

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE  
POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPÉRIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
Université Kasdi MERBAH  
Ouargla



Faculté des Sciences Appliquées  
Département de Génie des  
Procédés

Mémoire

MASTER ACADIMIQUE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie Chimique

Présenté par :

Ferdaous ARAR et Fatma Zohra BACHI

Thème

**Impact des propriétés de surface des charbons  
actifs sur l'adsorption de composé phénolique.**

Soutenu publiquement :

Devant le jury composé de :

Soulef BENABDESSELAM	Pr. (UKM Ouargla)	Président
Abdelhakime BENARIMA	MCB (UKM Ouargla)	Examinateur
Ridha CHERRAYE	MCB (UKM Ouargla)	Encadreur

Année universitaire : 2023/2024

# Remerciements

Nous tiensons à exprimer toute notre reconnaissance à mon Directeur de mémoire Monsieur le Docteur CHERRAYE RIDHA. Nous la remercions de m'avoir encadrés, orientés, aidés et conseillés.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté de nous rencontrer et répondre à nos questions durant nos recherches .

Nous remercions nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous, «< Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous nous avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Nous sommes redevables d'une éducation dont nous sommes fiers »

Une attention toute particulière va aux membres du Département de Génie des procédés pour l'aide technique, le travail administratif et le soutien moral qu'ils nous ont apporté.

# Dédicace

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de Leurs dévouements, de leurs soutiens permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation et mon instruction pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

Mes très chères sœurs

Mes très chers frères

A toutes ma grande famille.

A tous mes enseignants et camarades de promotion Génie des procédés

# Liste des Figures

I.1	Facteurs affectant le processus d'adsorption . . . . .	6
I.2	Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain . . . . .	7
I.3	Classification des isothermes d'adsorption selon Giles et al . . . . .	8
I.4	Structure chimique du charbon actif et représentation schématique de sa structure . . . . .	13
I.5	Groupes de surface du charbon actif . . . . .	14
II.1	Les étapes de l'imprégnation . . . . .	20
II.2	Courbe d'étalonnage du phénol dans une solution aqueuse à 270 (nm) . . . . .	22
II.3	. . . . .	23
II.4	Isothermes expérimentales d'adsorption du phénol sur les charbons actifs . . . . .	24
II.5	Les isotherme d'adsorption de Langmuir . . . . .	26
II.6	Les isotherme d'adsorption de Freundlich . . . . .	26
II.7	Effet de la masse de CA sur l'adsorption du phénol . . . . .	27
II.8	Effet de la masse de CA sur l'adsorption du phénol . . . . .	28
II.9	Effet de pH sur l'adsorption du phénol . . . . .	29

# Liste des Tableaux

II.1	.....	21
II.2	Propriétés de phénol .....	21
II.3	Paramètres de Langmuir et Freundlich des isothermes d'adsorption du phénol sur les charbons actifs et la surface spécifique apparente. ....	25

# Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Liste des Figures	III
Liste des Tableaux	III
Table des Matières	IV
Introduction Générale	1
<b>I PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	<b>3</b>
I.1 Généralités sur l'adsorption . . . . .	4
I.1.1 Introduction . . . . .	4
I.1.2 Les types d'adsorption . . . . .	4
I.1.3 Facteurs influençant sur le phénomène d'adsorption . . . . .	5
I.1.4 Mécanisme d'adsorption . . . . .	6
I.1.5 Les isothermes d'adsorption . . . . .	6
I.1.6 Classification des isothermes d'adsorption . . . . .	8
I.1.7 Modèles des isothermes . . . . .	8
I.1.7.1 Modèle de Freundlich . . . . .	9
I.1.7.2 Modèle de Langmuir . . . . .	9
I.2 Généralités sur le Charbon actif . . . . .	11
I.2.1 Introduction . . . . .	11
I.2.2 Mode de préparation du charbon actif . . . . .	11

I.2.2.1	La pyrolyse . . . . .	12
I.2.2.2	Activation . . . . .	12
I.2.3	Propriétés . . . . .	13
I.2.3.1	Propriétés texturales . . . . .	13
I.2.3.2	Propriétés chimiques . . . . .	14
I.3	Synthèse Bibliographique . . . . .	14
I.3.1	Introduction . . . . .	14
I.3.2	Conclusion . . . . .	17
<b>II</b>	<b>PARTIE EXPÉRIMENTAL</b>	<b>19</b>
II.1	Préparation et caractérisation des adsorbants . . . . .	19
II.1.1	Introduction . . . . .	19
II.1.2	Préparations des adsorbants . . . . .	19
II.2	Caractérisation par adsorption du phénol . . . . .	21
II.2.1	Introduction . . . . .	21
II.2.2	Préparation des solutions du phénol . . . . .	22
II.2.3	Dosage des solutions du phénol (Détermination de la concentration en phénol en solution) . . . . .	22
II.2.4	Protocole expérimental d'adsorption . . . . .	23
II.2.5	Isothermes d'adsorption et modélisation par les modèles de Langmuir et de Freundlich . . . . .	24
II.3	Effet de quelques paramètres sur la capacité d'adsorption . . . . .	27
II.3.1	Effet de la masse d'adsorbant . . . . .	27
II.3.2	Effet de temps de contact . . . . .	28
II.3.3	Effet du pH . . . . .	28
	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>30</b>
	<b>Références</b>	<b>30</b>
	<b>Résumé</b>	<b>37</b>

# Introduction Générale

Les eaux usées contenant des composés phénoliques représentent un défi majeur pour l'industrie et l'environnement en raison de leur toxicité et de leur impact sur la santé publique [1, 2]. Les phénols, largement présents dans les effluents industriels produits par divers secteurs tels que l'industrie chimique, pharmaceutique et de transformation du bois. USEPA recommande une limite maximale autorisée de  $0,001 \text{ mg.l}^{-1}$  [3], La limite générale norme de rejet des effluents du phénol est de  $0,05 \text{ mg.l}^{-1}$ , avant d'être déversés dans les cours d'eau [4], nécessitent une élimination efficace pour prévenir la pollution de l'eau et protéger les écosystèmes aquatiques.

Dans l'industrie, le phénol est fabriqué selon diverses méthodes. Une méthode historique impliquait la fusion alcaline d'un sel d'acide sulfonique [5]. Une autre approche implique une chloration catalytique, suivie d'une hydrolyse basique du chlorobenzène résultant [5, 6]. Une méthode connue sous le nom de méthode DOW implique l'oxydation du toluène pour former de l'oxyde benzoïque, suivi d'une décarboxylation oxydante pour produire du phénol [5].

Cependant, la méthode principale de production de phénol, développée par Hock et Lang en 1944 [5], est largement utilisée depuis les années 1950 [7, 8]. Cette méthode implique l'oxydation du cumène ou de l'isopropylbenzène avec de l'oxygène de l'air. Cette réaction conduit à la formation d'hydroperoxyde de cumyle. Plus de 85% du phénol est produit selon cette méthode.

L'adsorption sur charbon actif est reconnue comme l'une des méthodes les plus efficaces pour éliminer les phénols des eaux usées, en raison de la grande surface spécifique du charbon et de sa capacité à adsorber une large gamme de composés organiques [9, 10]. D'autres matériaux adsorbants, tels que les résines synthétiques et les adsorbants naturels à faible coût, offrent également des perspectives prometteuses pour le traitement des eaux contaminées [11].

Ainsi, ce mémoire vise à fournir une vue d'ensemble complète sur l'adsorption en général,

en mettant l'accent sur l'utilisation du charbon actif comme adsorbant, ainsi que sur le phénol en tant qu'adsorbat spécifique. De plus, une synthèse bibliographique se penche sur plusieurs études récentes portant sur l'adsorption des phénols par différents types d'adsorbants. Nous examinerons en détail les méthodes de préparation des adsorbants, les caractéristiques de surface, les performances d'adsorption et les mécanismes sous-jacents. En mettant en lumière les avancées récentes dans ce domaine crucial de recherche, nous visons à fournir un aperçu complet des stratégies actuelles pour l'élimination des phénols des eaux usées industrielles.

Et ensuite la partie expérimentale vise à décrire en détail la préparation et la caractérisation du charbon actif utilisé dans l'étude, ainsi que l'étude comparative entre deux types de charbon actif différents, en fin une conclusion générale

# Chapitre I

## PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

## I.1 Généralités sur l'adsorption

### I.1.1 Introduction

L'adsorption est un phénomène de surface dans lequel des molécules d'une substance (adsorbant) sont retenues ou piégées à la surface d'un matériau solide ou liquide (adsorbant), sans pénétrer dans sa structure interne. Ce processus résulte généralement des forces d'attraction intermoléculaires entre les molécules de l'adsorbant et les sites actifs de la surface de l'adsorbant.

L'adsorption est l'un des processus les plus efficaces du traitement avancé des eaux usées, qui réduit les déchets organiques et inorganiques dangereux à l'état de traces restant dans les effluents après le traitement conventionnel. Elle est également utilisée pour éliminer les composés organiques et inorganiques toxiques des eaux souterraines contaminées. Cependant, dans le traitement de l'eau, la méthode la plus largement utilisée est l'adsorption sur la surface du charbon actif [12].

Les avantages relatifs de l'adsorption par rapport à d'autres méthodes conventionnelles de traitement avancé sont les suivants :

1. Elle peut éliminer à la fois les constituants organiques et inorganiques, même à des concentrations très faibles ;
2. Elle est relativement facile et sûre à mettre en œuvre ;
3. À la fois des équipements en mode batch et en mode continu peuvent être utilisés ;
4. Aucune formation de boue n'est générée ;
5. Et l'adsorbant peut être régénéré et réutilisé.

De plus, le processus est économique car il nécessite un faible coût en capital et il existe de nombreux matériaux peu coûteux disponibles pouvant être utilisés comme adsorbants [13].

### I.1.2 Les types d'adsorption

Il existe principalement deux types d'adsorption :

1. **Adsorption physique (ou physisorption)** : Il s'agit d'une adsorption non spécifique basée sur des forces de Van der Waals entre les molécules de l'adsorbant et de

l'adsorbant. Les molécules adsorbées sont généralement faiblement liées à la surface de l'adsorbant et peuvent être facilement désorbées par des changements de conditions, tels que la température ou la pression [14] .

2. **Adsorption chimique (ou chimisorption)** : Ce type d'adsorption implique des interactions chimiques spécifiques entre les molécules de l'adsorbant et de l'adsorbant, conduisant à la formation de liaisons chimiques. La force d'adsorption est généralement plus forte que dans l'adsorption physique, et les molécules adsorbées peuvent nécessiter des conditions plus rigoureuses pour être désorbées [15] .

### I.1.3 Facteurs influençant sur le phénomène d'adsorption

Les facteurs influençant le phénomène d'adsorption sont nombreux et peuvent inclure (voir Figure I.1) [[16]] :

1. **Nature de l'adsorbant et de l'adsorbat** : Les propriétés chimiques et physiques de l'adsorbant (comme sa surface spécifique, sa polarité, sa charge électrique) et de l'adsorbat (telles que sa taille, sa polarité, sa solubilité) déterminent leur affinité et leur capacité d'adsorption.
2. **Température** : En général, l'adsorption physique augmente avec la baisse de la température, tandis que l'adsorption chimique peut être influencée de manière plus complexe par les changements de température.
3. **Pression** : Pour l'adsorption gazeuse, une augmentation de la pression peut généralement augmenter la quantité d'adsorption, en particulier pour l'adsorption physique.
4. **pH** : Le pH de la solution peut affecter la charge de surface de l'adsorbant et l'ionisation de l'adsorbat, influençant ainsi l'efficacité de l'adsorption.
5. **Concentration initiale de l'adsorbat** : En règle générale, une augmentation de la concentration initiale de l'adsorbat dans la solution entraîne une augmentation de la quantité adsorbée jusqu'à un certain point, après quoi une saturation peut être atteinte.
6. **Temps de contact** : Le temps pendant lequel l'adsorbant est en contact avec la solution d'adsorbat peut influencer la quantité d'adsorption atteinte, en particulier pour l'adsorption cinétique.

7. **Taille des particules d'adsorbant** : Une taille de particule plus petite peut augmenter la surface spécifique de l'adsorbant, augmentant ainsi la capacité d'adsorption.
8. **Présence d'autres espèces dans la solution** : La compétition entre les différents composants de la solution pour les sites d'adsorption peut influencer l'efficacité de l'adsorption.

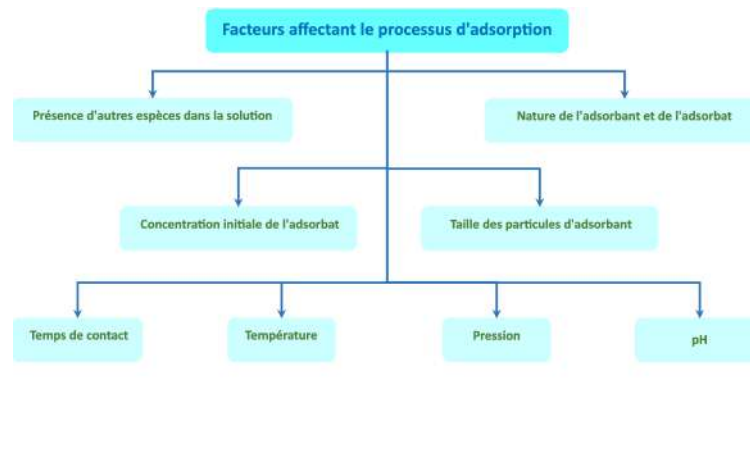


FIG. I.1 – Facteurs affectant le processus d'adsorption

### I.1.4 Mécanisme d'adsorption

Pendant l'adsorption d'une espèce sur un solide, Plusieurs étapes sont impliquées dans le processus global d'adsorption d'une seule molécule de polluants (voir Figure I.2) :

1. Étape de transfert de masse : transfert de masse du volume du fluide à la surface de l'adsorbant à travers la couche limite autour de la particule.
2. Étape de diffusion : diffusion interne à travers les pores de l'adsorbant.
3. Étape d'adsorption : adsorption sur la surface de la particule [17] .

### I.1.5 Les isothermes d'adsorption

L'adsorption entraîne généralement l'élimination des solutés de la solution et les fixer sur la surface de l'absorbant, jusqu'à ce que la quantité de soluté restant dans la solution soit en équilibre avec celle présente à la surface. Cet équilibre est décrit en exprimant la quantité de

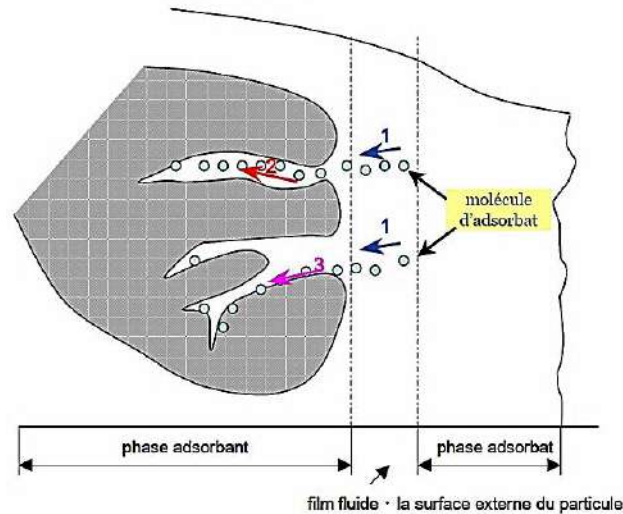


FIG. I.2 – Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbant au sein d'un grain

soluté absorbée par unité de masse d'adsorbant,  $q$ , en fonction de la concentration de soluté restant dans la solution,  $C$ . Une expression de ce type est appelée une isotherme d'adsorption.

La capacité d'adsorption ou la charge dépend de la concentration en phase fluide, de la température et d'autres conditions (en particulier des conditions initiales de l'adsorbant). Typiquement, les données de capacité d'adsorption sont recueillies à une température fixe et à diverses concentrations d'adsorbant (ou pressions partielles pour une vapeur ou un gaz), et les données sont représentées sous forme d'isotherme (charge versus concentration à température constante).

Pour un système particulier à une température donnée, l'isotherme d'adsorption est l'expression de la quantité adsorbée en fonction de la concentration (Équation I.1) :

$$\frac{q_e}{q_m} = f(C_e)_{T.\text{solide.liquide}} \quad (\text{I.1})$$

$q_e$  : La quantité de soluté adsorbée ( $mg.g^{-1}$ ),  $q_m$  : La quantité maximale de soluté adsorbée ( $mg.g^{-1}$ ) et  $C_e$  : Concentration massique de soluté ( $mg.l^{-1}$ ).

De nombreux modèles théoriques et empiriques ont été développés pour représenter les différents types d'isothermes d'adsorption. À l'heure actuelle, il n'existe pas d'équation unique qui décrit de manière satisfaisante tous les mécanismes et formes. Les modèles de Langmuir, Freundlich, Sips, Dubinin-Radushkevich et Brunauer-Emmett-Teller (BET) sont quelques-unes des équations qui sont couramment utilisées pour décrire les isothermes d'adsorption [18, 19]. L'isotherme de Langmuir est généralement décrit par [20].

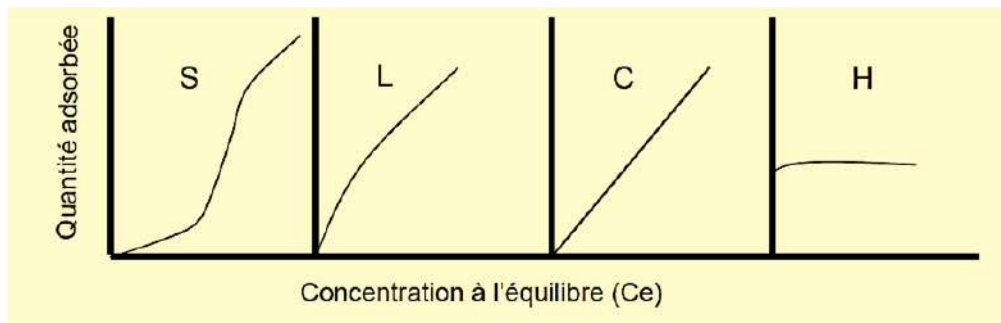


FIG. I.3 – Classification des isothermes d'adsorption selon Giles et al

### I.1.6 Classification des isothermes d'adsorption

Expérimentalement, on distingue quatre classes principales nommées : S (Sigmoïde), L (Langmuir), H (Haute affinité) et C (partition Constante). La Figure I 3 illustre la forme de chaque type d'isothermes [13, 21] :

Cette classification tient compte entre autre d'un certain nombre d'hypothèses [13, 21] :

- Le solvant s'adsorbe sur les mêmes sites que le soluté. Ceci implique l'existence d'une compétition d'adsorption entre le solvant et le soluté.
- Le nombre de sites susceptibles d'accueillir les molécules de soluté à la surface du solide diminue quand la quantité adsorbée augmente.
- L'orientation des molécules à la surface. On peut citer le cas où les molécules sont adsorbées verticalement ou horizontalement sur la surface.
- Enfin, les interactions attractives ou répulsives entre les molécules adsorbées se manifestent d'une façon notable dans le phénomène d'adsorption.

### I.1.7 Modèles des isothermes

Différentes lois ont été avancées pour examiner le phénomène de l'adsorption, décrivant la corrélation entre la quantité adsorbée et la concentration en soluté dans un solvant à une température spécifique. Ci-dessous, nous rappellerons les lois principales qui sont couramment utilisées à cet effet.

### I.1.7.1 Modèle de Freundlich

Les isothermes concaves sont les plus répandues. Le modèle initial utilisé, appelé le modèle de Freundlich, était empirique (Van Bemmelen, 1888; Freundlich, 1909), fondé sur la corrélation (Équation I.2) entre la concentration du composé adsorbé sur la phase solide  $q_e$  et la concentration restante du composé en solution  $C_e$ .

$$q_e = K_F C_e^n \quad (\text{I.2})$$

Cette équation (Équation I.2) peut être aisément transformée en une forme linéaire (Équation I.3).

$$\ln q_e = \ln K_F + n \ln C_e \quad (\text{I.3})$$

Où  $K_F$  et  $n$  des constantes expérimentales.

Le graphe décrivant  $\ln q_e$  en fonction de  $\ln C_e$  donne une droite de pente  $n$ , dont l'ordonnée à l'origine est  $\ln K_F$ .

### I.1.7.2 Modèle de Langmuir

Un autre modèle largement utilisé repose sur des hypothèses réactionnelles (Langmuir, 1918) (Équation I.4). Selon ce modèle, le solide est supposé posséder une capacité d'adsorption limitée,  $q_m$ , qui est liée à un nombre restreint de sites d'adsorption, formant ainsi une couche monomoléculaire.

$$\frac{q_e}{q_m} = \theta = \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (\text{I.4})$$

$K_L$  : constante d'équilibre de Langmuir,  $\theta$  : taux de recouvrement.

La forme linéaire de l'isotherme de Langmuir :

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \frac{1}{C_e} \quad (\text{I.5})$$

Les caractéristiques essentielles d'une isotherme de Langmuir peuvent être exprimées en terme de facteur constant (sans dimension) de séparation ou paramètre d'équilibre,  $R_L$  qui est utilisé pour prédire si un système d'adsorption est "favorable" ou "défavorable". Le facteur de séparation,  $R_L$  est défini par l'équation suivante :

$$R_L = \frac{1}{1 + R_L C_0} \quad (\text{I.6})$$

$C_0$  est la concentration initiale maximale en phénol ( $mg.l^{-1}$ ) et  $K_L$  est la constante d'équilibre d'adsorption de Langmuir ( $l.mg^{-1}$ ). L'isotherme est défavorable lorsque  $R_L > 1$ , elle est linéaire lorsque  $R_L = 1$ , elle est favorable lorsque  $0 < R_L < 1$  et elle est irréversible lorsque  $R_L = 0$  [[13]].

## I.2 Généralités sur le Charbon actif

### I.2.1 Introduction

Les adsorbants sont des solides poreux se présentant sous forme de granulés, de poudre. Les premiers adsorbants utilisés il y a plusieurs siècles, furent les argiles et terres colorantes, puis à la fin du *XIX*<sup>ème</sup> siècle furent développés les charbons actifs [22].

Le charbon activé est un solide carboné largement utilisé comme adsorbant polyvalent destiné à l'adsorption des phases liquides et gazeuses. Le charbon activé (AC) est produit à partir d'une large gamme de précurseurs, y compris le charbon de bois et les déchets agricoles [23]. La chimie de surface, la microporosité et la porosité influent tous sur la capacité du charbon activé à être éliminé des phases gazeuses ou liquides [24]. Les charbons activés sont fabriqués en choisissant les bonnes matières premières et en veillant à ce qu'elles coûtent plusieurs milliards de dollars par an [25]. En général, les charbons activés sont classés en types commerciaux et à bas coût. La plupart des charbons activés commerciaux sont fabriqués à partir de matériaux non réutilisables, comme le charbon [26], les os d'animaux [27] et les noyaux d'abricot [28].

Les charbons activés à bas coût sont fabriqués à partir de biomasse renouvelable ou de déchets agricoles, tels que les tiges de lotus [29], les boues d'épuration [30], les coquilles de noix de coco [31], la bagasse de canne à sucre [32], les coques de palmiste [33], les épis de maïs [34], les coques de *Canarium Schwerin* et marc de café [35]. La production de charbon activé commercial est plus coûteuse que celle du charbon activé non commercial car elle est produite à partir de matières premières non renouvelables [36].

### I.2.2 Mode de préparation du charbon actif

La récente synthèse de charbons activés (AC) englobe plusieurs méthodes classifiées comme étant des techniques conventionnelles et avancées. Les méthodes conventionnelles utilisées pour l'activation sont généralement physiques (thermiques), chimiques, ou une combinaison des deux. En même temps, les techniques avancées comprennent la carbonisation hydrothermale, l'irradiation assistée par micro-ondes et la synthèse en une seule étape.

La fabrication de charbon activé implique généralement une ou deux étapes de carbonisation et de procédures d'activation. Pendant la carbonisation, les constituants non carbonés,

tels que l'hydrogène et l'oxygène, sont éliminés du matériau de départ par décomposition pyrolytique, ce qui donne un carbone squelettique avec un assemblage de pores masqués [37, 38, 39, 40].

### I.2.2.1 La pyrolyse

La carbonisation est la décomposition thermique des matières carbonées : les espèces autres que le carbone sont éliminées. Cette étape s'effectue à des températures comprises entre 600 et 800°C en présence de sels métalliques et sous un courant continu de gaz inerte (absence d'oxygène). La carbonisation est généralement effectuée à une vitesse de montée en température suffisamment grande pour minimiser le contact entre les produits carbonisés et les produits volatils. Elle fournit des matériaux ayant une structure poreuse limitée (surface spécifique d'environ 10  $m^2.g^{-1}$ ) et qui n'ont donc pas une forte capacité d'adsorption. La structure poreuse est ensuite étendue durant le processus d'activation.[1]

### I.2.2.2 Activation

L'activation consiste à développer la structure poreuse en éliminant les goudrons qui obstruent les pores, et à créer des fonctions de surface (généralement oxydées) qui sont à l'origine des interactions entre le solide et les molécules adsorbées. Elle peut être physique ou chimique. L'activation physique permet de développer les pores existants et d'en créer d'autres. Elle est réalisée entre 800°C et 1000°C en présence d'un gaz faiblement oxydant (air), de vapeur d'eau, de CO<sub>2</sub>, ou encore d'un mélange de ces gaz.

L'activation chimique est plutôt utilisée avec le bois. Elle consiste à imprégner le matériau de départ avec une solution concentrée d'agent très oxydant et/ou déshydratant (acide phosphorique, chlorure de zinc...). Le matériau subit ensuite une pyrolyse entre 400°C et 800°C à l'abri de l'air, puis est lavé et séché. Le charbon actif est ainsi obtenu en une seule étape. C'est le degré d'imprégnation du matériau en matière oxydante qui définit la structure poreuse finale. Suite à l'activation, le charbon actif acquiert une structure poreuse polydispersé : les pores ont différentes formes et dimensions. La répartition poreuse dépend de la nature de la matière première, mais aussi des conditions de l'activation. Les propriétés physico-chimiques d'un charbon peuvent donc varier pour un même précurseur.[1]

## I.2.3 Propriétés

Afin de mieux définir ses propriétés, différentes techniques analytiques ont été développées pour caractériser le charbon actif.

### I.2.3.1 Propriétés texturales

La structure du charbon peut être vue comme un assemblage aléatoire de feuillets plans constitués par des poly cycles aromatiques (encore appelés feuillets de graphène). L'espace libre entre ces feuillets constitue la porosité du charbon.[1]

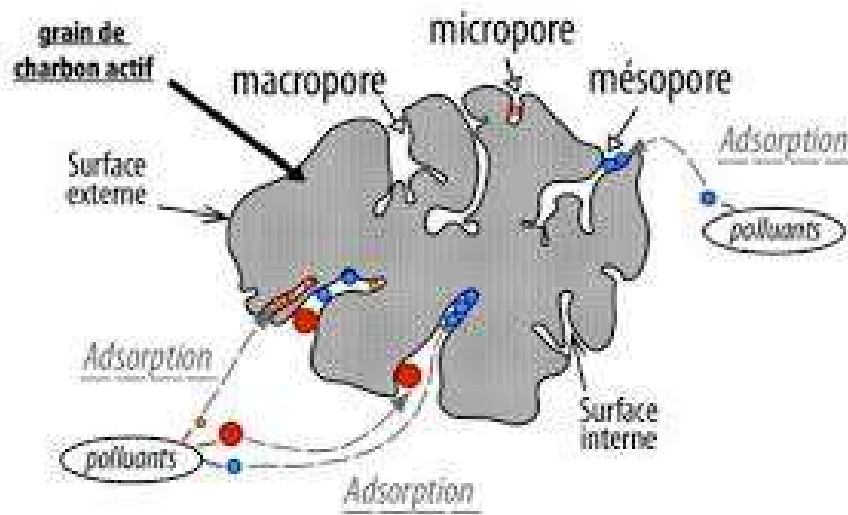


FIG. I.4 – Structure chimique du charbon actif et représentation schématique de sa structure

La structure d'un charbon est donc caractérisée par son volume poreux, la taille et la forme de ses pores. C'est ce qui est à l'origine de sa surface spécifique, c'est-à-dire de la surface développée accessible aux molécules par unité de masse de charbon. Ces propriétés sont principalement développées lors de l'étape d'activation du CA. Le charbon actif est connu pour avoir une grande surface spécifique, généralement comprise entre 800 et 2500 m<sup>2</sup>/g. Il présente également une distribution de taille de pores très variée, incluant à la fois des micropores (de diamètre  $p < p50$  nm) Ce sont ces propriétés texturales qui confèrent au charbon ses capacités d'adsorbant de multiples espèces chimiques [Stüber et coll., 2005].

Généralement ce sont les micropores (voire les mésopores) qui constituent les sites d'adsorption, tandis que les macropores interviennent dans le transport des molécules jusqu'à la structure interne. Le volume poreux et la taille des pores sont déterminés à partir d'iso-

thermes d'adsorption désorption d'azote à 77K pour la micro- et méso-porosité (cf. chapitre 2) et porosimétrie au mercure pour les pores les plus gros.[1]

### I.2.3.2 Propriétés chimiques

#### 1. Composition globale du charbon actif

Bien que le carbone soit l'élément majoritaire du charbon actif, d'autres composés (oxygène, hydrogène, soufre, azote, minéraux, ...) sont aussi présents et influent fortement sur les propriétés d'adsorption du charbon actif

#### 2. Fonctions de surface du charbon actif

L'hétérogénéité chimique du charbon actif est donc principalement associée aux différentes fonctions de surface, surtout les groupements oxygénés, qui lui confèrent son caractère acido-basique et déterminent, selon l'environnement (pH de la solution) sa charge électrique[1]

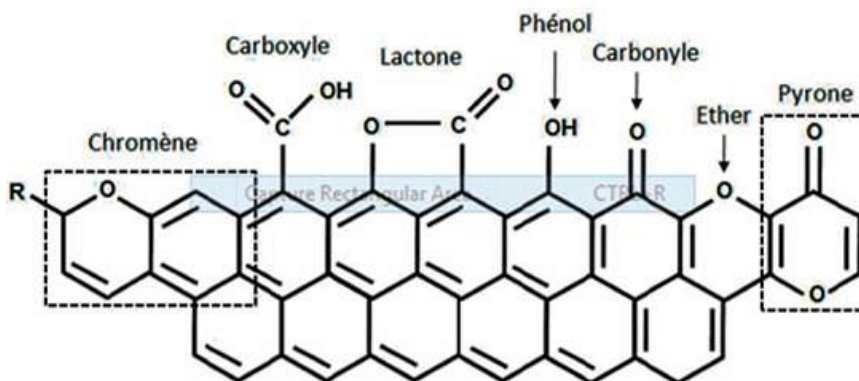


FIG. I.5 – Groupes de surface du charbon actif

## I.3 Synthèse Bibliographique

### I.3.1 Introduction

L'adsorption de composés organiques, tels que le phénol, constitue un défi majeur dans le traitement des eaux contaminées. En raison de ses effets nocifs sur la santé humaine et l'environnement, la réduction des niveaux de phénol dans les eaux usées industrielles et municipales est devenue une préoccupation mondiale croissante. Parmi les diverses méthodes de

traitements disponibles, l'adsorption sur charbon actif est largement reconnue comme l'une des techniques les plus efficaces et les plus utilisées. Le charbon actif possède une structure poreuse exceptionnelle qui lui confère une grande surface spécifique et une capacité d'adsorption élevée pour une variété de contaminants organiques. Cette synthèse bibliographique examine les avancées récentes dans le domaine de l'adsorption de phénol par le charbon actif, en mettant en lumière les différentes stratégies, les matériaux innovants et les modèles cinétiques utilisés pour optimiser ce processus crucial de purification de l'eau.

**C. R. Girish et al.** : Cette étude a révélé que l'adsorbant *Lantana camara* traité à l'acide chlorhydrique et à la potasse a montré une capacité d'adsorption de phénol de 112.5 mg/g et 91.07 mg/g respectivement, pour des concentrations de phénol allant de 25 à 250 mg/L. De plus, les paramètres thermodynamiques ont montré que le processus d'adsorption était spontané, avec une énergie libre de Gibbs négative (-) et une variation d'enthalpie négative (-). La cinétique d'adsorption a été bien ajustée par le modèle de pseudo-seconde ordre [41][12].

**Bestamin Özkaya** : Les études de désorption ont montré un taux de constante de désorption de  $3.924 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  pour le modèle de premier ordre. Les modèles d'isothermes d'adsorption ont révélé que le modèle de Langmuir était le mieux ajusté, avec une capacité maximale d'adsorption de 250 mg/g pour le charbon actif [42][13].

**H. Cherifi et al.** : Les tests en lots ont montré que l'éponge végétale de loofa a présenté une capacité d'adsorption accrue avec une augmentation de la température, atteignant une capacité maximale de 200 mg/g à 60 °C. Les données d'équilibre ont été bien ajustées par le modèle de Langmuir [43].

**H.D.S.S. Karunarathne et B.M.W.P.K. Amarasinghe** : Les isothermes d'adsorption ont révélé que le charbon actif dérivé de la bagasse de canne à sucre avait une capacité maximale d'adsorption de 180 mg/g selon le modèle de Langmuir. Les expériences en colonne fixe ont montré un temps de rupture de 12 heures pour une concentration initiale de phénol de 100 mg/L [44].

**Xiao Wei et al.** : Les carbones actifs préparés à partir de résidus mycéliens antibiotiques ont montré une surface spécifique élevée de 1369.76 m<sup>2</sup>/g, avec une capacité d'adsorption de phénol de 300 mg/g selon le modèle de Langmuir. Les études cinétiques ont montré un ajustement optimal avec le modèle de pseudo-second ordre [45].

**Lin et Juang** : Cette étude passe en revue la faisabilité technique de l'utilisation de divers adsorbants, y compris le charbon actif, les résines synthétiques et les adsorbants naturels à faible coût, pour l'élimination des phénols de l'eau contaminée. Les chercheurs ont constaté que certains adsorbants à faible coût, tels que les cendres volantes de charbon, les boues, la biomasse et les zeolites, présentaient une capacité d'adsorption élevée pour les phénols, dépassant parfois celle du charbon actif commercial. Ils ont également identifié des résines synthétiques efficaces pour l'adsorption de différents dérivés de phénol. Par exemple, les résines synthétiques HiSiv 1000 et IRA-420 ont une capacité d'adsorption élevée pour le phénol, tandis que XAD-4 présente une bonne capacité d'adsorption pour le 2-nitrophénol [46].

**Liu et al.** : Cette étude explore l'utilisation de fibres de charbon actif pour l'adsorption de différents dérivés de phénol en solution aqueuse. Les résultats montrent que les fibres de charbon actif présentent une capacité d'adsorption élevée pour les phénols. Par exemple, la capacité d'adsorption maximale pour le 2,4,6-trichlorophénol est de 716,10 mg/g à 30 °C. De plus, les études cinétiques révèlent une cinétique d'adsorption rapide des phénols, en raison de la structure poreuse ouverte des fibres de charbon actif [47].

**Srivastava et al.** : Cette étude explore l'utilisation de la bagasse de canne à sucre comme adsorbant pour l'élimination du phénol de l'eau contaminée. Les résultats montrent que la bagasse de canne à sucre activée présente une capacité d'adsorption élevée pour le phénol. Par exemple, la capacité d'adsorption maximale est d'environ 10 g/l de solution avec un temps d'équilibre d'environ 5 heures [48].

**Hameed et al.** : Cette étude évalue les caractéristiques d'adsorption du 2,4,6-trichlorophénol (TCP) sur du charbon actif à base de coques de noix de coco. Les résultats montrent que le charbon actif à base de coques de noix de coco présente une capacité d'adsorption élevée pour le TCP. Par exemple, la capacité d'adsorption maximale est de 716,10 mg/g à 30 °C [49].

**Park et al.** : Cette étude présente la préparation de carbones poreux enrichis en azote pour l'adsorption des composés phénoliques. Les résultats montrent que les carbones préparés présentent une capacité d'adsorption élevée pour les phénols. Par exemple, la capacité d'adsorption maximale pour le p-nitrophénol est de  $910 \pm 18$  mg/g [50].

**Dursun et al.** : Cette étude explore l'utilisation de pulpe de betterave comme adsorbant

pour l'adsorption du phénol de l'eau contaminée. Les résultats montrent que la pulpe de betterave carbonisée présente une capacité d'adsorption élevée pour le phénol. Par exemple, la capacité d'adsorption maximale est d'environ 89,5 mg/g à 60 °C [51].

**Sabrina F. Lütke et al.** : ont produit un charbon actif à partir de déchets d'écorce d'acacia noir pour l'adsorption du phénol. Ils ont constaté que la capacité d'adsorption du phénol augmentait avec la température de carbonisation, atteignant jusqu'à 98,57 mg/g à 55 °C. De plus, leur étude a révélé que le modèle d'isotherme de Freundlich était le plus adapté pour représenter les données d'équilibre, avec une surface spécifique du charbon de 414,97  $m^2.g^{-1}$  [52].

**Issa I. Salame et Teresa J. Badosz** : ont examiné l'adsorption du phénol par du charbon actif d'origine ligneuse oxydé. Leurs résultats ont montré une forte dépendance de l'adsorption du phénol au nombre de groupes carboxyliques sur la surface du charbon. Ils ont observé une capacité d'adsorption allant jusqu'à 160 mg/g pour le phénol [53].

**Ngoc Hoa Phan et al.** : ont produit des charbons actifs fibreux à partir de fibres naturelles et ont constaté une capacité d'adsorption élevée pour le phénol, atteignant jusqu'à 181 mg/g. Ils ont également observé une porosité élevée jusqu'à 1500  $m^2/g$ , favorisant une adsorption efficace des micro-polluants [54].

### I.3.2 Conclusion

En conclusion, les résultats des différentes études examinées démontrent la diversité des approches et des matériaux utilisés pour l'élimination des phénols des eaux usées. Ces recherches fournissent des informations précieuses sur l'efficacité de divers adsorbants, notamment le charbon actif, les biochars et d'autres matériaux adsorbants, dans la réduction des niveaux de phénols dans les effluents industriels et domestiques. Les données numériques obtenues ont permis de mieux comprendre les mécanismes d'adsorption, les cinétiques d'adsorption et les facteurs influençant les performances des adsorbants. Par exemple, certaines études ont mis en évidence l'importance des propriétés physico-chimiques des adsorbants, telles que la surface spécifique, la porosité et la présence de groupes fonctionnels, dans leur capacité à adsorber les phénols. De plus, des paramètres tels que le pH, la concentration initiale de phénols, la température et le temps de contact ont été identifiés comme des facteurs clés influençant l'efficacité de l'adsorption.

Ces avancées scientifiques ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de technologies de traitement des eaux usées plus efficaces et durables.

Cependant, malgré les progrès réalisés, des défis persistent, notamment en ce qui concerne la faisabilité à grande échelle de ces méthodes, la réduction des coûts de production des adsorbants et la gestion des sous-produits générés pendant le processus d'adsorption.

En définitive, les études examinées soulignent l'importance continue de la recherche dans ce domaine crucial pour relever les défis environnementaux liés à la présence de phénols dans les eaux usées. En poursuivant ces efforts de recherche et en collaborant avec l'industrie et les organismes de réglementation, il est possible de développer des solutions de traitement des eaux usées plus efficaces, économiques et respectueuses de l'environnement pour assurer la santé publique et la durabilité des écosystèmes aquatiques.

# Chapitre II

## PARTIE EXPÉRIMENTAL

### II.1 Préparation et caractérisation des adsorbants

#### II.1.1 Introduction

Pour préparer les charbons actifs peuvent être utilisés comme matière première les déchets de la biomasse[2], des coquilles de noix[3] ou de bois[4] Les agents activants utilisés sont principalement NaOH, HCl, KOH, etc....

Cette partie de notre étude comprend deux étapes :

La première étape est la préparation de l'adsorbants (charbons actifs) par voie chimique, à partir des matières premières la coquille de pistache, on utilise sodium hydroxide NaOH comme agent activant.

La deuxième étape est la caractérisation de ces adsorbants (charbons actifs) préparées, par l'adsorption de phénol et le comparer avec le charbon d'origine boues.

#### II.1.2 Préparations des adsorbants

La décomposition de coquilles de pistache sous vide ou sous atmosphère inerte a température 600 °C.

40 g de coquille de pistache sec tamisé a été imprégné pendant 24h par une solution de NaOH à différentes concentration.

Le taux d'imprégnation ( $X_p$ ,  $mmol.g^{-1}$ ) est défini comme étant le rapport de la masse de NaOH (mol) sur la masse de coquilles de pistache sec ayant servi comme précurseur (g).

Les propriétés physico-chimiques des charbons actifs préparés avec  $X_p = 1.001 - 2.997 - 7.001$  ( $mmol.g^{-1}$ ), ont été étudiées



(a) Coquille de pistache



(b) Carbonisation



(c) Charbon non activé



(d) Activation



(e) Lavage



(f) Charbon actif

FIG. II.1 – Les étapes de l'imprégnation

Calcination ou pyrolyse a été réalisé dans le four, Le « Burn-off » représente la perte de masse de la coquille de pistache imprégné par l'hydroxyde de sodium due au traitement thermique à l'étape d'activation :

$$\text{Burn - off} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 = \frac{450 - 56}{450} \times 100 = 87.55\% \quad (\text{II.1})$$

TAB. II.1

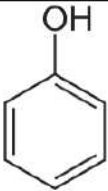
Échantillons	Imprégnation Xp mol.g <sup>-1</sup>	Durée d'imprégnation	Lavage	Séchage
Co pi- 0	0	/	/	/
Co pi-13.009g	1.001	24 heures	Laver jusqu'à pH neutre	Séchage pendant 24h à 100 °c
Co pi-13.005g	2.997			
Co Pi-13.009g	7.001			

## II.2 Caractérisation par adsorption du phénol

### II.2.1 Introduction

Nous utilisons le phénol comme adsorbat pour déterminer la surface spécifique apparente de nos échantillons. La présence du phénol et de ses dérivés dans l'environnement provient des eaux usées rejetées par divers industries telles que les raffineries d'huiles et de pétrole, les usines chimiques, les manufactures d'explosifs, de production de résines phénoliques, les usines de cokéfaction, les usines à gaz, les distilleries de goudrons, les centrales thermiques. Selon les normes américaines, la législation française, et le comité des experts de l'OMS la concentration limite du phénol dans l'eau potable est de 1 (ppb) ou ( g · l<sup>-1</sup> ). Elle est de l'ordre de 1 (ppm) ou (mg.l<sup>-1</sup> ) pour les eaux de rejets. La combinaison du phénol avec du chlore même à des teneurs extrêmement faibles dans l'eau conduit à l'apparition de chloro phénols qui provoquent des odeurs et des goûts désagréables .[5] Le phénol est un alcool anionique (acide faible), ses propriétés sont regroupées dans le tableau II.2 :

TAB. II.2 – Propriétés de phénol

Nom	Phénol
Masse molaire (g.mol <sup>-1</sup> )	94.11
Formule chimique	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH
Structure	
pKa	9.9
Solubilité (g.l <sup>-1</sup> )	87
Longueur d'onde (nm)	270

## II.2.2 Préparation des solutions du phénol

Solutions de phénol (Labo Biochem, teneur en phénol 99,5%) Ils sont préparés avec de l'eau distillée. Pour une bonne répétition Résultats des études d'adsorption, nous avons pesé 0,101 g de phénol dans 100 ml d'eau distillée à une concentration de 1000 (ppm). Les solutions de faible niveau ont De la solution diluée 100 (ppm) à 300 (ppm)

## II.2.3 Dosage des solutions du phénol (Détermination de la concentration en phénol en solution)

Le spectre d'absorption en UV-visible du phénol a été obtenu par un balayage spectral, entre 200 et 900 (nm), d'une solution de phénol à 100 (ppm). Ce spectre montre bien la longueur d'onde du maximum d'absorption de phénol (270 nm). Les concentrations des solutions du phénol ont été analysées en mesurant leur absorbance à 270 nm sur un spectrophotomètre LNICAM Helios $\gamma$ .

Une courbe d'étalonnage des absorbances en fonction des concentrations en phénol a été obtenue en employant les solutions du phénol de concentrations comprises entre 10 et 100 (ppm). Les données expérimentales rapportées dans la Figure indiquent une relation linéaire entre l'absorbance et la concentration avec un coefficient de corrélation  $R^2 = 0,998$ . La concentration en phénol déterminée à partir de l'équation de la droite de régression suivant :

$$C_e \text{ (ppm)} = \frac{DO - 0.0114}{0.0155} \quad (\text{II.2})$$

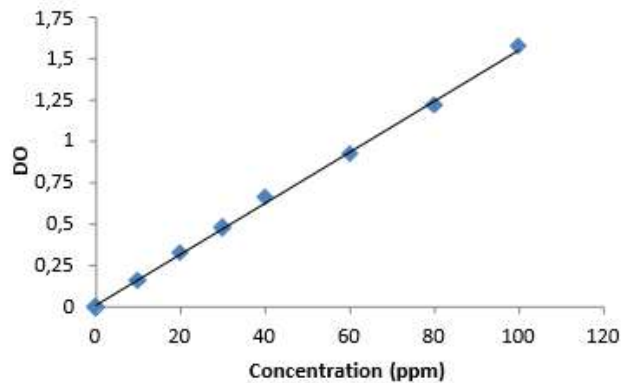


FIG. II.2 – Courbe d'étalonnage du phénol dans une solution aqueuse à 270 (nm)

## II.2.4 Protocole expérimental d'adsorption

L'adsorption du phénol sur les différents charbons actifs a été étudiée sur tous nos échantillons. Une masse de 0.5 (g) de CA est introduite dans 10 (ml) de solution du phénol avec différentes concentrations initiales dans la gamme 100 - 300 (ppm). Le pH des suspensions est 7 à une température de  $25^{\circ}\text{C}$  et une vitesse d'agitation de  $500 (\text{tour.min}^{-1})$  après 2 heures le filtrat est dosée par spectrophotométrie UV visible.

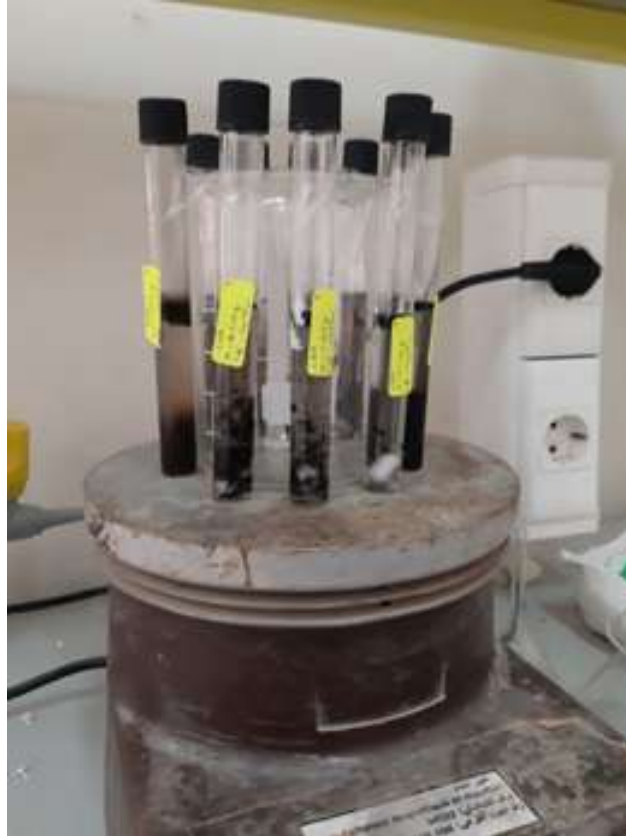


FIG. II.3

La quantité de soluté adsorbée est donnée par l'équation suivante

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} V \quad (\text{II.3})$$

Où :

$q_e$  : La quantité de soluté adsorbée ( $\text{mg.g}^{-1}$ );

$q_m$  : La quantité maximale de soluté adsorbée ( $\text{mg.g}^{-1}$ );

V : Volume de solution (l);

$C_e$  : Concentration massique de soluté ( $\text{mg.l}^{-1}$ );

$C_0$  : Concentration massique initiale de soluté ( $mg.l^{-1}$ );

m : Masse d'adsorbant utilisé (g).

## II.2.5 Isothermes d'adsorption et modélisation par les modèles de Langmuir et de Freundlich

La concentration initiale fournit une force d'entraînement importante pour surmonter toutes les résistances de transfert de masse de toutes les molécules entre les phases aqueuses et les solides.

Dans cette étude, l'effet de la concentration initiale de phénol sur la quantité adsorbée ( $mg.g^{-1}$ ) par les charbons actifs préparés, a été étudié dans une gamme de concentrations initiales (100 – 300ppm). Les isothermes d'adsorption du phénol mesurées à température ambiante sont représentées sur la Figure. Chaque isotherme d'adsorption montre une forme-L (Langmuir) selon la classification de Giles.

Les valeurs maximales de la capacité d'adsorption à l'équilibre sont 46,68-60,36 -43,78-55,78-55,45( $mg.g^{-1}$ ) pour les charbons CNA600, CB600, CA600-NaOH C1, CA600-NaOH C2, CA600-NaOH C3 respectivement. Les charbons CB600, CA600-NaOH C1 et CA600-C2 adsorbent plus du phénol que les autres charbons.

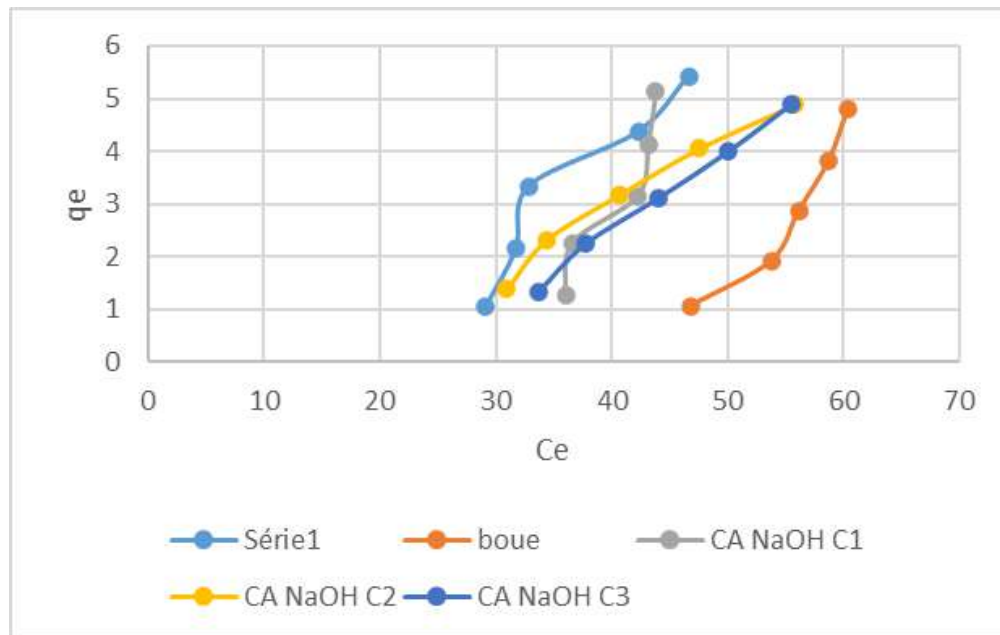


FIG. II.4 – Isothermes expérimentales d'adsorption du phénol sur les charbons actifs

Afin de déterminer le mécanisme de l'adsorption du phénol sur les charbons actifs, nous avons tenté de reproduire les données expérimentales en utilisant les équations des isothermes de Langmuir, Freundlich. Les paramètres pour ces modèles d'adsorption ont été calculés par régression en utilisant la forme linéaire des équations des isothermes. Les paramètres de Langmuir et Freundlich, le rendement d'adsorption à faible et forte concentration, le coefficient de corrélation ( $R^2$ ) et les surfaces apparentes sont récapitulés dans le tableau.

La surface spécifique apparente ( $m^2.g^{-1}$ ) est calculée par la méthode de Giles & Nakhwa s'il y a un liquide comme adsorbat :

$$SSA = q_m N_A A_m \quad (II.4)$$

SSA : surface spécifique apparente ( $m^2.g^{-1}$ );

$q_m$  : Capacité d'adsorption maximum ( $mg.g^{-1}$ );

$N_A$  : Nombre d'Avogadro  $6.023 \times 10^{23}$  ( $mol^{-1}$ );

$A_m$  : L'aire moléculaire, phénol ( $48,6 \times 10^{-20} m^2.mol^{-1}$ ) [32,33].

TAB. II.3 – Paramètres de Langmuir et Freundlich des isothermes d'adsorption du phénol sur les charbons actifs et la surface spécifique apparente.

Charbons	Langmuir I					Freundlich			Rendement	
	$q_m$ ( $mg.g^{-1}$ )	kL	$R^2$	$S_p$ ( $m^2.g^{-1}$ )	RL	kF	n	$R^2$	Faible concentration	Forte concentration
C Non A	46,68	0,837	0,97	136,64	0,011	0,033	1,31	0,96	29,1355	46,6839
C BOUE	60,36	371,707	0,99	176,68	1	1,427	5,89	0,97	46,8129	60,3613
CA600-C1	43,78	45,640	0,90	128,15	1	4,767	13,42	0,99	36,0387	43,7806
CA600-C2	55,78	3,595	0,98	163,27	1	0,00161	2,01	0,92	30,9419	55,7806
CA600-C3	55,45	39,966	0,90	162,31	1	0,0002	2,48	0,96	33,6516	55,4581

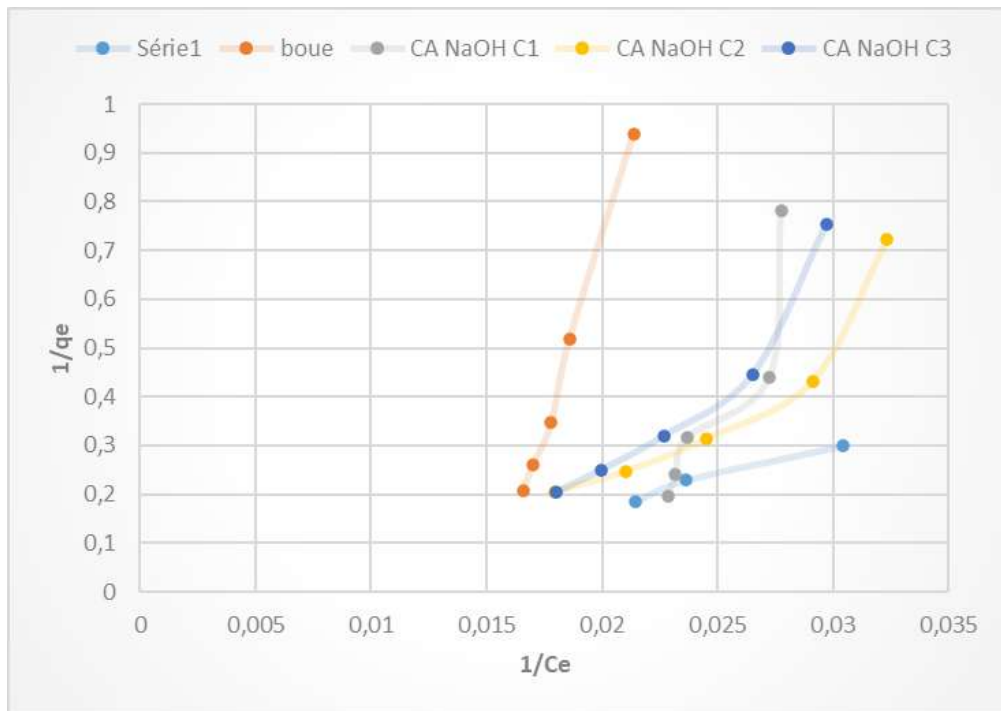


FIG. II.5 – Les isotherme d'adsorption de Langmuir

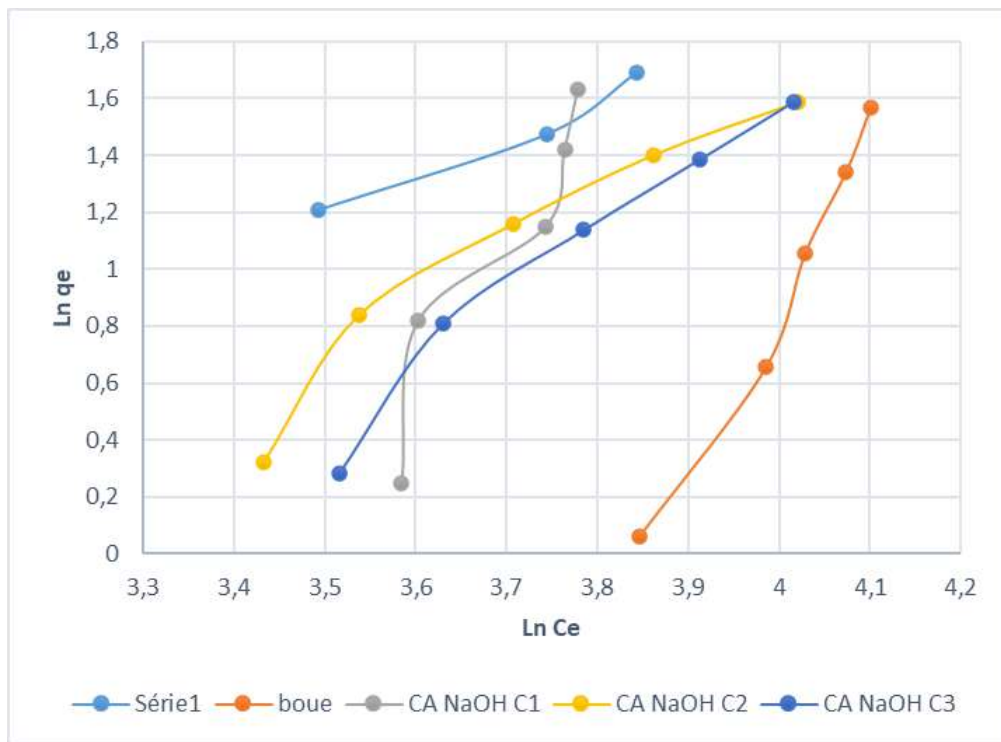


FIG. II.6 – Les isotherme d'adsorption de Freundlich

## II.3 Effet de quelques paramètres sur la capacité d'adsorption

### II.3.1 Effet de la masse d'adsorbant

La capacité d'adsorption augmente respectivement avec l'augmentation du taux d'imprégnation et quel que soit la concentration initiale on remarque que l'équilibre est atteint à 0,3 g .

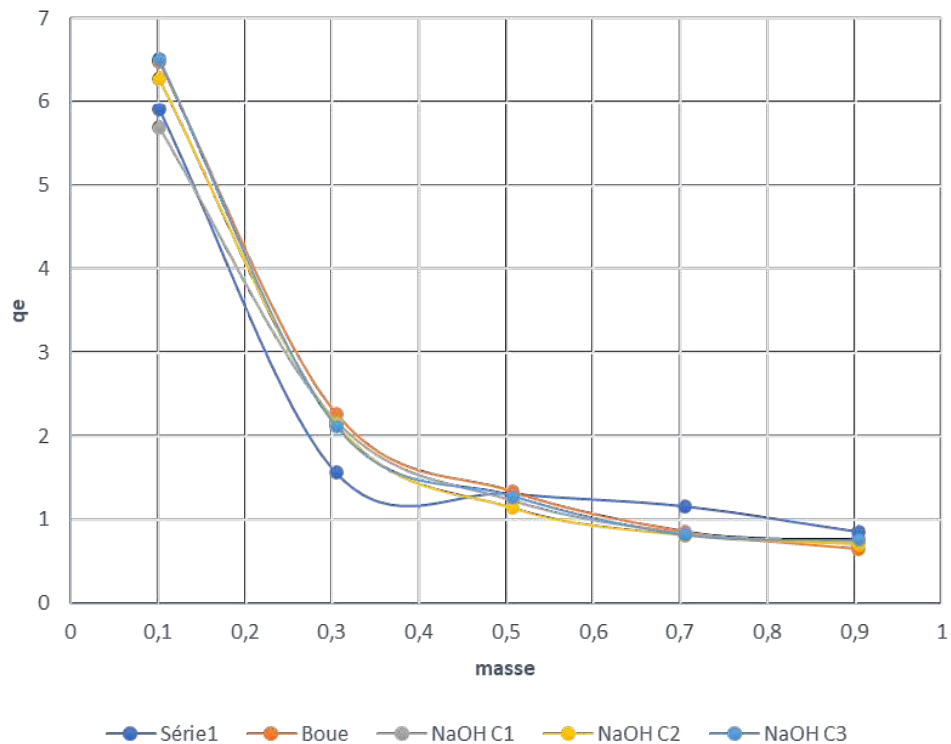


FIG. II.7 – Effet de la masse de CA sur l'adsorption du phénol

### II.3.2 Effet de temps de contact

L'un des facteurs influant sur l'adsorption est le temps de contact entre l'adsorbant et l'adsorbat, et pour assurer l'équilibre il faut déterminer la cinétique d'adsorption d'adsorbat, ce qui conduit à la valeur du temps d'équilibre nécessaire pour mesurer l'isotherme en question. D'après Les figures ci-dessus, on remarque que l'équilibre est atteint à 60 minute.

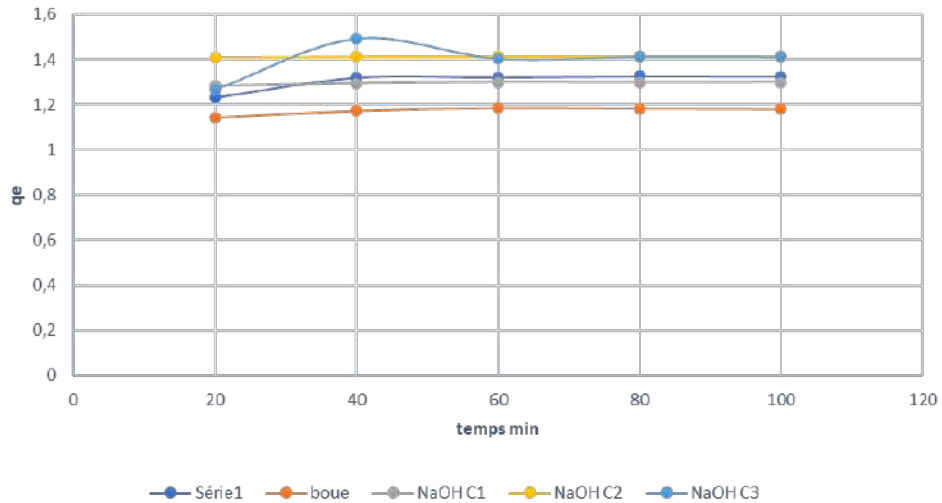


FIG. II.8 – Effet de la masse de CA sur l'adsorption du phénol

### II.3.3 Effet du pH

L'effet du pH de la solution sur la capacité d'adsorption du phénol a été étudié sur les charbons actifs suivants (CA600-NaOH C1, CA600-NaOH C3). La capacité d'adsorption est inversement proportionnelle avec le pH pour les trois charbons.

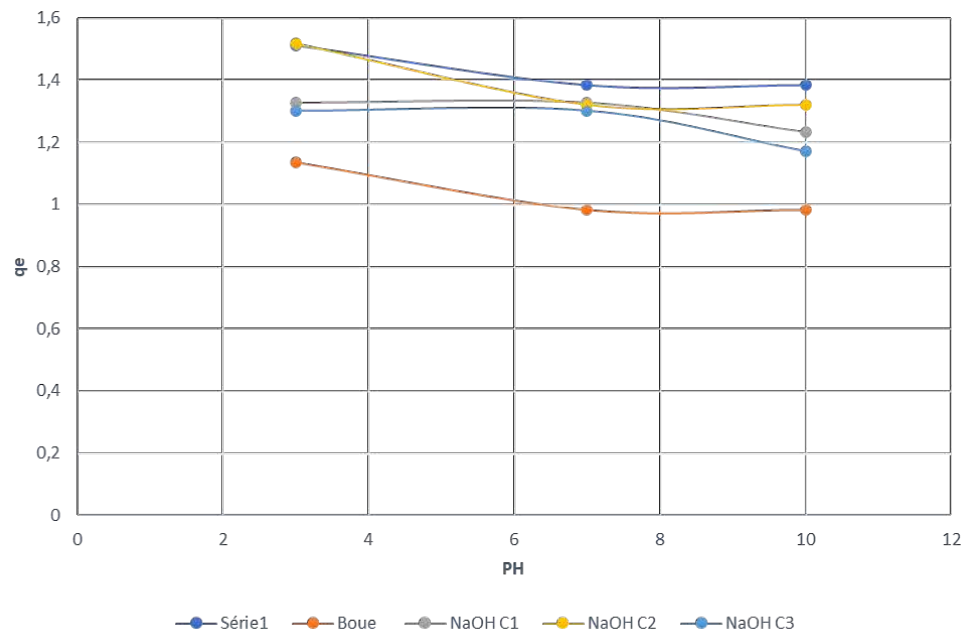


FIG. II.9 – Effet de pH sur l'adsorption du phénol

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette étude s'est déroulée en deux phases : la première consistait à fabriquer du charbon actif à partir de coquilles de pistache, un sous-produit, et la seconde à caractériser les charbons activés obtenus. Une préparation optimale des échantillons, incluant une carbonisation à  $600;^{\circ}C$  avec un adjuvant de  $2.997;mmol.g^{-1}$ , a permis de produire un charbon actif aux propriétés comparables à celles trouvées dans la littérature, avec une surface spécifique apparente de  $163;m^2.g^{-1}$  et une capacité d'adsorption de  $55.45;mg.g^{-1}$ .

Les résultats de l'adsorption du phénol en milieu aqueux sont très satisfaisants, montrant une bonne concordance avec les modèles de Langmuir et Freundlich. Nos charbons actifs montrent une meilleure adsorption pour les fortes concentrations que pour les faibles.

Les aspects quantitatifs de l'évaluation de la masse d'adsorbant sont fiables pour des masses inférieures à 0,3 g. L'équilibre d'adsorption est atteint en soixante minutes, indépendamment du taux d'imprégnation et de la température de calcination. Une augmentation du pH entraîne une diminution de la capacité d'adsorption.

Enfin, des applications potentielles, telles que des essais d'adsorption ou le traitement des eaux, sont envisageables.

# Références

- [1] M. Ehtash, Purification des eaux polluées par du phénol dans un pertracteur à disques tournants. Thesis, 2011.
- [2] J. Crawford, O. Faroon, F. Lladós, and J. D. Wilson, “Toxicological profile for phenol,” 2008.
- [3] K. Mohanty, D. Das, and M. N. Biswas, “Treatment of phenolic wastewater in a novel multi-stage external loop airlift reactor using activated carbon,” J Separation Purification Technology, vol. 58, no. 3, pp. 311–319, 2008.
- [4] K. Mohanty, D. Das, and M. N. Biswas, “Adsorption of phenol from aqueous solutions using activated carbons prepared from tectona grandis sawdust by zncl2 activation,” Chemical Engineering Journal, vol. 115, no. 1, pp. 121–131, 2005.
- [5] R. Perrin and J. Scharff, Chimie industrielle 1. MASSON Paris, 1993.
- [6] M. Jean-Marc, “Phénol. acétone. alpha-méthylstyrène,” Techniques de l’ingénieur Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique, vol. base documentaire : TIP452WEB, no. ref. article : j6490, 2002.
- [7] W. Kujawski, A. Warszawski, W. Ratajczak, T. Porębski, W. Capała, and I. Ostrowska, “Removal of phenol from wastewater by different separation techniques,” Desalination, vol. 163, no. 1, pp. 287–296, 2004.
- [8] W. Kujawski, A. Warszawski, W. Ratajczak, T. Porębski, W. Capała, and I. Ostrowska, “Application of pervaporation and adsorption to the phenol removal from wastewater,” Separation and Purification Technology, vol. 40, no. 2, pp. 123–132, 2004.
- [9] J. Li, Q. Li, Z. Xu, and X. Yang, “Molecular simulation of adsorption behavior for phenol aqueous solution into layered graphene oxides,” Separation and Purification Technology, vol. 335, p. 126215, 2024.

- [10] X. Wei, S. Huang, J. Yang, P. Liu, X. Li, Y. Wu, and S. Wu, “Adsorption of phenol from aqueous solution on activated carbons prepared from antibiotic mycelial residues and traditional biomass,” Fuel Processing Technology, vol. 242, p. 107663, 2023.
- [11] J. Bensalah, “Removal of the textile dyes by a resin adsorbent polymeric : Insight into optimization, kinetics and isotherms adsorption phenomenally,” Inorganic Chemistry Communications, vol. 161, p. 111975, 2024.
- [12] T. M. Roy, E. Nazari, O. K. L. Strong, P. R. Pede, and A. J. Vreugdenhil, “The effect of adsorbent textural and functional properties on model naphthenic acid adsorption,” Journal of Environmental Sciences, vol. 148, pp. 27–37, 2025.
- [13] R. CHERRAYE, Préparation par voie chimique d’un charbon actif à partir des déchets de café (Effet de taux d’adjuvant). Thesis, 2012.
- [14] J. Wang and X. Guo, “Adsorption isotherm models : Classification, physical meaning, application and solving method,” Chemosphere, vol. 258, p. 127279, 2020.
- [15] S. Shamohammadi, M. Khajeh, R. Fattahi, and M. Kadkhodahosseini, “Introducing the new model of chemical adsorption for heavy metals by jacobi activated carbon adsorbents, iranian activated carbon and blowy sand,” Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, vol. 6, p. 100220, 2022.
- [16] G. Feng, B. Zhou, R. Yuan, S. Luo, N. Gai, and H. Chen, “Influence of soil composition and environmental factors on the adsorption of per- and polyfluoroalkyl substances : A review,” Science of The Total Environment, vol. 925, p. 171785, 2024.
- [17] M. El-Naas and M. A. Alhaija, “Modelling of adsorption processes,” Mathematical Modelling, pp. 579–600, 2013.
- [18] C. Zheng, Y. Xie, Y. Niu, C. Wang, J. Hu, K. Kang, H. Song, and S. Bai, “Modeling of multi-temperature type i and ii benzene/ammonia adsorption isotherms : Dual lf model and linearized dr model,” Separation and Purification Technology, vol. 338, p. 126246, 2024.
- [19] I. I. Laskar and Z. Hashisho, “Insights into modeling adsorption equilibria of single and multicomponent systems of organic and water vapors,” Separation and Purification Technology, vol. 241, p. 116681, 2020.

- [20] C. Zheng, H. Song, Y. Xie, X. Yang, L. Lan, K. Kang, and S. Bai, “Modeling of multi-temperature iv and v-type water vapor adsorption isotherms on activated carbons for chemical protection,” Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 670, p. 131486, 2023.
- [21] L. Naidja and A. Malouki, Elimination du colorant orange II en solution aqueuse, par voie photochimique et par adsorption. Thesis, 2010.
- [22] M.O.BENABDERRAHMANE, BIOSORPTION DU PLOMB SUR UNE BIOMASSE (Pleurotus Mutilus). Thesis, 2006.
- [23] K. S. Ukanwa, K. Patchigolla, R. Sakrabani, E. Anthony, and S. Mandavgane, “A review of chemicals to produce activated carbon from agricultural waste biomass,” Sustainability, vol. 11, no. 22, p. 6204, 2019.
- [24] A. M. de Yuso, B. Rubio, and M. T. Izquierdo, “Influence of activation atmosphere used in the chemical activation of almond shell on the characteristics and adsorption performance of activated carbons,” Fuel processing technology, vol. 119, pp. 74–80, 2014.
- [25] N. Arena, J. Lee, and R. Clift, “Life cycle assessment of activated carbon production from coconut shells,” Journal of Cleaner Production, vol. 125, pp. 68–77, 2016.
- [26] H. Zhao, L. Wang, D. Jia, W. Xia, J. Li, and Z. Guo, “Coal based activated carbon nanofibers prepared by electrospinning,” Journal of Materials Chemistry A, vol. 2, no. 24, pp. 9338–9344, 2014.
- [27] M. A. P. Cechinel, A. A. U. de Souza, et al., “Study of lead (ii) adsorption onto activated carbon originating from cow bone,” Journal of Cleaner Production, vol. 65, pp. 342–349, 2014.
- [28] M. Abbas, S. Kaddour, and M. Trari, “Kinetic and equilibrium studies of cobalt adsorption on apricot stone activated carbon,” Journal of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 20, no. 3, pp. 745–751, 2014.
- [29] H. Liu, X. Wang, G. Zhai, J. Zhang, C. Zhang, N. Bao, and C. Cheng, “Preparation of activated carbon from lotus stalks with the mixture of phosphoric acid and pentaerythritol impregnation and its application for ni (ii) sorption,” Chemical engineering journal, vol. 209, pp. 155–162, 2012.

- [30] K. Björklund and L. Y. Li, “Adsorption of organic stormwater pollutants onto activated carbon from sewage sludge,” Journal of environmental management, vol. 197, pp. 490–497, 2017.
- [31] A. T. M. Din, B. Hameed, and A. L. Ahmad, “Batch adsorption of phenol onto physiochemical-activated coconut shell,” Journal of Hazardous Materials, vol. 161, no. 2-3, pp. 1522–1529, 2009.
- [32] G. da Cunha Gonçalves, N. C. Pereira, and M. T. Veit, “Production of bio-oil and activated carbon from sugarcane bagasse and molasses,” Biomass and Bioenergy, vol. 85, pp. 178–186, 2016.
- [33] P. Feng, J. Li, H. Wang, and Z. Xu, “Biomass-based activated carbon and activators : preparation of activated carbon from corncob by chemical activation with biomass pyrolysis liquids,” ACS omega, vol. 5, no. 37, pp. 24064–24072, 2020.
- [34] A. S. Olawale, O. A. Ajayi, M. S. Olakunle, M. T. Ityokumbul, and S. S. Adefila, “Preparation of phosphoric acid activated carbons from canarium schweinfurthii nutshell and its role in methylene blue adsorption,” Preparation of phosphoric acid activated carbons from Canarium Schweinfurthii Nutshell and its role in methylene blue adsorption, vol. 6, no. 2, pp. 1–6, 2015.
- [35] S. M. Lamine, C. Ridha, H.-M. Mahfoud, C. Mouad, B. Lotfi, and A. H. Al-Dujaili, “Chemical activation of an activated carbon prepared from coffee residue,” Energy Procedia, vol. 50, pp. 393–400, 2014.
- [36] Y. Chen, Y. Zhu, Z. Wang, Y. Li, L. Wang, L. Ding, X. Gao, Y. Ma, and Y. Guo, “Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process—a review,” Advances in colloid and interface science, vol. 163, no. 1, pp. 39–52, 2011.
- [37] M. Zgrzebnicki, V. Nair, S. Mitra, A. Kałamaga, J. Przepiórski, and R. J. Wrobel, “N-doped activated carbon derived from furfuryl alcohol—development of porosity, properties, and adsorption of carbon dioxide and ethene,” Chemical Engineering Journal, vol. 427, p. 131709, 2022.
- [38] M. Zgrzebnicki, V. Nair, S. Mitra, A. Kałamaga, J. Przepiórski, and R. J. Wrobel, “N-doped activated carbon derived from furfuryl alcohol – development of porosity,

- properties, and adsorption of carbon dioxide and ethene,” Chemical Engineering Journal, vol. 427, p. 131709, 2022.
- [39] S. T. Tibor and C. A. Grande, “Industrial production of activated carbon using circular bioeconomy principles : Case study from a romanian company,” Cleaner Engineering and Technology, vol. 7, p. 100443, 2022.
- [40] G. M. G. Siregar, R. F. Syahputra, R. Farma, et al., “Koh activation with microwave irradiation and its effect on the physical properties of orange peel activated carbon,” in Journal of Physics : Conference Series, vol. 2049, p. 012025, IOP Publishing, 2021.
- [41] C. Girish and V. Ramachandra Murty, “Adsorption of phenol from aqueous solution using lantana camara, forest waste : kinetics, isotherm, and thermodynamic studies,” International scholarly research notices, vol. 2014, 2014.
- [42] B. Özkaya, “Adsorption and desorption of phenol on activated carbon and a comparison of isotherm models,” Journal of hazardous materials, vol. 129, no. 1-3, pp. 158–163, 2006.
- [43] H. Cherifi, S. Hanini, and F. Bentahar, “Adsorption of phenol from wastewater using vegetal cords as a new adsorbent,” Desalination, vol. 244, no. 1-3, pp. 177–187, 2009.
- [44] H. Karunarathne and B. Amarasinghe, “Fixed bed adsorption column studies for the removal of aqueous phenol from activated carbon prepared from sugarcane bagasse,” Energy Procedia, vol. 34, pp. 83–90, 2013.
- [45] X. Wei, S. Huang, J. Yang, P. Liu, X. Li, Y. Wu, and S. Wu, “Adsorption of phenol from aqueous solution on activated carbons prepared from antibiotic mycelial residues and traditional biomass,” Fuel Processing Technology, vol. 242, p. 107663, 2023.
- [46] S.-H. Lin and R.-S. Juang, “Adsorption of phenol and its derivatives from water using synthetic resins and low-cost natural adsorbents : a review,” Journal of environmental management, vol. 90, no. 3, pp. 1336–1349, 2009.
- [47] Q.-S. Liu, T. Zheng, P. Wang, J.-P. Jiang, and N. Li, “Adsorption isotherm, kinetic and mechanism studies of some substituted phenols on activated carbon fibers,” Chemical engineering journal, vol. 157, no. 2-3, pp. 348–356, 2010.
- [48] V. C. Srivastava, M. M. Swamy, I. D. Mall, B. Prasad, and I. M. Mishra, “Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon : equilibrium, kinetics and

- thermodynamics,” Colloids and surfaces a : physicochemical and engineering aspects, vol. 272, no. 1-2, pp. 89–104, 2006.
- [49] B. Hameed, I. Tan, and A. Ahmad, “Adsorption isotherm, kinetic modeling and mechanism of 2, 4, 6-trichlorophenol on coconut husk-based activated carbon,” Chemical engineering journal, vol. 144, no. 2, pp. 235–244, 2008.
- [50] J. M. Park, C. M. Kim, and S. H. Jhung, “Melamine/polyaniline-derived carbons with record-high adsorption capacities for effective removal of phenolic compounds from water,” Chemical Engineering Journal, vol. 420, p. 127627, 2021.
- [51] G. Dursun, H. Çiçek, and A. Y. Dursun, “Adsorption of phenol from aqueous solution by using carbonised beet pulp,” Journal of hazardous materials, vol. 125, no. 1-3, pp. 175–182, 2005.
- [52] S. F. Lütke, A. V. Igansi, L. Pegoraro, G. L. Dotto, L. A. Pinto, and T. R. Cadaval Jr, “Preparation of activated carbon from black wattle bark waste and its application for phenol adsorption,” Journal of Environmental Chemical Engineering, vol. 7, no. 5, p. 103396, 2019.
- [53] I. I. Salame and T. J. Bandoz, “Role of surface chemistry in adsorption of phenol on activated carbons,” Journal of colloid and interface science, vol. 264, no. 2, pp. 307–312, 2003.
- [54] N. H. Phan, S. Rio, C. Faur, L. Le Coq, P. Le Cloirec, and T. H. Nguyen, “Production of fibrous activated carbons from natural cellulose (jute, coconut) fibers for water treatment applications,” Carbon, vol. 44, no. 12, pp. 2569–2577, 2006.

## Résumé

Le développement des procédés d'adsorption sur charbon actif est un domaine de recherche d'actualité. La préparation des charbons activés possédant des propriétés spécifiques attirent de plus en plus l'attention des chercheurs. La valorisation des sous-produits industriels connaît actuellement un essor remarquable. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail. Il s'agit d'une part de la préparation de charbons actifs à partir de coquille de pistache , autre part la mise en évidence de l'influence du taux de l'agent activant et de la température de calcination sur la capacité d'adsorption. Les différents résultats obtenus pour les surfaces spécifiques et les capacités d'adsorption sont promoteurs.

Mots-clés : Adsorption, Carbonisation, Charbon actif ; coquille de pistache , Phénol, Traitement chimique.

### المخلص

تطوير عمليات الامتزاز على الفحم المنشط هو مجال بحث يجتذب تحضير الفحم المنشط بخصائص محددة زيادة اهتمام الباحثين. تقييم المنتجات الثانوية الصناعية هو حاليا ارتفاع ملحوظ. وفي هذا السياق يجري هذا العمل. هذا جزئيا هو التحضير الفحم النشط من قشرة الفستق، وجزء آخر تسليط الضوء على تأثير معدل العامل المنشط ودرجة حرارة التكييف على السعة الامتزاز. النتائج المختلفة التي تم الحصول عليها لأسطح محددة وقدرات الامتزاز هم مروجون. الكلمات الرئيسية: الامتزاز، الكربنة، الفحم النشط؛ قشرة الفستق، الفينول، المعالجة الكيميائية.

كلمات البحث : الكربون المنشط ، الامتزاز ، الكربنة ، الفينول ، العلاج الكيميائي ، قشور الفستق .

### Abstract

The development of adsorption processes on activated charcoal is an area of research The preparation of activated coals with specific properties attracts increasing the attention of researchers. The valorization of industrial by-products is currently a remarkable rise. It is in this context that this work takes place. This is partly the preparation of active coals from pistachio shell , other part the highlighting of the influence of the rate of the activating agent and the calcination temperature on the capacity adsorption. The different results obtained for specific surfaces and adsorption capacities are promoters.

Keywords : Adsorption, Carbonization, Activated charcoal ; pistachio shell, Phenol, Treat-

ment chemical.