec l'augmentation de la concentration initiale du phénol. Donc on a relation proportionnelle entre la concentration initiale et la quantité adsorbée, Dans ce cas il y aura plus de molécules qui vont diffuser vers les sites poreux à la surface du support et par conséquent la rétention du phénol par l'adsorbant devient plus importante.

#### IV.4.4. L'influence de pH sur l'adsorption

Pour étudier l'influence du pH sur l'adsorption de phénol, des expériences d'adsorption ont été menées en mélangeant la quantité optimale de charbon actif magnétique avec solution de

phénol de concentration 5 mg/l, le pH des différentes solutions étant ajusté entre 2 et 10 par addition de solutions de HCl (0,1 M) ou NaOH (0,1 M) et agitées pendant 60 minutes à température ambiante.

Les résultats sont portés sur la figure suivante :



**Figure IV.4 :** Influence de pH sur la quantité adsorbée.

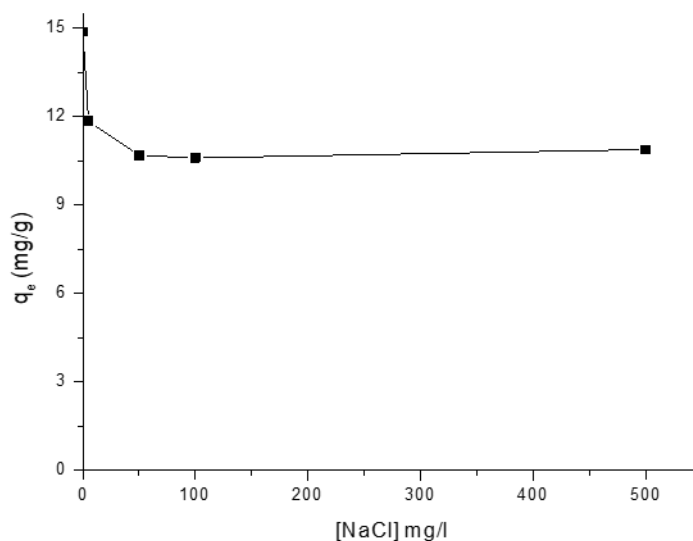
D'après la courbe obtenue on constate que la meilleure capacité d'adsorption du phénol est en milieu acide dans un pH est égal à 2, et diminue nettement avec l'augmentation du pH. Cela montre que le pH est un facteur clé dans le processus d'adsorption, influençant fortement les interactions entre le phénol et le charbon actif magnétique.

#### **IV.4.5. L'influence de la force ionique sur l'adsorption**

Nous avons étudié l'effet de chlorure de sodium (NaCl) sur l'adsorption de phénol. Pour cela, nous avons préparé une solution de phénol de concentration 5 mg/l. Ensuite, nous avons ajouté différentes concentrations de NaCl (5 mg/l, 50 mg/l, 500 g/l) à ces solutions. Nous avons agité et mélangé les solutions contenant des sels avec la quantité optimale d'adsorbant préparé pendant une durée de 60 minutes.

Notre objectif est de comprendre comment les sels peuvent influencer l'adsorption de phénol.

Les résultats sont portés sur la figure suivante :



**Figure IV.5 :** Influence de la force ionique sur la quantité adsorbée.

Le graphique montre que l'augmentation de la concentration en NaCl entraîne une légère diminution de la quantité adsorbée de phénol jusqu'à 50 mg/L, puis une stabilisation au-delà. Cette tendance suggère que l'effet de la force ionique est limité et que l'adsorption du phénol sur le charbon actif magnétique est peu influencée par la présence d'ions en solution.

L'adsorption semble donc principalement gouvernée par des interactions non électrostatiques, ce qui traduit la stabilité et l'efficacité du charbon actif magnétique même en milieu salin.

#### IV.5. Modélisation de la cinétique d'adsorption

Les résultats ont été analysés utilisant les modèles du pseudo-premier, pseudo-second ordre et diffusion intra-particulaire. Les constantes de vitesse d'adsorption pour le pseudo-premier, pseudo-second ordre et diffusion intra-particulaire sont déterminées graphiquement.

Nous avons calculé les constantes de vitesses pour les trois modèles à partir des droites obtenues.

##### IV.5.1. Modèle cinétique de pseudo-premier-ordre

Le modèle pseudo-premier-ordre est donné par l'expression:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1 (q_e - q_t) \quad (IV.3)$$

Où :

$k_1$  : la constante de vitesse pour une cinétique du pseudo premier ordre;

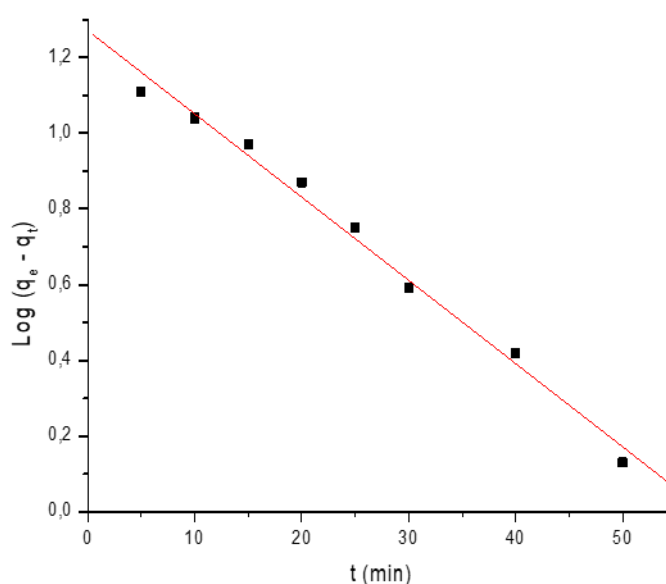
$q_t$  : la capacité d'adsorption à l'instant  $t$ ;

$q_e$  : la capacité d'adsorption à l'équilibre;

l'intégration de l'équation donne:

$$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log}(q_e) - \frac{k_1}{2.303} \times t \quad (\text{IV.4})$$

Nous avons donné sur la figure suivante la modélisation de la cinétique d'adsorption par le modèle de pseudo-premier-ordre:



**Figure IV.6 :** Modélisation de la cinétique d'adsorption de phénol sur le charbon actif magnétique par le modèle pseudo- premier -ordre.

#### IV.5.2. Modèle cinétique de pseudo-deuxième-ordre:

Le modèle pseudo-deuxième-ordre est donné par l'expression suivante:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (\text{IV.5})$$

Où :

$k_2$  : constante de vitesse pour une cinétique du deuxième ordre en (g/mg/min);

$q_e$ : quantité adsorbée à l'équilibre en (mg/g) ;

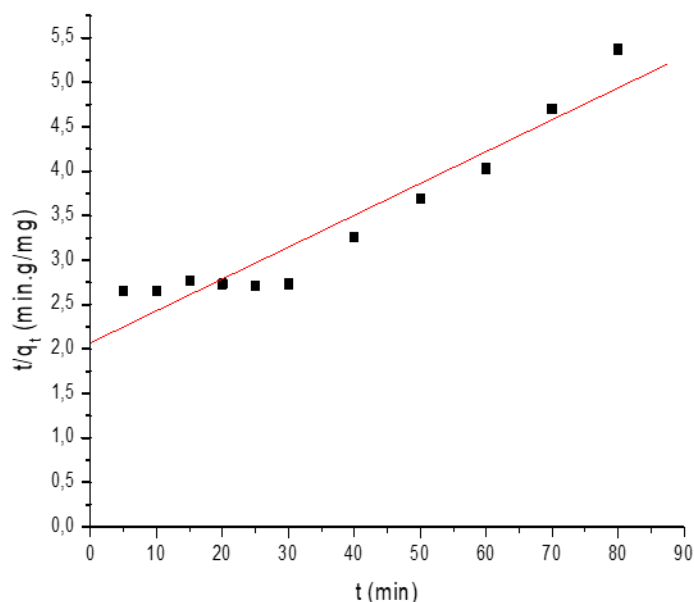
$q_t$  : quantité adsorbée au temps  $t$  en (mg/g) ;

$t$  : temps de contact en(min) ;

L'intégration de l'équation donne :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 \times q_e^2} + \frac{1}{q_e} \times t \quad (IV.6)$$

Nous avons donnés sur la figure suivante la modélisation de la cinétique d'adsorption par le modèle de pseudo-deuxième-ordre:



**Figure IV.7 :** Modélisation de la cinétique d'adsorption de phénol sur le charbon actif magnétique par le modèle pseudo- deuxième -ordre.

### IV.5.3. Diffusion intra- particulaire

Le modèle de diffusion intra-particulaire est proposé par Weber et Morris. La molécule est supposée migrer par diffusion dans le liquide, et pénétrer dans les pores.

Selon l'axe de ceux-ci. En cours de route elle s'équilibre localement le long de la paroi du pore, par adsorption. Il est représenté par l'équation suivante :

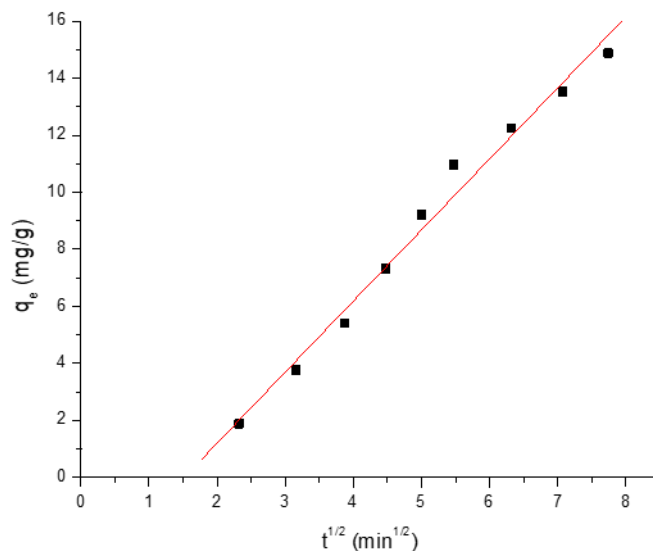
$$q_t = K_{int} \times t^{\frac{1}{2}} + C \quad (IV.7)$$

Où:

$k_{int}$ : la constante de la diffusion intra-particule en (mg /g min<sup>1/2</sup>).

La constante  $k_{int}$  est déduite de la pente (B) de la partie linéaire de l'équation représentant ce modèle.

Nous avons donné sur la figure suivante la modélisation de la cinétique d'adsorption par le modèle diffusion intra-particulaire:



**Figure IV.8 :** Modélisation de la cinétique d'adsorption de phénol sur le charbon actif magnétique par le modèle diffusion intra-particulaire

Les paramètres de l'équation de pseudo-premier-ordre, de deuxième ordre et diffusion intra-particulaire obtenus pour le charbon actif sont regroupés dans le tableau suivante:

Tableau IV.1: Les paramètres des modèles pseudo-premier-ordre, deuxième ordre et diffusion intra-particulaire.

**Tableau IV.2 :** Les paramètres des modèles pseudo-premier-ordre, deuxième ordre et diffusion intra-particulaire.

	$q_e$ (mg/g) exp	Pseudo 1 <sup>er</sup> ordre			Pseudo 2 <sup>ème</sup> ordre			diffusion intra-particulaire		
		$q_e$ cal (mg/g)	$R^2$	$K_1$ (min <sup>-1</sup> )	$q_e$ cal (mg/g)	$R^2$	$K_2$ (min <sup>-1</sup> )	$K_{int}$	C	$R^2$
<b>CAM</b>	14.88	18.67	0.98	0.05	27.92	0.91	6.19 10 <sup>-4</sup>	2.49	-3.77	0.98

D'après les valeurs du coefficient de corrélation et les valeurs reportées dans le tableau ci-dessus, nous remarquons que les valeurs estimées de la quantité adsorbée ( $q_e$ ) calculées en utilisant le modèle pseudo-premier ordre sont plus proches des valeurs expérimentales pour l'adsorption du phénol sur le charbon actif magnétique, tandis que les valeurs sont très éloignées lorsqu'on utilise le modèle pseudo-deuxième ordre.

Il s'avère que le modèle pseudo-premier ordre est le plus fiable pour décrire le processus d'adsorption du phénol sur le charbon actif magnétique.

Les résultats obtenus en appliquant le modèle cinétique de diffusion intra particulaire pour l'adsorption du phénol sur le charbon actif magnétique, on constate que la courbe obtenue entre l'ordonnée  $qt$  et l'abscisse est linéaire avec un coefficient de corrélation  $R^2=0,98$ . Dans ce cas la diffusion intra particulaire est impliquée dans le processus de sorption. On constate aussi que la courbe ne passe pas par l'origine, ce qui démontre que la diffusion dans les pores de charbon actif magnétique n'est pas le seul mécanisme limitant de la cinétique d'adsorption, il y a sûrement d'autres mécanismes impliqués.

#### **IV.6. Modélisation des isothermes d'adsorption**

Les paramètres obtenus à partir de la modélisation des isothermes fournissent des informations importantes sur le mécanisme d'adsorption, les propriétés de surface est les affinités adsorbant-adsorbat. Les deux modèles à deux paramètres les plus couramment utilisés sont les modèles de Langmuir et Freundlich.

##### **IV.6.1. Modèle de Langmuir**

Ce modèle est très utile pour l'adsorption mono moléculaire d'un soluté en formant une monocouche à la surface d'un adsorbant.

Il est décrit par l'expression suivante :

$$q_e = q_{\max} \times \frac{b \times C_e}{1 + b \cdot C_e} \quad (\text{IV.8})$$

Où :

$C_e$  : concentration à l'équilibre (mg/l) ;

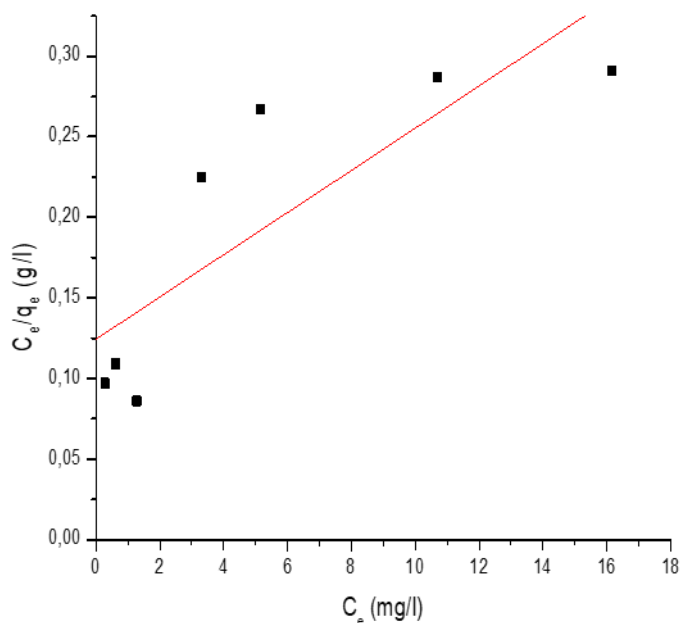
$q_{\max}$  : quantité d'adsorption maximale en (mg/g) ;

$b$  : paramètre de Langmuir ;

La linéarisation de l'équation donne :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\max}} + \frac{1}{q_{\max} \cdot K_L} \quad (\text{IV.9})$$

Nous avons donnés sur la figure suivante la modélisation d'isotherme d'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique selon le modèle de Langmuir :



**Figure IV.9 :** Isotherme d'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique selon le modèle de Langmuir.

#### IV.6.2. Modèle de Freundlich

Le modèle empirique de Freundlich est basé sur l'adsorption sur des surfaces hétérogènes

$$q_e = K_f \cdot C_e^{1/n} \quad (\text{IV.10})$$

Où :

$C_e$ : concentration à l'équilibre (mg/l).

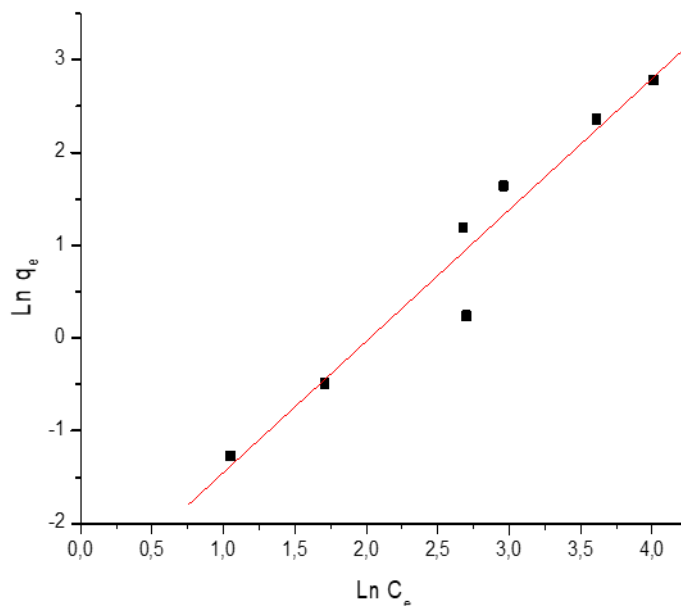
$q_e$ : quantité du produit adsorbé par unité de masse d'adsorbant (mg/g) ;

$K_f, n$ : des constantes de Freundlich ;

La linéarisation de cette équation implique un passage des termes sous forme logarithmique :

$$\text{Ln } q_e = \text{Ln } K_f + \frac{1}{n} \text{Ln } C_e \quad (\text{IV.11})$$

Nous avons donnés sur la figure suivante la modélisation d'isotherme d'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique selon le modèle de Freundlich :



**Figure IV.10 :** Isotherme d'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique selon le modèle de Freundlich

Les paramètres de l'équation de Langmuir et Freundlich obtenus pour les deux adsorbants sont regroupés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.2 :** Résultats des valeurs des paramètres de Langmuir et Freundlich.

	Langmuir				Freundlich		
	$q_m$ (mg/g)	$R_L$	$K_L$	$R^2$	$1/n_f$	$K_F$	$R^2$
Charbon actif magnétique	76.39	0.90-0.24	0.105	0.69	1.41	0.056	0.94

Les résultats obtenus montrent que :

- La comparaison des coefficients de corrélation de la forme linéaire de deux modèle Langmuir et modèle de Freundlich indique clairement que le coefficient de corrélation de modèle Freundlich est meilleur pour les données d'équilibre d'adsorption expérimentales par rapport au modèle Langmuir.

- Le facteur de séparation comprise entre 0 et 1 ( $0 < RL < 1$ ) cela indique que l'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique est favorable selon le modèle de Langmuir.
- La capacité d'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique est 76.39 mg/g.

# **Conclusion général**

## Conclusion Générale

Ce mémoire a porté sur l'étude de l'élimination d'un polluants organiques, en particulier le phénol, à travers l'utilisation de charbon actif magnétique préparé à partir de coques de pistache, un déchet agroalimentaire abondant et peu coûteux.

L'objectif principal de cette étude était d'étudier l'utilisation du charbon actif magnétique à partir des coques de pistache. Il est largement disponible en Algérie et enlève le phénol dans les solutions aqueuses. À travers tous les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La quantité adsorbée augmente avec le temps de contact jusqu'à l'obtention d'un palier, celui-ci indique que l'équilibre est atteint. L'équilibre est atteint au bout de 60 min.
- L'efficacité d'adsorption du phénol augmente progressivement avec l'augmentation de la masse de charbon actif magnétique jusqu'à un maximum d'efficacité à partir de à 125 mg.
- La quantité adsorbée augmente avec l'augmentation de la concentration initiale du phénol. Donc on a relation proportionnelle entre la concentration initiale et la quantité adsorbé.
- Le pH est un facteur clé dans le processus d'adsorption, influençant fortement les interactions entre le phénol et le charbon actif magnétique.
- L'effet de la force ionique est limité sur l'adsorption du phénol sur le charbon actif magnétique.
- Le modèle pseudo-premier ordre est le plus fiable pour décrire le processus d'adsorption du phénol sur le charbon actif magnétique.
- La diffusion intra particulaire est impliquée dans le processus de sorption.
- La diffusion dans les pores de charbon actif magnétique n'est pas le seul mécanisme limitant de la cinétique d'adsorption, il y a sûrement d'autres mécanismes impliqués.
- Le coefficient de corrélation de modèle Freundlich est meilleur pour les données d'équilibre d'adsorption expérimentales par rapport au modèle Langmuir.
- Le facteur de séparation comprise entre 0 et 1 ( $0 < RL < 1$ ) cela indique que l'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique est favorable selon le modèle de Langmuir.

- La capacité d'adsorption de phénol sur charbon actif magnétique est 76.39 mg/g.

**Références bibliographiques**

- [1] <https://fr.scienceaq.com/Chemistry/100118748.html>
- [2] <https://www.britannica.com/science/organic-compound/Chemical-synthesis>
- [3] <https://fr.differkinome.com/articles/chemistry-science-nature/difference-between-organic-compound-and-inorganic-compound.html>
- [4] <https://etrevert.net/chimie-organique/>
- [5] S. L. Ng, C.E. Seng, P.E. Lim , Quantification of bioregeneration of activated carbon and activated rice husk loaded with phenolic compounds, *Chemosphere*, 75 (2009) 1392–1400.
- [6] [https://1drv.ms/w/c/d065845fa47c42ac/EfbIM\\_jrYC9MIN8DWKX8UC0BnuMSRrTlr3rQidYDQAJZdA?e=HCjYB5](https://1drv.ms/w/c/d065845fa47c42ac/EfbIM_jrYC9MIN8DWKX8UC0BnuMSRrTlr3rQidYDQAJZdA?e=HCjYB5)
- [7] Arris S, 2008. Etude expérimentale de l'élimination des polluants organiques et inorganiques par adsorption sur des sous-produits de céréales. Thèse de doctorat.
- [8] INERIS, « Phénol Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques », Institut National de l'Environnement Industriel et des risques INERIS3DRC01-25590-01DR021. N°2-1 (2005) 1-47.
- [9]. Ehtash Moamer. Purification des eaux polluées par du phénol dans un pertracteur à disques tournants. Thèse De doctorat, Spécialité : Génie des Procédés, institut National des Sciences Appliquées de Rouen .26 octobre 2011.
- [10] Organisation Mondiale de la Santé, « Environmental health criteria for chlorophenols », (1987).
- [11] L. Layton, « Reversing itself, FDA expresses concerns over health risks from BsPA », *Washington Post*, U.S.A (2010).
- [12] Bonnard N, Brondeau M T, Jargot D, Lofon D, Miraval S, Schneider O, 2011.
- [13] Z. Haddoum, O. Maouche, « Adsorption de phénol sur les mésoporeux LaNO<sub>3</sub>/SBA-15 », mémoire de Master, Université de Bejaia (2015).
- [14]. MESSIKH Nabil . Application des reseaux de neurones pour predirele rendement de l'extraction liquide-liquide de phénol. These de Doctorat en génie des procédés, Option : Génie chimique, Université Badji Mokhtar-Annaba .2008.
- [15]. DECRETS. Journal officiel de la république algérienne N° 26. 24 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 23 avril 2006.

- [16] M.Chermat,Z.Kermiche,"Utilisation de charbon actif en poudre dans un procédé d'adsorption du phénol en milieu aqueuse", Mémoire de Master, Université Salah Boubnider Constantine 03(2018-2019)
- [17]. Ehtash Moamer. Purification des eaux polluées par du phénol dans un pertracteur à disques tournants. Thèse De doctorat, Spécialité : Génie des Procédés, institut National des Sciences Appliquées de Rouen .26 octobre 2011.
- [18] Phénomènes de surface et Catalyse hétérogène/2021.2022/Chimie de surface et catalyse : cours et applications De.S.BOUR/ Phénomènes de surface et catalyse hétérogène Dr.H.GH
- [19] Sciences et Technologies des Poudres /03.2025/[https://nte.mines-albi.fr/STP/fr/co/uc\\_Introduction.html#:~:text=L'adsorption%20%3A%20petite%20histoire.,d%C3%A9salinisation%20d'eau%20par%20exemple](https://nte.mines-albi.fr/STP/fr/co/uc_Introduction.html#:~:text=L'adsorption%20%3A%20petite%20histoire.,d%C3%A9salinisation%20d'eau%20par%20exemple)
- [20]L'adsorptionetl'environnement/04.2025/<https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/l-adsorption-et-l-environnement>
- [21] Lian-Ming SUN, Francis MEUNIER, Nicolas BRODU, Marie-Hélène MANERO/ Adsorption - Aspects théoriques /le 14 sept. 2020/<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/operations-unitaires-extractions-fluide-fluide-et-fluide-solide-42332210/adsorption-j2730/adsorption-et-adsorbantsj2730v2niv10001.html#:~:text=Il%20existe%20deux%20types%20de,l'adsorption%20chimique%20ou%20chimisorption>
- [22] BOULKENAFET Hiba , DARDAR Amani , MESSIKH Mohammed Anis /Etude d'adsorption d'un colorant sur un charbon actif issu les coquilles de noix /2023.2024.
- [23] Phénomènes de surface et Catalyse hétérogène/2021.2022/Chimie de surface et catalyse : cours et applications De.S.BOUR/ Phénomènes de surface et catalyse hétérogène Dr.H.GH
- [24] Guide des techniques des industries de procédé/[http://processs.free.fr/page/modelisation-isothermes-adsorption/3503#voir\\_aussi](http://processs.free.fr/page/modelisation-isothermes-adsorption/3503#voir_aussi)
- [25]:Boumediene, Fatiha. Traitement des effluents industriels par adsorption sur différentes matrices solides (biomasse). Thèse de doctorat LMD, Génie des Procédés, Spécialité Procédés Environnement, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Département de Génie des Procédés,
- [26]Ndongo Kounou, G. (2021). Synthèse et caractérisation des تم charbons actifs ferromagnétiques à partir des épluchures de manioc (Manihot dulcis) : Application à l'adsorption du bleu de méthylène en solution aqueuse (Thèse de doctorat, Université de Yaoundé I). Sous la direction de Ketcha J. M.
- [27] : MUZATTIZ J G B. Dégradation de polluants organiques en phase gaz et en phase aqueuse en présence de matériaux à base d'aluminosilicates par des Procédés d'Oxydation

Avancés. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. (2010).

[28] :Coulson J.M., Richardson J.F. (1979). Chemical Engineering, vol 3 2nd Edition, (1979).

[29] : H.BELACHI .Étude de l'adsorption des composé organique par le charbon actif magnétique dans les solutions simples et binaires. Master en chimie. Université de Mostaganem.

[30]:N.J. Krou; Thèse de doctorat: Etude expérimentale et modélisation d'un procédé séquentiel AD-OX d'élimination de polluants organiques, Université de Toulouse, 2010

[31]:C. Ayrat; Thèse de doctorat: Elimination de polluants aromatiques par oxydation catalytique sur charbon actif, Université de Toulouse, 2009.

[32] :Sarah Khirani. Procédés hybrides associant la filtration membranaire et l'adsorption/échange ionique pour le traitement des eaux usées en vue de leur réutilisation. Thèse de doctorat

[33] : H.A.SLASLI, 2002, Modélisation de l'adsorption par les charbon active microporeux :approches théorique et expérimentale, thèse de doctorat de Neuchâtel

## Résumé

L'adsorption est une technique efficace et largement utilisée pour l'élimination des polluants grâce à la fixation de substances à la surface de matériaux solides.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'adsorption de phénol par le charbon actif.

Différentes variables expérimentales ont été analysées : le temps d'équilibre, la masse de l'adsorbant et la concentration initiale de phénol le  $pH$  initial et la force ionique. La capacité d'adsorption a été déterminée en utilisant les isothermes de Langmuir et de Freundlich. La cinétique d'adsorption de phénol a été étudiée en utilisant les équations de pseudo-premier ordre, pseudo-deuxième ordre et la diffusion intra-particulaire. Le modèle de pseudo premier ordre s'est avéré être le meilleur pour la modélisation cinétique, tandis que pour l'isotherme, le modèle de Langmuir était le plus adapté.

Mots-clés : adsorption, phénol, charbon actif.

## Abstract

Adsorption is an effective and widely used technique for the removal of pollutants through the attachment of substances onto the surface of solid materials.

The objective of this study is to investigate the adsorption of phenol using activated carbon.

Various experimental variables were analyzed: equilibrium time, adsorbent mass, initial phenol concentration, initial  $pH$ , and ionic strength.

The adsorption capacity was determined using Langmuir and Freundlich isotherms.

Phenol adsorption kinetics were studied using pseudo-first order, pseudo-second order, and intra-particle diffusion models.

The pseudo-first-order model was found to best fit the kinetic data, while the Langmuir model was the most suitable for the isotherm.

Keywords: adsorption, phenol, activated carbon.

## ملخص

الامتزاز هو تقنية فعّالة وشائعة تُستخدم لإزالة الملوثات، وذلك من خلال تثبيت المواد على سطح مواد صلبة. يهدف هذا العمل إلى دراسة امتزاز مادة الفينول باستخدام الفحم النشط. تمت دراسة عدة عوامل تؤثر على عملية الامتزاز، مثل: زمن التوازن، كمية الفحم المستخدم، التركيز الابتدائي للفينول، الرقم الهيدروجيني ( $pH$ ) الابتدائي، والقوة الأيونية. تم حساب قدرة الامتزاز باستخدام نماذج لانغموير وفرويندليش. كما تمت دراسة الحركية ( $kinetics$ ) باستخدام معادلات الرتبة الأولى شبه الحقيقية، الرتبة الثانية شبه الحقيقية، ونموذج الانتشار داخل الجزيئات. أظهرت النتائج أن نموذج الرتبة الأولى هو الأفضل لتمثيل حركية الامتزاز، بينما نموذج لانغموير كان الأنسب لوصف الإيزوثيرم (منحنى الامتزاز). الكلمات المفتاحية: الامتزاز، الفينول، الفحم النشط.