



UNIVERSITÉ DE SAÏDA - Dr MOULAY TAHAR

جامعة سعيدة – د. مولاي الطاهر

Faculté des Sciences et Technologie

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département de Science de la matière

قسم علوم المادة

MEMOIRE

Elaboré en vue de l'obtention du diplôme de master en Chimie
Spécialité : Chimie Inorganique

Intitulé :

**Etude de l'adsorption des colorants organiques (FA)/(BC)
par un matériau naturel (Ecorces de grenade).**

Présenté par :

M^{lle} Bougrine Souheyla

M^{lle} Benouaz Samah

Liste des Jurys

M ^{me} MILOUDI Safia	MCB	Université de Saida - Dr MOULAY Tahar	Présidente
M ^{me} BOUTALEB Nadia	MCA	Université de Saida - Dr MOULAY Tahar	Encadrante
M ^{me} ZAOUI Fatiha	Pr	Université de Saida - Dr MOULAY Tahar	Examinatrice

Année Universitaire 2025/2026

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, pour leur amour
Inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien permanent tout au long de mes
études. Que Dieu les protège et leur accorde santé et longue vie.*

*À mes frères Abdelkhalek, Othmane et Idris, pour leur présence, leur soutien et
leurs encouragements.*

À toute ma famille, pour sa confiance et son affection.

*À mes chères amies Fatima, Khalida, Chaïma et Zineb, pour leurs amitiés
sincères et les moments partagés.*

*À toutes les personnes qui m'ont aidé et encouragé durant ce parcours
universitaire. Enfin, à toute personne qui croit que la persévérance mène au
succès.*

BOUGRINE Souheyla

Je dédie ce modeste travail, fruit de plusieurs années d'efforts et de persévérance,

À mes très chers parents,

*Aucun mot ne saurait exprimer ma profonde gratitude pour votre amour
inconditionnel, vos sacrifices, votre patience et votre soutien indéfectible tout au
Long de mon parcours. Que Dieu vous accorde santé, bonheur et longue vie.*

À mes chers frères et sœurs,

*Pour leur affection, leurs encouragements et leur présence précieuse dans les
moments les plus importants de ma vie.*

À mes chères amies,

*Qui ont partagé avec moi les joies et les difficultés de ce parcours, merci pour
votre amitié sincère, votre soutien et tous les beaux souvenirs que nous avons
construits ensemble.*

*À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce
travail.*

Je dédie ce mémoire avec toute mon affection, mon respect et ma reconnaissance.

BENOUAZ Samah

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien et finaliser ce travail.

Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à notre encadrante, **Madame Nadia Boutaleb**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et ses orientations tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son soutien et ses encouragements ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à Madame MILOUDI Safia Maitre de conférences "B" à l'université de Saïda, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider le jury, ainsi que pour ses remarques constructives. Nos remerciements vont aussi à madame ZAOUI Fatiha Professeur à l'Université de Saïda, pour avoir accepté d'examiner ce travail, et pour l'intérêt qu'elle lui a accordé.

Nous adressons également nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants du Département de Chimie de **l'Université Dr Moulay Tahar** de Saïda pour la qualité de leur enseignement, leurs précieux conseils et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre cursus universitaire.

Nos remerciements s'adressent également au personnel du laboratoire pour son aide, sa collaboration et les moyens mis à notre disposition lors de la réalisation de la partie expérimentale de cette étude.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos chers parents, pour leurs sacrifices, leur amour inconditionnel, leur soutien moral et matériel, ainsi que pour leurs encouragements permanents tout au long de notre parcours. Sans leur confiance et leurs efforts, nous n'aurions pas pu atteindre cette étape importante de notre vie.

Nous remercions également nos frères et sœurs pour leur présence, leur soutien et leurs encouragements qui nous ont accompagnées durant toutes ces années d'études.

Nos chaleureux remerciements vont aussi à nos familles, nos proches et nos amis pour leurs compréhensions, leurs patiences et leurs encouragements dans les moments les plus difficiles.

Liste Des abréviations

Liste Des abréviations	
FA	Fuchsine acide
BC	Bleu Coomassie Brilliant G -250
EG	Ecorces de grenade
T	Température
m	Masse de l'adsorbant en gramme
C	Concentration
R (%)	Rendement
t	Temps de contact
q_e	La capacité d'adsorption théorique a l'équilibre
q_t	La capacité d'adsorption à l'instant t
k₁	La constante de vitesse d'adsorption du pseudo-premier ordre
k₂	La constante de vitesse du pseudo-second ordre
C₀	Concentration initiale de l'adsorbat
C_e	Concentration de l'adsorbat à l'équilibre
V	Volume prélevé de la solution
A₀	Absorbance initiale (colorant).
A_t	Absorbance à l'instant "t".
q_{max}	Quantité maximale adsorbée ou capacité maximale d'adsorption du solide
K_f	Constante d'équilibre de Freundlich
K_d	Constante d'équilibre.
ΔH°	Enthalpie standard
ΔS°	Entropie standard
ΔG	Energie libre standard
FT-IR	Infra rouge à transformée de fourrier
NaOH	Hydroxyde de sodium
HCl	L'acide Chlorhydrique

Liste des Figures

Figure I.1 : Formule chimique de la molécule d'eau.	5
Figure I.2 : Sources industrielles de pollution.	5
Figure I.3 : Préparation traditionnelle des colorants naturels	10
Figure I.4 : Longueur d'onde des couleurs.	10
Figure I.5 : L'indigo.	12
Figure I.6 : Les racines de Granace.	12
Figure I.7 : Le safran.	12
Figure I.8 : Le kermès	12
Figure I.9 : La cochenille	12
Figure I.10 : Structure chimique d'un colorant azoïque acide (5-amino-4hydroxy-3-[[2-(trifluorométhyl) phényl] azo] naphtalène-2-sulfonate de sodium).	14
Figure I.11 : Structure chimique d'un colorant basique de la famille des oxazines (Chlorure de 7-(diméthylamino) -2-éthyl-3-méthylphenoxazin-5-ium).	14
Figure I.12 : Structure chimique du colorant diazoïque direct (Rouge de Trypan) 4,4'-[(3,3'-diméthyl[1,1'-biphényl] -4,4'-diyl) bis(diazène2,1-diyl)] bis(3-aminonaphtalène-1-sulfonate) de disodium.	15
Figure I.13 : Structure chimique du colorant réactif anthraquinonique (Reactive Blue 5) 1-amino-4-[[3-[[4-chloro-6-(3-sulfophényl) -1,3,5-triazin-2-yl] amino]4-sulfophényl] amino]-9,10-dioxoanthracène-2-sulfonate de trisodium.	15
Figure I.14 : Structure chimique du colorant de dispersion anthraquinonique (Disperse Orange 11) 1-amino-2-hydroxyanthracène-9,10-dione.	16
Figure I.15 : (Indigo) 2-(1,3-dihydro-3-oxo-2(H)-indole-2-ylidène)-1,2-dihydro-3(H)-indole-3-one	16
Figure I.16 : Structure chimique de la Fuchsine acide.	19
Figure I.17 : Structure chimique du Bleu Coomassie Brillant G-250.	20
Figure II.1 : phénomène d'adsorption.	24
Figure II.2. : Schéma du phénomène d'adsorption.	25

Figure II.3 : Schéma du mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain	28
Figure II.4 : Les principaux adsorbants	32
Figure II.5 : Photographie des feuilles, des fleurs et des fruits de grenadier (Anonyme).	33
Figure III.1 : Schéma représentative des étapes d'expérimentale.	39
Figure III.2 : Fruit de grenade	41
Figure III.3 : Ecorces de grenade	41
Figure III.4 : Lavage des écorces de grenade	41
Figure III.5 : Séchage et broyage des écorces de grenade	41
Figure III.6 : Spectre Infrarouge à transformée de Fourier des écorces de grenade	42
Figure III.7 : Courbe d'étalonnage de la Fuchsine Acide	44
Figure III.8 : Courbe d'étalonnage du Coomassie brillant G-250.	44
Figure III.9 : Influence de la masse des écorces de grenade sur le rendement d'adsorption R (%) de la Fuchsine acide (FA) et du Bleu Coomassie brillant G250 (BC).	45
Figure III.10 : Influence du temps de contact sur le rendement de l'adsorption R (%) de la Fuchsine Acide (FA) et de Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.	46
Figure III.11 : Influence de concentration sur le rendement de l'adsorption R (%) de la Fuchsine Acide (FA) et de Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.	48
Figure III.12 : Influence de la Température sur le rendement d'adsorption de la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.	49
Figure III.13 : Influence du PH sur le rendement d'adsorption de la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.	50
Figure III.14 : Détermination des constantes des vitesses du pseudo 1 ^{er} ordre de l'adsorption du la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC).	52
Figure III.15 : Détermination des constantes des vitesses du pseudo-second ordre de l'adsorption du la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250(BC).	53
Figure III.16 : Linéarisation de Langmuir de la Fuchsine Acide (FA) par les écorces de grenade.	54
Figure III.17 : Linéarisation de Langmuir du Bleu Coomassie brillant G-250(BC) par les écorces de grenade	54
Figure III.18 : Linéarisation de Freundlich de la Fuchsine Acide (FA) par les écorces de grenade	55
Figure III.19 : Linéarisation de Freundlich du Bleu Coomassie brillant G250(BC) par les écorces de grenade.	55
Figure III.20 : Paramètre thermodynamique d'adsorption du la Fuchsine Acide (FA) par les écorces de grenade	57
Figure III.21 : Paramètre thermodynamique d'adsorption du Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.	57

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante.	11
Tableau I.2 : Toxicité des colorants (influence sur la santé humaine).	19
Tableau I.3 : Propriétés physico-chimique du Fuchsine Acide	20
Tableau I.4 : Propriétés physico-chimique du Bleu Coomassie Brillant G-250	21
Tableau II.1 : Différence entre la chimisorption et la physisorption.	25
Tableau II 2 : Composition chimique de la peau de grenade.	34
Tableau III.1 : Tableau des réactifs chimiques utilisés.	38
Tableau III.2 : Bandes caractéristiques du spectre infrarouge à transformée de Fourier des écorces de grenade [1].	43
Tableau III.3 : Constantes cinétiques d'adsorption de la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) sur les écorces de grenade	53
Tableau III.4 : Constantes des deux isothermes d'adsorption du FA et BC par les écorces de grenade	55
Tableau III.5 Paramètres thermodynamiques de l'adsorption de la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC).	57

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I : Revue bibliographique sur la pollution et les polluants	
Introduction	3
I.1 POLLUTION	3
I.1.1 Généralité sur l'eau	3
I.1.2 Définition de la pollution de l'eau	4
I.1.3 Types de pollution de l'eau	5
• I.3.1 Pollution physique	5
• I.3.2 Pollution chimique	5
• I.3.3 Pollution microbiologique	5
I.1.4 Les sources principales de la pollution de l'eau	5
• I.4.1 Pollution urbaine	6
• I.4.2 Pollution industrielle	6
• I.4.3 Pollution d'origine agricole	6
• I.4.4 Pollution par les polluants émergents	6
I.1.5 Impact de la pollution de l'eau	7
I.2 COLORANT	7
I.2.1 Généralités sur les eaux colorées	7
I.2.2 Historique des colorants	8
I.2.3 Définition des colorants	9
I.2.4 Classification des colorants	10
I.2.5 Application des colorants	16
I.2.6 Toxicité des colorants	17
I.2.7 Colorants étudiés	18
• I.2.7.1 Fuchsine acide	18
• I.2.7.2 Bleu Coomassie G-250	19
Références bibliographiques	21
Chapitre II : Revue bibliographique sur le procédé d'adsorption	
Introduction	23
II.1 Introduction	23
II.2 Types d'adsorption	23
• II.2.1 Chimisorption	23
• II.2.2 Physisorption	24
II.3 Facteurs influençant l'adsorption	25
II.3.1 Influence du pH	25
II.3.2 Influence de la température	25
II.3.3 Nature de l'adsorbant	25
II.3.4 Nature de l'adsorbat	26
II.3.5 Surface spécifique	26
II.3.6 Porosité	26

II.3.7 Polarité	26
II.3.8 Temps de contact	26
II.4 Mécanisme d'adsorption	27
II.5 Cinétique d'adsorption	27
• II.5.1 Pseudo premier ordre	27
• II.5.2 Pseudo second ordre	29
II.6 Isothermes d'adsorption	29
• II.6.1 Langmuir	30
• II.6.2 Freundlich	30
• II.6.3 Temkin	31
II.7 Matériaux adsorbants	31
II.7.1 Description du grenadier	32
II.7.2 Production de grenade en Algérie	33
II.7.3 Écorce de grenade	33
II.7.4 Composition chimique de l'écorce de grenade	34
Références bibliographiques	35

Chapitre III : ETUDE DEL'ADSORPTION DE LA (FA) ET DU LE (BC) PAR LES (EG)

Introduction	38
III.1 Matériels et verreries	38
III.2 Réactifs chimiques	38
III.3 Protocole expérimental	39
III.4 Préparation du biomatériau	41
III.5 Étude paramétrique	43
III.6 Effets expérimentaux	45
III.7 Étude cinétique	46
III.8 Effet de la concentration	47
III.9 Effet de la température	48
III.10 Effet du pH	50
III.11 Modélisation cinétique	51
III.12 Isothermes d'adsorption	54
III.13 Étude thermodynamique	56
Références bibliographiques	58
Conclusion générale	59

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'eau est un élément fondamental à la vie et joue un rôle essentiel dans le développement économique de la civilisation humaine, étant largement utilisée dans de nombreux secteurs, notamment l'industrie et l'agriculture. [1]

Cependant, cette ressource vitale demeure fragile et vulnérable à diverses formes de pollution. La contamination des eaux, qu'elle soit accidentelle ou intentionnelle, constitue aujourd'hui un problème environnemental majeur, entraînant la dégradation des écosystèmes aquatiques, l'altération de la qualité des ressources hydriques et des risques importants pour la santé publique [2].

Dans ce contexte, la pollution environnementale reste un défi actuel, puisque de nombreuses activités industrielles continuent de rejeter divers polluants, notamment des métaux lourds et des colorants, dont la toxicité représente une source importante de contamination des milieux aquatiques [3].

Les normes environnementales deviennent de plus en plus strictes, abaissant les seuils admissibles pour la concentration des métaux dans les eaux rejetées. Par exemple, la concentration maximale de zinc est fixée à $2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ selon l'arrêté du 2 février 1998 relatif aux rejets des eaux résiduaires dans le milieu naturel [4]. Ces réglementations obligent les industries à traiter leurs effluents métallifères afin de se conformer à la législation en vigueur.

Par ailleurs, les colorants, composés organiques largement utilisés dans les secteurs cosmétiques, agroalimentaires, textiles, agricoles, pharmaceutiques et médicaux [5], représentent un défi majeur dans le traitement des eaux usées. Plusieurs types de colorants sont très toxiques, cancérogènes, mutagènes et difficilement biodégradables [6]. Ils constituent ainsi des risques pour la santé humaine et des nuisances pour l'environnement, rendant indispensable la mise en place de méthodes de traitement adaptées, telles que les unités de décoloration [7].

Plusieurs techniques physiques, chimiques et biologiques permettent de traiter et décolorer les effluents pollués, notamment la coagulation-floculation, la biodégradation, la filtration membranaire, l'oxydation chimique, l'ozonation, l'échange d'ions, les méthodes électrochimiques et l'adsorption [8]. Parmi ces techniques, l'adsorption apparaît comme l'une des méthodes les plus efficaces et les plus simples à mettre en œuvre pour l'élimination des colorants [9].

Ce procédé consiste à piéger les colorants via un matériau solide appelé adsorbant. Différents matériaux solides peuvent être utilisés pour la décoloration des eaux, tels que les

INTRODUCTION GÉNÉRALE

argiles, zéolites, alumines activées, boues, biomasses, résidus agricoles, sous-produits industriels et charbon actif [7].

Cette étude se concentre sur la suppression de la Fuchsine acide et du Bleu de Coomassie brillant G-250 en milieu aqueux grâce à l'adsorption sur des écorces de grenade employées comme biomatériau adsorbant. Pour réaliser cet objectif, ce mémoire se compose de trois chapitres.

Le premier chapitre fournit une revue de la littérature concernant la pollution de l'eau et les colorants. Le chapitre deux traite de l'adsorption, de ses paramètres clés et propose une présentation globale du biomatériau utilisé. Pour conclure, le chapitre trois détaille tous les résultats expérimentaux recueillis durant cette recherche relative à l'adsorption de deux colorants par les pelures de grenade

Références bibliographiques

- [1] **Boucif, F.** (2024). *Étude de l'adsorption des polluants par un biomatériau issu des déchets de dattes*. Université Dr Moulay Tahar de Saïda.
- [2] **Bentahar, Y.** (2016). *Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse* [Thèse de doctorat, Université Côte d'Azur].
- [3] **Chalghmi, H.** (2015). *Étude de la pollution marine par les hydrocarbures et caractérisation de leurs effets biochimiques et moléculaires sur la palourde Ruditapes sp.* [Thèse de doctorat en géochimie, Université de Bordeaux et Université de Monastir].
- [4] **Ingrid, V.** (2004). *Impact des rejets de cuivre et de zinc en milieu aquatique : circulation, spéciation, biodisponibilité, bioaccumulation, transfert et toxicité* [Thèse en écotoxicologie, Université Paul-Verlaine de Metz].
- [5] **Mansour, H., Boughzala, B., Dridi, O., Barillier, D., Chekir-Ghedira, L., & Mosrati, R.** (2011). Les colorants textiles, sources de contamination de l'eau : criblage de la toxicité et des méthodes de traitement. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 24(3), 209–238.
- [6] **Bouderhem, S., & Lakhal, W.** (2020). *Valorisation des déchets naturels pour le traitement des eaux résiduaires textiles* [Mémoire universitaire, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès].
- [7] **Faouzia, B.** (2014). *Élimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture*. Université Ferhat Abbas Sétif 1.
- [8] **Rangabhashiyam, S., Anu, N., & Selvaraju, N.** Sequestration of dye from textile industry wastewater using agricultural waste products as adsorbents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1.
- [9] **Ahmed, M. J., & Dhedan, S. K.** (2012). Equilibrium isotherms and kinetics modeling of methylene blue adsorption on agricultural wastes-based activated carbons. *Fluid Phase Equilibria*, 317, 9–14.

CHAPITRE I
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE
SUR LA POLLUTION ET LES
POLLUANTS

Introduction

L'eau est une ressource naturelle essentielle à la vie et au développement des activités humaines. Cependant, l'urbanisation croissante, l'industrialisation et l'intensification des activités agricoles ont entraîné une dégradation significative de sa qualité. La pollution de l'eau est devenue un enjeu environnemental majeur, affectant gravement les écosystèmes aquatiques, la biodiversité et la santé humaine. La protection des ressources en eau est donc cruciale pour assurer un développement durable. [1]

Parmi les différents polluants présents dans les eaux usées, les colorants occupent une place importante. Utilisés dans de nombreux secteurs industriels tels que le textile, le papier, les cosmétiques et l'industrie alimentaire, ils sont souvent rejetés dans l'environnement sans traitement adéquat. Leur forte stabilité chimique, leur résistance à la biodégradation ainsi que leur toxicité potentielle peuvent entraîner des impacts négatifs sur les organismes vivants et les milieux aquatiques, ce qui justifie l'intérêt croissant porté à leur élimination. [2]

I.1 POLLUTION

I.1.1 Généralité sur l'eau

La molécule d'eau est constituée de deux atomes d'hydrogène (symbole chimique **H**) et d'un atome d'oxygène (symbole chimique **O**) liés par deux liaisons covalentes simples, formant un angle de

104,5°, sa formule chimique est **H₂O**. [3]

Les liaisons entre les molécules d'eau sont appelées liaisons hydrogène ; ce sont des liaisons physiques très faibles. Comme toute molécule, la molécule d'eau est électriquement neutre.

Elle présente un moment dipolaire élevé (1,85 Debye), dû à la forte électronégativité de l'atome d'oxygène. Cette polarisation explique pourquoi l'eau peut conduire le courant électrique ainsi que d'autres propriétés remarquables. [4]

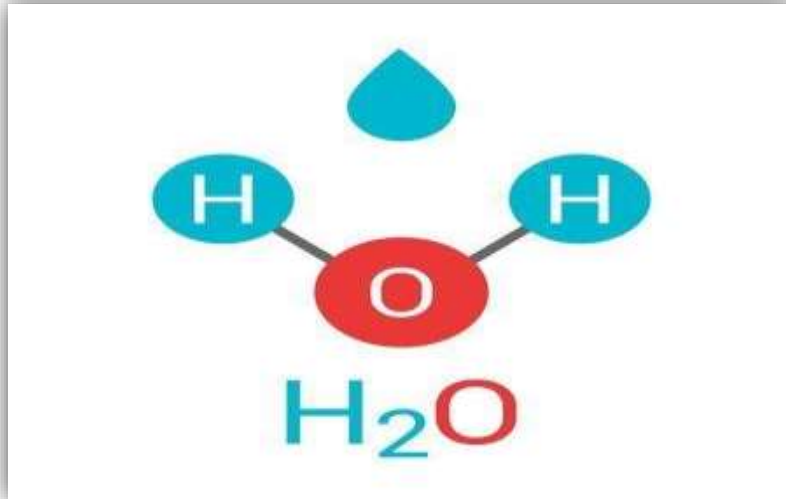


Figure I.1 : Formule chimique de la molécule d'eau.

I.1.2 Définition de la pollution de l'eau

La pollution de l'eau désigne toute modification des caractéristiques de l'eau survenant lors de son utilisation, entraînant un appauvrissement ou un enrichissement en diverses substances.

Cette altération devient gênante ou nuisible pour les usages humains, ainsi que pour la faune et la flore.

Les effets néfastes de la pollution peuvent se manifester à plusieurs niveaux, notamment

Sur le plan sanitaire et écologique, et se traduisent notamment par une augmentation de la turbidité de l'eau ainsi que par l'envasement des retenues d'eau. [5]



Figure I.2 : Sources industrielles de pollution.

I.1.3 Types de pollution de l'eau

La pollution de l'eau se divise en trois grandes catégories principales :

1.3.1 Pollution physique

Cette pollution est causée par différents éléments solides transportés par les rejets domestiques et industriels. On peut distinguer plusieurs sous- types :

- **Pollution solide** : elle provient des particules solides présentes dans les eaux industrielles, les eaux de ruissellement, ainsi que des déchets déversés en plein air. [6]
- **Pollution thermique** : généralement liée aux eaux utilisées pour refroidir les installations industrielles. Toute variation de la température de l'eau peut perturber l'équilibre écologique du milieu aquatique naturel et menacer la survie des organismes vivants. [6]
- **Pollution radioactive** : liée aux rejets d'éléments radioactifs provenant des centrales nucléaires, des installations industrielles et des usines de traitement des déchets radioactifs. [6]

1.3.2 Pollution chimique

Elle résulte de la présence de polluants chimiques d'origine organique ou minérale, générés par

Diverses activités humaines. Ce type de pollution inclut notamment les solvants, les métaux lourds comme le [Zn, Pb, Cd, ...], les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), les produits pharmaceutiques, les pesticides, les sels, ...etc. [6]

1.3.3 Pollution microbiologique

Elle provient de diverses sources telles que les rejets des hôpitaux, de l'agriculture et des eaux usées domestiques. L'eau se charge alors de microorganismes pathogènes [bactéries, virus, parasites] qui peuvent représenter un danger pour l'environnement et la santé humaine. [7]

1.1.4 Les sources principales de la pollution de l'eau

Selon l'origine de la pollution on distingue différentes sources principales de la pollution de L'eau ainsi que tous ces types de pollution peuvent se rencontrer simultanément :

1.4.1 Pollution urbaine

La pollution urbaine, générée par les activités quotidiennes des populations, provient principalement des eaux usées domestiques, incluant les eaux vannes et ménagères. Ces eaux sont riches en matières organiques, en détergents contenant des phosphates, ainsi qu'en germes pathogènes tels que bactéries, virus et parasites issus des matières fécales. Par ailleurs, l'urbanisation rapide favorise le ruissellement des eaux de pluie sur les surfaces imperméables, qui entraînent avec elles des déchets solides, des microplastiques et des résidus de carburants vers les cours d'eau. [8]

1.4.2 Pollution industrielle

Les activités industrielles constituent une source majeure de contamination chimique et toxique. De nombreuses usines rejettent, souvent sans traitement adéquat, des effluents contenant des métaux lourds hautement toxiques comme le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium. S'y ajoutent les hydrocarbures issus des activités pétrolières ainsi que les solvants organiques. Ces polluants sont persistants dans l'environnement et ont la capacité de se bioaccumuler tout au long de la chaîne alimentaire aquatique. [9]

1.4.3 Pollution d'origine agricole

L'agriculture moderne est aujourd'hui la principale cause de la dégradation des ressources en eau à l'échelle mondiale. L'utilisation intensive d'engrais chimiques, riches en nitrates et phosphates, ainsi que de pesticides pour augmenter les rendements, provoque le lessivage des sols lors des précipitations. Ces substances chimiques pénètrent dans les nappes phréatiques et se déversent dans les cours d'eau, entraînant le phénomène d'eutrophisation, qui asphyxie les écosystèmes aquatiques. Par ailleurs, l'élevage intensif génère d'importantes quantités de matières organiques et de résidus de médicaments vétérinaires. [10]

1.4.4 Pollution par les polluants émergents

Depuis quelques années, la recherche scientifique met en lumière une nouvelle catégorie de menaces appelée « polluants émergents ». Il s'agit de résidus de médicaments humains (antibiotiques, anti-inflammatoires, hormones), de produits de soins personnels (cosmétiques,

filtres solaires) et de composés chimiques perfluorés (PFAS). Bien que présents en très faibles concentrations, ces micropolluants échappent souvent aux traitements des stations d'épuration classiques et agissent comme perturbateurs endocriniens sur la faune aquatique. [11]

I.1.5 Impact de la pollution de l'eau

a) Impact sur l'écosystème

Le déversement direct des eaux usées dans les environnements naturels représente un risque considérable pour les milieux aquatiques et l'équilibre écologique global. Les rejets industriels, souvent riches en azote et en phosphore, participent à l'eutrophisation des étangs et des rivières. Ce phénomène engendre une prolifération excessive de végétation aquatique, notamment des algues, ce qui diminue la quantité d'oxygène dissous et crée des zones anoxiques où les espèces aquatiques ne peuvent pas survivre. Par ailleurs, la présence de métaux lourds comme le mercure et l'arsenic dans les eaux peut s'avérer extrêmement nocive pour les organismes aquatiques, perturbant leurs fonctions biologiques cruciales et entraînant des dysfonctionnements physiopathologiques sévères. [12]

b) Impact sur la santé humaine

La contamination des eaux a également un impact direct sur la santé des êtres humains. Les métaux lourds et les substances chimiques contenus dans les eaux usées peuvent s'accumuler au sein de la chaîne alimentaire, en particulier par la consommation de poissons ou d'autres produits aquatiques souillés. Cette bioaccumulation expose les populations humaines à des dangers de maladies chroniques, incluant des troubles neurologiques, des cancers et des mal fonctionnements rénaux. De plus, l'ingestion ou le contact avec les eaux polluées peut entraîner des infections gastro-intestinales, des maladies dermatologiques, et même des problèmes respiratoires. La pollution des ressources en eau, en plus de son impact environnemental dévastateur, présente donc une menace sérieuse pour la sante publique. [12]

I.2 COLORANT

I.2.1 Généralités sur les eaux colorées

Les effluents industriels se distinguent par une hétérogénéité marquée, corrélée directement à la diversité des secteurs d'activité. La charge polluante, résultant du contact de l'eau avec divers états de la matière (solides, liquides ou gazeux), se caractérise souvent par une fraction dissoute notable. Si certains secteurs, comme l'agroalimentaire, génèrent des rejets principalement biodégradables, d'autres industries (chimique, textile) introduisent des

composés xénobiotiques ou toxiques. Ces derniers peuvent inhiber les processus biologiques, masquant ainsi la biodégradabilité réelle de l'effluent. L'industrie textile illustre particulièrement cette problématique par l'usage de colorants synthétiques, dont la persistance et la forte concentration constituent une menace majeure pour les écosystèmes aquatiques. [13]

L'impact environnemental de l'industrie des colorants est colossal : sur une production mondiale annuelle estimée à 700 000 tonnes, environ 20 % (soit 140 000 tonnes) sont perdus et évacués dans les effluents lors des processus industriels. Ces rejets ne constituent pas seulement une pollution visuelle ; ils forment une matrice chimique complexe intégrant des surfactants, des biocides, des agents de dispersion et des traces métalliques. Cette synergie de substances chimiques confère aux effluents une écotoxicité élevée, menaçant l'intégrité des organismes vivants dans les milieux récepteurs. [14]

I.2.2 Historique des colorants

Depuis l'Antique, l'être humain a eu recours aux colorants naturels pour teindre divers supports tels que les textiles, les aliments ou encore pour embellir son environnement. Ces substances colorantes étaient principalement extraites de sources naturelles, notamment de végétaux comme l'indigo ou d'origine animale, à l'image du carmin obtenu à partir de la cochenille. Les premières traces de l'utilisation de ces colorants remontent à environ 2600 avant Jésus-Christ.

En 1856, William Henry Perkin réussit à synthétiser la mauvéine, considérée comme le premier colorant synthétique, marquant ainsi un tournant majeur dans l'histoire de la chimie. Ce composé fut rapidement utilisé dans la teinture de textiles tels que la soie et le coton. Deux ans plus tard, François Verguin mit au point la fuchsine, un colorant basique de teinte rouge violacée, dont l'impact sur l'industrie fut considérable. Cette avancée favorisa l'essor des industries chimiques à l'échelle mondiale [15]

Au début du XXe siècle, les colorants synthétiques avaient presque entièrement supplanté les colorants naturels en raison de leurs performances et de leur coût de production plus avantageux. De nos jours, on recense plus de 10000 colorants issus de la synthèse organique, dont la structure repose majoritairement sur des noyaux aromatiques. [16]



Figure I.3 : Préparation traditionnelle des colorants naturels.

I.2.3 Définition des colorants

Les colorants sont des composés, généralement organiques, qu'ils soient d'origine naturelle ou

Synthétique, ayant la capacité de colorer durablement le support sur lequel ils sont appliqués (Needles, 1986 ; Sen, 2005). Cette propriété est liée à leur aptitude à absorber une partie du rayonnement lumineux dans le spectre visible compris entre 380 à 750 nm. (**Figure I.3**)

En général, les colorants sont constitués d'un assemblage de groupements chromophores et auxochromes associés à des structures aromatiques (**Tableau I.1**), responsables de leur couleur (Guivarc'h, 2004). Ils sont largement utilisés dans divers domaines tels que le textile, les encres, les peintures, les vernis ainsi que l'industrie alimentaire. [17]

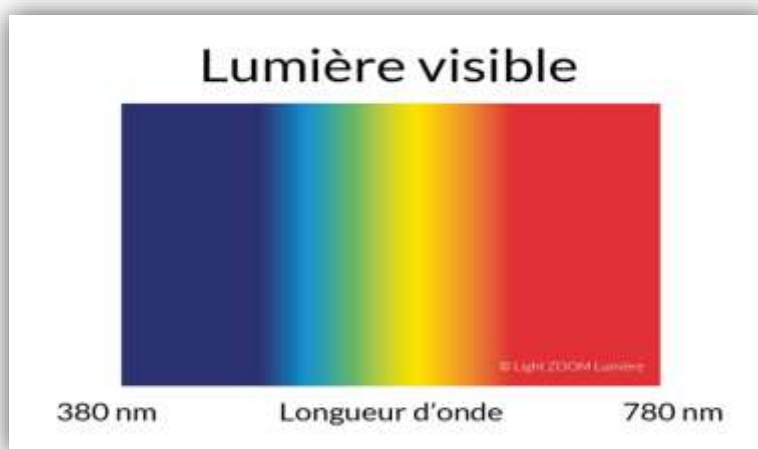


Figure I.4 : Longueur d'onde des couleurs.

Tableau I.1 : Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante.

Groupes chromophores	Groupes auxochromes
Azo ($-N=N-$)	Amino
Nitroso ($-N$, $-N-OH$)	Méthylamino
Carbonyl ($=C=O$)	Diméthylamino
Vinyl ($(-C=C-)$)	Hydroxyl
Nitro ($-NO_2$ ou $=NO-OH$)	Alkoxy
Sulfure ($>C=S$)	Groupements donneurs d'électrons

I.2.3 Classification des colorants

Les colorants sont largement utilisés dans plusieurs domaines industriels. Ils peuvent être classés selon différents critères :

A). Selon l'origine

Colorants naturels

La plupart des colorants employés proviennent soit de sources végétales, extraits de Plantes, d'arbre ou de lichens, soit de sources animales, obtenus à partir d'insectes tels que le kermès (**Figure I.8**) et la cochenille (**Figure I.9**), de mollusques comme la pourpre, ou encore de micro-organisme. [13]

- Le bleu est tiré de l'indigo, une plante légumineuse. (**Figure I.5**)
- Le rouge provient de la racine de la garance. (**Figure I.6**)
- Le jaune est issu du safran. (**Figure I.7**)
- **Colorants synthétiques**

Les colorants synthétiques sont classés en fonction de leur structure chimique ainsi que de leur mode d'application sur divers supports tels que les textiles, le papier, le cuir, les matières plastiques, etc. [18]

B). Selon la structure chimique

- **Colorants azoïques**

Se distinguant par la présence du groupement fonctionnel azoïque ($-N=N-$) unissant deux cycles aromatiques, les colorants azoïques constituent la classe la plus prépondérante du marché. Ils représentent en effet plus de la moitié de la production globale de matières colorantes. [19]



Figure I.5 : L'indigo.



Figure I.6 : Les racines de Granace.



Figure I.7 : Le safran.



Figure I.8 : Le kermès



Figure I.9 : La cochenille.

- **Colorants triphénylméthanés**

Les colorants triphénylméthanés proviennent du triphénylméthane, un hydrocarbure formé de trois cycles phényle liés à un atome de carbone central. Cette structure est commune à de nombreux composés organiques colorés. Les colorants triphénylméthanés et leurs dérivés hétérocycliques constituent la plus ancienne famille de colorants synthétiques.

Bien qu'ils soient aujourd'hui moins utilisés que les colorants azoïques et anthraquinoniques, ils restent commercialement importants grâce à leur capacité à offrir une large gamme de nuances. [20] Les triphénylméthanés sont largement employés dans les industries du papier et du textile pour teindre des fibres comme le nylon, la laine, la soie et le coton. Leur usage dépasse le secteur industriel, puisqu'ils sont également utilisés en médecine comme marqueurs biologiques et comme agents antifongiques dans l'élevage des poissons et de la volaille. [18]

- **Colorants anthraquinoniques**

D'un point de vue commercial, ils représentent la deuxième famille de colorants la plus importante après les colorants azoïques. Leur formule générale, dérivée de l'anthracène, montre que le chromophore est constitué d'un noyau qui ionique auquel peuvent se lier des groupes hydroxyles ou amino. [18]

- **Colorants indigoïdes**

Les colorants indigoïdes, nommés d'après l'indigo (**Figure I.5**) dont ils sont issus, sont employés comme additifs dans les produits pharmaceutiques et dans les procédés de diagnostic médical. [18]

c). Selon le mode d'application

- **Colorants acides ou anioniques**

Les colorants acides sont solubles dans l'eau en raison de la présence de groupes sulfonates. Ils affichent une forte affinité pour les fibres textiles et sont principalement employés pour teindre des fibres animales comme la laine et la soie, ainsi que certaines fibres synthétiques modifiées telles que le nylon et le polyamide. [21]

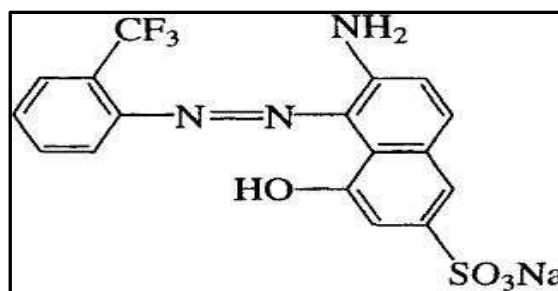


Figure I.10 : Structure chimique d'un colorant azoïque acide (5-amino-4-hydroxy-3-[[2-(trifluorométhyl) phényl] azo] naphtalène-2-sulfonate de sodium).

- **Colorants basiques ou cationiques**

Les colorants basiques sont solubles dans l'eau puisqu'ils se présentent sous forme de sels D'amines organiques. Ils établissent des liaisons entre leurs sites cationiques et sites anioniques des fibres textiles. Toutefois, ils ont généralement une faible résistance à la lumière. [21]

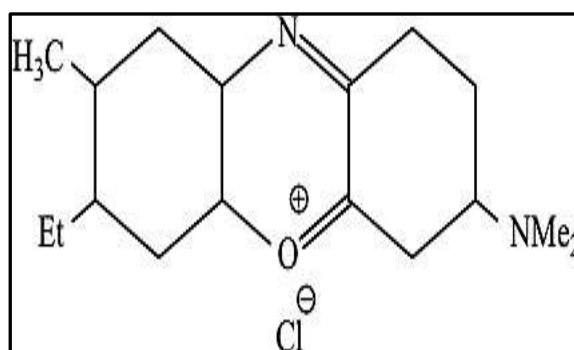


Figure I.11 : Structure chimique d'un colorant basique de la famille des oxazines (Chlorure de 7-(diméthylamino) -2-éthyl-3-méthylphenoxazin-5-ium)

- **Colorants directs**

Les colorants directs sont capables de former des charges positives ou négatives attirées électrostatiquement par les charges des fibres textiles. Ils présentent une forte affinité pour les fibres cellulosiques et peuvent teindre directement le coton sans utilisation de mordant. De plus, ils se caractérisent par un prix modéré, une application facile, mais une faible résistance aux lavages. [21]

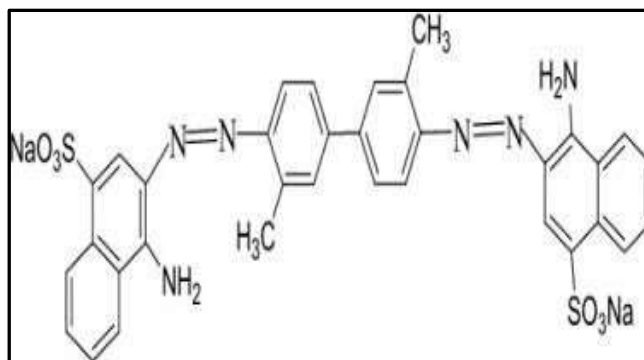


Figure I.12 : Structure chimique du colorant diazoïque direct (**Rouge de Trypan**) 4,4'-[(3,3'-diméthyl[1,1'-biphényl] -4,4'-diyl) bis(diazoène-2,1-diyl)] bis(3-aminonaphtalène 1-sulfonate) de disodium.

- **Colorants réactifs**

Ces colorants contiennent principalement des groupes chromophores issus des familles azoïques, anthraquinoniques et phtalocyanines. Ils possèdent également une fonction chimique réactive, comme une fonction triazinique ou vinylsulfone, qui permet la formation d'une liaison covalente solide avec les fibres. De plus, ces colorants sont solubles dans l'eau, facilitant ainsi leur application. [21]

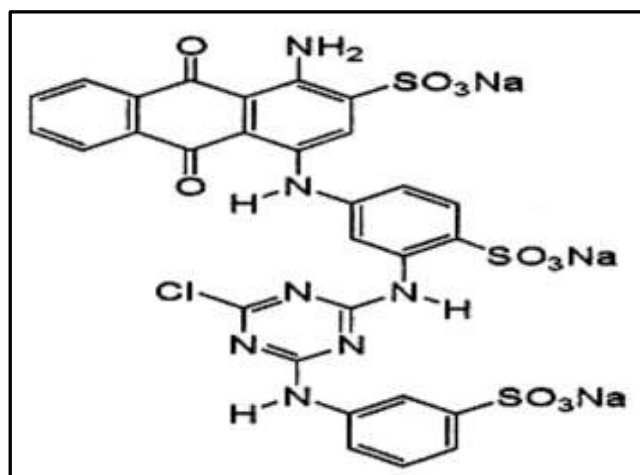


Figure I.13 : Structure chimique du colorant réactif anthraquinonique (**Reactive Blue 5**) 1-amino-4-[[3-[[4-chloro-6-(3-sulfophényl) -1,3,5-triazin-2-yl] amino] -4-sulfophényl] amino] -9,10-dioxoanthracène-2-sulfonate de trisodium.

- **Colorants dispersés**

Ces colorants sont très peu solubles dans l'eau et sont appliqués sous forme de fines poudres dispersées dans le bain de teinture. [21]

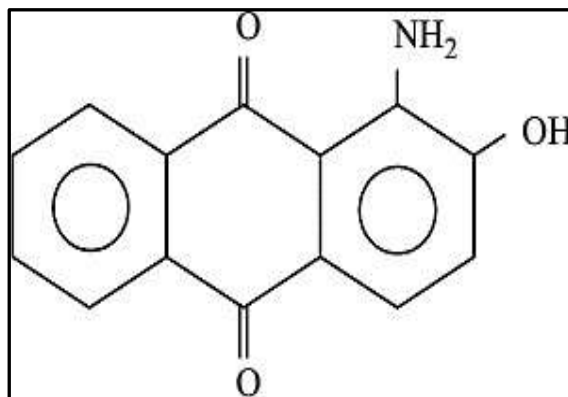


Figure I.14 : Structure chimique du colorant de dispersion anthraquinonique
(Disperse Orange 11) 1-amino-2-hydroxyanthracène-9,10-dione.

- **Colorants de cuve**

Ces colorants sont insolubles dans l'eau et sont principalement utilisés pour l'application de l'indigo, qui nécessite la préparation d'une cuve spécialement conçue pour résister aux agents de dégradation. [21]

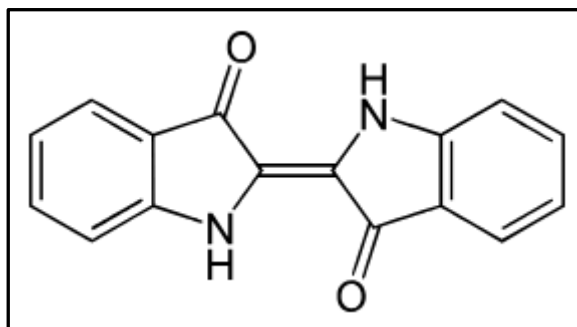


Figure I.15: (Indigo) 2-(1,3-dihydro-3-oxo-2\(\text{H}\)-indole-2-ylidène)-1,2-dihydro-3\(\text{H}\)-indole-3-one

I.2.4 Application des colorants

Les colorants ont de nombreuses applications dans divers domaines, notamment :

- La teinture et l'impression sur toutes sortes de fibres et tissus.

- La teinture en bain des fils pour les fibres synthétiques.
- La teinture du cuir.
- La coloration du papier et du parchemin.
- La teinture des caoutchoucs, feuilles et matières plastiques.
- L'utilisation dans toutes les techniques de peinture.
- La préparation de couleurs à la chaux pour les pré-colorations et enduits sur bâtiments.
- La coloration des papiers peints lors de l'impression.
- La fabrication d'encres.
- La coloration des denrées alimentaires.
- L'utilisation dans les domaines médical et cosmétique.

I.2.5 Impact des colorants sur les êtres vivants et l'environnement

Impact sur les êtres vivants

Les colorants synthétiques présentent plusieurs effets néfastes sur la santé humaine. Certains colorants, notamment les colorants azoïques et cationiques, sont considérés comme très toxiques même à faibles concentrations. Leur exposition prolongée peut provoquer des irritations de la peau et des yeux ainsi que des réactions allergiques.

Plusieurs études ont également montré que certains colorants peuvent avoir des effets cancérigènes et mutagènes. Les travailleurs de l'industrie textile exposés durant de longues périodes aux colorants azoïques présentent un risque plus élevé de développer certains cancers, notamment celui de la vessie.

Les colorants de la famille des triphénylméthanes sont reconnus pour leurs effets génotoxiques sur les cellules vivantes, tandis que les colorants indigoïdes peuvent provoquer une toxicité neurologique aiguë. De plus, l'accumulation de ces substances dans la chaîne alimentaire peut entraîner une contamination indirecte de l'homme à travers l'eau et les aliments consommés. [22]

Impact sur L'environnement

Les colorants rejetés dans les eaux usées industrielles ont des conséquences importantes sur l'environnement aquatique. Même à de faibles concentrations, ils modifient la couleur, l'odeur et la turbidité de l'eau, ce qui réduit la pénétration de la lumière et perturbe le processus de photosynthèse des plantes aquatiques.

Certains colorants libèrent également des nitrates et des phosphates favorisant l'eutrophisation des milieux aquatiques. Ce phénomène entraîne une prolifération excessive des algues et une diminution de l'oxygène dissous dans l'eau, ce qui menace la survie des organismes aquatiques. En outre, plusieurs colorants sont toxiques pour les poissons, les micro-organismes et d'autres espèces vivantes. Leur persistance dans l'environnement favorise leur accumulation dans les chaînes alimentaires, provoquant une bioaccumulation des substances toxiques chez les êtres vivants.

Enfin, la présence de colorants dans les effluents industriels constitue une source importante de pollution des sols et des eaux, nécessitant des traitements spécifiques avant leur rejet dans l'environnement. [22]

I.2.6 Toxicité des colorants

En raison de leur utilisation étendue dans des secteurs variés tels que le textile, les cosmétiques et l'agroalimentaire, les colorants constituent une source fréquente de pollution environnementale parmi les effluents industriels. Les colorants synthétiques de type azoïque figurent parmi les additifs colorants les plus courants, mais leurs métabolites sont suspectés de provoquer des effets toxiques.

Cette toxicité est principalement liée à la présence de groupes chimiques potentiellement cancérigènes, tels que les groupes aromatiques, phtalogènes, cyanurés, ainsi que des sels de barium et de plomb. [23]

Tableau I.2 : Toxicité des colorants (influence sur la santé humaine).

Code	Nom	Teinte	Origine	Risques
E171	Bixyde de Titane	Blanc	Minéral	Cancérigène
E160bii	Extraits d'annato à base de norbixine	Orange	Végétale	Allergène
E151	Noir brillant BN	Noir	De synthèse	Asthme allergène
E151d	Caramel aux sulfites d'ammonium	Brun	De synthèse	Toxique à haute dose. Peut être cancérigène Allergène
E150b	Caramel sulfité	Brun	De synthèse	Allergène
E142	Vert brillant BS	Vert	De synthèse	Allergène, Provoque l'hyperactivité
E133	Bleu brillant FCF	Bleu	De synthèse	Allergène
E132	Indigotine	Bleu	Inconnu	Irritant, Allergène
E131	Bleu patenté V	Bleu	De synthèse	Allergène,
E129	Rouge allura AC	Rouge	De synthèse	Allergène, Provoque l'hyperactivité
E122	Carmoisine	Rouge	De synthèse	Allergène, Provoque l'hyperactivité
E120	Cochenille	Rouge	Insoclo	Allergène
E107	Jaune 2G	Jaune	De synthèse	Asthme allergène, Provoque l'hyperactivité
E102	Tartrazine	Jaune	De synthèse	Asthme allergène, Provoque l'hyperactivité
E160b	Roccou	Orange	Végétale	Allergène

I.2.7 Colorants étudiées (Fuchsine Acide et Bleu Coomassie Brillant G-250)

I.2.7.1 Fuchsine Acide

Propriétés Physico -Chimiques du Fuchsine Acide

La fuchsine acide est un colorant organique synthétique anionique appartenant à la famille des triarylméthanes. Elle se caractérise par une forte solubilité dans l'eau et une coloration rouge intense. Ce colorant est largement utilisé dans les domaines textile et biologique grâce à son pouvoir colorant élevé.

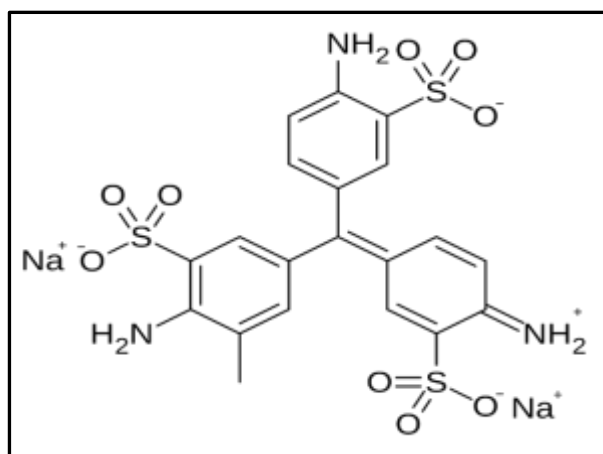


Figure I.16 : Structure chimique de la Fuchsine acide.

Tableau I.3 : Propriétés physico-chimique du Fuchsine Acide

Caractéristiques	Fuchsine Acide
Nature du colorant	Anionique
Famille Chimique	Triarylméthane
Formule Chimique	$C_{20}H_{17}N_3Na_2O_9S_3$
Masse Molaire (g/mol)	585,54
Couleur	Rouge/ rose intense
Solubilité	Très soluble dans l'eau
$\lambda_{max}(nm)$	540-545
Domaine d'utilisation	Textile, histologie, biologique

I.2.7.2 Bleu Coomassie Brillant G-250

Le Bleu Coomassie Brillant G-250 est un colorant organique anionique appartenant à la famille des triphénylméthanes. Il est largement utilisé en biochimie et en biologie moléculaire, notamment pour la coloration et le dosage des protéines. Ce colorant se caractérise par une bonne solubilité dans l'eau ainsi qu'un fort pouvoir colorant.

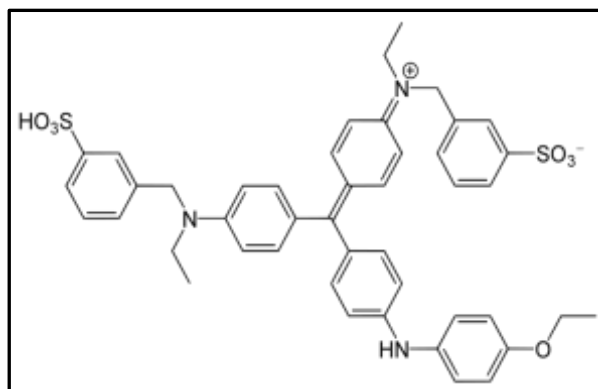


Figure I.17 : Structure chimique du Bleu Coomassie Brillant G-250.

Tableau I.4 : Propriétés physico-chimique du Bleu Coomassie Brillant G-250

Caractéristiques	Bleu Coomassie Brillant G-250
Nature du colorant	Anionique
Famille Chimique	Triphénylméthane
Formule Chimique	$C_{47}H_{48}N_3NaO_7S_2$
Masse Molaire (g/mol)	854,02
Couleur	Bleu
Solubilité	Soluble dans l'eau
λ max (nm)	595
Domaine d'utilisation	Biochimie, coloration des protéines, biologie moléculaire.

Références bibliographiques

- [1] **Crini, G.** (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*.
- [2] **Forgacs, E., Cserhádi, T., & Oros, G.** (2004). Removal of synthetic dyes from wastewaters: A review. *Environment International*.
- [3] **Chaplin, M.** (2008). *Water structure and science*. London South Bank University.
- [4] **Boutheina, N., Sameh, N., Ghouli, Y., & Hannech, A.** (2022). *Contribution à l'analyse bactériologique de l'eau potable : cas de l'eau du robinet*. Université 8-Mai-1945 de Guelma.
- [5] **Yamina, Z.** (2014). *Traitement des eaux résiduaires renfermant des colorants textiles par des matériaux biodégradables*. Université Mouloud-Mammeri de Tizi Ouzou.
- [6] **Batoul, B.** (2018). *Contribution à l'étude de la contamination des eaux et des sédiments de l'Oued Cheliff, Algérie* [Thèse de doctorat, Université de Perpignan Via Domitia et Université Abdelhamid-Ibn-Badis de Mostaganem].
- [7] **Lounnas, A.** (2009). *Amélioration des procédés de clarification des eaux de la station Hamadi-Krouma de Skikda* [Mémoire de magister, Université de Skikda].
- [8] **Organisation mondiale de la Santé.** (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. Organisation mondiale de la Santé.
- [9] **UNESCO & ONU-Eau.** (2021). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2021 : La valeur de l'eau*. UNESCO.
- [10] **Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture & Institut international de gestion de l'eau.** (2018). *More people, more food, worse water? A global review of water pollution from agriculture*. FAO.
- [11] **Centre d'information sur l'eau.** (2025). *Les causes de la pollution de la ressource en eau : focus sur les micropolluants*. CIEAU.
- [12] **Manel, B.** (2025). *Étude de l'adsorption d'un colorant organique sur un support argileux naturel*. Université Mohamed-El-Bachir-El-Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj.
- [13] **Sehailia, K., & Talbi, F.** (2019). *Étude de l'adsorption du Rouge Congo en phase aqueuse sur les feuilles de palmier*. Université Kasdi-Merbah d'Ouargla.
- [14] **Belhadji, H., & Moumeni, O.** (2016). *Étude des performances épuratoires d'une station d'épuration des eaux usées de l'industrie textile : cas de la STEP de Sebdou*. Université Abou-Bekr-Belkaïd de Tlemcen.
- [15] **Naidja, L.** (2010). *Élimination du colorant Orange II en solution aqueuse par voie photochimique et par adsorption* [Mémoire de magister, Université de Constantine].
- [16] **Hassiba, B.** (s. d.). *Synthèses, caractérisations et applications d'argiles anioniques de type hydrotalcite à la dépollution des eaux*. Université Abdelhamid-Ibn-Badis de Mostaganem.

- [17] **Nejib, A.** (2015). *Interactions argiles naturelles-effluents teinturiers : influence des propriétés de surface des argiles et mécanismes d'adsorption des colorants* [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg et Université de Carthage].
- [18] **Houri, R., Kebaili, M., & Mogdad, S.** (2020). *Élaboration d'un biofiltre pour la dépollution des eaux contaminées par des colorants*. Université Kasdi-Merbah d'Ouargla.
- [19] **Halima, C.** (s. d.). *Étude de la dégradation par voie photochimique du polluant organique « Orange G » en milieu aqueux homogène et hétérogène* [Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine].
- [20] **Houda, B. Y.** (2019). *Étude de la rétention des colorants par des réseaux de polymères acryliques*. Université Abou-Bekr-Belkaïd de Tlemcen.
- [21] **Bounaas, M., & Tadjine, S.** (2015). *Adsorption de colorants de l'industrie textile sur les écorces d'orange*. École nationale polytechnique.
- [22] **Hocine, G.** (2021). *Purification d'une eau usée industrielle par des matériaux naturels et valorisation de la boue résultante*. Université Mouloud-Mammeri de Tizi Ouzou.
- [23] **Benahmed, W., & Mennad Sanna.** (2023). *Dégradation des colorants textiles par photocatalyse hétérogène*. Université Abou-Bekr-Belkaïd de Tlemcen.

CHAPITRE II

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

SUR LE PROCEDE DE

L'ADSORPTION

II.1. Introduction

L'adsorption est un processus d'interface résultant des interactions entre les particules de fluide et la surface de l'adsorbant solide. Le concept de surface doit être étendu à l'ensemble de la surface solide, comprenant à la fois la surface externe et interne créée par les pores et les fissures [1]. Le processus inverse, où les molécules se détachent de la surface des matériaux, est appelé la désorption

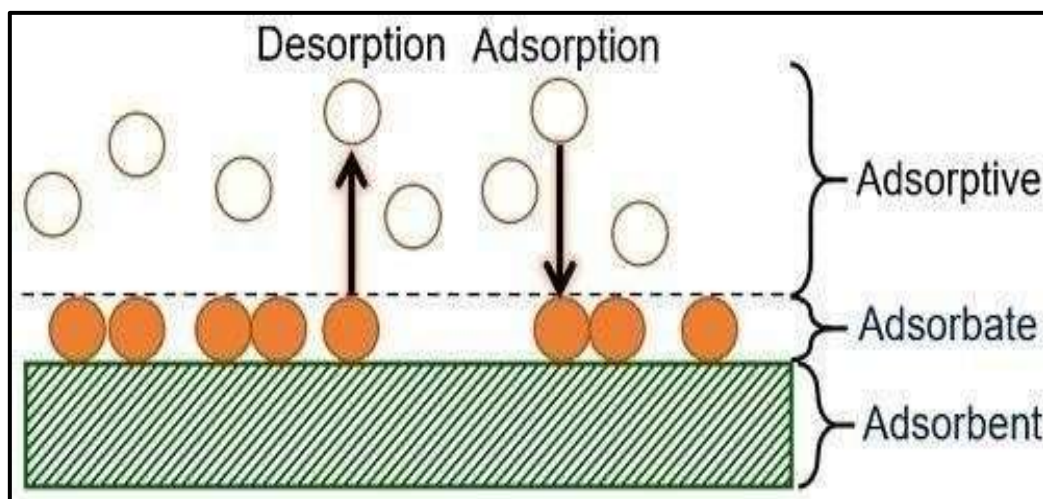


Figure II.1 Schéma du Phénomène D'adsorption.

II.2. Types d'adsorption

En fonction des liaisons entre le substrat et les particules adsorbées, les forces à l'origine de l'adsorption peuvent être de nature physique ou chimique, ce qui donne lieu à deux types d'adsorption :

la physisorption résultant de forces physiques, et la chimisorption, résultant de réactions chimiques (Figure II.1).

II.2.1. Adsorption chimique (Chimisorption)

Elle implique la formation d'une ou de plusieurs liaisons chimiques covalentes ou électrostatiques entre l'adsorbât et l'adsorbant. La chimisorption, en général, est irréversible et entraîne une modification des molécules adsorbées. Celles-ci ne peuvent pas s'accumuler au-delà d'une monocouche (une couche d'épaisseur moléculaire). La distinction entre les deux types d'adsorption n'est pas toujours évidente car les énergies impliquées dans les physisorptions fortes se rapprochent de celles des chimisorptions faibles. Pour la chimisorption, les énergies d'interaction sont très élevées, variant généralement entre 40 et 400 KJ/mole [2].

II.2.2. Adsorption physique (Physisorptions)

La physisorption résulte de forces d'interaction physiques telles que les forces d'attraction intermoléculaires de Van Der Waals et les forces électrostatiques, également connues sous le nom de forces coulombiennes. La force des liaisons formées peut être évaluée par l'énergie d'adsorption, qui ne dépasse généralement pas 40 KJ/mol, ce qui est considéré comme relativement faible. Ce type d'adsorption physique se produisant à des températures basses, est rapides et réversible, et la désorption peut être complète.

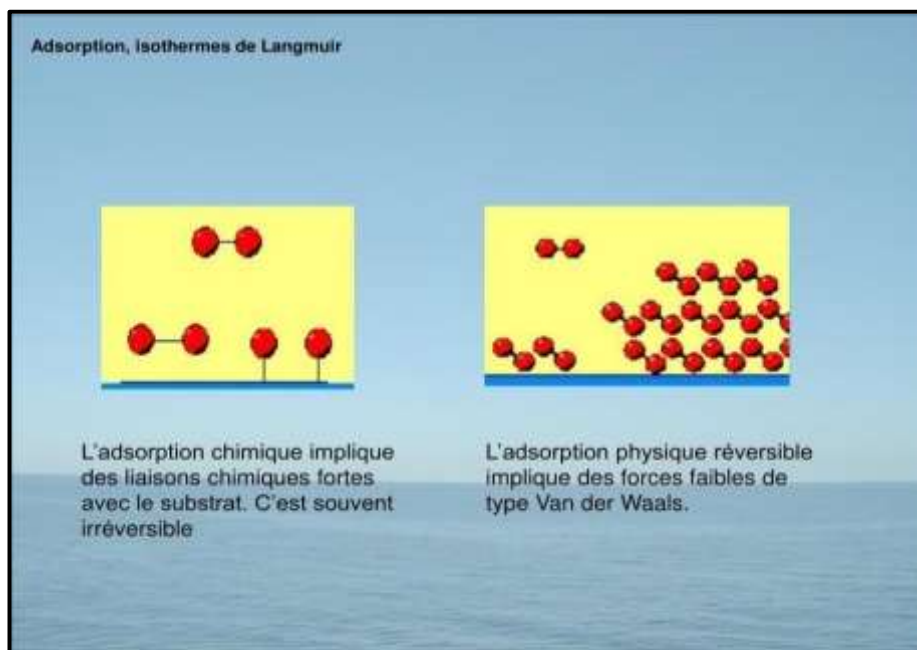


Figure II.2. Schéma du phénomène d'adsorption [3].

Tableau II.1. Différence entre la chimisorption et la physisorption [4,5].

Caractéristiques	Physisorption	Chimisorption
Type de liaison	Van der waals	Ionique ou covalente
Energies de liaison	Faible	Forte
Réversibilité	Réversible	Irréversible
Type de couche	Poly-moléculaire	Mono-moléculaire
Chaleur d'adsorption (KJ/mol)	50	100 à 500
Désorption	Plus ou moins parfaite	Difficile

II.3. Facteurs influençant l'adsorption

Le phénomène d'adsorption est influencé par plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

II.3.1. Influence du pH sur l'adsorption

Le pH peut avoir un impact significatif sur les propriétés de l'adsorption. Dans la plupart des cas, les résultats optimaux sont obtenus à des pH relativement bas, en particulier lors de l'adsorption de substances acides [6]. Le pH joue un rôle dans la détermination du degré d'ionisation des métaux dans l'eau, ce qui affecte leur mobilité et, par conséquent, leur adsorption. De plus, les propriétés électrocinétiques d'un matériau sont également influencées par le pH. Ainsi, à des pH acides, le matériau acquiert une charge positive, ce qui facilite l'adsorption de substances anioniques.

II.3.2. Influence de la température

L'adsorption physique se produit à des températures basses et libère de la chaleur, tandis que l'adsorption chimique nécessite des températures plus élevées et absorbe de la chaleur. Ainsi, la température est un facteur crucial à considérer dans l'analyse cinétique de l'adsorption [7].

II.3.3. Influence de la nature de l'adsorbant sur l'adsorption

Les adsorbants peuvent être classés en deux catégories :

Les adsorbants apolaires : qui présentent une plus grande affinité pour les substances non polaires. Parmi ces derniers, on trouve des exemples tels que le charbon, le graphite, le talc, etc.

Les adsorbants polaires : qui ont la capacité d'adsorber des électrolytes. Dans ce cas, l'adsorption est sélective. En fonction de la charge de la surface de l'adsorbant, les cations ou les anions seront retenus. Parmi ces adsorbants polaires, on peut citer le silica gel et divers types d'argiles [8].

II.3.4. Influence de l'adsorbat sur l'adsorption

La structure chimique des solutés influe également sur l'adsorption. Par exemple, les composés aromatiques présentent une meilleure capacité d'adsorption par rapport aux composés aliphatiques contenant le même nombre de carbones. De plus, l'introduction du groupe hydroxyde dans les composés tend à réduire l'ampleur de l'adsorption

II.3.5. Influence de la Surface spécifique

La surface spécifique représente une mesure cruciale de la capacité d'adsorption de l'adsorbant, définissant la surface accessible par unité de poids d'adsorbant. Une surface spécifique est d'autant plus étendue si l'adsorbant est poreux [10].

II.3.6. Influence de la Porosité

L'adsorption d'une substance augmente lorsque la taille des particules et des pores de l'adsorbant diminue. Cependant, si le diamètre des pores est plus petit que celui des molécules, l'adsorption de ce composé peut être négative, même si la surface de l'adsorbant a une forte affinité pour le composé. La répartition des tailles des pores joue un rôle crucial dans la cinétique globale du processus d'adsorption [11].

II.3.7. Influence de la Polarité

Les solides polaires ont tendance à adsorber sélectivement les corps polaires, tandis que les solides apolaires ont tendance à adsorber les corps apolaires. L'intensité d'adsorption est plus élevée pour les corps ayant une affinité relativement plus grande pour le soluté que pour le solvant [12].

II.3.8. Influence du temps de contact

L'analyse cinétique des processus d'adsorption offre des indications sur le mécanisme d'adsorption ainsi que sur le mode de transfert des solutés de la phase liquide à la phase solide. La cinétique d'adsorption reflète l'évolution temporelle du processus d'adsorption. C'est un paramètre crucial à considérer lors du choix d'un adsorbant. Une adsorption rapide est recommandée pour les méthodes de traitement utilisant l'adsorption comme processus de purification [13].

II.4 Mécanisme d'adsorption

L'adsorption se déroule principalement en trois étapes, chacune contribuant à la vitesse totale du processus comme est mentionné dans la figure II.3.

- 1. Diffusion extra-granulaire de la matière :** il s'agit du transfert du soluté (adsorbat) vers la surface des grains (adsorbant).
- 2. Diffusion intra-granulaire de la matière :** cela implique le transfert de la matière à l'intérieur de la structure poreuse, depuis la surface externe des grains vers les sites actifs.
- 3. Réaction d'adsorption au niveau des sites actifs :** une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile [14].

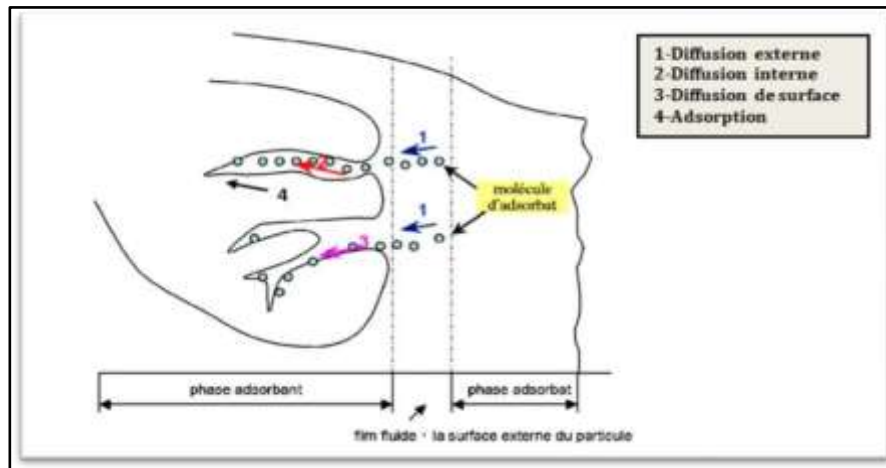


Figure II.3. Schéma du mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain [15].

II.5. Modélisation des cinétiques d'adsorption

II.5.1. Cinétique du pseudo premier ordre

C'est le modèle cinétique le plus ancien, formulé par Lagergren en 1898. Selon ce modèle, l'adsorption est vue comme étant restreinte par la formation de liaisons entre le soluté et les sites actifs. L'équation de Lagergren, qui régit la cinétique d'adsorption du premier ordre, est la suivante [16] :

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t$$

q_e : quantité de soluté adsorbée (mg/g) à l'équilibre

t : temps de contact en mn.

q_t : quantité de soluté adsorbée (mg/g) à l'instant t .

K_1 : la constante de vitesse (mn^{-1}).

dont la valeur est déterminée en traçant: $\ln (q_e - q_t) = f(t)$.

Le modèle cinétique du pseudo-premier ordre décrit la relation entre la différence entre la capacité de rétention à l'équilibre et celle à un temps antérieur à l'équilibre, ainsi que le temps d'agitation de l'extractant. En d'autres termes, la vitesse de sorption est plus élevée lorsque le système est loin de l'équilibre. Cette relation est représentée par la courbe $\ln (q_e - q_t)$ en fonction du temps d'agitation.

$$\ln (q_e - q_t) = f(t)$$

La valeur de q_t est déterminée par la relation :

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \cdot V}{m}$$

C_t : Concentration résiduelle de la solution (mg/l) à l'instant t .

C_0 : Concentration initiale de la solution (mg/l).

V : Volume de la solution (l).

m : Quantité d'adsorbant en solution (g).

II.5.2. Modèle de la cinétique du pseudo second ordre

La vitesse d'adsorption pseudo-seconde, établie par Blanchard, est fonction de la quantité adsorbée à l'équilibre [17].

L'équation du cinétique pseudo-second ordre est exprimée par :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2(q_e - q_t)^2$$

Lorsqu'on intègre cette équation sur les plages de valeurs de t allant de 0 à t et de q_t allant de 0 à q_t , on obtient :

$$\frac{t}{dt} = \frac{1}{2 \cdot q_e} + \frac{1}{q_e} \cdot t$$

K_2 : la constante de vitesse d'adsorption (g/(mg.mn)), dont la valeur et t déterminée en traçant la courbe :

$$\frac{t}{dt} = (t)$$

II.6. Isothermes d'adsorption

Plusieurs modèles mathématiques et empiriques ont été développés pour mieux comprendre le phénomène d'adsorption, chacun étant basé sur des hypothèses et des approximations spécifiques. Parmi les modèles largement utilisés, on peut mentionner.

II.6.1. Modèle de l'isotherme de Langmuir

$$q_e = q_{\max} K_L C_e / (1 + K_L C_e)$$

- q_e : quantité adsorbée à l'équilibre (mg/g).
- $q_{\max}$: capacité maximale d'adsorption (mg/g).
- K_L : constante de Langmuir (L/mg).
- C_e : concentration à l'équilibre (mg/L).

Ce modèle suppose une adsorption en monocouche sur une surface homogène où tous les sites sont identiques [18].

II.6.2. Model de l'isotherme de Freundlich

En 1962, Freundlich a avancé un nouveau modèle à fin d'expliquer l'adsorption dans les milieux gazeux ou liquides. Ce modèle se présente sous la forme d'une équation comportant deux paramètres (K_F et n) et postule une distribution exponentielle des énergies des sites d'adsorption à la surface du support, ce qui se traduit par une adsorption en sites localisés [19]. Cette formulation est la suivante :

$$q_e = K_F C_{eq}^{1/n}$$

Sachant que :

q_e : Quantité d'entités adsorbées par gramme d'adsorbant à l'équilibre (mg/g).

C_{eq} : Concentration de l'adsorbat dans la solution à l'équilibre (mg/L).

K_F : la constante de Freundlich (L/mg).

n : paramètre énergétique de Freundlich.

Quand n prend des valeurs entre 1 et 10, cela suggère une adsorption favorable, mais si n est inférieur à 1, cela indique une faible adsorption. Les paramètres de Freundlich, K_F et n , peuvent être évalués expérimentalement en prenant le logarithme de l'expression, ce qui donne :

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_{eq}$$

II.6.3. Modèle de Temkin

L'isotherme de Temkin prend en considération la diminution linéaire de la chaleur d'adsorption de toutes les molécules de la couche de recouvrement à mesure que le recouvrement progresse, en raison de la réduction des interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat.

Ainsi, l'adsorption est définie par une répartition uniforme des énergies de liaison à la surface.

L'expression de l'isotherme de Temkin est donnée par [20].

$$q_e = B_1 \ln K_t + B_1 \ln C_{eq}$$

II.7. Matériaux adsorbants

Les solides qui agissent comme adsorbants se distinguent par leur structure microporeuse, ce qui leur donne une surface active de masse considérable. Ces adsorbants sont généralement d'origine organique (végétale ou animale) ou minérale, et sont utilisés directement ou après un traitement d'activation visant à accroître leur porosité.

Voici les adsorbants les plus couramment employés dans les applications de traitement des eaux : figure II.4.



Figure II. 4. Les Principaux Adsorbants

En plus de cette diversité d'adsorbants, de nombreuses études se concentrent sur l'utilisation d'adsorbants dérivés de déchets naturels, tels que la sciure de bois, les coquilles de noix, l'écorce de grenade, la peau d'orange ou encore les déchets de blé. Ces adsorbants sont des matériaux naturels disponibles en grandes quantités et à faible coût.

II.7.I. Description du grenadier

Le terme grenade vient du latin « malum granatum » qui signifie : « fruit à petits grains » [69]. La grenade est un fruit sphérique, quelquefois aplati, de 5 à 12 cm de diamètre, à écorce dure et coriace de couleur jaune-rouge violacée avec des nuances brunâtres ; elle renferme, dans ces « loges » délimitées par des cloisons épaisses, de nombreuses graines translucides. La saveur de la grenade, douce et légèrement acidulée, est la résultante d'un équilibre harmonieux entre deux de ses constituants : les glucides, d'une part, et les acides organiques, d'autre part [70]. Selon Mortan (1987), la cueillette de la grenade se fait de 5 à 7

mois après la floraison. Elle ne mûrit plus après la cueillette ; il est donc important qu'elle soit cueillie à maturité.



Figure II.5 : Photographie des feuilles, des fleurs et des fruits de grenadier (Anonyme) [71].

III.7.2. Production de grenade en Algérie

Bien que le grenadier soit peu exigeant, les plantations ne sont pas très importantes en Algérie. Il existe de nombreuses variétés de grenades, de qualités très différentes. Plusieurs sortes de grenadier sont signalées dans des petits jardins en Kabylie, on ne connaît que leurs appellations locales telles que « Lahlou », « Elmouze », etc. Actuellement, l'État a autorisé quatorze (14) variétés pour la production et la commercialisation [70].

II.7.3. Ecorce de grenade

L'écorce du fruit du grenadier est également appelée « malicorium », il s'agit de la partie dure du fruit. Elle représente environ 50 % du poids total de la grenade. Elle est généralement utilisée séchée, sous forme de morceaux brunâtres ou vert-rougeâtres à l'extérieur, un peu verruqueux, brillants, jaunâtres sur la face intérieure. Ces fragments sont de consistance coriace ; ils sont formés d'un parenchyme de cellules à paroi minces, au milieu desquelles on distingue des groupes de cellules pierreuses et de faisceaux fibrovasculaires [72].

II.7.4. Composition chimique de l'écorce de grenade

Diverses propriétés biologiques démontrées par la peau de grenade ont été associées à la présence de flavonoïdes et de tanins. Parmi les graines, la pelure et le jus, la pelure est le constituant qui possède une activité antioxydante la plus élevée, en bonne corrélation avec la

teneur élevée en polyphénols [73]. Cette partie du fruit contient les punicalagines, qui font partie de la famille des ellagitannins, c'est-à-dire les tanins secondaires. Tous ces ellagitannins ont la capacité d'être hydrolysés en acide ellagique. La punicalagine est un polyphénol volumineux [74].

Tableau II 2 : Composition chimique de la peau de grenade [74].

Partie du fruit	Composition
La peau de la grenade (Malicorium)	• Acide hydroxybenzoïque: l'acide gallique et l'acide ellagique • Acide hydroxycinnamique • Dérivés de flavones: molécules de coloration jaune • Anthocyanidines: responsables de la couleur rouge des grenade • nombreux ellagitannins: tels que la punicaline, la punicalagine, la corilagine, la granatine A et la granatine B, ces tanins représentent jusqu'à 28% de la peau du fruit • La pelletiérine pourrait aussi se trouver dans la peau de la grenade

Références bibliographiques

- [1] **Ghaddab, C. H. E., & G. Z.** (2020). *Étude de l'adsorption d'un polluant sur la surface d'un adsorbant préparé à partir de la sciure de bois* [Mémoire de master, Université de Biskra].
- [2] **Messemeche, F.** (2013). *Étude qualitative et quantitative de l'adsorption d'un colorant organique sur le charbon actif* [Thèse de doctorat].
- [3] **Google.** (2024). Résultat de recherche consulté le 27/04/2024. (*À remplacer par la source originale citée, les liens Google ne doivent pas figurer dans une bibliographie scientifique.*)
- [4] **Halimi, H. E., Ayad, M., & Rida, K. E.** (2018). *Synthèse d'un charbon actif pour l'élimination des polluants en phase aqueuse par adsorption et photocatalyse* [Thèse de doctorat, Université de Jijel].
- [5] **Bouchelta, C.** (2003). *Étude de l'adsorption des métaux Hg^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} et Cr^{6+} sur charbon actif en grain : modélisation.*
- [6] **Errais, E.** (2011). *Réactivité de surface d'argiles naturelles : étude de l'adsorption de colorants anioniques* [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg et Université de Tunis].
- [7] **Boutira, F.** (2014). *Préparation de nouveaux matériaux : application à l'adsorption des polluants organiques.* Université Mouloud-Mammeri de Tizi Ouzou.
- [8] **Medjda, B.** (2020). *Étude de l'adsorption du diclofénac sur divers adsorbants en eau distillée : effet des paramètres opératoires* [Mémoire de master, Université de Biskra].
- [9] **Sadouki, F., & Touil, B.** (2022). *Élimination du bleu de méthylène par adsorption sur charbon actif.* Université Abdelhamid-Ibn-Badis de Mostaganem.
- [10] **Saifi, F., & Naimi, H.** (2019). *Étude de l'influence de quelques paramètres sur la capacité d'adsorption des métaux lourds sur des zéolites Na-Y.* Université Kasdi-Merbah de Ouargla.
- [11] **Djakmo, N., & Bettayeb, K.** (2021). *Optimisation des isothermes d'adsorption du 2-mercaptopbenzothiazole sur un charbon actif à base de marc de raisin par les méthodes linéaire et non linéaire.* Université Abdelhamid-Ibn-Badis de Mostaganem.
- [12] **Zahaf, F.** (2017). *Étude structurale des argiles modifiées appliquées à l'adsorption des polluants* [Thèse de doctorat en sciences, Université Mustapha-Stambouli de Mascara, 243p.].
- [13] **Foulani, O., & Boulghiti, A.** (2023). *Valorisation d'une diatomite de Sig par fonctionnalisation et application à l'adsorption de polluants : arsenic et chrome VI.* Université Abdelhamid-Ibn-Badis de Mostaganem.
- [14] **Gouasmia, K.** (2022). *Étude de la conversion de la biomasse Ziziphus jujuba en charbon actif par activation chimique.* Université Larbi-Tébessi de Tébessa.
- [15] **Soltani, R.** (2022). *Étude de la conversion de la biomasse Ziziphus jujuba en charbon actif par activation chimique.* Université Larbi-Tébessi de Tébessa.

- [16] **Belaid, D., & Kacha, S.** (2011). Étude cinétique et thermodynamique de l'adsorption d'un colorant basique sur la sciure de bois. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 24(2), 131–144.
- [17] **Fayoud, N., Alami, S., Younssi, S., Tahiri, A., & Albizane, A.** (2015). Cinétique et thermodynamique de l'adsorption du bleu de méthylène sur les cendres de bois. (*Article scientifique, publié en 2015*).
- [18] **Pereira, C. S.** (2016). *Influence de la matière organique dissoute d'origine urbaine sur la spéciation des micropolluants : de la station d'épuration au milieu récepteur* [Thèse de doctorat en chimie inorganique, Université Paris-Est].
- [19] **Pereira, C. S.** (2016). *Influence de la matière organique dissoute d'origine urbaine sur la spéciation des micropolluants : de la station d'épuration au milieu récepteur* [Thèse de doctorat en chimie inorganique, Université Paris-Est].
- [20] **Dada, A. O., Olalekan, A. P., Olatunya, A. M., & Dada, O.** (2012). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn^{2+} onto phosphoric acid modified rice husk. *IOSR Journal of Applied Chemistry*, 3, 38–45.
- [21] **Hammou, S., & Gaboussa, S.** (2016). *Élimination des polluants organiques par adsorption sur la bentonite de Touggourt*. Université Echahid-Hamma-Lakhdar d'El Oued.
- [22] **Gharbi, H. K., & Guentrah, K.** (2021). *Isothermes d'adsorption d'un polluant de l'industrie textile*. Université Abdelhamid-Ibn-Badis de Mostaganem.

CHAPITRE III

ETUDE DE L'ADSORPTION DE LA (FA) ET DU (BC) PAR LES (EG)

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude expérimentale de l'adsorption de la Fuchsine acide et du Bleu Coomassie brillant G-250 sur les écorces de grenade. L'objectif est d'évaluer les performances de ce matériau naturel dans l'élimination de ces colorants en solutions aqueuses à travers l'étude des paramètres opératoires, de la cinétique et des isothermes d'adsorption.

III.1. Matériels et verreries utilisés

III.1.1. Verreries utilisées

- Béchers
- Fiole jaugée
- Eprouvettes graduées pipettes graduées
- Entonnoir

III.1.2. Matériels utilisés

- Balance analytique
- Agitateur magnétique
- pH-mètre
- Thermomètre
- Etuve
- Broyeur
- Tamis
- Papier filtre

III.2. Réactifs chimiques utilisés

Tableau III.1 Tableau des réactifs chimiques utilisés.

Réactif	Formule	Masse molaire (g/mole)
Fuchsine acide	$C_{20}H_{17}N_3Na_2O_9S_3$	585,54
Bleu Coomassie brillant G-250	$C_{47}H_{48}N_3NaO_7S$	854,02
Acide chlorhydrique	HCl	36 ,46
Hydroxyde de sodium	NaOH	40

III.3. Protocole expérimentale de l'adsorption

La démarche méthodologique suivie pour l'évaluation de la performance de l'adsorption de la Fuchsine acide et du Bleu de Coomassie Brillant G250 repose sur la mise en contact du matériau (écorces de grenade) avec les solutions colorantes. Le suivi quantitatif des teneurs résiduelles en colorants dans le milieu aqueux a été assuré par des analyses colorimétriques.

Au cours de ce travail, nous avons mis en évidence l'effet de plusieurs facteurs opératoires sur le rendement et la capacité de rétention de notre bio-adsorbant préparé à partir des écorces de grenade. Les variables examinées englobent le temps de contact, la concentration initiale des colorants, la masse de l'adsorbant, le pH de la solution ainsi que la température du système.

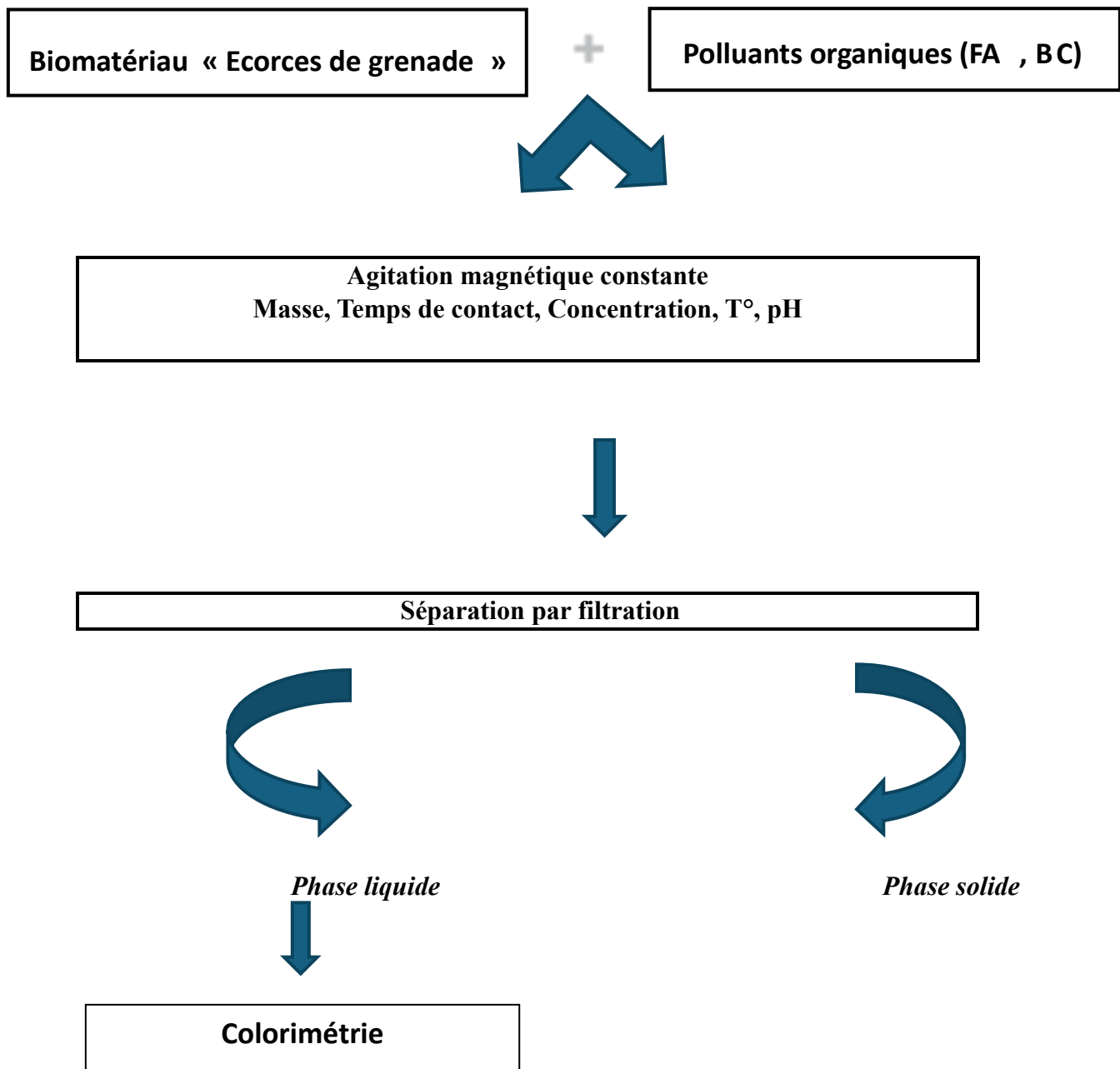


Figure III.1 : Schéma représentative des étapes d'expérimentale.

III.4. Préparation du biomatériau



III.4.1. Ecorces de grenade

Les écorces de grenades utilisées dans ce travail ont été prélevées à partir des fruits locaux. Dans un premier temps, la matière brute a été soigneusement lavée à l'eau courante afin d'éliminer toutes impuretés et résidus en surface. Ensuite, les écorces ont été séchées thermiquement dans une étuve à température contrôlée à 80°C pendant 3 heures. Après séchage, les écorces ont été finement broyées puis tamisées afin d'obtenir une poudre homogène.

III.4.2 : Etapes de préparation du matériau à partir des écorces de grenade.



Figure III.2 : Fruits de grenade.



Figure III.3 : Ecorces de grenade.



Figure III.4 : lavage des écorces de grenade.



Figure III.5 : Séchage et broyage des écorces de grenade.

III.4.3. Caractérisation physico-chimique du biomatériau

L'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) des écorces de grenade a été effectuée sur un appareil de type Agilent Cary 630. Les spectres ont été enregistrés sur un domaine spectral allant de 400 à 4000 cm^{-1} . Le spectre infrarouge correspondant est illustré dans la **figure III.6**. Cet enregistrement met en évidence les bandes d'absorption caractéristiques de la structure du bio-adsorbant. Les bandes majeures ainsi que leurs attributions sont regroupées dans le **tableau III.2**.

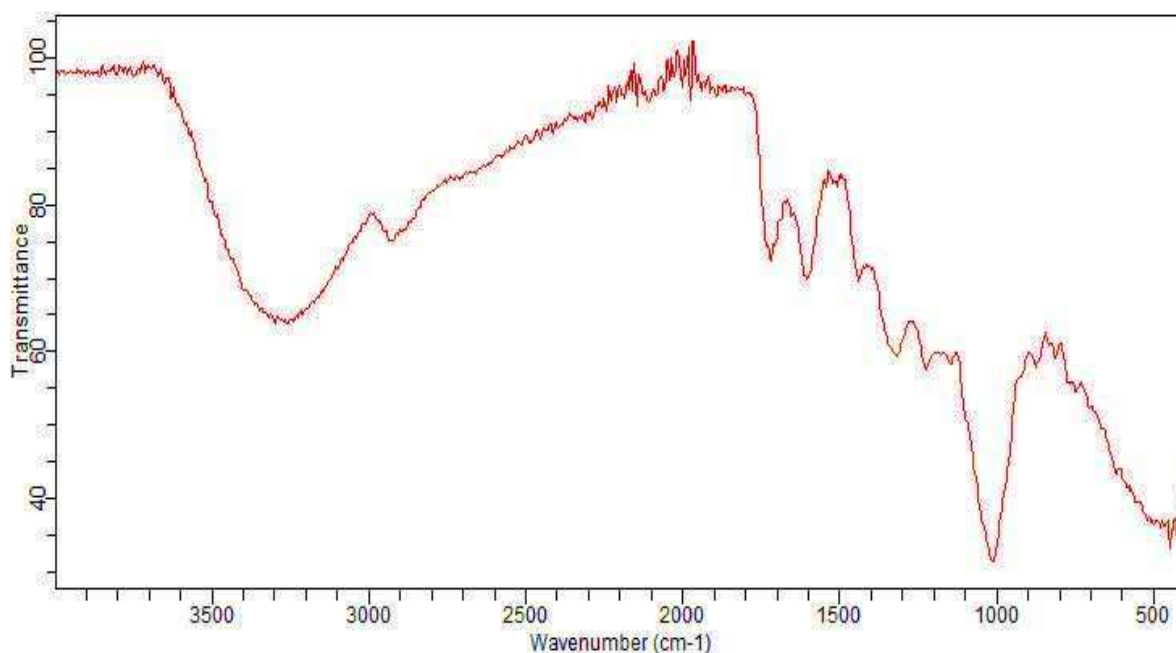


Figure III.6 Spectre Infrarouge à transformée de Fourier des écorces de grenade

Tableau III.2 : Bandes caractéristiques du spectre infrarouge à transformée de Fourier des écorces de grenade [1].

Bandes caractéristiques	Bande d'absorption (cm⁻¹)
Bandes larges et intense de vibration d'élongation des liaisons -OH (Alcools, phénols, cellulose, hémicelluloses) ainsi de l'eau résiduelle (humidité)	Entre 3300 et 3400
Bande de vibration d'élongation des liaisons C-H (Groupements CH ₂ et -CH ₃ des groupements alkyles)	2900 - 2920
Bande d'élongation de la liaison (C=O carbonyle / ester non conjugué), liée aux fonctions esters/acides de la lignine.	1710 - 1730
de de vibrations d'élongation des liaisons C=C relatifs aux cycles aromatiques de la lignine)	1615
Bande de vibrations de déformation des liaisons C-H	1400-1440
Bande d'intensité moyenne de vibration de déformation dans le plan des liaisons O-H	1320-1370
Bandes de vibrations d'élongation des liaisons C-O et C-O-C (Polysaccharides : cellulose et hémicellulose)	1000 et 1050

III.5. Etude paramétriques

Dans cette étude, les écorces de grenade brutes ont été utilisées pour réaliser les essais d'adsorption de deux colorants organiques ciblés : la Fuchsine acide (FA) et le Bleu de Coomassie Brillant G-250 (BC). Les expériences consistent à mettre en contact, sous agitation moyenne continue et pendant un temps défini, une quantité précise de biomatériau avec un volume donné de solution de colorant à concentration initiale bien définie. L'objectif principal est de déterminer les conditions opératoires optimales influençant le processus de rétention des colorants, notamment le temps de contact, la concentration initiale du colorant, le pH du milieu, la masse de l'adsorbant et la température du système.

Pour quantifier avec précision les concentrations résiduelles de colorants dans la phase aqueuse après adsorption, il a été nécessaire d'établir au préalable des courbes d'étalonnage spécifiques pour chaque colorant.

III.5.1. Préparation des solutions diluées pour tracer les courbes d'étalonnages

Pour chacun des colorants organiques étudiés, à savoir la Fuchsine acide et le Bleu Coomassie Brillant G250, une solution mère de concentration $1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ a été préparée par dissolution d'une masse rigoureusement pesée de la poudre de colorant dans un volume déterminé d'eau distillée.

À partir de ces solutions mères, des séries de solutions filles ont été préparées par des dilutions successives dans des fioles jaugées. Pour ce faire, des volumes précis de chaque solution mère, à savoir 500, 1250, 2500, 3750 et 5000 μL , ont été prélevés à l'aide d'une micropipette, puis complétés jusqu'au trait de jauge d'une fiole de 10 ml avec de l'eau distillée. Les concentrations des solutions diluées ont été déterminées en appliquant la relation de dilution suivante :

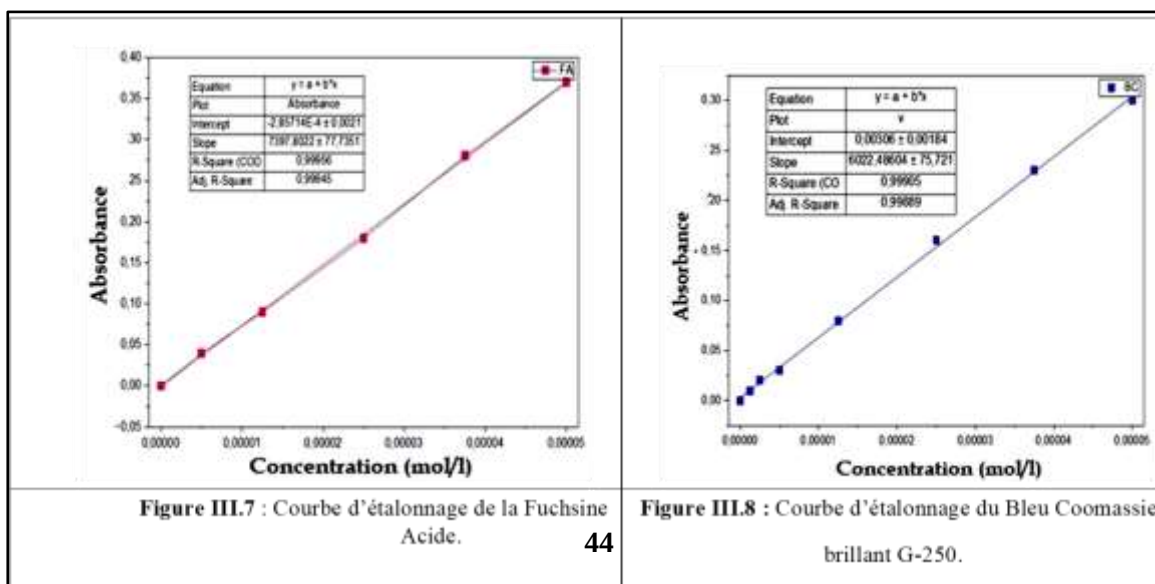
$$A = \epsilon * L * C$$

Avec :

A : Absorbance

ϵ : Coefficient d'extinction molaire $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$

C : Concentration du colorant mol/l



Par la suite, la mesure de l'absorbance de chaque solution étalon a été réalisée à l'aide d'un colorimètre, en sélectionnant la longueur d'onde ou le filtre approprié à chaque colorant, notamment à 540 nm pour la Fuchsine acide et 595 nm pour le Bleu Coomassie Brilliant G250. Les données obtenues nous ont permis de tracer les courbes d'étalonnage $A = f(C)$ pour les deux colorants, afin de vérifier la linéarité du système conformément à la loi de Beer-Lambert.

III.6. Etude paramétrique

III.6.1. Effet de la masse d'adsorbant

La masse de l'adsorbant est un paramètre important dans le processus d'adsorption, car elle détermine le nombre de sites actifs disponibles pour la fixation des molécules de colorant.

Afin d'étudier son influence sur l'élimination de la Fuchsine acide (FA) et du Bleu Coomassie Brilliant G250 (BC), différentes masses d'écorces de grenade ont été mises en contact avec des solutions de colorants. Les résultats obtenus sont représentés par la courbe $R(\%) = f(m)$.

Le rendement a été calculé en utilisant l'équation suivante :

$$R(\%) = ((A_0 - A_t) / A_0) * 100$$

Avec :

A_0 : Absorbance initiale du colorant.

A_t : Absorbance à l'instant "t".

$R(\%)$: Rendement de l'adsorption.

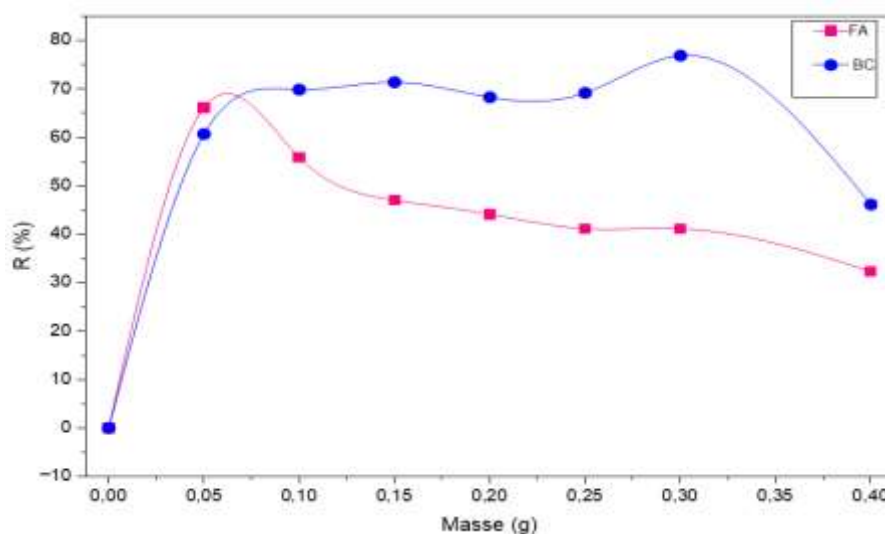


Figure III.9 : Influence de la masse des écorces de grenade sur le rendement de l'adsorption $R(\%)$ de la Fuchsine acide (FA) et du Bleu Coomassie brillant G-250 (BC).

Les résultats montrent que la masse de l'adsorbant influence remarquablement le rendement d'élimination des deux colorants. Cette augmentation est liée à la disponibilité des sites actifs à la surface de l'adsorbant. Une variation du rendement est observée pour la Fuchsine acide et le Bleu Coomassie Brilliant G250 selon la masse utilisée, en raison de la répartition des molécules de colorant et de possibles phénomènes d'agrégation à fortes masses.

Les masses optimales retenues sont 0,25 g pour la Fuchsine acide et 0,30 g pour le Bleu Coomassie Brilliant G250 pour la suite des expériences.

III.7. Etude cinétique

L'étude de l'influence du temps de contact sur le rendement de l'adsorption R (%) de la (FA) et du (BC) par les écorces de grenade a été réalisée sous une agitation moyenne pour un volume de solution fixe de 25ml. Afin d'optimiser le processus, une masse d'adsorbant de 0,25g a été utilisée pour le colorant FA, tandis qu'une masse de 0,30g a été appliquée pour le BC. Les résultats obtenus sont illustrés dans la **Figure III. 10**.

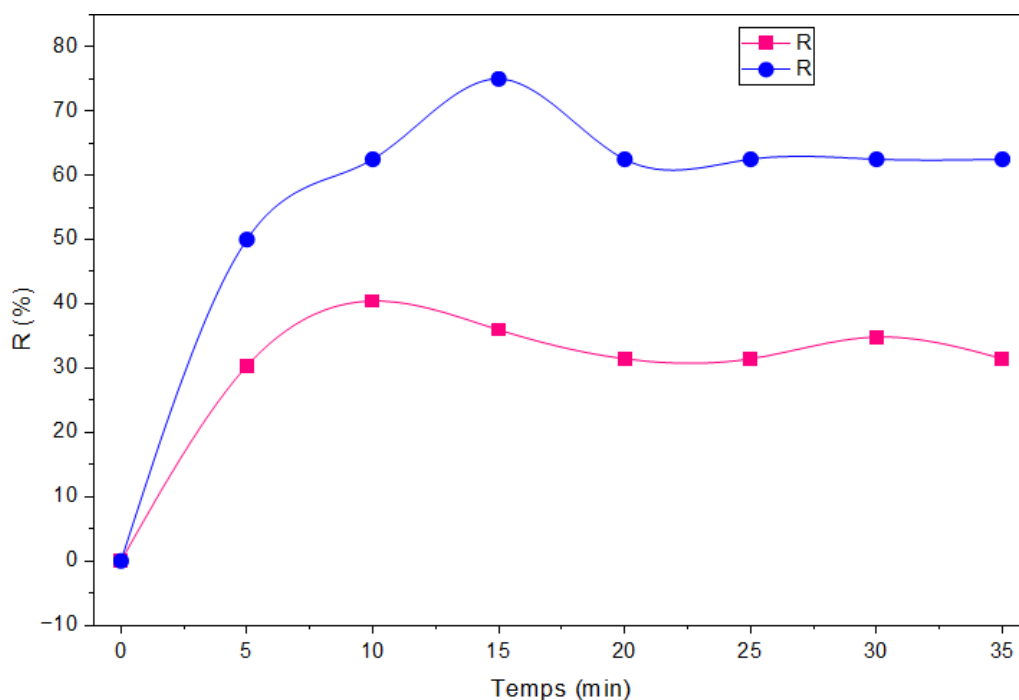


Figure III.10 Influence du temps de contact sur le rendement de l'adsorption R (%) de la Fuchsine Acide (FA) et de Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.

Les résultats montrent que l'augmentation du temps de contact favorise l'adsorption du Bleu Coomassie Brillant et de la Fuchsine Acide par les écorces de grenade, particulièrement durant les premières minutes de l'expérience. Le rendement d'élimination du Bleu Brillant augmente rapidement jusqu'à atteindre environ 75 % après 15 min, avant de se stabiliser autour de 62 %, indiquant l'atteinte de l'équilibre d'adsorption. En revanche, la Fuchsine Acide présente un rendement maximal d'environ 40 % après 10 min, suivi d'une légère diminution et d'une stabilisation autour de 30–35 %. Ces résultats révèlent une affinité plus élevée des écorces de grenade pour le Bleu Brillant que pour la Fuchsine Acide, probablement en raison de différences dans les interactions moléculaires entre les colorants et les groupements fonctionnels présents à la surface du biosorbant.

III.8. Effet de la concentration

L'étude de l'influence de la concentration initiale en colorant est une étape essentielle pour évaluer la capacité maximale de l'adsorption et comprendre le comportement des écorces de grenade face à des charges variables en polluants. Pour ce faire, les expériences ont été menées sous une agitation moyenne pour un volume de solution fixe de 25 ml pour les deux colorants. Les conditions optimales de masse et de temps de contact, déterminées précédemment, ont été appliquées comme suit :

Pour la (FA) : Une masse d'adsorbant de 0,25 g a été introduite pour un temps de contact fixe de 10 min. Pour le (BC) : Une masse d'adsorbant de 0,30g a été introduite pour un temps de contact fixe de 15min.

La gamme de concentration initiale étudiée varie simultanément de 4×10^{-6} mol/L à 1×10^{-4} mol/L. Les résultats du rendement d'élimination R (%) en fonction de la concentration initiale sont illustrés dans la **Figure III.11**.

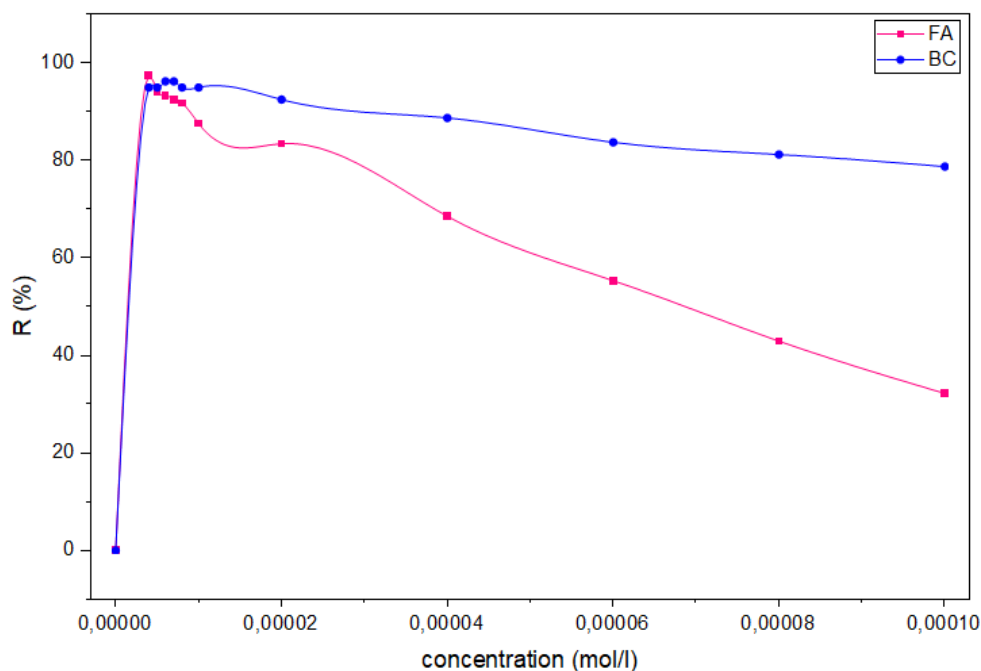


Figure III.11 Influence de concentration sur le rendement de l'adsorption R (%) de la Fuchsine Acide (FA) et de Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.

Le rendement d'élimination des deux colorants dépend fortement de la concentration initiale. À faibles concentrations (4×10^{-6} à 1×10^{-5} mol/L), les rendements sont maximaux (97,52 % pour la (FA) et 95 % pour le (BC)) grâce à la disponibilité importante des sites actifs de l'adsorbant. À fortes concentrations (jusqu'à 1×10^{-4} mol/L), le rendement diminue progressivement en raison de la saturation des sites actifs, atteignant 32,23 % pour la (FA) et 78,75 % pour le (BC).

III.9. Effet de la température

L'étude de l'influence de la température sur le rendement d'élimination est une étape cruciale pour comprendre la nature thermodynamique du processus d'adsorption de la (FA) et du le (BC) sur les écorces de grenade. Pour cette étude, les expériences ont été réalisées sous une agitation moyenne pour un volume de solution fixe de 25 ml pour tous les essais. Les concentrations initiales ont été fixées à 4×10^{-6} mol/l pour la (FA) et 6×10^{-6} à pour le (BC). Les conditions optimales de masse et de temps de contact propres à chaque système ont été maintenues, à savoir :

- Pour la (FA) : $m = 0,25$ g pendant un temps de contact de 10min.

- Pour le (BC) : $m = 0,30\text{g}$ pendant un temps de contact de 15min.

La gamme de température étudiée varie de 10°C à 30°C . Les variations du rendement d'élimination R (%) en fonction de la température sont représentées dans la **Figure III.12**.

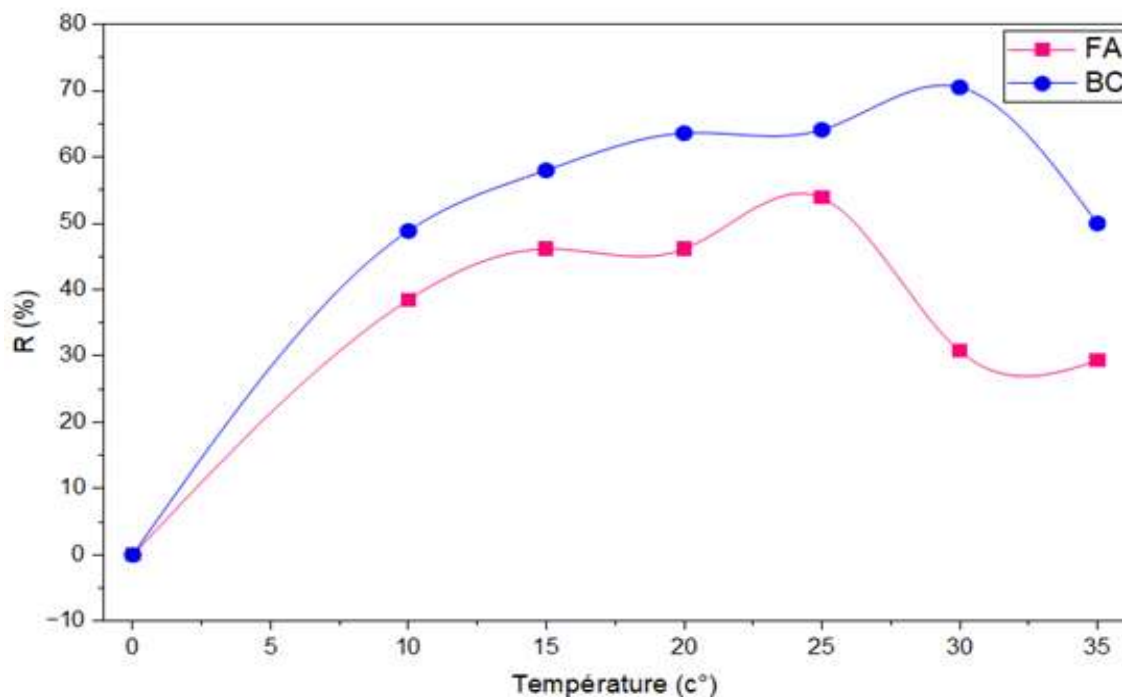


Figure III.12 Influence de la Température sur le rendement d'adsorption de la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par

Le rendement d'adsorption augmente avec l'augmentation de la température de 10 à 25°C pour les deux colorants, indiquant que le processus est favorisé par la chaleur et présente un caractère endothermique. Cette hausse s'explique par une meilleure mobilité des molécules de colorant et une diffusion plus rapide vers les sites actifs de l'adsorbant. À 30°C , le rendement d'adsorption de la Fuchsine acide (FA) diminue légèrement, probablement en raison de phénomènes de désorption thermique qui affaiblissent les interactions entre le colorant et l'adsorbant. La température optimale d'adsorption pour la FA est donc de 25°C . En revanche, le rendement d'adsorption du Bleu de Coomassie Brillant G-250 (BC) continue d'augmenter avec la température, atteignant son maximum à 30°C .

III.10. Effet du pH

Le pH est un paramètre clé influençant le processus de l'adsorption, car il agit à la fois sur l'état de surface de l'adsorbant et sur l'ionisation des molécules adsorbées. Dans cette étude, l'effet du pH a été évalué pour l'adsorption de la Fuchsine acide (FA), à une concentration initiale de 4×10^{-6} mol/L pendant 10 minutes, et du Bleu de Coomassie brillant G-250 (BC), à une concentration initiale de 6×10^{-6} mol/L pendant 15 minutes, à partir de 25 mL de solution, en présence respectivement de 0,25 g et 0,30 g d'écorces de grenade. Les résultats sont illustrés dans la **Figure III.13**.

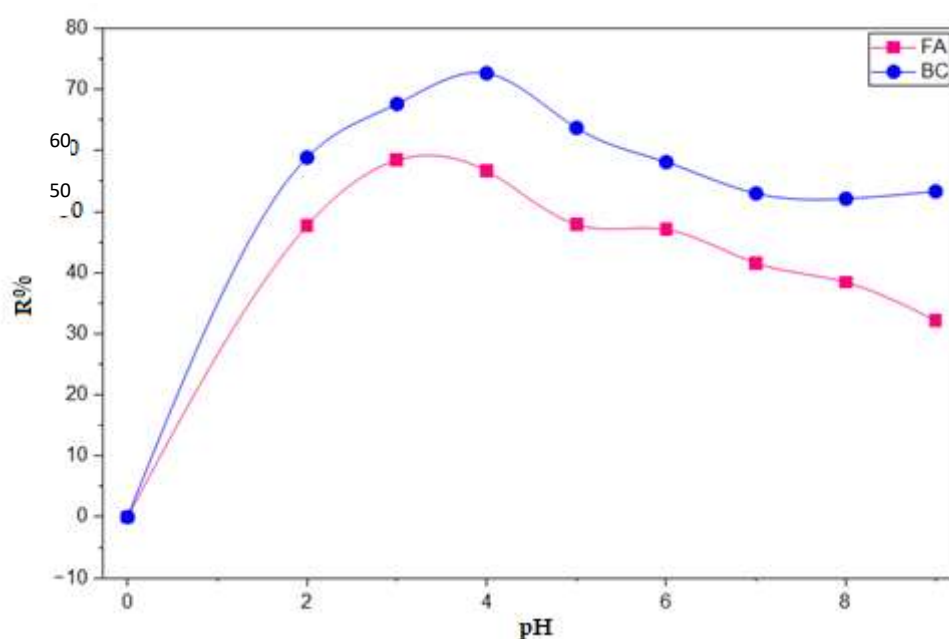


Figure III.13 : Influence du PH sur le rendement d'adsorption de la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.

L'étude de l'effet du pH révèle que le rendement d'élimination dépend fortement de ce paramètre. Pour la Fuchsine acide (FA), le rendement augmente jusqu'à un maximum d'environ 56 % à pH 3, puis diminue progressivement pour atteindre 27 % à pH 9. Le Bleu de Coomassie brillant G-250 (BC) présente un rendement plus élevé, atteignant environ 70 % à pH 4, avant de diminuer aux pH basiques. Cette variation s'explique par l'influence du pH sur la charge des sites actifs de l'adsorbant et l'état d'ionisation des colorants. En milieu acide, les interactions entre l'adsorbant et l'adsorbat sont favorisées, améliorant ainsi l'adsorption.

En conclusion, le pH optimal est de 3 pour la (FA) et de 4 pour le (BC).

III.11. Modélisation de la cinétique d'adsorption

L'étude cinétique constitue une étape clé pour comprendre le mécanisme d'adsorption et déterminer la vitesse de transfert de masse du soluté vers l'adsorbant. Pour modéliser ce phénomène et identifier les étapes limitantes du processus, les données expérimentales ont été analysées à l'aide de deux modèles mathématiques couramment utilisés : le modèle du pseudo-premier ordre et celui du pseudo-second ordre. La pertinence de chaque modèle a été évaluée en comparant les capacités d'adsorption calculées aux valeurs expérimentales, ainsi qu'en examinant les coefficients de corrélation linéaire (R^2).

A. Le modèle du pseudo-premier ordre

Le modèle cinétique du pseudo-premier ordre, initialement proposé par Lagergren, repose sur la capacité d'adsorption du matériau. Il postule que la vitesse de fixation du soluté est proportionnelle au nombre de sites actifs encore disponibles sur l'adsorbant. La forme intégrée de l'équation linéaire associée s'exprime ainsi :

$$\ln (q_e - q_t) = \ln (q_e) - k_1 \cdot t$$

Avec :

q_e (mg/g) : Capacité d'adsorption théorique à l'équilibre.

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

k_1 : Constante de vitesse d'adsorption du pseudo-premier ordre.

t (min) : Temps de contact.

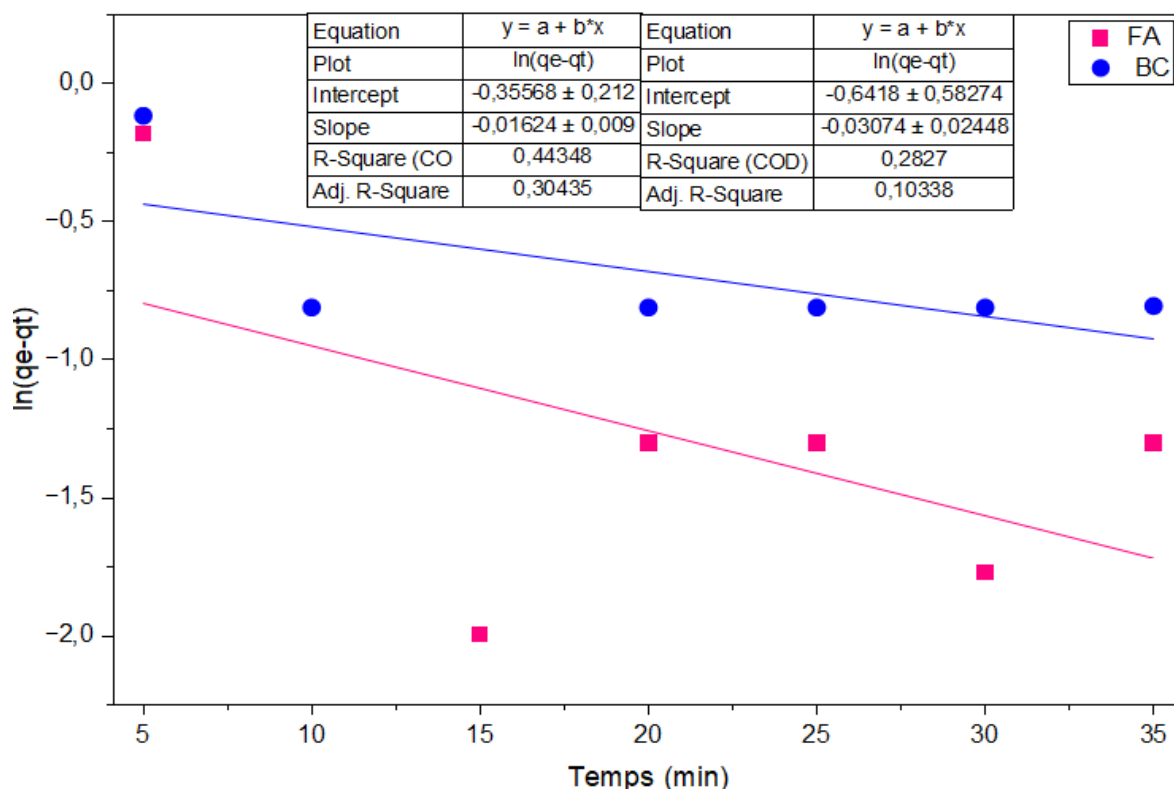


Figure III.14 : Détermination des constantes des vitesses du pseudo 1^{er} ordre de l'adsorption du la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC).

B. Le modèle du pseudo-second ordre

Le modèle du pseudo-second ordre repose sur la capacité d'adsorption à l'équilibre et suppose que l'étape limitante du processus est une adsorption chimique (chimisorption). Ce mécanisme implique des forces de valence, avec un échange ou un partage d'électrons entre l'adsorbant et le soluté. La forme intégrée de l'équation linéaire correspondante s'exprime comme suit :

$$(t/q) = (1/ k_2 \cdot q_e^2) + (t/q_e)$$

Avec :

q_e (mg/g) : Capacité d'adsorption théorique a l'équilibre.

q_t (mg/g) : Capacité d'adsorption a l'instant t.

t (min) : Temps de contact.

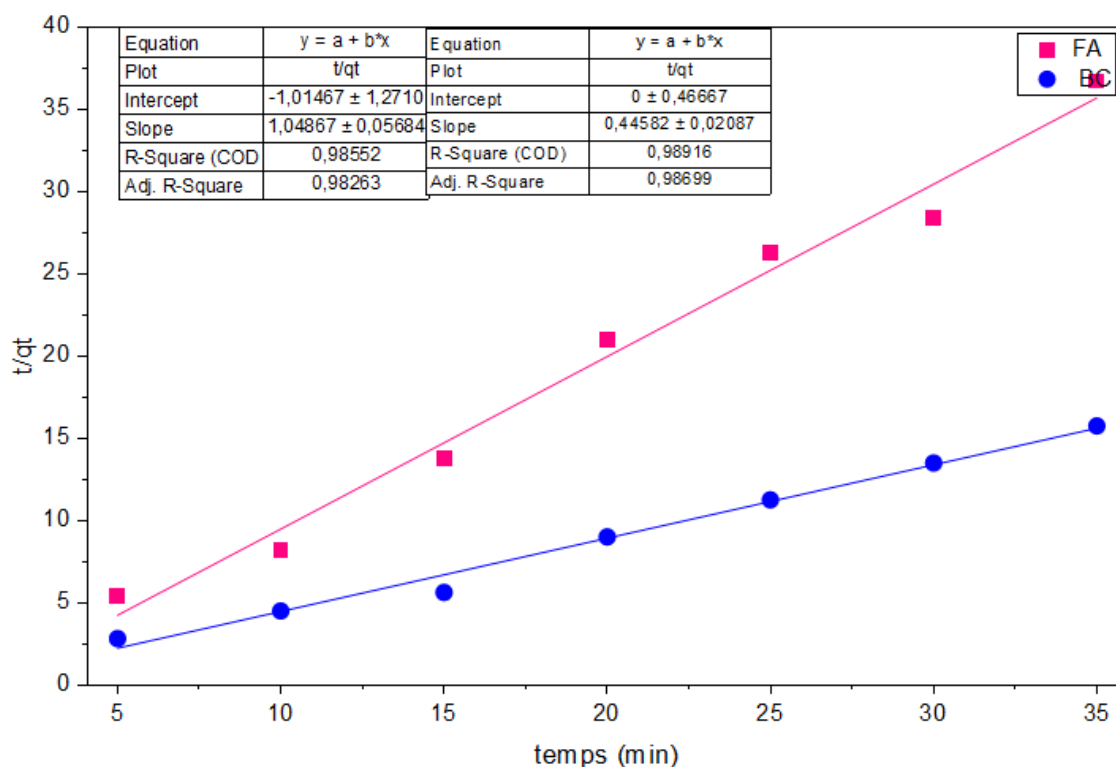


Figure III.15 : Détermination des constantes des vitesses du pseudo-second ordre de l'adsorption du la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250(BC).

Selon les **Figures III.14** et **III.15**, les résultats cinétiques indiquent que le modèle du pseudo-second ordre décrit mieux l'adsorption des deux colorants que le modèle du pseudo premier ordre. En effet, les coefficients de corrélation pour le pseudo-second ordre ($R^2 = 0,986$ pour la Fuchsine acide et $R^2 = 0,989$ pour le Bleu de Coomassie) sont nettement supérieurs à ceux du pseudo-premier ordre (R^2 variant entre 0,00514 et 0,4484). Ces résultats suggèrent que le mécanisme d'adsorption est principalement régi par des interactions de type chimisorption.

Tableau III.3 : Constantes cinétiques d'adsorption de la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) sur les écorces de grenade.

Absorbant	Absorbat	K_1 (g/mg.min)	q_e (mg/g)	R^2	K_2 (g/mg.min)	q_e (mg/g)	R^2
Les écorces de grenade	FA	0,00217	0,24	0,00514	1,307	0,9592	0,9866
	BC	0,01636	0,7018	0,4484	0,0446	2,2430	0,9891

III.12. Isothermes d'adsorption

Afin décrire les interactions entre les colorants et l'adsorbant à l'équilibre, les modèles d'isothermes de Langmuir et de Freundlich ont été utilisés. Les résultats obtenus après linéarisation sont présentés dans les figures ci-dessous :

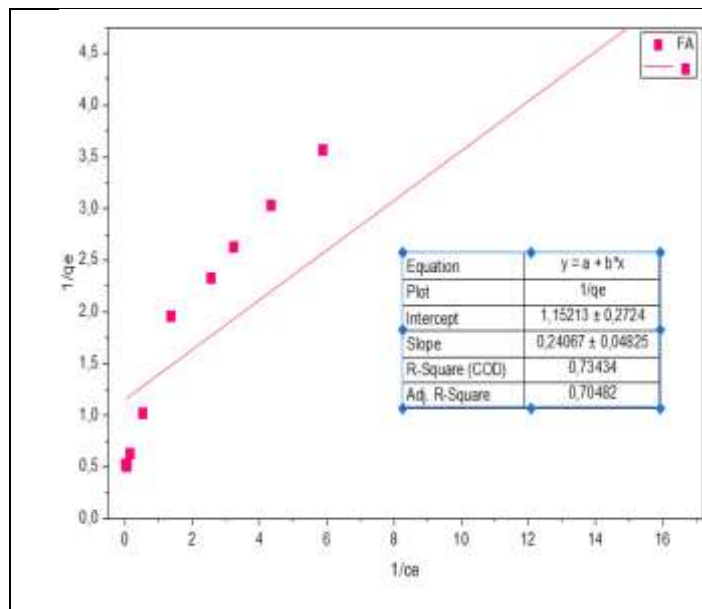


Figure III.16 : Linéarisation de Langmuir de la Fuchsine Acide (FA) par les écorces de grenade.

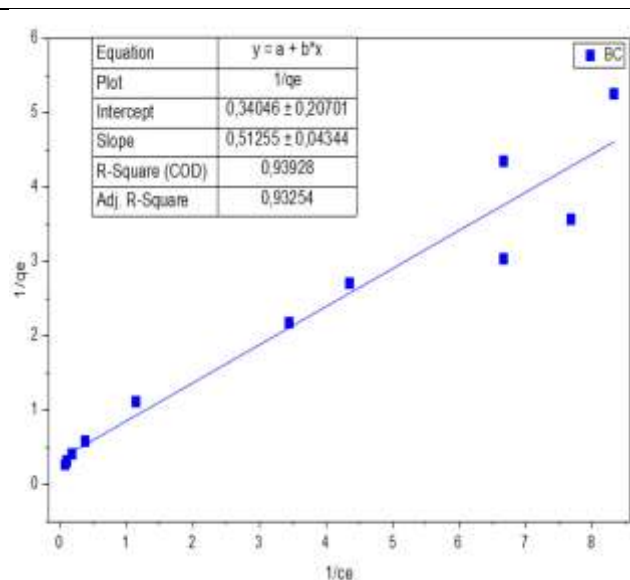


Figure III.17 : Linéarisation de Langmuir du Bleu Coomassie brillant G-250(BC) par les écorces de grenade.

D'après les résultats présentés dans les **figures III.16 et III.17**, les **figure III.18 et III.19**, les coefficients de corrélation pour le modèle de Freundlich ($R^2=0,9719$ pour la Fuchsine acide (FA) et $R^2=0,9866$ pour le Bleu de Coomassie (BC) sont supérieurs à ceux du modèle de Langmuir ou ($R^2=0,7343$ pour la Fuchsine acide (FA) et $R^2=0,9392$ pour le Bleu de Coomassie (BC)). Cela indique que l'isotherme de Freundlich décrit mieux le processus d'adsorption des deux colorants sur les écorces de grenade. Cette observation suggère que la surface de l'adsorbant est hétérogène, présentant des sites d'adsorption avec des énergies variées. De plus, le modèle de Freundlich envisage la formation possible de multicouches adsorbées. Les valeurs du paramètre $n > 1$, indiquent que l'adsorption de la Fuchsine acide et du Bleu de Coomassie est favorable, reflétant une bonne affinité entre les molécules des colorants et la surface de l'adsorbant. En outre, les valeurs plus élevées de $q_{\max}$ (2,937 mg/g) et de K_f (0,882 mg/g) obtenues pour le Bleu Brillant témoignent d'une plus grande capacité d'adsorption et d'une meilleure affinité des écorces de grenade vis-à-vis de ce colorant par rapport à la Fuchsine Acide.

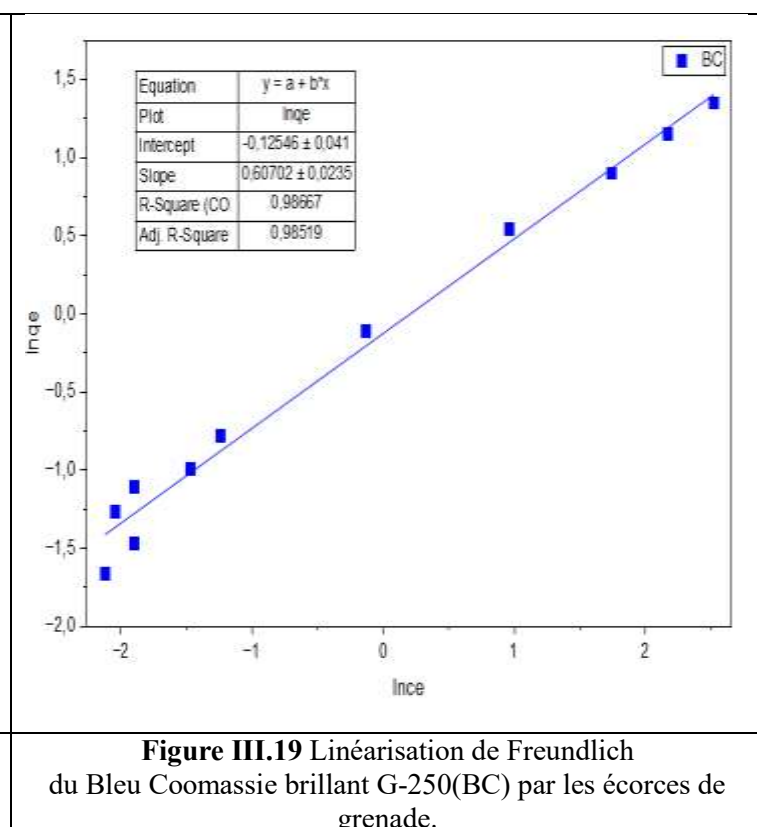
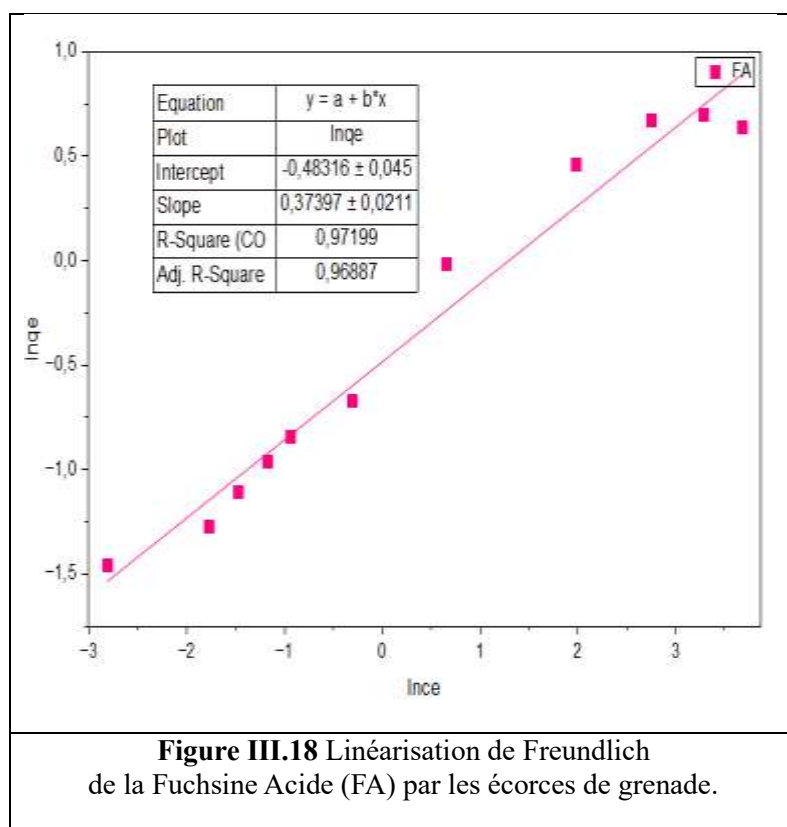


Tableau III.4 : Constantes des deux isothermes d'adsorption du FA et BC par les écorces de grenade

Absorbant (Ecorces de grenade)	Isotherme de Langmuir $q_e = (q_{\max} \cdot k_l \cdot c_e) / (1 + k_l \cdot C_e)$			Isotherme de Freundlich $\ln q_e = \ln k_f + 1/n \ln C_e$		
	Constante	$q_{\max}$ (mg/g)	k_l (l/mg)	R^2	K_f (mg/g)	n
FA		0,868	4,7871	0,7343	0,617	2,674
BC		2,937	0,664	0,9392	0,882	1,647

III.13. Etude thermodynamique de l'adsorption de la (FA) et (BC) sur les écorces de grenade

Afin d'étudier le comportement thermodynamique de l'adsorption des colorants sur les écorces de grenade, les paramètres thermodynamiques standards, notamment l'énergie libre de Gibbs (ΔG°), l'enthalpie (ΔH°) et l'entropie (ΔS°), ont été déterminés. L'énergie libre de Gibbs

a été calculée à partir de l'équation :

$$\Delta G^{\circ} = -R T \ln K_d$$

Avec :

K_d : Constante d'équilibre.

ΔG° : Enthalpie libre (joule/mole).

T° : Température absolue (K).

R : Constante des gaz parfaits (8,314 Joule/mole K)

Les paramètres thermodynamiques sont reliés par la relation fondamentale :

$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T \Delta S^{\circ}$$

Avec:

ΔG° : Enthalpie libre (joule/mole)

ΔH° : Enthalpie (joule/mole)

ΔS° : Entropie (joule/mole. K)

T : Température absolue (K)

En combinant ces deux équations, on obtient l'équation de Van't Hoff :

$$\ln K_d = - \frac{\Delta H^{\circ}}{RT} + \frac{\Delta S^{\circ}}{R}$$

Tandis que :

$$K_d = q_e / C_e$$

Avec :

q_e : capacité de distribution (L/g)

C_e : concentration du colorant à l'équilibre (mg/l)

Le tracé de $\ln K_c$ en fonction de $1/T$ permet d'obtenir une droite dont la pente est égale à $-\Delta H^{\circ}/R$ et l'ordonnée à l'origine à $\Delta S^{\circ}/R$. Les valeurs de ΔH° et ΔS° sont ainsi déterminées à partir des paramètres de cette droite, tandis que ΔG° est calculée pour chaque température étudiée. D'une manière générale, une valeur négative de ΔG° indique que le processus d'adsorption est spontané, alors qu'une valeur positive de ΔH° traduit un phénomène endothermique et une valeur négative un phénomène exothermique. Les droites de Van't Hoff

obtenues sont présentées dans les **Figures III.20** et **III.21**, tandis que les valeurs des paramètres thermodynamiques calculés sont regroupées dans le **Tableau III.5**.

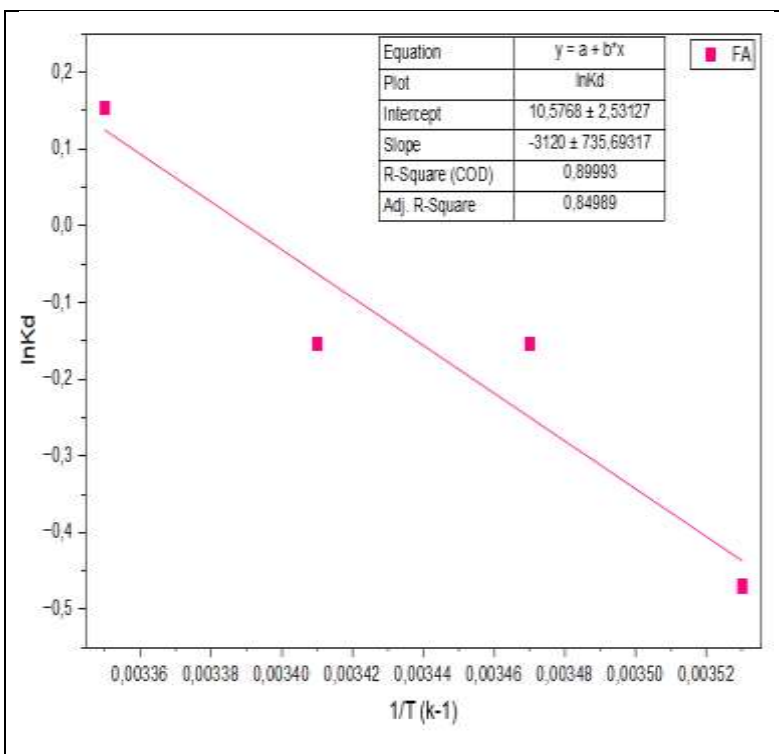


Figure III.20 : Paramètre thermodynamique d'adsorption du la Fuchsine Acide (FA) par les écorces de grenade.

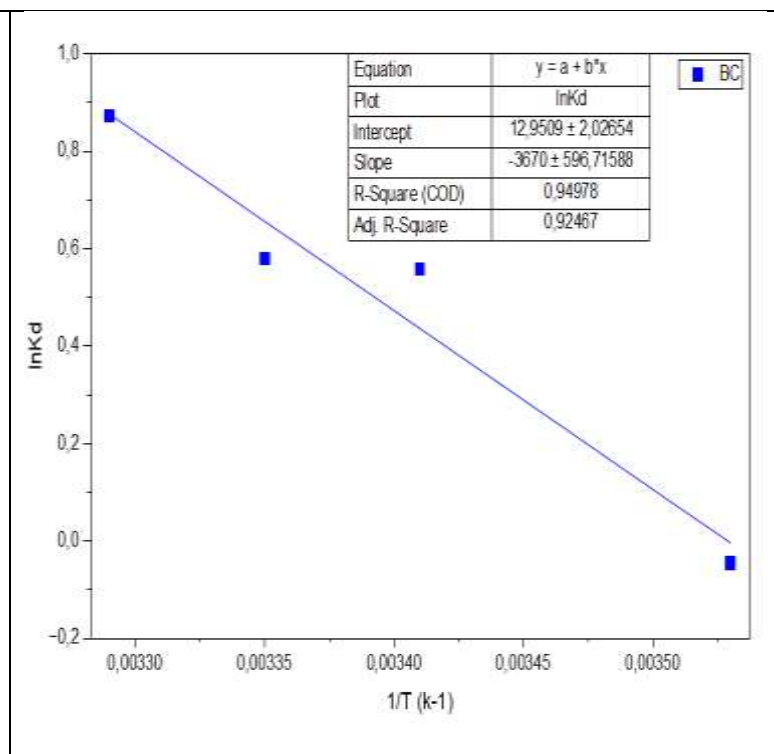


Figure III.21 : Paramètre thermodynamique d'adsorption du Bleu Coomassie brillant G-250 (BC) par les écorces de grenade.

Tableau III.5 Paramètres thermodynamiques de l'adsorption de la Fuchsine Acide (FA) et le Bleu Coomassie brillant G-250 (BC)

	ΔH (KJ. mole ⁻¹)	ΔS (J. mole ⁻¹ . K ⁻¹)	ΔG (KJ. mole ⁻¹)
FA	25,94	87,95	-0,28
BC	30,51	107,67	-2,13

L'analyse des paramètres thermodynamiques obtenus pour l'adsorption de la Fuchsine acide et du Bleu de Coomassie Brillant G-250 sur les écorces de grenade met en évidence un comportement similaire pour les deux colorants. Les valeurs négatives de l'énergie libre de Gibbs (ΔG°) indiquent que le processus d'adsorption est spontané et thermodynamiquement favorable. De plus, les faibles valeurs de ΔH° , inférieures à $40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, suggèrent que l'adsorption est principalement gouvernée par des interactions physiques faibles, caractéristiques d'un mécanisme de physisorption. Par ailleurs, les valeurs positives de l'entropie (ΔS°) traduisent une augmentation du désordre à l'interface solide-solution au cours

de l'adsorption, reflétant une plus grande liberté de mouvement des espèces présentes dans le système.

Références bibliographiques

- [1] Boudia S., Mémoire de Master, Université Dr Moulay Tahar de Saida, 2025 : Etude de l'adsorption de colorants organiques par un matériau naturel (Ecorces de grenade).
- [2] Chouit A., Habireche., M, Mémoire de Master, Université Yahia Fares De Médéa, 2015 : Utilisation des matrices naturelles et traitée pour la purification des eaux potables.
- [3] Ait Salem. D ; Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzo, 2018 : Adsorption d'un colorant sur un matériau naturel.
- [4] Jenway (2007). *Model 6051 Colorimeter: Instruction Manual*. Stone, Staffordshire, United Kingdom: Bibby Scientific Ltd.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Cette étude a évalué le potentiel d'adsorption des écorces de grenade, un matériau naturel, pour éliminer deux colorants organiques en solution aqueuse : la Fuchsine acide et le Bleu de Coomassie brillant G-250. L'adsorption a été suivie par colorimétrie et complétée par une analyse infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) pour caractériser le matériau et comprendre le mécanisme d'interaction.

Les résultats expérimentaux montrent que l'efficacité de l'adsorption dépend fortement des conditions opératoires. Les conditions optimales sont une masse de 0,25 g pour la Fuchsine acide et 0,30 g pour le Bleu de Coomassie, des temps de contact respectifs de 10 et 15 minutes, ainsi que des concentrations initiales de 6×10^{-6} mol/L pour la Fuchsine acide et 4×10^{-6} mol/L pour le Bleu de Coomassie.

L'étude de l'effet du pH révèle des rendements maximaux à pH 3 pour la Fuchsine acide et à pH 4 pour le Bleu de Coomassie. L'analyse thermique indique que l'adsorption est favorisée par l'augmentation de la température, avec des conditions optimales fixées à 25°C pour la Fuchsine acide et 30°C pour le Bleu de Coomassie.

Les analyses cinétiques et thermodynamiques montrent que le processus d'adsorption est spontané et endothermique. Les valeurs négatives de ΔG° confirment la spontanéité, tandis que les faibles valeurs de ΔH° (inférieures à $40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) indiquent une adsorption principalement physique (physisorption). Les valeurs positives de ΔS° traduisent une augmentation du désordre à l'interface solide-solution.

Enfin, les écorces de grenade se révèlent être un adsorbant efficace, économique et écologique, avec une affinité plus marquée pour le Bleu de Coomassie brillant G-250 que la Fuchsine acide. Ces résultats confirment leur potentiel pour le traitement des eaux contaminées. Des études complémentaires pourraient être menées pour optimiser davantage les conditions d'adsorption et évaluer leur application à plus grande échelle.

Résumé

L'objectif de ce travail était d'étudier l'élimination de la Fuchsine acide et du Bleu de Coomassie brillant G-250 par adsorption sur les écorces de grenade. L'étude a montré que ce biomatériau naturel est efficace pour l'élimination des deux colorants dans des solutions aqueuses. Les résultats ont mis en évidence une influence importante des conditions opératoires sur l'efficacité du processus. Les analyses cinétiques et thermodynamiques ont confirmé que l'adsorption est spontanée, endothermique et principalement physique. Ces résultats confirment le potentiel des écorces de grenade comme adsorbant naturel, économique et écologique pour le traitement des eaux contaminées.

Mots-clés : Traitement des eaux, Écorces de grenade, Adsorption, Fuchsine acide, Bleu de Coomassie brillant G-250, Adsorbant naturel.

Abstract

The objective of this study was to investigate the removal of Acid Fuchsine and Brilliant Coomassie Blue G-250 by adsorption onto pomegranate peel. The study showed that this natural biomaterial is effective in removing both dyes from aqueous solutions. The results highlighted a significant influence of operating conditions on the efficiency of the process. Kinetic and thermodynamic analyses confirmed that the adsorption is spontaneous, endothermic, and mainly physical. These findings confirm the potential of pomegranate peel as a natural, low-cost, and eco-friendly adsorbent for wastewater treatment.

Keywords: Wastewater treatment, Pomegranate peel, Adsorption, Acid Fuchsine, Brilliant Coomassie Blue G-250, Natural adsorbent.

ملخص

كان الهدف من هذه الدراسة هو تقييم إزالة صبغتي الفوشين الحمضي والأزرق اللامع كوماسي G-250 عن طريق الامتزاز على قشور الرمان. أظهرت الدراسة أن هذا المادة الحيوية الطبيعية فعالة في إزالة الصبغتين من المحاليل المائية. كما بينت النتائج أن الشروط التجريبية تؤثر بشكل كبير على كفاءة العملية. وأكدت الدراسات الحركية والديناميكية الحرارية أن الامتزاز يتم بشكل تلقائي، ماص للحرارة، وغالباً فيزيائي. وتؤكد هذه النتائج إمكانية استخدام قشور الرمان كمادة مازة طبيعية، اقتصادية وصديقة للبيئة لمعالجة المياه الملوثة.

الكلمات المفتاحية: إزالة التلوث، قشور الرمان، الامتزاز، الفوشين الحمضي، الأزرق اللامع كوماسي G-250 ، معالجة المياه.

