République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés et Environnement

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme Master en Génie des Procédés

Option : Génie chimique

Thème

Etude de la capacité d'adsorption d'un matériau naturel vis a vis de certains polluants organiques

Proposé et Dirigé Par :

Dr. NEDJHIOUI M.

GRINI A.

Préparé par :

ABDESLEM NAWEL

TADJINE KHADIDJA

Promotion 2018

REMERCIMENT

En premier lieu, nous remercie ***ALLAH*** *le tout Puissant qui m'a donnée la force démené à terme ce travail.*

Ensuite nous tenons à remercier nos ***chers parents*** *pour leur patience*

Et

Encouragement à finir un chemin commencé il y'a si longtemps.

Nous exprimons nous remerciements au ***Dr. NEDJHIOUI MOHAMED,*** *pour*

La confiance qu'il nous a témoignée en pour avoir proposé ce sujet Comme nous lui exprimons-nos reconnaissances pour avoir Dirigé ce travail.

Nous remercierons également Co-promotrice Mme ***GRINI AMINA,***

nous souhaite exprimer mes sincères et respectueuses reconnaissances et remerciements à mon enseignant : ***Dr. TAIR***

Pour le grand honneur qu'il me fait en présidant ce jury ;

Toute ma gratitude et mes remerciements au ***Dr : KARMAT SAID***

Nous n'oublie pas de présenter mes remerciements au directeur ***CHAIBA*** *et l'équipe du laboratoire* ***HALL*** *et arrière Manteau Mme* ***HAMIDI.N***

Khadija, Nawal

DEDICACE

C'est avec un très grand honneur que je dédie ce modeste travail

Aux personnes les plus chères au monde pour leurs sacrifices :

A Mes chères parents que ***Allah*** *les gardes et préserve*

A Mes Sœurs, A Mes frères : .A toute la famille «Abdeslam et brahmi ». A Mes amies, A mon fiancé

A Tous mes collègues de la promotion 2018

A Tous à ceux qu'on aime.

NAWAL

DEDICACE

*Merci **ALLAH** (mon Dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patient ce d'aller jusqu'au bout.*

Je dédie ce modeste travail :

A celle qui m'a donné la vie, a la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.

A mon père, A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, l'école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

A mes sœurs : Houria, Sarah, Zineb, ma petite sœur Aya : mes belle fleurs que j'aime si fort,
A mon frère Youcef à qui je souhaite un bel avenir.

A mes petites enfants : Rodwane, Marame, Mohamed Wassim et Lokman.

A mes amies en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréable que nous avons passés ensemble.

A mon fiancé Dr. Mahdi Abdelmadjid qui je souhaite plus de succès Afin de compléter la spécialité qu'il veut.

A toute la famille «Tadjine Grine et Mahdi ».

A Tous mes collègues de la promotion 2018
A Tous à ceux qu'on aime.

KHADIDJA

ملخص:
تستهلك الصناعات كمية كبيرة من المياه وترمي الكثير منها في أنظمة الاستقبال خاصة الصناعات النسيجية فيتم رمي جزء كبير من المياه الملونة للغاية وإن لم تخضع هذه الأخيرة للمعالجة الأولية الكافية فإنها تشكل ضرر على البيئة وعلى الإنسان. ولذلك يجب معالجتها بتقليل التراكيز إلى مستوى يتفق مع معايير الكميات المرمية.
هذا العمل هو مساهمة في إيجاد آليات للحد من آثار هذه الملوثات. هذا الأخير يتكون من امتزاز الملونين (الميثيلين الأزرق والأسود الأخضر) على مادة طبيعية: الباذنجان.
أظهرت النتائج أنه ، في حالة NET ، يتم الحصول على أقصى إنتاج (85٪) للتركيز C0 = 20 مغ / ل مقابل زمن اتصال قدره 1800 دقيقة بينما في حالة BM ، أقصى عائد (90 ٪) يتم الحصول عليها لتركيز C0 = 35 ملغم / لتر. المقابلة لوقت الاتصال على مقربة من 1600 دقيقة. تبين دراسة حركية الامتزاز أن توازن الامتصاص الذي تم الحصول عليه يكون أفضل في حالة NET لتركيز C0 = 20 مغ / ل، وهو ما يقابل زمن الاتصال بما يقارب 1600 دقيقة. في حالة BM، يتم الحصول على هذا التوازن للتركيز C0 = 35 ملغم / لتر، وهو ما يقابل زمن الاتصال على مقربة من 1500 دقيقة.
الكلمات المفتاحية :امتزاز. الميثيلين الأزرق، أسود ايريكروم. الباذنجان.

Résumé :
Les industries consomment une grande quantité d'eau et en rejettent une grande partie dans les systèmes récepteurs. Dans l'industrie textile, une grande partie d'eau fortement colorée est rejetée. Lorsque les effluents aqueux ne subissent pas un traitement adéquat préalable ces derniers sont la cause d'un effet néfaste sur l'environnement et sur l'homme. Un traitement de ces eaux est alors exigé en vue déterminer les conditions opératoires optimales pour traiter ces effluents aqueux colorés afin de diminuer leurs concentrations à un niveau conforme aux normes de rejets
Ce travail est une contribution à la recherche de mécanismes permettant la limitation des effets de ces rejets. Ce dernier consiste en l'adsorption des deux colorants (le Bleu de méthylène: BM et le Noir d'eriochrome: NET) sur un matériau naturel : l'aubergine.
Les résultats ont montré que, dans le cas du NET, un rendement max (85%) est obtenu pour une concentration C_0=20 mg/l correspondant à un temps de contact de 1800 min alors que pour le cas du BM, un rendement maximum (90%) est obtenu pour une concentration C_0=35mg/l. correspondant à un temps de contact voisin de 1600 min.
L'étude de la cinétique d'adsorption montre que l'équilibre d'adsorption obtenu est meilleur dans le cas du NET pour une concentration C_0=20mg/l, ce qui correspond à un temps de contact voisin de 1600 min. Dans le cas du BM, cet équilibre est obtenu pour une concentration C_0=35mg/l, correspondant à un temps de contact voisin de 1500min.
Mots clés : Adsorption, bleu de méthylène**,** noir eriochrome, aubergine.

Abstract:
Industries consume a large amount of water and reject much of it in the receiving systems. In the textile industry, a large part of highly colored water is rejected. When the aqueous effluents do not undergo an adequate preliminary treatment these are the cause of an adverse effect on the environment and on the man. A treatment of these waters is then required in order to determine the optimal operating conditions for treating these colored aqueous effluents in order to reduce their concentrations to a level in accordance with the standards of rejects.
This work is a contribution to finding mechanisms to limit the effects of these releases. The latter consists of the adsorption of the two dyes (Methylene Blue: MB and Eriochrome Black: EB) on a natural material: eggplant.
The results showed that, in the case of NET, a max yield (85%) is obtained for a concentration C0 = 20 mg / l corresponding to a contact time of 1800 min while for the case of the BM, a maximum yield (90%) is obtained for a concentration C0 = 35 mg / l. corresponding to a contact time close to 1600 min.
The study of the adsorption kinetics shows that the adsorption equilibrium obtained is better in the case of NET for a concentration C0 = 20 mg / l, which corresponds to a contact time close to 1600 min. In the case of BM, this equilibrium is obtained for a concentration C0 = 35 mg / l, corresponding to a contact time close to 1500 min.
Keywords: Adsorption, Methylene Blue, Eriochrome Black, Eggplant.

Liste des tableaux

Tableau I. 1	Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante	4
Tableau I.2	Classification standard des colorants	5
Tableau III.1	Composition chimique de l'aubergine pour 100g de produit cru	33
Tableau IV.1	principales caractéristique physico-chimique du BM	41
Tableau IV.2	principales caractéristique physico-chimique du NET	42
Tableau IV.3	Caractérisations d'aubergine	47

Liste des figures

Figure I.1 :	exemple de colorants azoïques	6
Figure I.2 :	Exemple de colorant anthraquinonique	6
Figure I.3 :	Exemple de colorant triphénylméthane	7
Figure I.4 :	Exemple de colorant indigoïdes	7
Figure I.5 :	Exemple de colorant xanthènes.	8
Figure I.6 :	Exemple de colorant nitré	8
Figure I.7 :	Colorant C.I. Acid red 27	9
Figure I.8 :	Colorant CI Basic green	10
Figure I.9 :	Colorant direct	10
Figure I.10 :	Colorant C.I. mordant bleue 9	11
Figure II .1 :	classes des isothermes d'après Gilles et	16
Figure II.2 :	Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain	17
FigureII.3 :	Isotherme d'adsorption de Langmuir	18
FigureII.4 :	Isotherme d'adsorption de Freundlich	20
Figure III.1 :	Fruits d'aubergine	32
Figure IV.1 :	séchage d'aubergine	36
FigureIV.2 :	broyage d'aubergine.	37
Figure IV.3 :	L'aubergine tamisé	37
Figure IV.4 :	pH-mètre	38
Figure IV.5 :	Conductimètre	38
Figure IV.6.1 :	Pycnomètre	39
Figure IV.6.2 :	un pycnomètre est tarré à vide	39
Figure IV.6.3 :	un pycnomètre rempli de méthanol	39
Figure IV.7 :	spectroscopie infrarouge	41
Figure IV.8 :	la loi de Beer Lambert	43
Figure IV.9 :	L'appareillé de spectrophotomètre UV. Visible	44
Figure IV.10 :	Organigramme du mode opératoire d'adsorption	45
Figure IV.11 :	Courbe d'étalonnage NET pH=6	47
Figure IV.12 :	Courbe d'étalonnage BM pH=6	48
Figure IV.13 :	variation du rendement fonction du temps : cas du NET	49
Figure IV.14 :	courbes des cinétiques d'adsorption x/m= f(t): cas du NET	49

Figure IV.15 : cinétique d'adsorption pour NET Ct= f(t) 50
Figure IV.16 : variation du rendement fonction du temps : cas du BM 50
Figure IV.17 : courbes des cinétiques d'adsorption x/m= f(t) : cas du BM 51
Figure IV.18 : cinétique d'adsorption pour BM Ct= f(t) 51
Figure IV.19 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c) 53
Figure IV.20 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m=f (log c) 53
Figure IV.21 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c) 54
Figure IV.22 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m=f (log c) 54
Figure IV.23 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c) 55
Figure IV.24 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m=f (log c) 55
Figure IV.25 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c) 56
Figure IV.26 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c) 56
Figure IV.27 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c) 57
Figure IV.28 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c) 57
Figure IV.29 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c) 58
Figure IV.30 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c) 58
Figure IV.31 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c) 59
Figure IV.32 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c) 59
Figure IV.33 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c) 60
Figure IV.34 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c) 60

Liste des abréviations

BET : Brunauer-Emett-Teller

BM : Bleu de Méthylène

Do : Densité optique

FA O : Food Agricultural Organisation.

IR : Infrarouge

Kcal Kilo calorie

MEB : Microscope Electronique à Balayage

NET : Noir d'ériochrome

RC : Rouge Congo

UV : Ultra-Violet

Vpt : Volume poreux total

Nomenclature et symboles

Lecture (selon l'ordre Alphabétique)	**Désignation**	**Unité** (selon l'unité Internationale MKSA
A	Constante liée à l'énergie d'interaction avec la surface.	(-)
C	Concentration massique	g/l
C	Conductivité	ms
C_e	Concentration à l'équilibre de l'adsorbat	mg $.l^{-1}$
C_s	Concentration du soluté dans la phase liquide à la saturation de l'adsorba.	$mg.l^{-1}$
H	Humidité	(-)
I	Intensité du faisceau immergent	(A)
I_0	Intensité du faisceau incitant	(A)
K_1	Constante de vitesse De La Première Adsorption..	min^{-1}
K^0	Constante D'équilibre	(-)
Kid	Constante D'équilibre de la diffusion intra-particulaire	$Mg/g\ m^{1/2}$
K	coefficient spécifique d'adsorption	(-)

Kf	Constantes de Freundlich caractéristiques de l'efficacité d'un adsorbant donné vis-à-vis d'un soluté donné.	(-)
K	Constante D'affinité.	(-)
l	Epaisseur de la cuve	cm
M	Masse d'absorbant.	g
M	Masse du produite a analyse	g
M_0	Matière avant sèche	g
M_1	Matière après sèche	g
M_1	Masse de méthanol ajoute à l'échantillon un pour de remplir le pycnomètre	g
M_2	Masse de méthanol permettant de remplie le pycnomètre	g
pH	Potentiel Hydrogène.	(-)
Qe	Capacité d'adsorption instante t	Mg/g
Q1	Capacité d'adsorption instante t	
Q	Quantité de soluté adsorbée.	Mg
Qm	Capacité maximale d'adsorption.	J/K
R	Distance Moyenne Entre Les Deux Sites D'adsorption De L'anticorps.	(-)
T	Température.	°C
V	Volume	ml

Lettres Grecques

Lecture (Selon L'ordre Alphabétique)	**Désignation**	**Unité** (selon l'unité Internationale MKSA)
λ	Longueur d'onde	nm
λ_{max}	Longueur d'onde maximale	(-)
ρ	Masse volumique.	(g/cm^3)
ρ_{app}	Masse spécifique apparent	(g/cm^3
ρ	Masse spécifique réel	(g/cm^3)
φ	porosité	(-)

Exposant

Lecture (selon l'ordre alphabétique)	**Désignation**
Ads	Adsorption.
Abs	absorbance
Do	Densité optique

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction Générale…….…….……..1

Chapitre I : les colorants

I. 1. Introduction…….3

I. 2. Historique ……...3

I. 3. Définition ……..3

I.4. L'origine des matières colorants…… 4

I.5. Classification des colorants …….5

I.5.1. Classification selon la nature chimique……5

a. Les colorants azoïques…….…….5
b. Les colorants anthraquinoniques ……6
c. Les colorants triphénylméthans ……..……..7
d. Les colorants indigoïdes……..……..……..…..7
e. Les colorants kanthènes ……..…8
f. Les colorants nitrés et nitrosés ……...……..8

I. 5.2.classification selon le domaine d'application ……..9

a. Les colorants acides ou anionique ……...…….…9
b. Les colorants basiques ou cationiques ……9
c. Les colorants directs ……10
d. Les colorants à mordants ……...……11

1. 6.Utilisation des colorants ……..……12

I. 7. Toxicité et impact environnemental …….…11

I.7.1.Toxicité sur la santé humaine ……..11

I.7.2.Toxicité des milieux aquatiques par les rejets industriels ……...12

I.8.conclusion…….……..13

Chapitre II : biosorption

II. 1. Introduction…….14

II. 2. Définition ……...…14

II. 3. Principe……14

II. 4. Différents types d'adsorption …… ……..…15

II.4.1. L'adsorption physique…… …….....……....15

II.4.2.L'adsorption chimique ……..15
II.5.Classification des isothermes d'adsorption ……..15
II.5.1.Les isotherme de types C……15
II.5.2.Les isotherme de types L……16
II.5.3.Les isotherme de types H……16
II.5.4.Les isotherme de types S……....16
II.6.Description du mécanisme d'adsorption ……..17
II.7.Modélisation de l'équilibre d'adsorption ……..…18
II.7.1.Isotherme de Langmuir ……..18
II.7.2.Isotherme de Freundlich…….19
II.7.3.Isotherme de B.E.T…….20
II.8.Facteurs influençant d'adsorption ……21
II.9 La cinétique adsorption…….22
II.9.1 Introduction……...……22
II.9.2. Approche théorique de la cinétique globale……..……23
II.9.2.a Réaction globale……..……23
II.9.2.b Les modèles cinétiques d'adsorption…….…….23
II.10. Revue biblio graphique sur la bio sorption des colorants ……25
II.11. Conclusion……..26

CHAPITRE III: Les adsorbants

III. 1. Introduction ……..…27
III.2.Matériaux adsorbants ……..27
II.2.1. Déchets de fruits et agricoles…….28
III.2.2.Déchets industriels .....…...29
III.2.3. Déchets d'algues et de fruits de mer ……...……30
III.3.Facteurs généraux de caractérisation …….……..30
III.4.Caractérisation des adsorbants ……30
III.4.1.Propriétés chimiques …….……...30
III.4.2.Propriétés physiques……...……...30

III.5. L'aubergine (Solanum melongena L.)…….31

III.5.1.La famille des Solanacées ……31

III.5.1.1. L'espèce Solanum melongena L……...……31

III.5.1.1.a. Description botanique de l'espèce ……...…….31

III.5.1.1.b Place dans la systhématique .....…...32

III.5.2. Composition chimique…….33

III.5.3 Principales caractéristiques……...34

III.5.4. Caractéristiques nutritionnelles et usage……..35

III.6.Conclusion……..……..…35

CHAPITRE IV: Partie Expérimentale

IV.1 Introduction …….36

IV.2. Matériels et Méthodes .……...……36

IV.2.1 la préparation d'aubergine…….36

IV.2.2 La caractérisation d'aubergine …….38

IV.2.3 Présentation et préparation des solutions…… 41

IV.2.3.a.1Etalonnage des solutions …….…....42

IV.2.3.b. Méthode de détermination des concentrations ……43

IV.2.3.c Analyse du Bleu de méthylène, Noir d'ériochrome par UV-Visible ……..…43

IV.2.4.Courbe d'étalonnage ……...…….44

IV.2.4.1.Essais d'adsorption du BM et NET sur les aubergines ……..……..……..44

IV.2.4.2.Cinétique d'adsorption ……..……44

IV.5. Isotherme D'adsorption……...46

IV.6.disscusion et résultats ...……..……47

IV.6.1.Les caractérisation de l'aubergine…….47

IV.6.3.Cinétique d'adsorption ……49

IV.6.4. Interprétation des résultats ……..51

IV.6.5. Isotherme D'adsorption……52

IV.7 Conclusion…….……..62

Conclusion générale……63

Annexe.

Recherche bibliographique.

Introduction générale

Introduction Générale

La protection de l'environnement est depuis longtemps devenue un enjeu économique et politique majeur. Parmi ces priorités figure la sauvegarde des ressources en eau. Tous les pays du monde sont concernés soit parce qu'ils manquent d'eau soit parce qu'ils la polluent. L'eau est nécessaire à la vie et à l'activité humaine.

Depuis quelques années, les dangers potentiels des pollutions pour l'équilibre écologique et la santé publique sont considérés avec une inquiétude croissante par les pouvoirs publics. Avec l'adoption du Code de l'Environnement, le 14 septembre 2000, la problématique « eau polluée » est devenue une préoccupation essentielle [1].

L'utilisation des colorants remonte aux époques les plus reculées de l'histoire où les hommes utilisaient les colorants naturels d'origine animale ou végétale tels que l'indigo, pourpre.

Les colorants sont alors utilisés pour améliorer l'aspect et donner une grande variété aux différents objets produits tissus, papier, cuir,…

Mais qui dit industrie dit pollution .en effet ces industries utilisant les colorants, rejettent leur eaux fortement coloré ou chargées en matières colorantes dans les cours d'eau présentant des nuisances à la nature.

En raison de leur caractère toxique, les colorants ont une influence sur l'aspect esthétique de la nature. Il faut donc éliminer cette pollution de l'eau avant son rejet en milieu récepteur, ce qui est généralement réalisé par des procédés de traitement.

Différentes techniques ont été utilisées pour l'élimination de certains polluants solubles dans les effluents industriels ou domestiques. Elles sont différentes les unes par rapport aux autres et peuvent être citées à titre d'illustration l'adsorption, l'électrolyse, la flottation, la précipitation, les échanges d'ions, l'extraction liquide-liquide, la filtration membranaire etc.

L'adsorption est l'une des techniques les plus adoptées pour cette élimination de polluants, à cause de sa grande capacité d'épurer les eaux contaminées. Le charbon actif est l'adsorbant le plus couramment utilisé mais reste très onéreux et nécessite en plus une régénération, constituant un facteur limitant. Ceci a donc encouragé des travaux de recherche en les orientant vers des procédés de traitement faisant appel à de matériau naturel moins couteux et largement disponible. En effet la performance et l'efficacité de cette technique d'adsorption dépend d'une façon prépondérante de la nature du support utilisé comme adsorbant.

L'objectif de ce travail est une contribution à la limitation de ce fléau. C'est un essai d'élimination des polluants organiques par bio-sorption.

Notre travail est réparti en une partie bibliographique et une autre expérimentale :

- Le premier chapitre présente une généralité sur les colorants, utilisations et toxicité et impact environnemental sur différences domaines.
- Le deuxième chapitre décrit et définit en détails le procédé de la biosorption ainsi que la cinétique d'adsorption, et enfin, on donne une revue bibliographique sur la biosorption des colorants.
- Le troisième chapitre décrit le matériau utilisé, en se basant sur l'étude de l'adsorbant utilisé et de ces caractéristiques et composition chimique : qui est l'aubergine.
- La partie expérimentale est consacrée à l'étude de la description, préparation et caractérisation de notre adsorbant. Cette partie est suivie par l'exposé des résultats et interprétations des essais obtenus de l'adsorption et de la cinétique d'adsorption des colorants sur l'aubergine.

En fin, on termine par une conclusion générale qui résume les interprétations des résultats.

CHAPITRE I :

Les colorants

I.1 Introduction :

Dans la pollution de l'eau industrielle, la couleur produite par les petites concentrations de colorants synthétiques dans l'eau est importante, car en plus d'avoir les effets toxiques possibles, la couleur de l'eau est visiblement désagréable. Les effluents de la teinture textile sont généralement très colorés, avec de grandes quantités des matières en suspensions organiques. Les colorants synthétiques sont conçus pour être récalcitrants à la biodégradation et donc les processus de traitement biologique sont inefficaces pour éliminer la couleur des eaux usées.

En outre, les produits de dégradation de certains colorants sont toxiques. L'adsorption est largement utilisée pour éliminer ces polluants des eaux usées.

I.2Historique des colorants : [2]

Jusqu'à la création des colorants artificiels, les fibres et les tissus ont été soit teints à l'aide de produit naturels d'origine végétale ou animale, soit colorés à l'aide de combinaisons minérales, insoluble dans l'eau, qui étaient précipitées sur les fibres .Les matières naturelles les plus importantes : indigo, garance, bois de compéche,bois jaune ,cachou, d'autres produits naturels, tels que coquilles de noix ,écorces, lichens, feuilles étaient récoltés par le teinture lui-même pour son exploitation artisanale.

Le premier colorant artificiel découvert en 1770 est l'acide picrique, il été utilisé pour la teinture de la soie et pour la laine, les synthèses se succédèrent rapidement avec la fuchsine le violet méthyle…..

Ce sont là des colorants basiques qui se distinguent par une vivacité inconnue auparavant.

Dans la période qui sépare les deux guerres mondiales signalons le développement des colorants à cuve.

Celui des colorants direct, solides à la lumière, de la série azoïque, des dioxazénes .la création des colorants de chrome complexes acides, de nombreux pigments pour l'industrie des laques des colorants dispersés.

Les colorants réactifs (cibacrau, procion, Remazol) sont un nouveau des dernières années ,ils sont à même d'enter en liaison chimique effective .

I.3 Définition :

Un colorant est défini comme étant un produit capable de teindre substance d'une manière durable. Les colorants furent, pendant très longtemps, extraits du milieu naturel : plantes, animaux et minéraux. Le coût d'obtention une était souvent très élevé, et les procédés d'application plus ou moins reproductibles et très fastidieux. Les premiers colorants

synthétiques datent du milieu du 19ème siècle. L'évolution de l'industrie des colorants a été étroitement liée au développement de la teinture synthétique et de la chimie en général. Un colorant proprement dit est une substance qui possède deux propriétés spécifiques, indépendantes l'une de l'autre, la couleur et l'aptitude à être fixée sur un support tel qu'un textile [03].

Les principaux groupes chromophores et auxochromes sont donnés dans tableau I.1. Les chromophores sont des systèmes à liaisons π conjuguées ou des complexes de métaux de transition. Les colorants diffèrent les uns des autres par des combinaisons d'orbitales moléculaires. La coloration correspond aux transitions possibles après absorption du rayonnement lumineux entre ces niveaux d'énergie propres à chaque molécule [04].

Tableau I. 1: Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante [05].

Groupes chromophores	**Groupes auxochromes**
Azo (-N=N)	Amine primaire ($-NH_2$)
Nitroso (-N=O)	Amine secondaire (-NHR)
Carbonyl (=C=O)	Amine tertiaire ($-NR_2$)
Vinyl (-CH=CH-)	Hydroxyl (-OH)
Nitro ($-NO_2$)	Alkoxyl (-OR)
Sulphure (>C=S)	Donneurs d'électrons (-Cl)

I.4 L'origine des Matières Colorantes :

Les colorants furent, pendant très longtemps, extraits du milieu naturel : plantes, animaux et minéraux. Les premiers colorants synthétiques datent du milieu du 19éme siècle.

L'évolution de l'industrie des colorants a été étroitement liée au développement de la teinture synthétique et de la chimie en générale.

Les matières colorantes modifient la transparence et l'éclairement du milieu ; l'action chlorophyllienne s'en trouve ralentie, la production d'oxygène en est diminuée et il y a tendance à l'installation des conditions anaérobies [06].

I.5 Classification Des Colorants [07] **:**

La classification peut être faite selon plusieurs manières : chimique, tinctoriale, commerciale. Toutefois, le classement chimique et tinctorial est le plus fréquent (tableau I.2).

Tableau I.2: Classification standard des colorants [07].

Colorants contenant un groupe fonctionnel anionique	**Colorants acquérant une réaction chimique avant l'application**
- colorants acides - colorants directs - colorants à mordants	- colorants de cuves - colorants au soufre - colorants azoïque
Colorants contenant un groupe fonctionnel cationique	**Classe spéciale des colorants**
- colorants basiques	- colorants dispersés - colorants solubles - pigments - colorants naturel

Du point de vue atomistique, les colorants peuvent être soit inorganiques (les atomes de carbone ne sont pas majoritaires dans la composition chimique de la molécule), soit organiques (abondance de carbone dans la formule chimique). De plus, le colorant, qu'il soit ; organique ou inorganique, peut être d'origine naturelle ou synthétique.

Une autre classification repose sur le critère suivant : un colorant peut exister à l'état solide (on parle de pigment) ou être en solution (la terminologie colorant est conservée). Un pigment consiste en une petite particule qui est insoluble dans l'environnement chimique ou il est appliqué. En d'autres mots, le pigment, pour fixer un substrat, doit être mélangé à certains additifs.

I.5.1. Classification Selon La Nature Chimique [08]. :

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupement chromophore.

a. Les colorants azoïques

Sont caractérisés par la présence au sein de la molécule d'un groupement azoïque (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques. Cette catégorie de colorant est actuellement la plus répandue sur le plan de l'application, puisqu'ils représentent plus de 50% de la production mondiale de matières colorantes .

Les colorants azoïques se répartissent en plusieurs catégories : les colorants basiques, acides, directs et réactifs solubles dans l'eau, et les azoïques dispersés et à mordant non ioniques insolubles dans l'eau.la fuguer I.1 donne un exemple de colorant azoïques

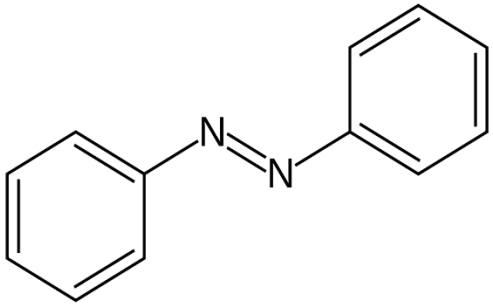


Figure I.1 : exemple de colorant azoïques

b. Les Colorants anthraquinoniques

Ils représentent, après les colorants azoïques, le plus important groupe de matières colorantes. Avec leurs nuances bleue et turquoise ils complètent les colorants azoïques jaunes et rouges. La molécule de base de ce groupe de colorants est l'anthraquinone qui présente le groupe chromophore carbonyle >C =O sur un noyau quinonique qui est le chromogène.

Les chromogènes anthraquinoniques constituent la base de la plupart des colorants naturels rouges, dont le plus célèbres est la garance, qui après détermination de la formule chimique (dihydroxy-1,2-anthraquinone), a été fabriquée synthétiquement sous le nom d'alizarine. La découverte des indigoïdes par leur constitution chimique, mais de qualité moins égale, car très résistants à la lumière et aux agents divers. La figure I.2 donne un exemple de colorant anthraquinonique.

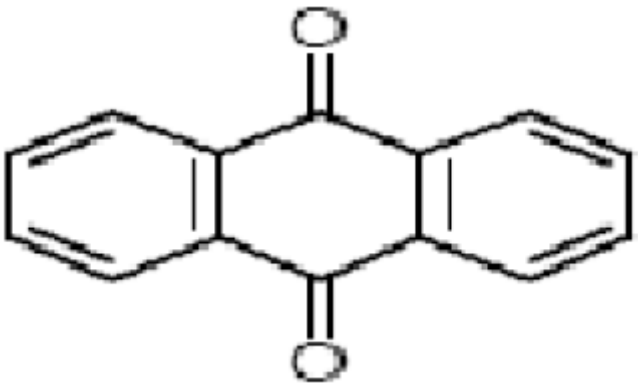


Figure I.2 : Exemple de colorant anthraquinonique

c. Les colorants triphénylméthanes

Les colorants triphénylméthanes dérivent du triphénylméthane, qui est un hydrocarbure possédant trois cycles phényle liés à un carbone central. On retrouve cette structure de base dans un grand nombre de composés organiques colorés. Les colorants triphénylméthanes et leurs dérivés hétérocycliques constituent la plus ancienne classe de colorants synthétiques.

Leur utilisation ne se limite pas à l'industrie. On les retrouve également dans le domaine médical comme marqueur biologique et comme agent antifongique chez les poissons et la volaille.

La figure I.3 donne un exemple de colorants triphénylméthanes.

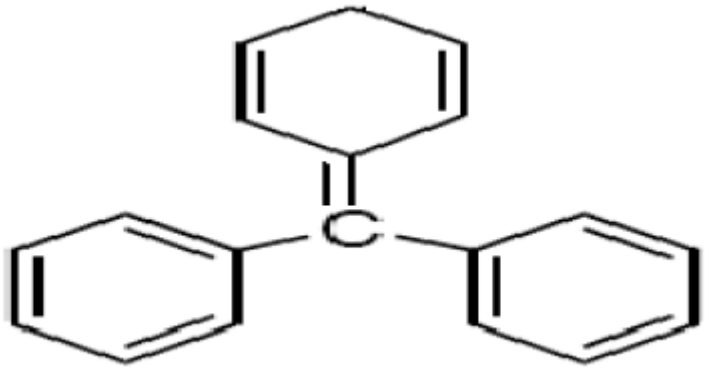


Figure I.3 : Exemple de colorant triphénylméthane [08].

d. Les colorants indigoïdes

Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues séléniés, soufrés et oxygénés du bleu indigo provoquent d'importants effets hypochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise. Les colorants indigoïdes sont utilisés comme colorant en textile, comme additifs en produits pharmaceutiques, la confiserie, ainsi que dans des diagnostiques médicales. Le plus important des colorants indigoïdes est l'indigo servant principalement à la coloration de jeans, de formule chimique $C_{16}H_{10}N_2O_2$ (figure I.4).

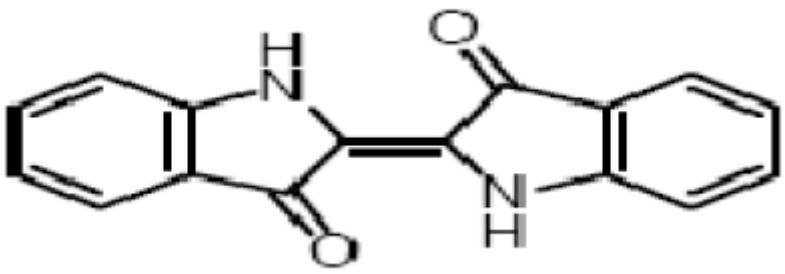


Figure I.4 : Exemple de colorant indigoïdes.

e. Les colorants xanthènes

Les colorants xanthènes sont des composés qui constituent les dérivés de la fluorescéine halogénée. Leur propriété de marqueurs lors d'accident maritime ou de traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie. Ils sont aussi utilisés comme colorant en alimentaire, cosmétique, textile et impression (figure I.5).

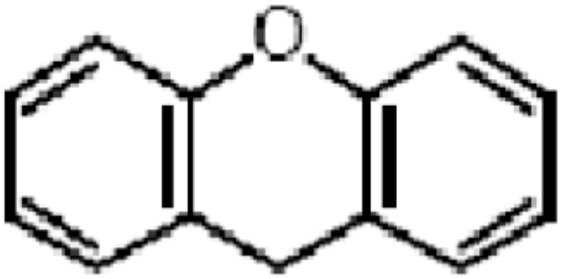


Figure I.5: Exemple de colorant xanthènes.

f. Les colorants nitrés et nitrosés

Les colorants nitrés et nitrosés forment une classe de colorants très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO2) en position ortho et d'un groupement électro donneur (hydroxyle ou groupes aminés) (figure I.6).

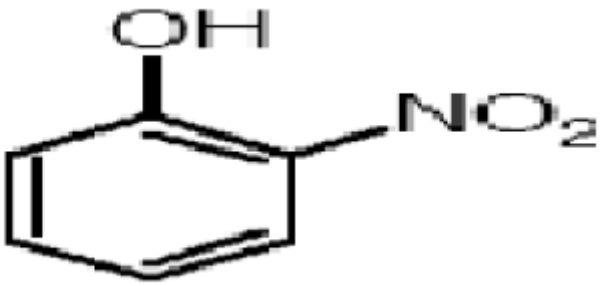


Figure I.6 : Exemple de colorant nitré.

I.5.2. Classification selon le domaine d'application [01] **:**

Si la classification chimique présente un intérêt pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application. Ainsi, il est renseigné sur la solubilité du colorant dans le bain de teinture, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation. Celle-ci est de force variable selon que la liaison colorant/substrat est du type ionique hydrogène, de Van der Waals ou covalente. On distingue différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les auxochromes.

a. Les colorants acides ou anioniques

Solubles dans l'eau grâce à leurs groupements sulfonates ou carboxylates, ils sont ainsi dénommés parce qu'ils permettent de teindre les fibres animales (laine et soie) et quelques fibres acryliques modifiées (nylon, polyamide) en bain légèrement acide.

L'affinité colorant-fibre est le résultat de liaisons ioniques entre la partie acide sulfonique du colorant et les groupements amine des fibres textiles. La figure I.7 donne un la structure d'un colorant acide.

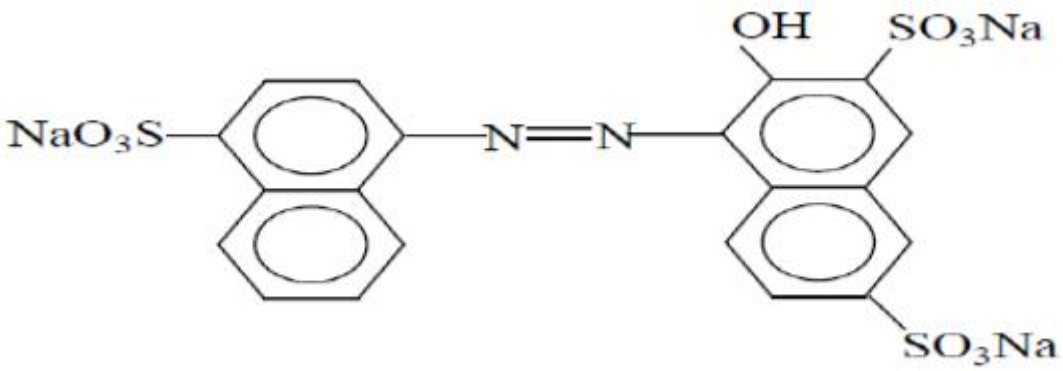


Figure I.7: Colorant C.I. Acidred 27

b. Les colorants basiques ou cationiques

Les colorants basiques ou cationiques sont des sels d'amines organiques, ce qui leur confère une bonne solubilité dans l'eau. Les liaisons se font entre les sites cationiques des colorants et les sites anioniques des fibres. En phase de disparaître dans la teinture de la laine et de la soie, ces colorants ont bénéficié d'un regain d'intérêt avec l'apparition des fibres acryliques, sur lesquelles ils permettent des nuances très vives et résistantes.

La figure I.8 donne la structure de colorant basique Green 4, un des colorants les plus importants de cette classe est le Bleu de Méthylène.

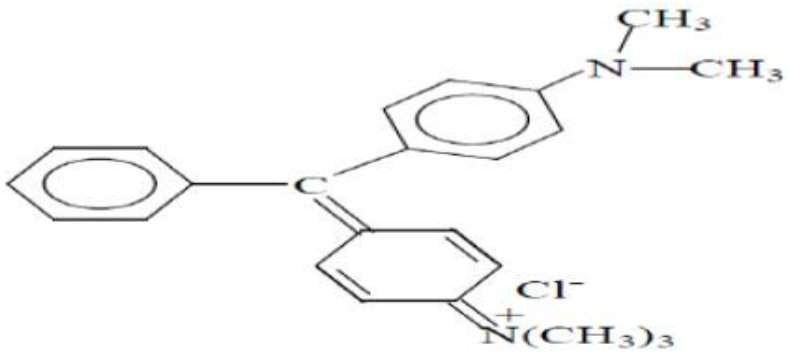


Figure I.8: Colorant CI Basic green 4.

c. Les colorants directs

En 1884 fut découvert le premier colorant direct, le rouge Congo, qui permettait de teindre directement le coton sans l'intervention d'aucun mordant. Les colorants directs ou substantifs, tout comme les colorants acides, sont solubles dans l'eau, du fait de la présence de groupes sulfonâtes. Les colorants directs contiennent ou sont capables de former des charges positives ou négatives électrostatiquement attirées par les charges des fibres. Ils se distinguent par leur affinité pour les fibres cellulosiques sans application de mordant, liée à la structure plane de leur molécule (figure I.9).

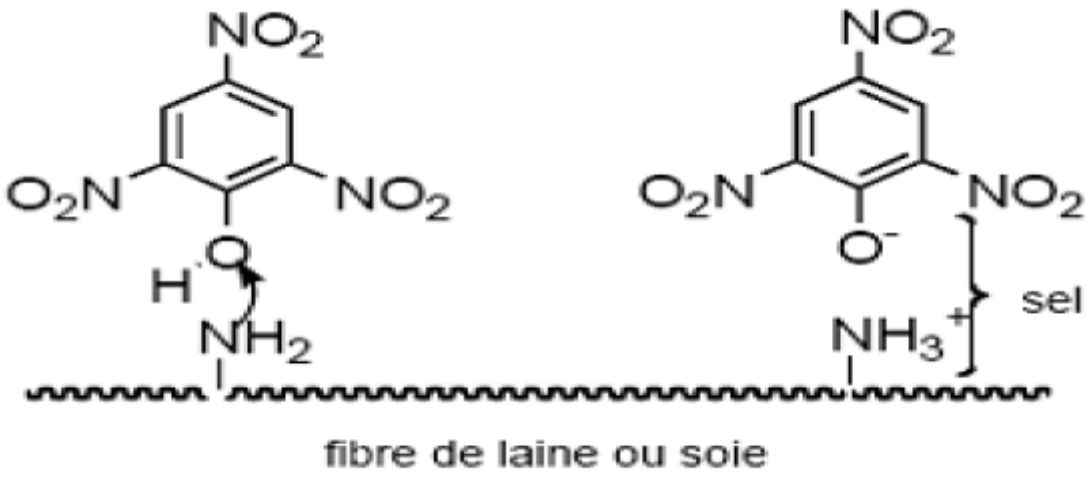


Figure I.9 : Colorant direct.

d. Les colorants à mordants

Les colorants à mordants contiennent généralement un ligand fonctionnel capable de réagir fortement avec un sel d'aluminium, de chrome, de cobalt, de cuivre, de nickel ou de fer pour donner différents complexes colorés avec le textile. La figure I.10 donne un exemple de colorant mordant.

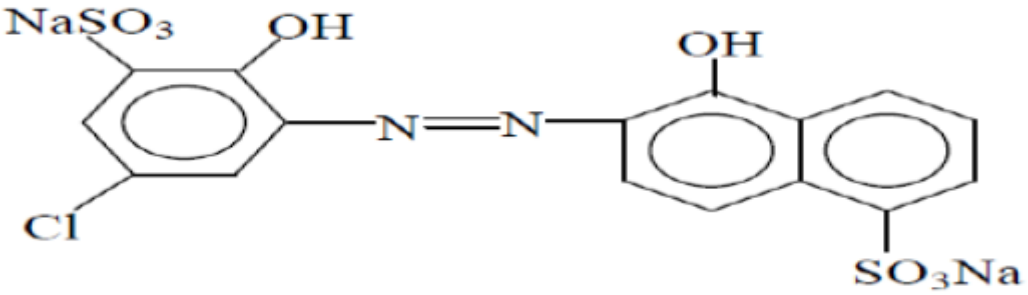


Figure I.10 : Colorant C.I.mordant bleue 9.

I.6 Utilisation des colorants :

Pour voir l'importance de matières colorantes il suffit d'examiner l'ensemble des produits manufacturés dans les différents domaines d'application suivants :

- Textiles 60%
- Papiers 10%
- Matières plastiques et élastomères 10%
- Cuire et fourrures 3%

Les autres applications concernent les produits alimentaires, le bois, la photographie [20].

I.7. Toxicité et impact environnemental :

Les colorants sont des composés difficilement biodégradables par les microorganismes, ils sont toxiques ou nocifs pour l'homme et les animaux.

I.7.1 Toxicité sur la santé humaine [01] **:**

Plusieurs travaux de recherche sur les effets toxiques des colorants sur la santé humaine ont été développés. En effet, des chercheurs, ont montré que les colorants aminés sont souvent aptes à provoquer des irritations de la peau et des dermites. Des effets similaires avec production

d'eczéma et d'ulcération ont été observés chez les ouvriers d'usine de fabrication des colorants de la série du triphénylméthane.

Des réactions allergiques, asthme quelquefois et surtout des dermites eczémateuses ont été observés avec divers colorants aminés azoïques, anthraquinoniques, ainsi qu'avec certains colorants du groupe des naphtalènes (chelite de rouge).

Les colorants de synthèse à base d'amines entraînent des risques cancérogènes, des tumeurs urinaires et plus spécialement les tumeurs bénignes et malignes de la vessie. En 1913, pour la première fois, on se rendit compte qu'il y avait une relation entre la production d'aniline et l'apparition de cancers de la vessie : ces maladies ont particulièrement touché les ouvriers allemands. D'autres recherches ont signalé que la tartrazine développe un certain nombre de réactions adverses chez certains individus comme le prurit, l'oedème, l'urticaire, l'asthme et la rhinite.

Les colorants azoïques sont aussi responsables d'apparition de Lépatomes chez l'homme. Les colorants métallifères sont parmi les substances qui représentent de grands risques pour la santé de l'homme. La granulomatose pulmonaire est signalée chez les femmes utilisant des laques colorées et parfumées plusieurs fois par jour pendant des années.

I.7.2. Toxicité des milieux aquatiques par les rejets industriels :

Les rejets d'effluents des industries textiles, chargés en colorants, dans les rivières, peuvent nuire grandement aux espèces animales, végétales ainsi qu'aux divers micro-organismes vivant dans ces eaux. Cette toxicité, pourrait être liée à la diminution de l'oxygène dissout dans ces milieux. Par ailleurs, eur très faible biodégradabilité, due à leur poids moléculaire élevé et à leurs structures complexes, confère à ces composés un caractère toxique pouvant être élevé ou faible [21].

De ce fait, ils peuvent persister longtemps dans ce milieu, engendrant ainsi des perturbations importantes dans les différents mécanismes naturels existant dans la flore (pouvoir d'auto épuration des cours d'eau, inhibition de la croissance des végétaux aquatiques…) et dans la faune (destruction d'une catégorie de poissons, de microorganismes…).

Dans ces conditions la dose létale (DL50) reste le meilleur paramètre pour évaluer les effets toxiques causés par ces déversements. Ainsi une DL50 signifie la mort de 50 % d'espèces animales testés en expérimentation [21]. Les données bibliographiques ont mentionné que [22] :

- Les algues peuvent être inhibés (à 35%) ou stimulés (à 65%) par les rejets d'effluents dans les industries textiles. Ces résultats ont été obtenus lors des prélèvements effectués sur la côte Est des U.S.A.
- le colorant "noir de l'uxanthol G" est très nocif pour les jeunes guppies à la concentration de 5 mg/l.
- la fuchsine inhibe la croissance des algues et des petits crustacés pour des concentrations minimales de 1mg/l et 20 mg/l respectivement.
- le bleu de méthylène est toxique pour les algues et les petits crustacés à partir des concentrations de 0,1 à 2 mg/l.
- le bleu de victoria, le violet de méthyle, le noir anthracite BT et le vert diamant sont très toxiques pour la faune et la flore à partir de concentrations de 1 mg/l.

I.8 conclusion :

Sur la base de cette revue bibliographique on note que certains colorants ne sont pas toxiques, mais d'autres colorants peuvent être toxique par leur teneur en groupements cancérigènes : groupements phtalogéne, cyanine, sels de baryum, et pour cette cause ont proposé les méthodes pour éliminer cette polluant organique.

CHAPITRE II:

La biosorption

II.1 Introduction

La biosorption correspond à l'utilisation des matériaux biologiques ayant un grand potentiel de fixation des polluants par adsorption. Elle est considérée comme alternative ou complémentaire aux méthodes conventionnelles et généralement coûteuses, utilisées pour le traitement des effluents contenant des ions métalliques ou des colorants. En effet, la biosorption des métaux lourds, colorants ou autres composés organiques comme le phénol contenus dans des effluents aqueux est un procédé pas très ancien et qui a montré une grande efficacité dans l'élimination de ces espèces métalliques ou organiques polluantes, utilisant des matériaux naturels comme adsorbants [23].

II.2 Définition [01] :

Les biosorbant sont des squelettes organiques, constitués pour la plupart de polysaccharides, de formule brute générale Cx (H_2O) y. Ces derniers désignent une grande variété de polymères, initialement appelés hydrates de carbone, dont les principaux sont, selon leur abondance dans la nature, la cellulose, les hémicelluloses, la lignine, les tanins, les pectines, etc. Les biosorbants sont disponibles généralement au niveau des exploitations agricoles et des installations industrielles, notamment les industries agroalimentaires, du bois et de la pèche.

Les principaux avantages de la biosorption, comparativement aux autres méthodes de traitement conventionnelles sont surtout son faible coût, son rendement élevé, la minimisation des boues chimiques et/ou biologiques, la régénération du biosorbant, aucune condition nutritive additionnelle, etc..

II.3 Principe de l'adsorption

Le principe de l'adsorption repose sur la propriété qu'ont les solides naturels (adsorbants) de fixer sur leur surface certains adsorbats.

Les interactions entre biosorbant ou adsorbant et adsorbat sont le plus souvent de nature électrostatique, donc faible et réversible. On parle alors de physisorption, par opposition à la chimi-sorption, phénomène généralement irréversible qui fixe par liaison covalente l'adsorbat à la biosorbant.

Le transfert des polluants est régi par trois phénomènes physico-chimiques : l'équilibre thermodynamique entre les deux phases qui exprime la limite du procédé, la cinétique de la biosorption et la compétition entre les différents adsorbats. Plusieurs facteurs vont donc influer sur ces phénomènes [24].

II.4 Différents types d'adsorption (biosorption) [25] :

II.4.1 L'adsorption physique (physisorption)

La physisorption ou adsorption physique est un processus caractérisé par des énergies relativement peu importantes (force de Van Der Waals) entre la matrice solide et le substrat. C'est aussi un processus réversible et aucune modification de la structure de la molécule adsorbée n'en résulte. Ce phénomène se produit ce à basses températures et pour des énergies de l'ordre de 10 Kcal/mole tout au plus. Cependant Matson et Mark préfèrent utiliser le terme d'adsorption non spécifique, due aux forces de Van Der Waals (attraction) et qui interviennent essentiellement entre la surface carbonée du support et le soluté.

II.4.2 L'adsorption chimique (chimisorption)

L'adsorption chimique ou chimisorption résulte de la formation d'une liaison chimique entre l'adsorbant et le substrat. Celle-ci peut être covalente ou ionique. Comparativement à l'adsorption physique, elle met en jeu des énergies d'adsorption plus élevées, qui sont de l'ordre de 100 Kcal/mole. Ce processus se produit à hautes températures, de plus, il est caractérisé par son irréversibilité.

II.5.Classification Des Isothermes D'adsorption :

Gilles et coll. (1974) ont proposé les modèles d'adsorption, dont quatre types particuliers sont maintenant considérés comme les quatre formes principales d'isotherme généralement observées, ces classes sont représentées sur la Figure 1.1 le type d'isotherme obtenu permet de tirer des conclusions qualitatives sur l'interaction, entre l'adsorbat et adsorbant, dont les plus importantes sont les suivantes [26] :

- La forme de l'isotherme ;
- L'existence de paliers sur l'isotherme ;
- Le type d'adsorption (mono ou poly moléculaire) ;
- L'orientation des molécules adsorbées.

II.5.1.Les Isotherme De Type C

Les courbes sont sous formes de ligne droite avec le zéro comme origine. Elle signifie que le rapport entre la concentration dans la solution aqueuse et adsorbée et la même à n'importe quelle concentration. Ce rapporte et appelé coefficient de distribution Kd (1.kg-1) [27].

Elles concernent les molécules flexibles pouvant pénétrer loin dans les pores.

II.5.2.Les Isotherme De Type L

Le modèle de Langmuir « standard », indique une adsorption à plat de molécules bi fonctionnelles le rapport entre la concentration dans la solution aqueuse et adsorbée diminue lorsque la concentration du soluté augmente, décrivant ainsi une courbe concave, cette courbe suggérant une saturation progressive de l'adsorbant [28].

II.5.3.Les Isotherme De Type H

C'est un cas particulier de l'isotherme de type L. Ce cas distingué des autres parce que le soluté montre parfois une affinité si élevée pour le solide que la pente initiale ne peut pas être distinguée de l'infini, même si cela n'a pas de sens du point de vue thermodynamique [28].

II.5.4. Les Isotherme De Type S

La courbe est sigmoïdal et elle présent un point d'inflexion. Ce type d'isotherme est toujours le résultat d'an moins d'un mécanisme opposé. Les composés organiques non polaires sont un cas typique ; ils sont une basse affinité avec les argiles, mais dès qu'une surface d'argile est couvert par ces composés, d'autres molécules organiques sont adsorbée plus facilement ce phénomène est appelé adsorption coopérative,[28]

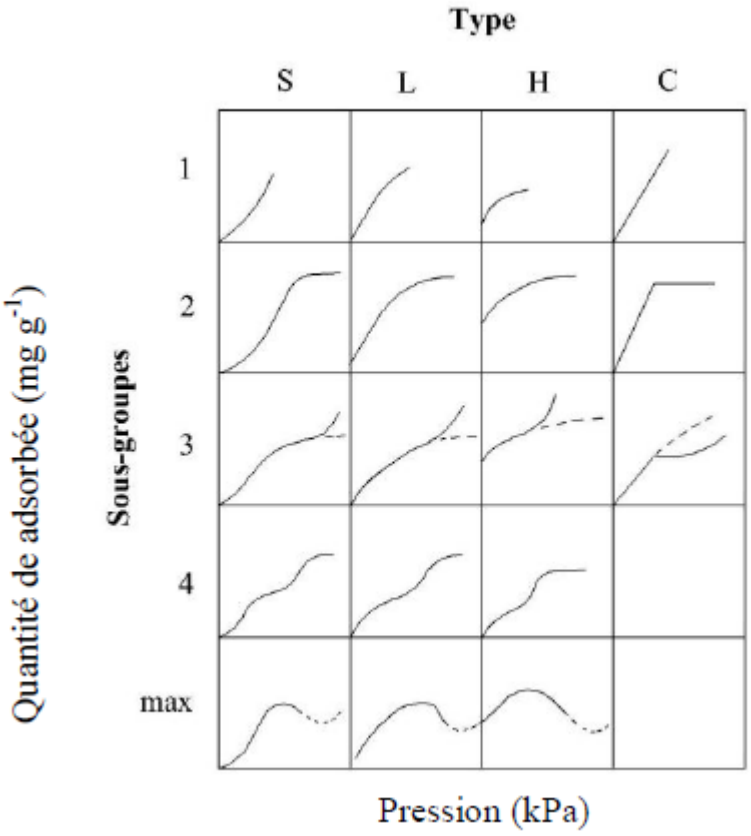


Figure II.1 : classes des isothermes d'après Gilles et al cités par [26].

II.6. Description du mécanisme d'adsorption, [28]

A chaque fois qu'un gaz ou un liquide est en contact avec un solide ; celui-ci est retenu par les atomes superficiels du solide et ce concentre à sa surface. Ce processus se déroule en trois étapes :

- Diffusion externe : elle correspond au transfert du soluté (molécules de la phase liquide) de sein de la solution à la surface externe des particules. le transfert de matière externe dépend des conditions hydrodynamiques de l'écoulement d'un fluide dans un lit d'adsorbant.
- Diffusion interne : les particules de fluide pénètrent à l'intérieur des pores. elle dépend du gradient de concentration du soluté.
- Diffusion de surface : elle correspond à la fixation des molécules sur la surface des pores.

Le mécanisme du transport d'un adsorbat au sein du solide est donné par la figure II.2,

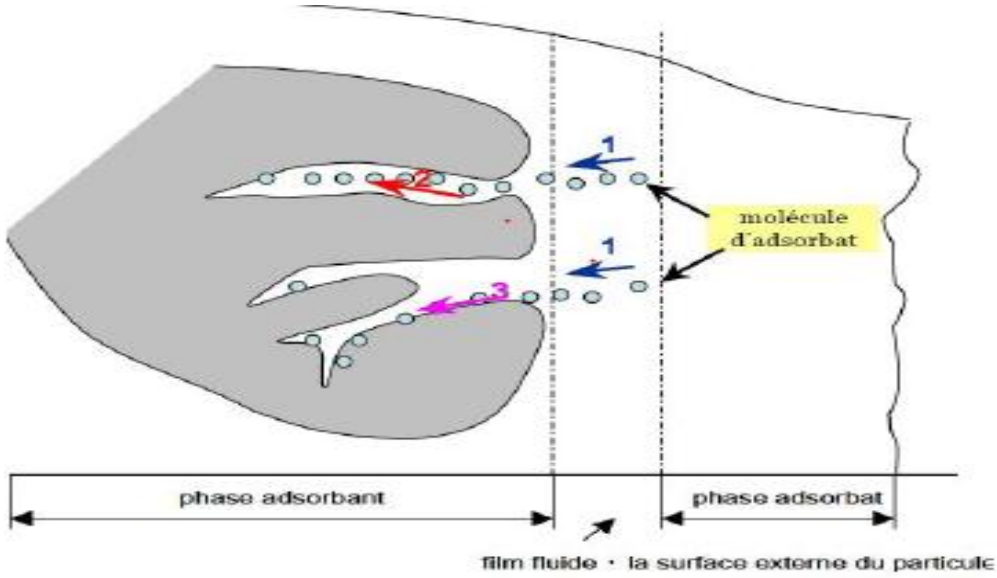


Figure II.2. Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain du solide:1– diffusion externe ; 2– diffusion interne (dans les pores) ; 3– diffusion de surface, [28].

II.7. Modélisation de l'équilibre d'adsorption, [29].

Plusieurs lois ont été proposées pour l'étude de l'adsorption. Elles expriment la relation entre la quantité adsorbée et la concentration en soluté dans un solvant à une température donnée. Nous rappellerons ci-dessous les principales lois utilisées.

II.7.1. Isotherme de Langmuir, [29].

C'est le modèle le plus utilisé pour commenter les résultats trouvés au cours de l'adsorption des composés organiques en solution aqueuse. Nous résumons ci-dessous ses principales caractéristiques.

L'**isotherme de Langmuir** décrit l'adsorption de molécules gazeuses sur une surface solide en fonction de la pression du gaz.

θ est le taux de recouvrement de la surface, P la pression du gaz et α une constante dite constante d'adsorption de Langmuir qui augmente avec l'énergie de liaison d'adsorption ou avec une diminution de la température.

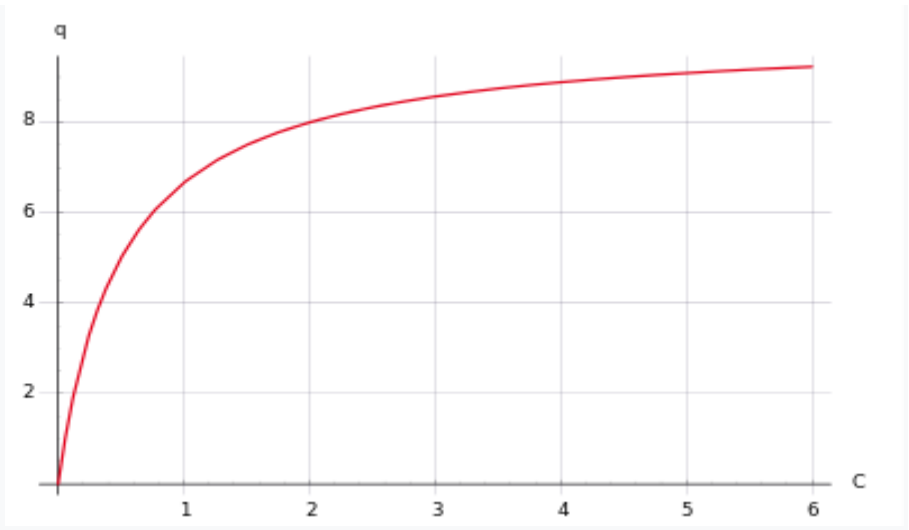


Figure1I.3 Isotherme d'adsorption selon Langmuir [29]

A une température constante, la quantité adsorbée *Q* est liée à la capacité maximale d'adsorption Qm, à la concentration à l'équilibre Ce du soluté et à la constante d'affinité *K* par l'équation

$$\frac{Q}{Qm} = \frac{KCe}{1+KCe} \quad \text{(II.1)}$$

La transformée linéaire de ce modèle a pour équation, [61]:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Qm} + \frac{1}{K \cdot Qm} * \frac{1}{Ce} \quad \text{(II.2)}$$

En portant ***1/Q***en fonction de ***1/Ce*** on obtient une droite de pente *1/K*m et d'ordonnée à l'origine $1/Q_m$, cela permet la détermination des deux paramètres d'équilibre de l'équation Q_m et K.

Parmi les caractéristiques de l'isotherme de Langmuir, on peut citer sa simplicité et le fait que les paramètres $Q_m$et *K* qu'il permet d'évaluer, ont un sens physique. La valeur de *K* est liée à la force d'interaction entre la molécule adsorbée et la surface du solide ; la valeur de Q_m exprime la quantité de soluté fixée par gramme de solide dont la surface est considérée comme totalement recouverte par une couche mono moléculaire. Cette simplicité est une conséquence des hypothèses restrictives qui permettent d'établir ce modèle, l'équivalence de tous les sites d'adsorption et la non-dépendance de l'énergie d'adsorption avec le taux de couverture de la surface. Ceci se traduit par l'absence des interactions entre des espèces adsorbées et adjacents sur la surface.

II.7.2. Isotherme de Freundlich [30] :

C'est une équation empirique largement utilisée pour la représentation pratique de l'équilibre d'adsorption. Elle ne repose sur aucune base théorique. Toutefois l'expérience montre qu'elle décrit bien les résultats d'adsorption des micropolluants par les solides tels que les charbons actifs, les sols et les argiles. **Figure 1I.4:**

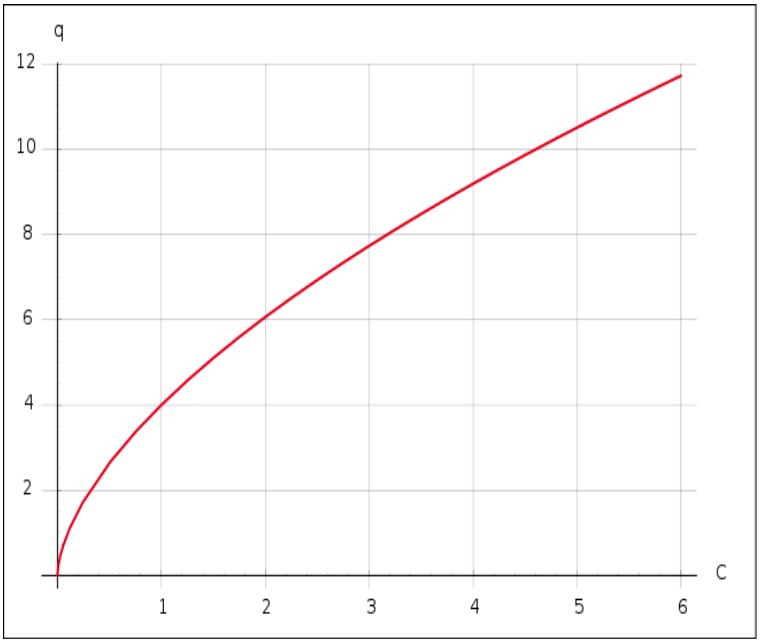


Figure II.4: Isotherme d'adsorption de Freundlich, avec la quantité adsorbée q (i.e. en mol/kg) en fonction de la concentration en équilibre c (en mol/L). Le calcul est fait avec K = 4 et 1/n= 0.6 [30]

Elle se présente sous la forme :

$$Q = KfCe^{1/nf} \qquad \text{(II.3)}$$

Q: Quantité adsorbée par gramme du solide·

Ce: Concentration de l'adsorbât à l'équilibre d'adsorption.

Kf et *1/nf*: constantes de Freundlich caractéristiques de l'efficacité d'un adsorbant donné vis-à-vis d'un soluté donné.

La transformée linéaire permettant de vérifier la validité de cette équation est obtenue par passage en échelle logarithmique :

$$LnQ = LnKf + 1/nf\ LnCe \qquad \text{(II.4)}$$

En traçant *Ln Q* en fonction de *Ln Ce***,** on obtient une droite de pente *1/nf* et d'ordonnée à l'origine *Ln Kf.*

II.7.3.Isotherme de B.E .T, [30].

L'isotherme de B.E.T est un modèle d 'adsorption en multicouches basé sur les hypothèses suivantes :

– Chaque couche adsorbée obéit à l'équation de Langmuir

- La chaleur d'adsorption à partir de la 2ème couche est égale à la chaleur de condensation de vapeur
- La chaleur d'adsorption de la première couche est différente de celle des couches suivantes.

Ce modèle est exprimé par l'équation suivante :

$$Q = Qm \,.\, A \,.\, \frac{Ce}{\left[(Cs - Ce)\left[1 + \frac{(A-1)Ce}{Cs}\right]\right]} \qquad \text{(II.5)}$$

Où :

Q : Quantité de soluté adsorbée (mg)

C_e : Concentration du soluté dans la phase liquide à l'équilibre (mg/l)

C_S : Concentration du soluté dans la phase liquide à la saturation de l'adsorbat (mg/l)

A : Constante liée à l'énergie d'interaction avec la surface

Q_m : Quantité ultime de soluté adsorbé (mg/l).

II.8. Facteurs influençant l'adsorption, [31].

L'équilibre d'adsorption entre un adsorbat, dépend de nombreux facteurs dont les principaux Sont décrits ci-après :

- **Température**

L'adsorption physique s'effectue à des basses températures (phénomène exothermique), alors que l'adsorption chimique demande des températures plus élevées (phénomène endothermique). Ce qui nécessite de fixer la température du processus dès le départ. En pratique, il n'y a pas de modification significative dans l'intervalle 5-20°C.

- **pH**

Le pH est un facteur important dans toute étude d'adsorption du fait qui 'il peut influencer à la fois la structure de l'adsorbant et de l'adsorbat ainsi que le mécanisme d'adsorption.

Ce facteur dépend de l'origine des eaux à traiter et du procédé de leurs traitements (coagulation, floculation, oxydation …). Donc, il est judicieux de connaitre l'efficacité de l'adsorption à différents pH. Selon, l'élimination optimale de la tyrosine sur charbon actif en grains et en poudre est observée à des pH acides inférieurs à 6.

- **Présence d'espèces compétitives**

En générale, la présence de la compétition diminue la capacité de chaque espèce sur l'adsorbant, ont étudié l'influence d'alcools aliphatiques sur l'adsorption d'acides aminés (phénylalanine et tyrosine) sur charbon actif en poudre. Cette étude a montré que les alcools ramifies provoquent l'inhibition de l'adsorption de ces acides aminés de l'ordre de 85%.

- **Surface spécifique**

L'adsorption lui est proportionnelle. La dépendance de la cinétique d'adsorption à la dimension de la surface externe des particules est fondamentale pour l'utilisation d'un adsorbant. Cette surface spécifique externe ne représente pourtant qu'une portion minime de la surface totale disponible à l'adsorption. Cette surface totale peut être augmentée par un broyage de la masse solide qui multiplie encore sa porosité totale.

Plus la surface spécifique est grande, plus on aura une meilleure adsorption, ceci a été montré dans l'étude d'adsorption de la tyrosine sur charbon actif.

- **Masse de l'adsorbant**

La capacité d'adsorption est d'autant plus grande que la masse de l'adsorbant dans la solution est importante. De fait du cout élevé des adsorbants, le choix d'un rapport liquide-solide optimal est recommandé.

II.9 La cinétique adsorption :

II.9.1 Introduction

Dans la littérature la sorption à l'interface liquide/solide, avec une réaction localisée dans des pores (adsorbants, échangeurs d'ions, catalyseurs, ...), est considérée comme comprenant cinétiquement trois étapes importantes ci-dessous, excluant e transport du soluté au sein de la solution est exclu, notamment quand le système est agité :

- La diffusion à travers le film entourant les particules solides d'adsorbant, appelée encore diffusion externe ;
- La diffusion dans les pores de l'adsorbant, dite diffusion intra-particulaire ;
- La réaction d'adsorption (et de désorption) dite réaction de surface.

Une (ou plusieurs) de ces étapes peut être cinétiquement déterminante (ou limitante). La réaction de surface étant également une étape rapide, certains auteurs [32] ont considéré que seules les diffusions de film externe et in tr particulaire gouvernent la cinétique d'adsorption. La désorption présente les mêmes étapes dans l'ordre inverse, quand elle a lieu significativement (K_L faible, n >1).

II.9.2. Approche théorique de la cinétique globale

II.9.2.a Réaction globale

Comme déjà mentionné précédemment, la réaction de sorption d'un soluté (ou adsorbat) en solution sur un adsorbant (ou solide) pour conduire à des complexes de surface entre le soluté et le solide. Globalement, l'expression cinétique de cette réaction de sorption doit s'appuyer, comme pour tout équilibre chimique, sur la combinaison des expressions d'une réaction spontanée d'adsorption proprement dite (constante de vitesse k_{ads} ou k_1) et de sa réaction inverse de désorption (k_{des} ou k_{-1}), les deux constantes de vitesse étant reliées par la constante d'équilibre K^0 [01].

II.9.2.b Les modèles cinétiques d'adsorption

La cinétique du phénomène d'adsorption est déterminée par le transfert de matière à l'interface liquide - solide où sont localisées toutes les résistances au transfert. L'équation fondamentale est celle qui régit les phénomènes de transfert de matière en général entre deux phases, en exprimant le flux d'adsorption proportionnellement à l'écart entre la quantité adsorbée *q* à l'instant *t*et la quantité adsorbée à l'équilibre q_e.

Il existe plusieurs modèles cinétiques pour étudier le mécanisme d'adsorption où les plus courants sont comme suit :

-Modèle du cinétique pseudo premier ordre (modèle Lagergren)

Lagergren (1898) a proposé un modèle cinétique de pseudo premier ordre exprimé par la relation suivante :

$$\frac{dqt}{dt}=k_2(q_e- q_t) \qquad \text{(II.6)}$$

Avec k_1 la constante de vitesse pour une cinétique du pseudo premier ordre [min^{-1}], q_t et q_e les capacités d'adsorption à l'instant t [mg d'adsorbat /g d'adsorbant] et à l'équilibre [mg d'adsorbat / g d'adsorbant], respectivement.

$$(\frac{qm}{qe})^{1/n}=\frac{1}{Kl*Ce}+1 \qquad \text{(II.7)}$$

L'intégration de l'équation donne :

$$\ln(qe - qt) = \ln qe - k^2 t \qquad \text{(II.8)}$$

-Modèle du cinétique pseudo deuxième ordre

Une expression également très souvent utilisée est celle du pseudo-deuxième ordre [34]. Ce modèle suggère l'existence d'une chimisorption, un échange d'électrons par exemple entre molécule d'adsorbat et l'adsorbant solide. Il est représenté par la formule suivante :

$$\frac{dqt}{dt} = k^2 (q_e - qt) \quad \text{(II.9)}$$

La constante de vitesse pour une cinétique du deuxième ordre [g.mg-1.min-1], qt et qe les capacités d'adsorption à l'instant t [mg d'adsorbat /g d'adsorbant)] et à l'équilibre [mg d'adsorbat / g d'adsorbant], respectivement.

L'intégration de l'équation (II.9) donne :

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k_2 q_e^{\,2}} + \frac{1}{q_e}\, t \quad \text{(II.10)}$$

- Modèle de la diffusion intra particulaire

Généralement il existe quatre étapes dans le processus d'adsorption par les solides poreux, comme il est déjà mentionné et qui sont les suivantes :

1- le transfert du soluté de la solution vers la couche limite entourant la particule ;

2- Le transfert du soluté de la couche limite vers la surface adsorbant ;

3- Le transfert du soluté vers les sites adsorbants : diffusion dans les micros et macros pores ;

4- Interactions entre les molécules du soluté et les sites actifs de la surface : adsorption, complexation et précipitation.

Les nombreux articles faisant référence à cette approche cinétique de diffusion intra-particulaire s'appuient généralement sur des travaux de Weber et Morris (1963) portant sur l'adsorption de composés aromatiques simples sur charbon actif, où ils ont montré que la concentration en adsorbat (C_t) est une fonction linéaire de la racine carrée du temps de contact($t^{1/2}$), dont la pente est assimilée à la constante de vitesse (k_{int}) [33].

Le modèle de diffusion intra- particulaire est représenté par l'équation suivante :

$$qt = k_{id} * t^{1/2} + C \quad \text{(II.11)}$$

Avec k_{id} la constante de la diffusion intra- particulaire en (mg/g $min^{1/2}$), elle est déduite de la pente de la partie linéaire de l'équation représentant ce modèle.

Et avec C est constante.

II.10. Revue bibliographique sur la biosorption des colorants :

Depuis bien longtemps, le charbon actif est l'adsorbant privilégié pour le traitement des eaux et bien d'autres applications. Son efficacité dans l'élimination de gaz polluants, de composés organiques et inorganiques toxiques
, justifie sa pérennité et sa dominance jusqu'à nos jours.
Cependant ce matériau fabriqué à l'échelle industriel possède des inconvénients liés à sa saturation en polluants, et sa régénération est couteuse. Actuellement beaucoup de travaux scientifiques et de praticiens industriels s'orientent vers la voie du développement durable en utilisant de matériaux nouveaux moins coûteux, issus pour la majorité d'entre eux de la nature. Dans les paragraphes suivants, il sera mis en relief certains de ces adsorbants naturels [34].

La Poudre de feuille de goyave / BM : Résultats et points marquants (La poudre de feuille de goyave a été utilisée pour l'adsorption de BM de l'eau.

L'adsorption s'est avérée excellente ; le taux de réduction était de 88.7% à pH 8 [35].

La peau des fruits jaune de passion/BM : Résultats et points marquants (Dans cette étude l'auteur a étudié l'élimination du BM des systèmes aquatiques sur un déchet solide en poudre qui est la peau des fruits de passion jaune.

Sous certaines conditions expérimentales : pH 7-10, temps de contact de 50 h ; l'adsorption maximale était 0.0068 mmol/g pH 9 à 25 °C après 50h d'agitation. [36]

Coquille de noisettes et sciure de bois/ BM : Résultats et points marquants (L'auteur a fait une comparaison de l'adsorption du BM sur les deux matériaux.

Il a montré que la capacité d'adsorption était plus importante (76.9 mg g−1) pour les coquilles de noisettes qui pourrait être utilisé comme une adsorbent à faible cout pour l'élimination des colorants de l'eau [35]

La peau de jacquier / BM : Résultats et points marquants (La peau de jacquier est un déchet solide très abondant en Malaisie. Dans cette étude, Il a été utilisé dans l'adsorption du BM

.Les résultats ont montré une meilleure adsorption (285.713 mg/g) à pH 4, un temps de contact optimal de 3h. [05]

Coquille de pomme de pin brésilienne / BM : Résultats et points marquants (L'auteur a travaillé avec des coquilles de pomme de pin à l'état naturel et carbonisé pour l'adsorption de BM. L'adsorption était de (252mg/g) pour les coquilles à l'état brut sous les conditions : pH 8.5, un temps de contact de 6 et 4 h à 25°C [37]

Les rejets de thé / BM : Résultats et points marquants (L'adsorption du BM sur un adsorbant bon marché «les rejets de thé» a été étudiée dans des conditions opératoires bien définies :

Concentrations (50-500 mg/L), pH 3-12 et la température de 30-50 °C. Les résultats ont montré une meilleure adsorption (37 mg/g) à pH acide 3 – 4[38].

Feuille de lotus / BM : Résultats et points marquants (L'adsorption du BM sur la feuille de lotus a montré que sous certaines conditions : temps de contact de 180 min, une masse de 1g et à pH acide, la capacité d'adsorption du BM était de : 221.7mg/g [39]

Poussière de fibre de noix de coco (Cocos nucifera L) / BM : Résultats et points marquants (L'adsorption du BM sur un déchet agricole : la poussière de fibre de noix de coco a été étudiée en fonction de la quantité d'adsorbant, pH, concentration initiale et le temps de contact. Les résultats ont montré qu'avec un temps optimum de 20 min, et une masse de

0.20 g.de matériau, la capacité d'adsorption du BM est de 99.5% [40].

Pulpe de betterave/ BM : Résultats et points marquants (La pulpe de betterave est un adsorbent connu, toutefois son utilisation pour l'élimination de colorants n'a pas été rapportée dans la littérature. Les expériences de cette étude d'adsorption du BM sur ce matériau ont montrées que l'adsorption est maximale (714.29 mg/g) à pH=2[41]

II.11. Conclusion

D'après toute cette revue et sur les aspects théoriques rapportés dans ce chapitre, il peut être conclu que l'adsorption solide- liquide reste l'une des principales techniques de dépollution des eaux contaminées par certains polluants solubles. Cette caractéristique a encore été renforcée par les nombreux résultats rapportés dans la littérature,
particulièrement durant les trois dernières décennies, et qui ont mis en évidence le potentiel de plusieurs types de matériaux naturels et de supports biologiques d'origine agricole, industrielle ou aquatique, à être utilisés comme adsorbants et aussi être des substituts aux charbons actifs dont le coût est un facteur limitant.

CHAPITRE III:

Les adsorbants

III.1.Introduction :

Les premiers « adsorbants » utilisés, il y a plusieurs siècles, furent les argiles et les terres décolorants, puis à la fin du XIX^{e} siècle furent développés les charbons actifs.

La première guerre mondiale vit apparaitre les gels de silice, puis dans les années 1939-1940 les alumines activées .En 1945 sont reconnus les propriétés d'adsorption exceptionnelle des zéolithes naturelles, en 1950 les premiers zéolithes synthétiques ouvrent la voie au fantastique développement des tamis moléculaires comme catalyseurs et adsorbant [40].

III.2.Matériaux adsorbants :

Tous les solides agissant comme adsorbants sont caractérisé par la structure microporeuse qui leur confère une très grande surface active par unité de masse. Les adsorbants utilisés dans la pratique sont, soit de nature organique (végétale ou animale), soit de nature minérale [41].Les adsorbants les plus utilisés dans les applications industriels sont les suivants :

- **Charbon actif :**

Disponible en poudre ou en grains, le charbon actif est obtenu par traitement spécial (pyrolyse) de charbons naturels (anthracite, tourbe) ou artificiels (bois de noix de coco carbonisé).

Après traitement, le charbon actif dispose d'une surface spécifique de l'ordre de 500à1000m^2/g avec des pores de 10 à 60 °A, une faible densité apparente (0.5 Kg/l) et surtout deux propriétés principales : un pouvoir adsorbant et un pouvoir catalyseur [41].

- **Les zéolithes :**

Les zéolithes sont des aluminosilicates cristallisés microporeux de formule globale (AlO_2M, $nSiO_2$) où M représente le plus souvent un métal alcalin ou alcalino-terreux et n≥ 1.

Il existe plus de 100 espèces de zéolithes, différant par la valeur de n et la structure cristallographique .La présence de cations dans les micropores génère des champs électriques de l'ordre de 10^{10} V.m^{-1}, ce qui fait de ces corps de puissants adsorbants polaires [06].

- **Gel de silice :**

Le gel de silice se présente sous la forme de grains durs et poreux avec une surface spécifique de 600 à800 m^2, dont la taille des pores varie de 20 à 50 ° A.

Il s'obtient par action de l'acide chlorhydrique sur une solution de silicate de sodium [42].

- **Alumine activée :**

L'alumine activée dispose d'une surface de 200 à 500 m^2 avec des pores de 20 à140 ºA. Elle résulte du traitement thermique de l'oxyde d'aluminium précipite ou de la bauxite.

L'alumine est utilisée dans le séchage des gaz et liquides [42].

- **Argiles activées :**

Les argiles activées sont des aluminosilicates de formule brute proche des zéolithes, mais de structure cristalline différente. Ce sont des produits naturels, utilisés surtout pour le séchage [43].

- **Tamis moléculaires :**

Du groupe des aluminosilicates cristallins, les tamis moléculaires appartiennent à la famille de minéraux connue sous le nom de Zéolithes.

Leur structure cristalline consiste essentiellement en un squelette tridimensionnel de tétraèdres de SiO_4 et d'AlO_4 , relié entre eux par la mise en commun d'atomes d'oxygène.

Les tamis moléculaires permettent la séparation des molécules d'un mélange d'après leur taille et leur forme.

II.2.1. Déchets de fruits et agricoles [44] :

Beaucoup de travaux sont déjà effectués avec comme adsorbants : les noyaux d'olives, des coquilles d'amande, d'abricot et de pêche etc. Pour l'élimination de l'eau de colorants et bien d'autres composés organiques et inorganiques toxiques. Par exemple ont étudiés les fruits de palme pour l'élimination de colorant basique (BR18). La coquille de noix de coco a été employée aussi avec succès pour l'élimination de colorants textiles à savoir le: Remazol bleu R160 (BR 160), Ruby S2G (R S2G) et le Remazol rouge 5R (RR5).ont étudié l'élimination d'un colorant textile (remazol noir B) de l'eau par Araucaria angustifolia , une coquille de fruit de pin d'origine brésilienne.

Quant à Benaissa en 2012, il a travaillé sur l'adsorption de colorants sur la peau de grenade et d'orange. Les cosses ou les coques de riz sont des déchets agricoles très abondants, utilisés pour la production d'adsorbants économique.

Nawar en 1989, ont travaillé sur les capacités d'adsorption de quelques colorants textiles sur des coques de riz .La feuille de lotus a été utilisée pour l'élimination du bleu de méthylène. Orhan en

1993, ont étudié les capacités d'adsorption, de coquille d'écrou et de noix, déchets de thé et café et ont effectué une comparaison avec le charbon actif, ils ont montré que les capacités d'adsorption des produits contenant du tannin étaient légèrement inférieures à celles du charbon actif. McKay en 1999, ont étudié l'adsorption de colorants cationique (bleu de safranine et bleu de méthylène) avec du coton, cheveux et charbon de riz.

En fin, Zhou en 2010, ont étudié l'élimination de colorant (rouge neutre) de l'eau en utilisant la coque de graine de coton qui est un déchet agricole très répandu en chine. Quelques autres sous-produits agricoles riches en tannin ont été examinés comme adsorbants à faible cout.

III.2.2.Déchets industriels [44] :

Il existe une multitude d'utilisation des déchets industriels et à chaque type d'industrie et de production on retrouve une infinité d'application possible. Par exemple, les pneus représentent un grand intérêt vu le risque élevé d'incendies, et leur combustion incontrôlée qui peut mener à un très grand volume d'huiles, d'hydrocarbures poly aromatiques (PAH) et phénol dans l'atmosphère. Lucchesi et Maschio, 1983, ont utilisé le caoutchouc dépouillé de pneus pour la fabrication de charbon. Récemment plusieurs travaux Gupta en 2011, ont été menés sur l'adsorption de divers colorants et phénols sur du charbon dérivé des caoutchoucs de pneu. Dans l'industrie avicole, Banat et Al-Asheh, 2000ont exploré l'utilisation de plumes de poulet en tant que biosorbant pour l'élimination du phénol de l'eau. Les boues de traitement peuvent être réutilisées à des fins de nouveaux traitements ; par exemple la boue produite lors de la combustion de carburant liquide dans les usines d'engrais a été convertie en charbon peu couteux par Srivastava. De même que labouerouge qui est un déchet formé pendant la production d'alumine, elle peut avoir sa propre utilité malgré sa toxicité spécifique. Une usine de fabrication produit de grande quantité de boue rouge 1-2 tonnes par tonne d'alumine .Lopez et Soto en 1998, ont évalué la faisabilité de l'utilisation de la boue rouge pour le traitement des eaux résiduaire. Récemment Bhatnagaren 2011 ont étudié l'efficacité de l'élimination de polluants sur la boue rouge, ils concluent que c'est un bon adsorbant pour différents types de colorants. Pour les industries du sucre, elles produisent un grande charge de polluante en termes de matières en suspension, matière organique, boue, cendre volante de résidu de canne à sucre. Ces cendres volantes de bagasse ont été employées comme adsorbant pour l'élimination de divers polluants de l'eau.

Les cendres volantes sont un résidu inorganique avec une composition chimique comme suit : 40-50% (w/w) slice SiO_2, 20-35 % (w/w) alumine Al_2O_3, 5-12 % (w/w) oxyde de fer FeO_3et ils

contiennent également 12-30% (w/w) de carbone et résidu non brulé. McKay et al, 1997, a étudié l'adsorption de deux colorants acides (Rouge acide 114 et bleu acide 25) sur la moelle de bagasse, qui est un déchet significatif de l'industrie de sucre de canne. Srivastava en 1995a travaillé sur l'adsorption de phénols. Gupta en 2000et Gupta et Ali, 2001ont réussi à éliminer avec succès sur ces cendres volantes de bagasse, des colorants basiques Rhodamine B et Bleu de méthylène des eaux usées.

III.2.3.Déchets d'algues et de fruits de mer [44] :

Certaines algues comme les algues brunes présentent des propriétés d'échange ionique significatif et cela est lié à leur contenu en polysaccharide. Gupta en 2001aemployé des bactéries Aeromonas formicans pour l'élimination de la DCO des eaux usées de l'usine de fabrication de pâte à papier. Rathinam en 2011aétudié la biomasse d'algue comme précurseur d'activation du charbon. Des algues vertes ont été aussi employées dans l'élimination de Bleu de méthylène. Un autre matériau (déchet) examiné pour sa nature adsorbant est la chitine, qui semble être plus économique en tant qu'adsorbant à cause de son abondance dans la nature.

III.3.Facteurs généraux de caractérisation :

Les adsorbants sont caractérisés par leurs propriétés physico-chimiques mécaniques et géométriques.

La surface du solide de l'adsorbant ou tout au moins la surface réellement accessible aux solutés doit être maximale, c'est pourquoi on utilise comme adsorbant des produits à grande surface spécifique soit naturelle comme les gels de silice soit synthétisée comme le charbon actif [45].

III.4.Caractérisation des adsorbants :

Un adsorbant se caractérise par des propriétés physiques et chimiques intrinsèques présentées ici de manière non exhaustive.

III.4.1.Propriétés chimiques [46] :

- Affinités polaires (hydrophile, hydrophobe).
- Teneur en eaux.
- Teneur en composés solubles.
- Taux de cendres.
- Tenue en gaz vecteurs.
- Propriétés catalytique

III.4.2.Propriétés physiques [47] :

- Forme (poudres, granulés…).

- Dimensions.
- Surface spécifique.
- Distribution des diamètres de pores.
- Volume poreux.
- Densité (apparente .réelle…).
- Tenue mécanique.

III.5. L'aubergine (Solanum melongena L.) [48] **:**

L'aubergine (Solanum melongena L.), fait partie de la famille des solanacées. Elle est un produit végétal tropical et le septième légume le plus consommé au monde (FAO, 1989) qui occupe une place économique importante en Asie, en Afrique et dans les régions subtropicales, mais elle est aussi cultivée dans certaines régions tempérées comme la zone méditerranéenne et le sud des États-Unis. Plus faible que celle de la tomate, sa valeur nutritionnelle est cependant comparable à celles des autres légumes. Selon l'Annuaire de la production FAO 1994, les zones de production mondialed'aubergineétaient556 000 hectares et la production totale, était de 8979.000tonnesmétriques. L'Asie a la plus grande production de l'aubergine, qui constitue plus de 90% de la zone de production mondiale et 87% de la production mondiale. (Les données ne comprennent pas l'Inde et le Bangladesh). Gill et Tomar(1991) signale299770ha de zone de production d'aubergine en Inde, et 29 150 ha au Bangladesh en 1992-93, ce qui porte le total de prèsde830 000had'Asie. L'aubergine peut être cultivée dans presque toutes les parties de l'Inde toute l'année, sauf dans les altitudes plus élevées.

III.5.1.La famille des Solanacées :

La famille des solanacées est l'une des grandes familles du monde végétal, du fait du grand nombre d'espèces qu'elle comporte (de l'ordre de 2300) et de nombreux usages que l'homme en fait (alimentaire, condimentaire, médicinal, pharmaceutique, narcotique, magique et ornemental) [48].

III.5.1.1.L'espèce Solanum melongena L :

III.5.1.1.a.Description botanique de l'espèce [48] **:**

Herbe annuelle dressée, ramifiée, ou sous-arbrisseau pérenne, de courte longévité, atteignant 1-1.50 m de hauteur, à longue racine pivotante ; Tiges et rameaux à pubescence de poils étoilés à 8-10 bras.

Les feuilles sont grandes, simples, lobées alternative sur les tiges ; pétiole de 6-10 cm de long ; à limbe ovale à oblong, aigu à obtus au sommet, tronqué à obtus ou oblique à la base, 5-20*4-

15cm, à pubescence dense sur la face inférieure, formée d'un indument de poils étoilés, grisâtre ou gris violet.

Inflorescence : Les fleurs sont grandes, de couleur violette ou blanche, souvent solitaires, mais elles sont trouvées en grappes de deux ou plus.

Calice campanulé, à tube long de 5 mm, profondément 5-lobé, les lobes longs de 1-1.5 cm, accrescent, tomenteux à l'extérieur et portant quelques aiguillons souples, corolle rotacée-pentagonale, de 2-4 cm de diamètre, bleu ou blanche, à toment Um pourpre ou violet pâle sur la face externe, formé de poils étoilés : lobes triangulaires-ovales. Les tiges, les feuilles et le calice de certains cultivars sont épines.

Le fruit (Solanum melongena L)est un pendentif, baie charnue de forme variable, su globuleuse à ovoïde, oblongue, obovoï des, ou à long cylindrique; ou allongée, ou piriforme, de 2-35cm de long (parfois plus longue),de 2-20 cm de large, aspect plus ou moins lisse et luisant, couleur (au stade commercial) blanche, verte ou à nuances de violet pâle à foncé et à noir, parfois réticulée ou zébrée, jaune à brune à maturité, lustrée, généralement pourpre noire, contenant de nombreuses graines. Graines lenticulaires à sub-réniformes, aplaties, de 3mm* 4mm, petites et brunes pâles.

III.5.1.1.b Place dans la systhématique [49] :

Suivant la classification de Cronquist (1988), nous avons la systématique suivante :



Figure III.1 : Fruits d'aubergine.

Règne : Plantae.

Sous-règne:Tracheobionta.

Classe : *Magnoliopsida.*

Sous-classe : *Asteridae*

Ordre : *Solanales*

Famille :*Solanaceae*

Genre : *Solanum*

Espèces :*Solanum melongena L.*

Nom commun:*aubergine*.

III.5.2.Composition chimique :

L'aubergine est caractérisée par une teneur très élevée en eau et riche en fibres (notamment des matériels pectiques) avec seulement des quantités très faibles en vitamines et minéraux. Le Tableau III.1. Représente les différents constituants de l'aubergine.

Tableau III.1 : Composition chimique de l'aubergine pour 100g de produit cru [50].

Composant	**Valeur certifiée**	**Composant**	**Valeur certifiée**
Energie	82 K calorie	**Vitamines**	
Eau	92-94	Vitamines E	30µg
Protéines totales	0.8-1.3g	VitaminesB1, thiamine	50µg
Glucides totaux	2-2.8g	Vitamines B2, riboflavine	30µg
Fructose	1-1.4g	Niacine	8mg
Glucose	1-1.4g	Tryptophane	6mg
Fibres	2.4-4.2g	Vitamine B6	0.08mg
Lipides totaux	0.1g	Acide Pantothénique	0.22mg
AG saturés	44mg	Vitamines C	0.5mg
AG mono-insaturés	16mg	**Cendres**	0.5-0.6g
AG poly-insaturés	89mg		
	Minéraux		
Sodium, Na	3-7mg	Fer, Fe	0.4mg
Potassium, K	240mg	Cuivre, Cu	0.08mg
Calcium, Ca	8-10mg	Zinc, Zn	0.15mg
Magnésium, Mg	10-13mg	Iode, I	0.15mg
Chlore, Cl	50-55mg	Manganèse, Mn	0.14mg
Phosphore, P	21mg	Chrome, Cr	0.7µg
Nickel, Ni	1µg	Sélénium, Se	0.2µg

III.5.3 Principales caractéristiques :

En ce qui concerne son apport énergétique, l'aubergine se situe parmi les légumes frais les moins calorifiques : elle apporte en effet environ 18 kilocalories (75 kilo Joules) aux 100 g, ce qui la place au niveau de la tomate, de l'endive ou de la laitue. Elle est riche en eau (plus de 92 % en moyenne), et sa teneur en éléments énergétiques reste limitée.

Elle renferme ainsi 3 à 4 g de glucides aux 100 g et moins de 1 g de protides, c'est à dire plutôt un peu moins que dans les autres végétaux frais. Les lipides, ou substances grasses, n'apparaissent qu'à l'état de traces.

La teneur en glucides de l'aubergine dépend de la variété, mais aussi du degré de maturité : les aubergines cueillies trop précocement sont pauvres en glucides, ce qui est défavorable pour la qualité gustative.

Les fibres de l'aubergine sont assez abondantes : 2,5 g aux 100 g. Elles sont composées en majeure partie par des proto pectines, et en moindre quantité par des pectines et des celluloses. Lors de la cuisson, les protopectines, comme les pectines, acquièrent une consistance moelleuse et tendre.

Parmi les substances minérales (qui atteignent au total 0,5 g aux 100 g), le potassium domine (260 mg aux 100 g), tandis que le sodium ne dépasse pas 3 mg : cela confère à l'aubergine des qualités diurétiques indéniables. Du fait de son apport énergétique peu élevé, l'aubergine présente une bonne densité minérale (teneur en minéraux aux 100 kilocalories) : c'est notamment le cas pour le magnésium (72 mg/100 kcal), le zinc (0,6 mg/100 kcal), le manganèse (0,8 mg/100 k Les vitamines sont bien diversifiées : vitamines du groupe B, vitamine E (tocophérols végétaux), provitamine A en petites quantités et bien sûr vitamine C (à des taux variantes entre 2 et 8 mg aux 100 g, en fonction des variétés et des saisons).

D'autres composants sont également présents en petites quantités dans l'aubergine. C'est le cas des acides organiques ; des tannins galliques, plus ou moins abondants selon les variétés, qui sont en grande partie responsables d'une certaine astringence, et d'un brunissement de la pulpe à l'air.

Et enfin, comme tous les végétaux appartenant aux solanacées, l'aubergine renferme des stéroïdes naturels à l'état de traces. Ces substances, encore difficiles à extraire et à identifier, ont une odeur caractéristique, et une saveur plutôt amère. Elles se concentrent surtout dans les parties vertes des aubergines, dans les feuilles et dans les racines de la plante [48].

L'aubergine contient des saponines stéroïdes, en particulier des glycoalcaloïdes ; les principaux glycoalcaloïdes de l'aubergine sont la solasonine et la solamargine. Elle contient également des saponines sans noyau azoté, que l'on nomme mélongosides. L'amertume de l'aubergine est due à ces substances et dépond de leur concentration ; lorsqu'elles sont présentes en fortes concentrations, largement au-dessus du seuil d'appétence, elles sont toxiques [51].

III.5.4.Caractéristiques nutritionnelles et usage :

L'aubergine est riche en potassium(260mg pour 10g) (équilibre acido-basique, essentiel à la contraction musculaire et à l'influx nerveux, participe au bon fonctionnement des reins) en manganèse (facilite les métabolismes et lutte contre les effets des radicaux libres), en cuivre(intervient dans la formation de l'hémoglobine et du collagène, aide à lutter contre les radicaux libres), en vitamine B1,en vitamine B6(favorise la dégradation du glycogène en glucose, intervient dans la production des globules rouges et collabore au bon fonctionnement du système immunitaire). Elle est riche en fibres avec un apport de 2,5g pour 100g ce qui facilite le transit intestinal [54]. Selon des chercheurs, l'aubergine (les fruits et les feuilles) renferme des substances fibres particulières, ayant la propriété de maintenir le cholestérol dans la lumière de l'intestin. Cela permettrait au cholestérol d'être expulsé sans être réabsorbé par la muqueuse, puis entraîné dans la circulation sanguine. Cet effet est bénéfique pour la réduction du taux de cholestérol dans le sang [48].

Différentes parties de la plante sont utilisées en décoction, sous forme de poudre ou de cendres pour soigner des maladies tels que le diabète, le choléra, la bronchite, la dysurie, la dysenterie, l'otite, les maux de dents, les infections de la peau, l'asthénie et les hémorroïdes. On prête également à l'aubergine des propriétés narcotiques, anti-asthmatiques et antirhumatiques
[51]. Elles ont été utilisées dans la médecine traditionnelle. Par exemple, les extraits des tissus végétaux ont été utilisés pour le traitement de l'asthme, des bronchites et du choléra. D'autres études effectuées ont montré que les extraits de l'aubergine éliminent le développement des vaisseaux sanguins responsables de la croissance des tumeurs et de métastase [50]. Ainsi, l'aubergine blanche est bonne pour les patients diabétiques. Il a aussi été recommandé comme un excellent remède pour ceux qui souffrent de troubles hépatiques [53].

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, l'importance de certains adsorbants dans le traitement des effluents, aussi, quelques caractéristique et méthodes de régénération. L'aubergine est classée parmi les dix premiers légumes en termes de capacité d'adsorption [51], et pour cette raison on a utilisé l'aubergine comme adsorbant.

CHAPITRE IV :

Partie Expérimentale

IV.1 Introduction :

Dans cette partie, il sera exposé toutes les méthodologies analytiques avec le matériel nécessaire à leurs applications. Les méthodologies concernent le matériau étudié ou l'aubergine, les colorants : le BM et le NET testés, ainsi que les essais d'adsorption de ces colorants sur l'aubergine.

Pour le matériau, il sera désigné son échantillonnage, ainsi que sa préparation à l'analyse. Une caractérisation de texture sera suivie pour en déduire les propriétés absorptives de ce matériau.

Pour les colorants BM et NET, les propriétés physico-chimiques ainsi la méthodologie d'analyse de spectrométrie dans le visible est décrite, il sera détaillé le protocole d'analyse suivi pour les essais d'adsorption des colorants sur l'aubergine.

Enfin, une interprétation des résultats est faite.

IV.2. Matériels et Méthodes :

IV.2.1 la préparation d'aubergine [01] :

Des quantités de matériau ont été préparées en vue de la réalisation des essais de caractérisation et d'adsorption dans le cadre de ce travail. La préparation d'aubergines comporte trois étapes physiques qui sont : le séchage, le broyage, et finalement le tamisage.

- **Le séchage**

Le séchage de matériau a été réalisé au moyen une étuve, entre 40 et 50°C en vue de prévenir une éventuelle altération des propriétés physicochimiques de matériau.



Figure IV.1 : séchage d'aubergine.

- **Le Broyage**

Le broyage a été réalisé afin d'obtenir de matériau homogènes pour le besoin des études de laboratoire, donnant des grains de petite taille, généralement inférieure à0. 2mm. La figure IV.2 représente des échantillons broyés à l'aide du broyeur.



FigureIV.2 : broyage d'aubergine.

- **Tamisage**

Les tailles de particules utilisées pour les essais d'adsorption ont été isolées mécaniquement au moyen d'un tamiseur dont la dimension des mailles correspond à un diamètre inférieur ou égal à 0.2mm. Seuls les grains représentant la masse de matériau qui passe par les mailles de tamis de 0.2mm ont été considérés pour les essais d'adsorption.

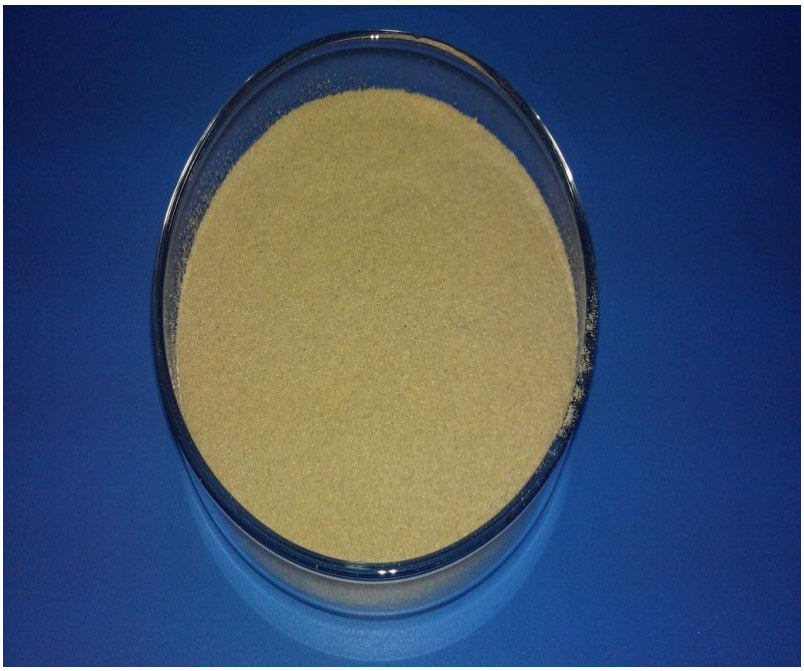


Figure IV.3 :L'aubergine tamisé.

IV.2.2 La caractérisation d'aubergine :

- **Matières sèches et humidité** [02]

La teneur en matière sèche et le taux d'humidité renseignent sur la masse réelle de matériau mise en contact avec les effluents. Ces paramètres ont été déterminés par pesée différentielle d'une quantité connue de matériau (m_0=5g), avant et après dessiccation à 105°C pendant 06 heures (m_1).

$$H=\frac{m_0-m_1}{m_1} \qquad \text{(IV.1)}$$

- **Le pH et conductivité** [44]

Le pH est mesuré avec un pH-mètre dans le filtrat de 5 g d'aubergine mis au contact avec 50ml d'eau distillée avec agitation de16heures. La conductivité est réalisée sur un conductimètre sur le même filtrat que le pH.



Figure IV.4 : pH-mètre



Figure IV.5 : conductimètre

- **La masse spécifique réelle [01]**

Pour déterminer la masse spécifique réelle d'aubergine, on utilise un pycnomètre est tarré à vide, il est ensuite pesé, contenant une certaine quantité d'aubergine, puis tarré de nouveau après avoir été rempli de méthanol.

D'autre part le pycnomètre est rempli de méthanole.il est ensuite pesé.

La connaissance de la tare et de la masse de méthanol nous permet d'accéder à la masse d'aubergine.

La masse spécifique réelle en est alors déduite.

- m : masse du produit à analyser en (0.137g).
- m_1 : masse de méthanol ajouté à l'échantillon m pour de remplir le pycnomètre (39.837g).
- m_2 : masse de méthanol permettant de remplir le pycnomètre (40.053g)

La masse spécifique réelle est donné par :

$$\rho_{réelle}=\frac{m.\rho}{m^2-m_1} \qquad \text{(IV.2)}$$



Figure IV.6.1 : pycnomètre



Figure IV.6.2 : un pycnomètre est tarré à vide



Figure IV.6.3 : un pycnomètre rempli de méthanol

- **La masse spécifique apparente :**

La méthode consiste à mettre dans une éprouvette préalablement lavée et séchée une quantité d'aubergine correspondant à un volume quelconque V.

L'ensemble est pesé après avoir été secoué afin de bien tasser les grains .connaissant la tare et la masse de l'ensemble .celle de l'échantillon m et en est déduite le volume V est lu sur l'éprouvette graduée.

La masse spécifique apparente est donnée par l'équation :

$$\rho_{app}=\frac{masse\ de\ l'échantillon(m)}{volume\ occupé(V)} \qquad (IV.3)$$

- **Volume poreux total :**

Il s'exprime par la relation suivante :

$$V_{pt}=\frac{1}{\rho app}-\frac{1}{\rho réelle} \qquad (IV\ .4)$$

.

- **La porosité**

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique entre 0 et 1 ou en pourcentage entre 0 et 100%, qui conditionnent les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat.

La porosité est aussi une valeur numérique définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un milieu poreux.

- **Spèctre Infrarouge de l'aubergine**

Une étude par spectroscopie infrarouge est réalisée en vue de déterminer d'une manière qualitative quelques composés existant dans le matériau utilisé. Cette étude permettra aussi de confirmer quelques groupements existants et qui sont donnés par la littérature concernant la composition chimique du matériau.



Figure IV.7 : spectroscopie infrarouge

IV.2.3 Présentation et préparation des solutions :

Le choix des colorants étudiés NET et BM répond aux critères suivants : leurs solubilités élevée dans l'eau, l'analyse simple et rapide par spectrophotométrie dans le visible, dans un but de comparaison de leurs adsorption. Le BM est une molécule organique appartenant à la famille des Xanthines. Le tableau V-1 et V-2 représente les principales propriétés physico-chimiques du deux colorants.

TableauV.1 : principales caractéristique physico-chimique du BM [52]

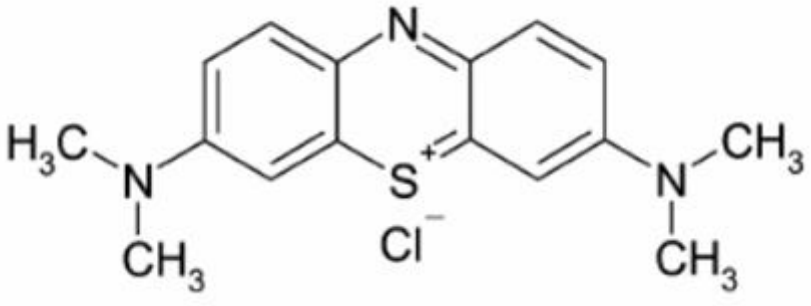
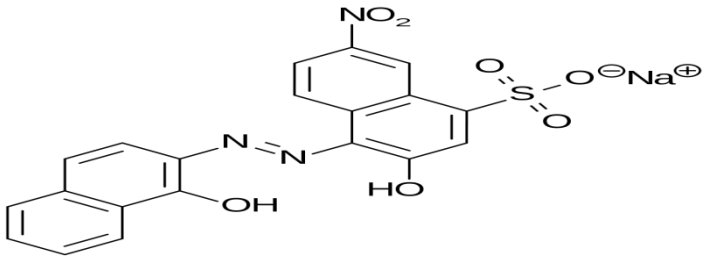
Nom	**Bleu de méthylène (BM)**
Famille	Colorants Basiques
Formule brute	$C_{16}H_{18}N_3SCl$
Appellation chimique	3,7-bis-(dimethylamino) phenazathionium
Masse molaire (g/mol)	320 g/mol
Dimension (A°)	15(diamètre)
λ_{max}	664nm
structure	

Tableau IV.2 : principales caractéristique physico-chimique du NET.

Nom	Noir d'ériochrome
Formule brute	$C_{20}H_{12}N_3NaO_7S$
Appellation chimique	(2-hydroxy-1-(1-hydroxy-2-naphthlazo)-6-nitronaphthain-4-sulfonsaure
Masse molaire (g/mol)	461.39g/mol
λ_{max}	622µm
Structure	

IV.2.3.a.1Etalonnage des solutions [01] :

La préparation des solutions des deux colorants consiste à préparer d'abord une solution mère de concentration 50 mg/l, à partir de laquelle nous préparons, par dilutions successives, une série de solutions de concentrations bien déterminées ; celles-ci sont par la suite analysées par spectrométrie UV aux longueurs d'onde appropriées.

Les courbes d'étalonnages de ces deux colorants sont établies à pH 6 et .Ces courbes qui est représenté sous forme d'absorbance (A) en fonction de la concentration C obéissent à la relation de Beer Lambert qui s'exprime comme suit :

$$A=\log\frac{I_0}{I} = k\ Cl \qquad (IV.5)$$

Avec :

A: absorbance ;

I: intensité du faisceau émergent(A) ;

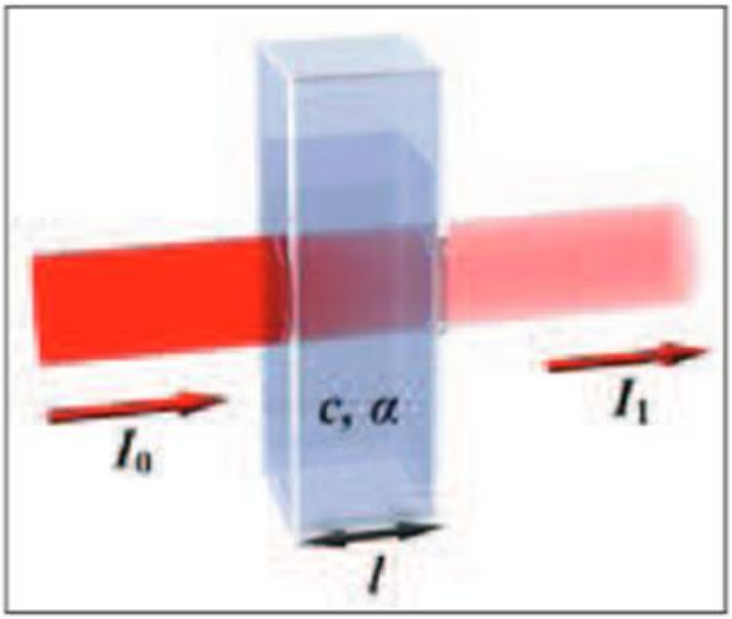
I0: intensité du faisceau incident (A) ;

k: coefficient spécifique d'absorption massique dépendant du composé et de la longueur d'onde considérée ($l.cm^{-1}.g^{-1}$) ;

C: concentration massique du composé dosé (g/l) ;

l: épaisseur de la cuve (cm).

Des écarts par rapport à cette loi peuvent se produire, à cause des interactions moléculaires, des formations de complexes, une insuffisance de résolution ou des problèmes instrumentaux. [55]



Figuer IV.8 : la loi de Beer lambert

IV.2.3.b. Méthode de détermination des concentrations :

La détermination des concentrations de nos solutions est réalisée à partir d'un spectrophotomètre UV-Visible qui permet d'enregistrer des courbes qui sont des spectres donnant la densité optique en fonction de la variation de la longueur d'onde λ, et en avoir la valeur maximum d'absorbance.

D'autre part, après le travail précédent (détermination de λ_{max}) et les concentrations connus des solutions C on peut déduire la courbe d'étalonnage D=f(C), d'après ça la concentration inconnue de solution C_x correspond à la densité optique connue est déterminée graphiquement.

IV.2.3.c Analyse du Bleu de méthylène, Noir d'ériochrome par UV-Visible

On utilise spectrophotomètre UV. Visible pour analyser les deux colorant les longueurs d'onde pour les deux polluants : le Bleu de méthylène Noir d'ériochrome sont λmax= 664nm, λmax= 622nm respectivement.

Par la suite, une courbe d'étalonnage a été obtenue, exprimant la variation de l'absorbance en fonction de la concentration en polluants représentée en l'annexe.

Cette courbe a servi de base dans l'analyse quantitative du polluant en question durant de la régression linéaire. Les courbes d'étalonnage établis à partir de solutions diluées de chacun de ces deux colorants sur la base des longueurs d'onde indiquées, montrent (figure IV BM et figure IV NET) une bonne linéarité et la possibilité d'analyser ces colorants par cette méthode. La loi de Beer-Lambert, est respectée ainsi



Figure IV.9 : L'appareillé de spectrophotomètre UV. Visible

IV.2.4.Courbe d'étalonnage :

Le courbe d'étalonnage et obtenu après varié la concentration des solutions dans déférence pH, chaque concentration correspond à une densité optique affichée sur le cadrant pour longueur d'onde constante.

IV.2.4.1.Essais d'adsorption du BM et NET sur les aubergines [44]

IV.2.4.1.a Mode opératoire d'adsorption :

La démarche à suivre pour décrire les différentes étapes de l'adsorption est représentée dans la figure IV.13

IV.2.4.2.Cinétique d'adsorption :

La cinétique d'adsorption a pour but de déterminer le temps d'équilibre d'adsorption pour ce fait, une série de flacons sont placés dans le secoueur en utilisant des masses d'adsorbants

de 0.1g dans un volume de 100 ml de solution polluante de concentration initiale de 15 ,20,35et 50mg/l. A des intervalles de temps allant 2min jusqu'à 30h, des prélèvements sont effectués, puis filtrés sous vide sur des membranes de 0,45µm.Les filtrats sont analysés par UV-Visible aux longueurs d'ondes appropriées (622nm pour NET et 664nm pour BM)) Le pH final pour chaque solution est contrôlé grâce à un pH-mètre.

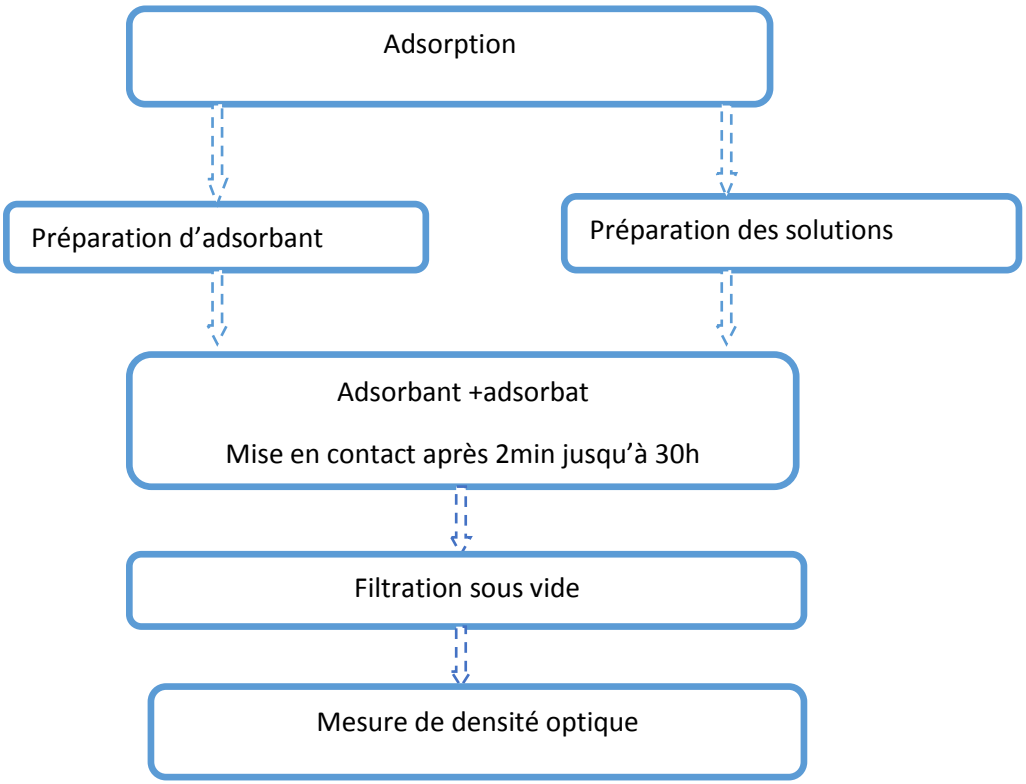


Figure IV.10 : Organigramme du mode opératoire d'adsorption

Le calcul de la quantité de soluté adsorbée sur un matériau donné est obtenu par la méthode de reste :

$$\frac{x}{m} = (C_0\text{-}Ce) * V/ m \text{ (mg/g)} \qquad \text{(IV.6)}$$

C_0: la concentration initiale de soluté en mg/L

Ce : la concentration résiduelle de soluté en mg/L

m : la masse de l'adsorbant en g

V : le volume de la solution en L

Le taux de réduction en NET ou BM après adsorption sur les aubergines est donné par l'équation 6 suivante

$$R\% = \frac{Ci(C) - Cf(C)}{Ci(C)} * 100\% \quad \text{(IV.7)}$$

-C_i (C) : concentration initiale du colorant (NET ou BM) dans le Becher

-C_f (C) : concentration finale du colorant (NET ou BM) dans le Becher

L'examen des isothermes permet de constater la présence d'une adsorption les courbes présentées donnent des allures selon les conditions initiales choisies. Les résultats permettent aussi de déduire des données thermodynamiques importantes pour expliquer l'adsorption de NET ou BM sur les aubergines.

IV.5. Isotherme D'adsorption

L'isotherme d'adsorption correspondant aux courbes de variation de la quantité d'adsorption par unité de masse d'adsorption X/m à l'équilibre en fonction de la concentration D'équilibre. Chaque courbe tracée correspondant à l'isotherme de Freundlich.

On utilise déférente masse d'adsorbant dans une 100ml de colorant et reste agité dans le secoueur à temps égale 400 min

IV.6.Résultat et discussion :

IV.6.1.Les caractérisation de l'aubergine

Tableau IV.3 : caractérisation de l'aubergine

H (humidité)	Le pH	Conductivité (ms)	ρ réel (g/cm3)	ρ_{app} (g/cm^3)	V_{pt} (cm^3/g)
19.86%	4.70	4.20	0.503	0.201	2.987

IV.6.2.Courbe d'étalonnage :

Le courbe d'étalonnage et obtenu après varié la concentration des solutions dans déférence pH, chaque concentration correspond à une densité optique affichée sur le cadrant pour longueur d'onde constante.

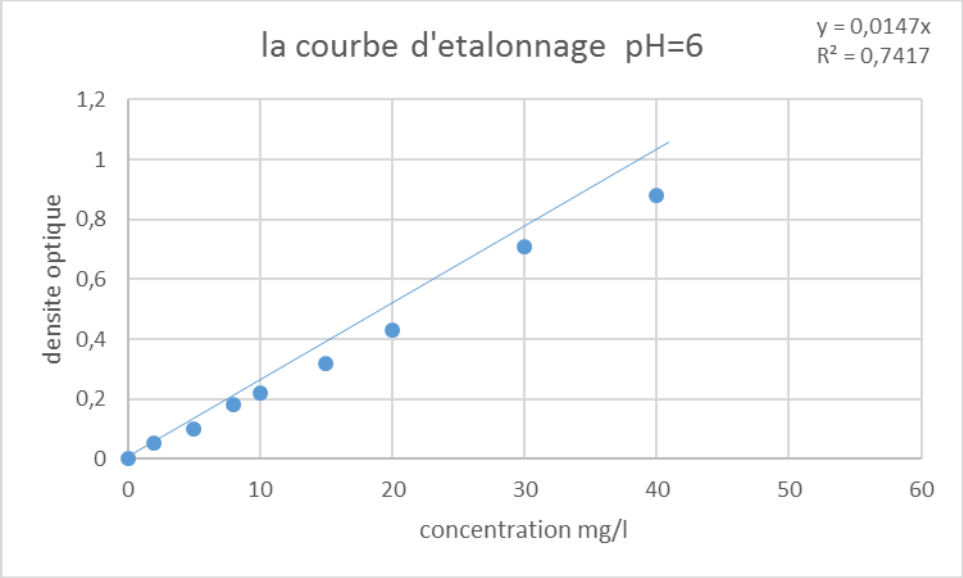


Figure IV. 11: Courbe d'étalonnage NET pH= 6 densité optique en fonction de la concentration

- Les courbes d'étalonnages de BM

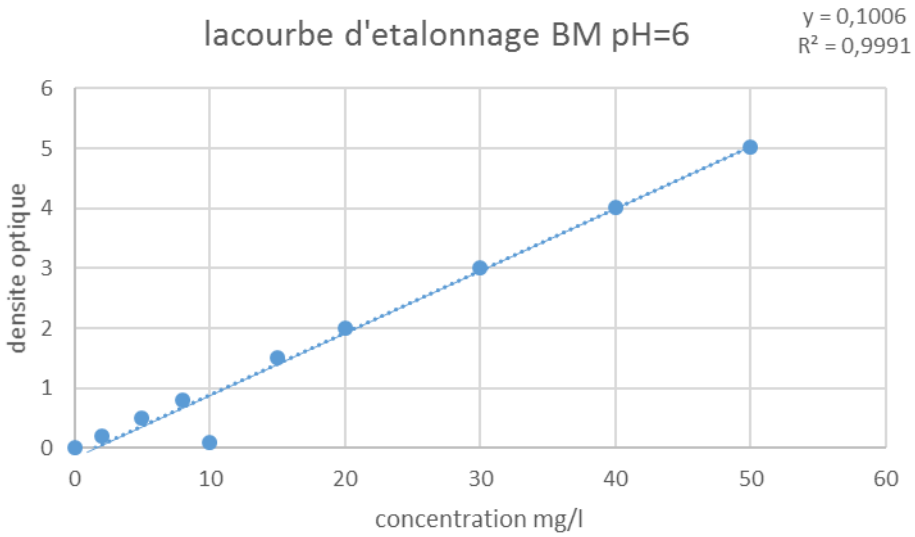


Figure IV.12 : Courbe d'étalonnage BM pH=6 densité optique en fonction de la concentration

La courbe d'étalonnage D=F(C) montre une augmentation de la densité optique avec l'augmentation de la concentration et la variation de densité en fonction de concentration se fait d'une façon linéaire conformément à la loi de beer-lambert figures IV (7, 8, 9, 10, 11,12)

➢ **Spèctre Infrarouge de l'aubergine**

Absorbance

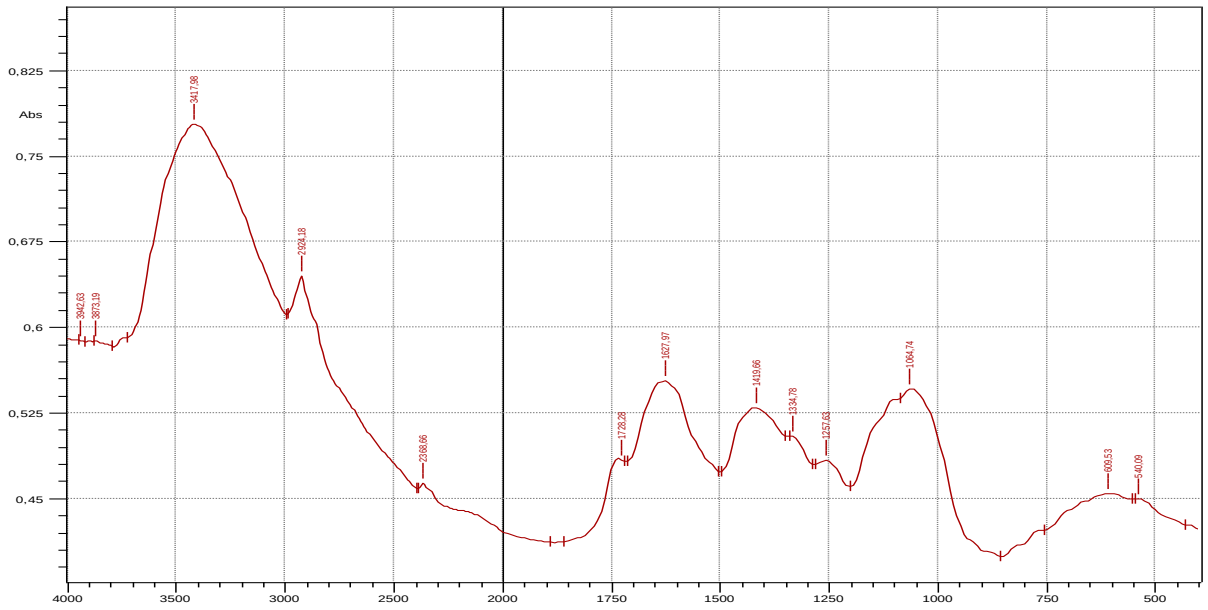


Figure IV.4 Spectre infrarouge de l'aubergine : a) transmittance en fonction du nombre d'onde, b) absorbance en fonction du nombre d'onde

Une interprétation de ce spectre permet de confirmer la présence de quelques groupements qui sont donnée dans la formule de ce matériau où l'on note :

- **La large bande à 3417.98 cm^{-1}** est caractéristique de la liaison OH (en particulier pour les fonctions acides ; COOH).
- **Le pic à 2924.18 cm^{-1}** reflète la vibration de valence de la liaison C-H des CH_3 ou CH_2.
- **Pic à 1728.28 cm^{-1}** : vibration de la liaison carbonyle "C=O"
- **Bande large à 1627.97 cm^{-1}** : probabilité de la présence de liaisons doubles entre les carbones "C=C"
- **Bande à 1419.66 cm^{-1}** : il y'a plusieurs possibilités car la région entre 1000 et 1500 cm^{-1} est dite complexe en IR (soit vibration de déformation de la liaison O-H d'un acide, soit la vibration de la liaison C-O d'un acide ou soit la vibration de la liaison C-N d'un amide CO-NH_2)
- **Bande à 1334.78 cm^{-1}** : il y'a plusieurs possibilités (vibration de la liaison CO, ou celle de la liaison OH ou encore celle de la liaison C-N des amides).
- **Bande à 1257.63 cm^{-1}** : il y'a plusieurs possibilités (vibration de la liaison CO, ou celle de la liaison OH ou encore celle de la liaison C-N des amines).
- **Bande à 1064.74 cm^{-1}** : il y'a plusieurs possibilités (vibration de la liaison CO, ou celle de la liaison C-O-C des éthers).
- **Bandes à 609.53 et 540.09cm^{-1}** : il peut s'agir des vibrations de la liaison OH des acides et celle de la liaison C=O des amides). De plus, généralement les absorptions en dessous de **1000cm^{-1}** sont caractéristiques des cycles aromatiques

IV.6.3.Cinétique d'adsorption :

- **Les graphes de cinétique.**

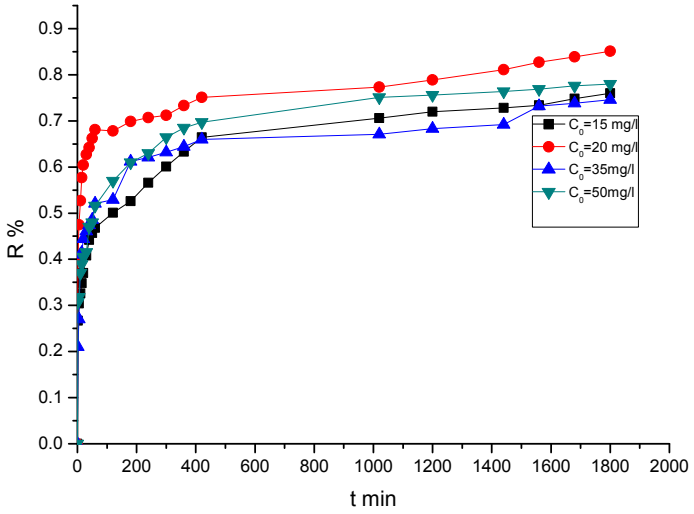


Figure IV 13 : variation du rendement fonction du temps : cas du NET

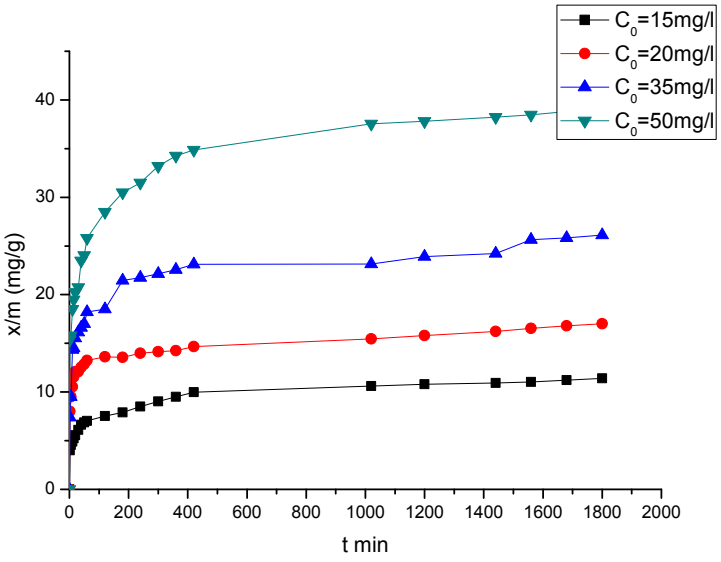


Figure IV 14 : courbes des cinétiques d'adsorption x/m= f(t): cas du NET

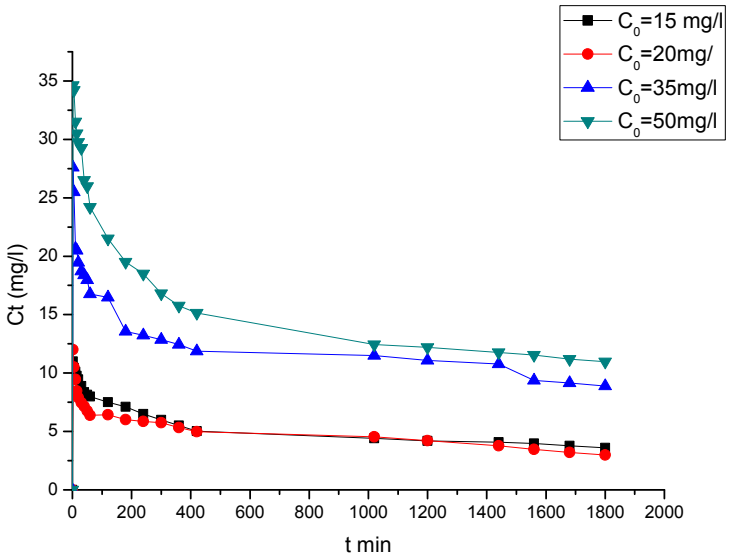


Figure IV 15 : cinétique d'adsorption pour NET C_t= f(t)

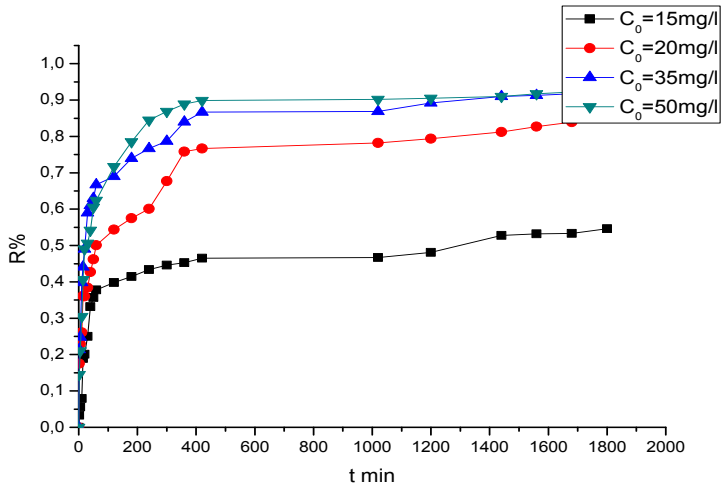


Figure IV.16 : variation du rendement fonction du temps : cas du BM

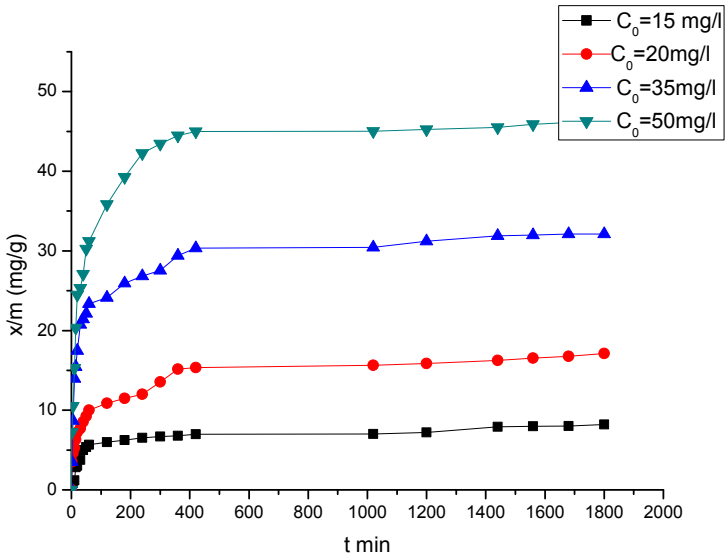


Figure IV.17 : courbes des cinétiques d'adsorption x/m= f(t) : cas du BM

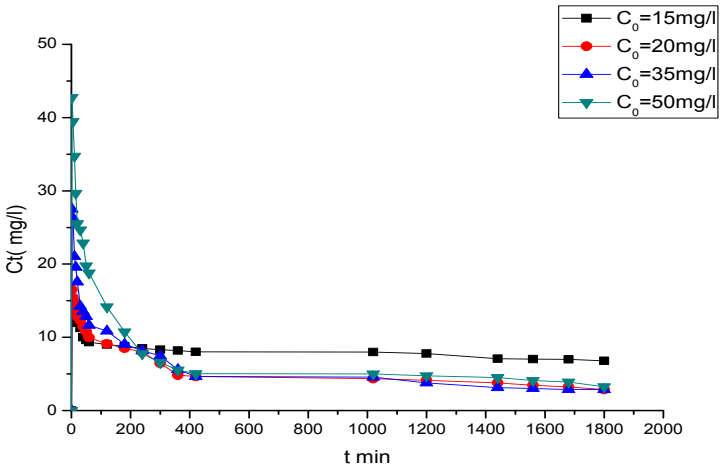


Figure IV. 18 : cinétique d'adsorption pour BM C_t= f(t)

IV.6.4. Interprétation des résultats :

L'adsorption du NET et BM sur l'aubergine est conduite à différents temps de contact (2 à 1800min) et différentes concentrations initiales en colorants (15, 20,35 et 50 mg/l). Les résultats sont présentés dans les figuresIV.15 et IV.18. Ils illustrent que la réduction des deux colorants par adsorption sur l'aubergine, augmente avec l'augmentation du temps de contact. Cette adsorption est rapide et se réalise dans les 400 premières minutes, au-delà de ce temps, l'adsorption des colorants est constante à sa valeur maximale. On peut en déduire que le temps de contact ou temps d'équilibre adéquat se trouve au-delà de 400min.

La concentration initiale du polluant a une influence importante sur la capacité derétention du support solide. Dans le but d'étudier son effet les valeurs suivantes : 15, 20, 35et 50mg/L, ont été considérées.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (IV.15 etIV.18) ci-dessous. Pour tous les échantillons, les données montrent que la capacité d'adsorption des colorants augmente avec l'augmentation de la concentration initiale.

- L'examen des courbes du rendements en fonction du temps de contact pour les deux colorants: figure IV.13 et figure IV.16 montrent que, dans le cas du NET, un rendement max (85%) est obtenu pour une concentration C_0=20 mg/l correspondant à un temps de contact de 1800 min (figure IV.13) , alors que pour le cas du BM, un rendement maximum (90%) est obtenu pour une concentration C_0=35mg/l. correspondant à un temps de contact voisin de 1600 min (figure IV.16).
- Les courbes de cinétique d'adsorption (figures IV.14 et IV.17) montrent que l'équilibre d'adsorption obtenu est meilleur dans le cas du NET pour une concentration C_0=20mg/l, ce qui correspond à un temps de contact voisin de 1600 min (figure IV.14). Dans le cas du BM, cet équilibre est obtenu pour une concentration C_0=35mg/l, correspondant à un temps de contact voisin de 1500min.
- Les courbes des figures IV.14 et IV.17 représentent la variation de la quantité adsorbée en fonction du temps. Ces dernières donnent une quantité optimale d'adsorption, dans le cas du NET, est obtenue pour une concentration C_0=50mg/l (x/m= 48 mg/g) figure IV.14 et pour une concentration en BM également pour une concentration de C_0=50mg/l (x/m= 45 mg/g)

En conséquence, il peut être conclu que le biosorbant : l'aubergine, donne des résultats importants et concluants où l'on remarque que, pour les concentrations choisies, on peut atteindre un rendement d'adsorption important dans les deux cas de polluants testés : le NET et le BM. Ce dernier avoisine les 90% pour le BM et 85% pour le NET.

Le temps d'équilibre est voisin de 1600 min pour le les deux colorants et enfin la quantité adsorbée est voisine de 50 mg/g.

IV.6.5. Isotherme D'adsorption

L'isotherme d'adsorption correspondant aux courbes de variation de la quantité d'adsorption par unité de masse d'adsorption X/m à l'équilibre en fonction de la concentration D'équilibre. Chaque courbe tracée correspondant à l'isotherme de Freundlich.

Cas du BM :

C= 15mg/L

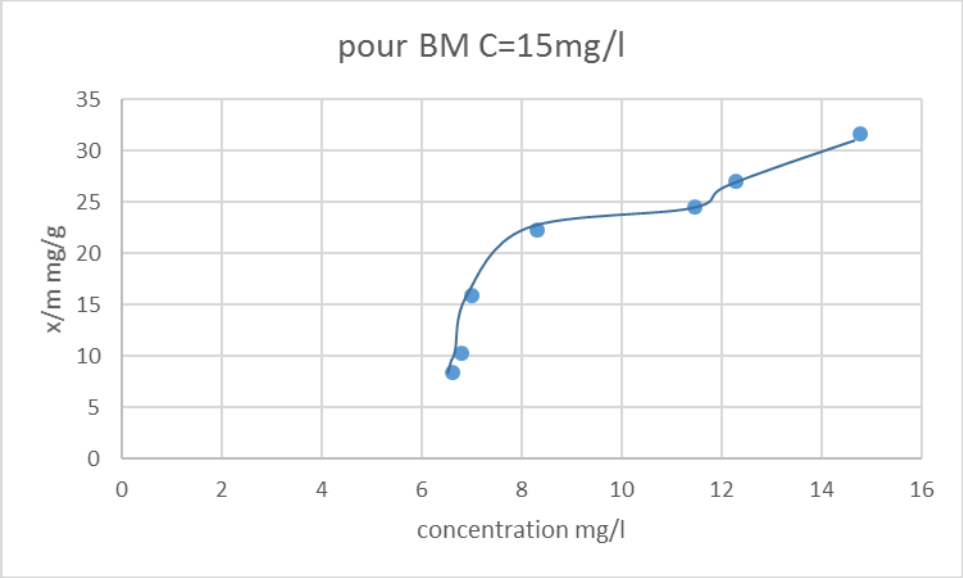


Figure IV.19 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c)

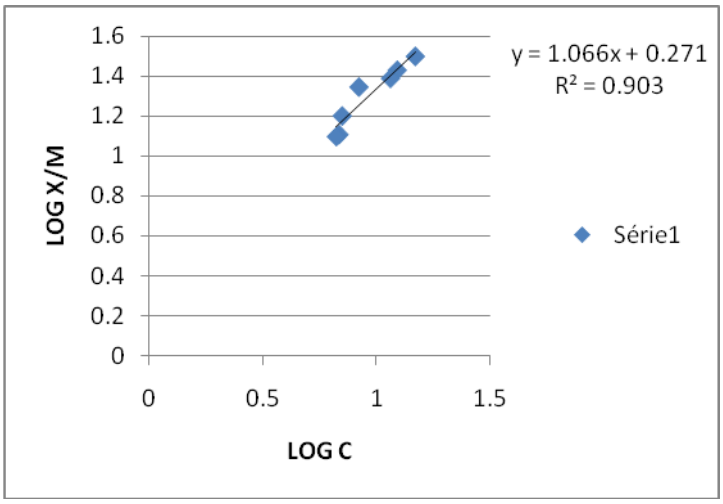


Figure IV.20 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m=f (log c)

C=20mg/l

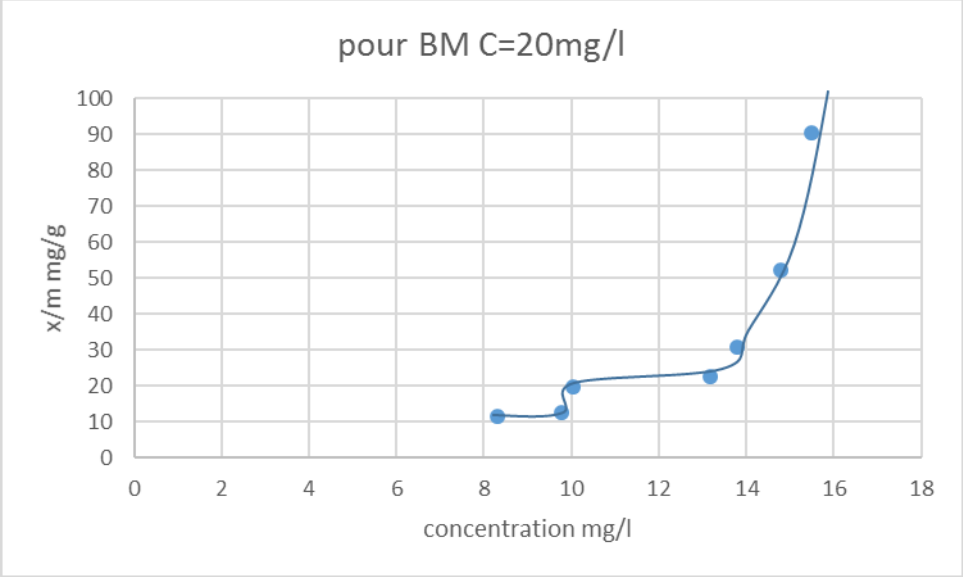


Figure IV.21 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c)

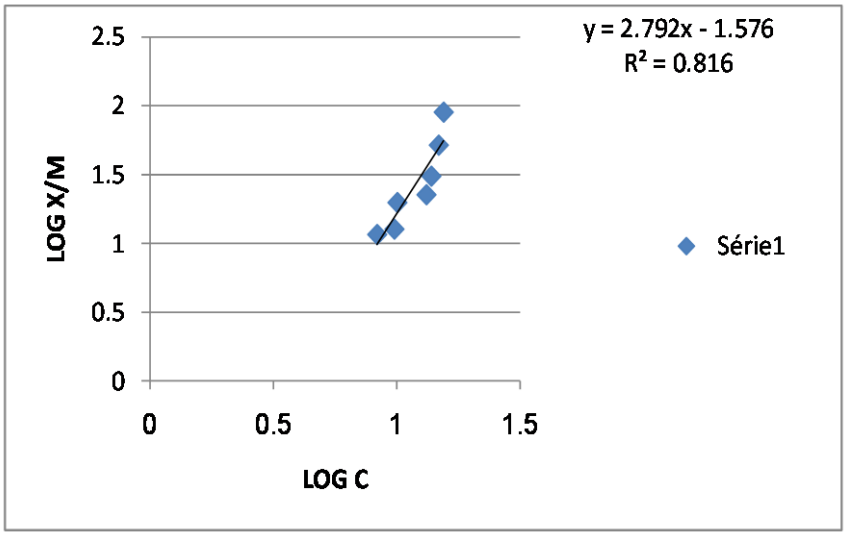


Figure IV.22 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m=f (log c)

C=35mg/l

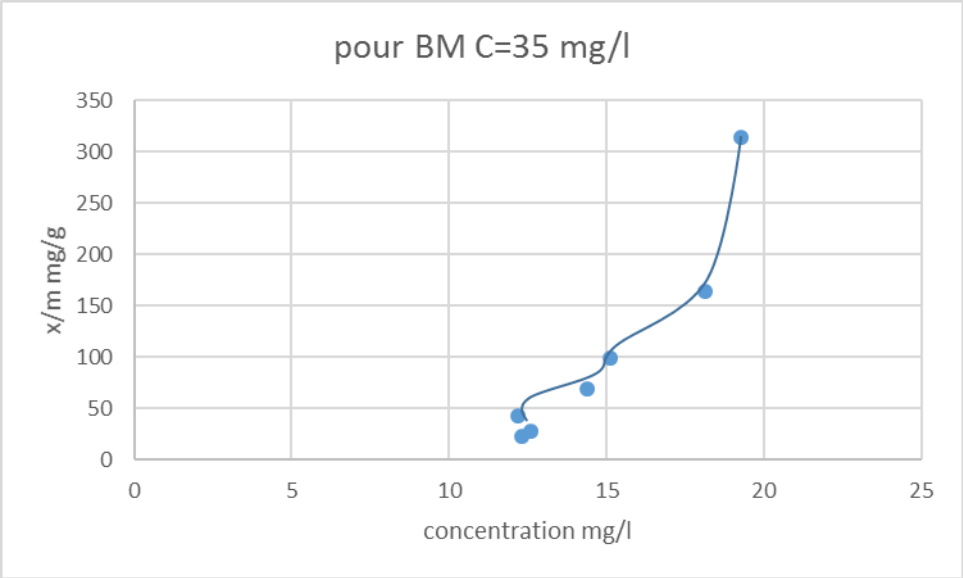


Figure IV.23 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c)

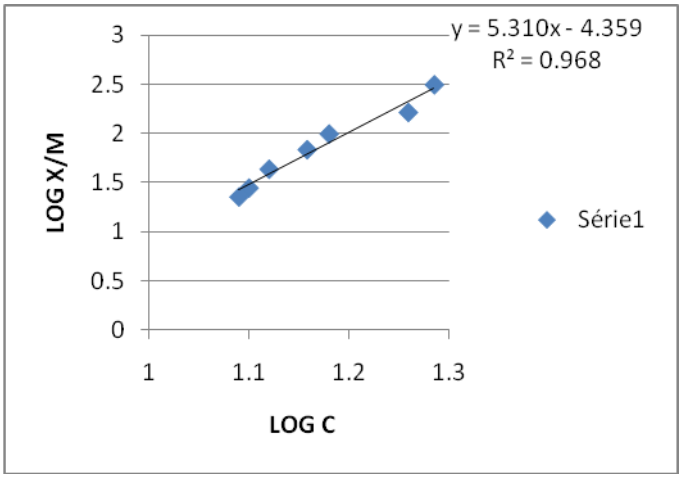


Figure IV.24: Isotherme de FREUNDLICH log X/m=f (log c)

C=50mg/l

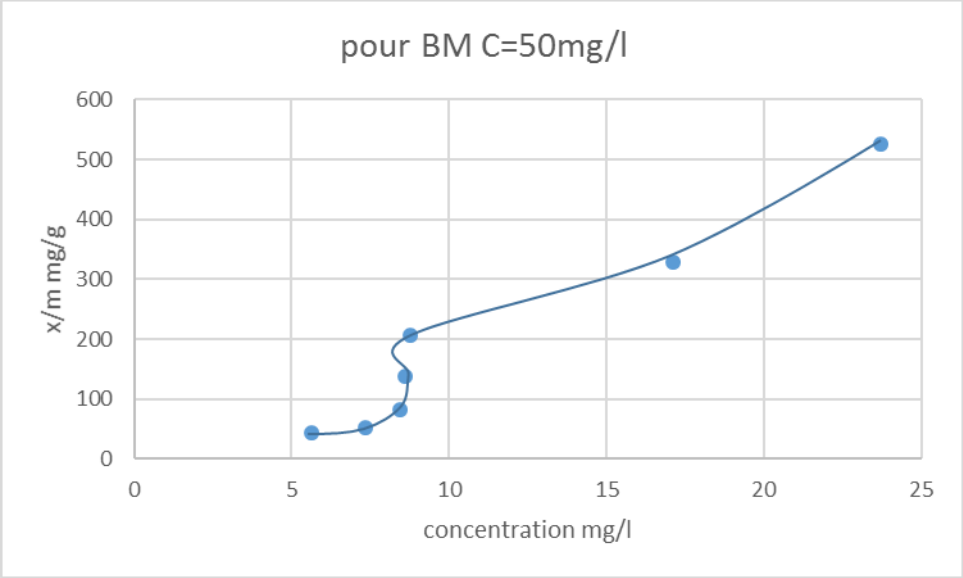


Figure IV.25 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c)

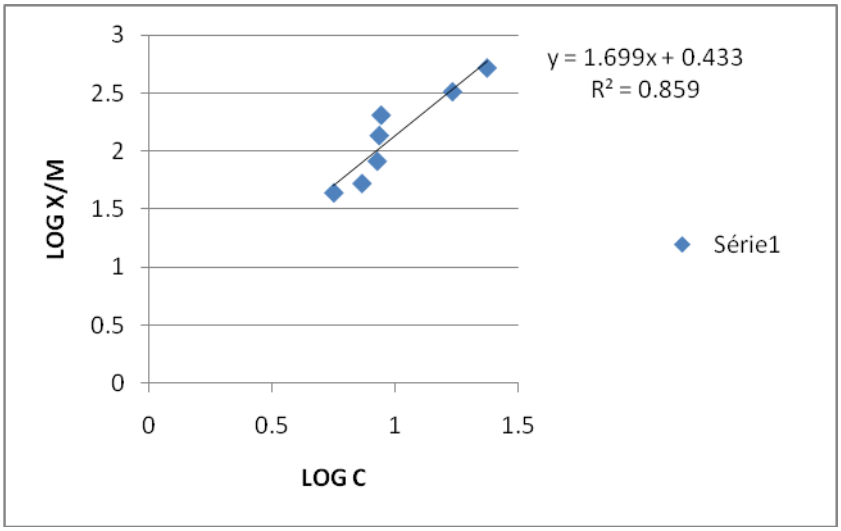


Figure IV.26: Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c)

Cas du NET :

C=15 mg/l

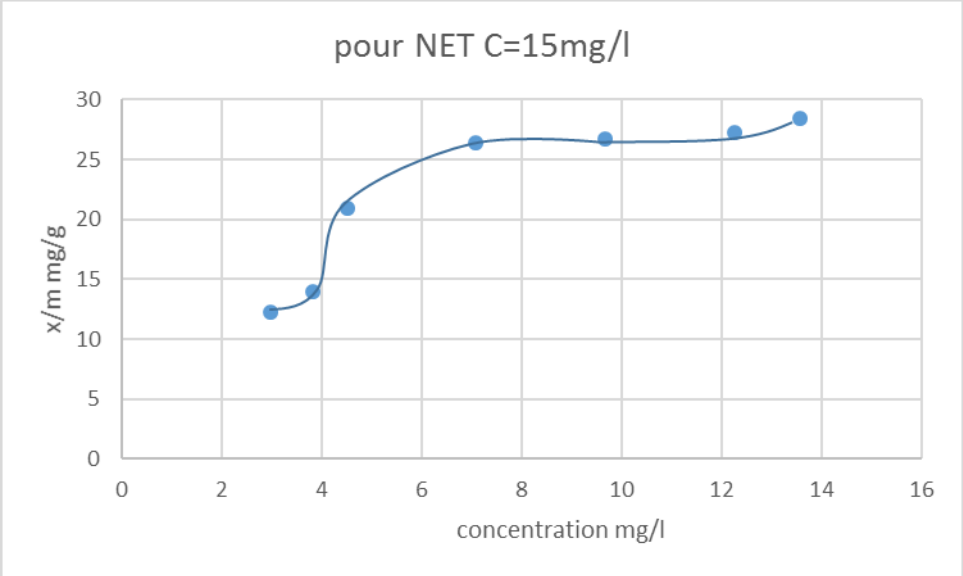


Figure IV.27 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c)

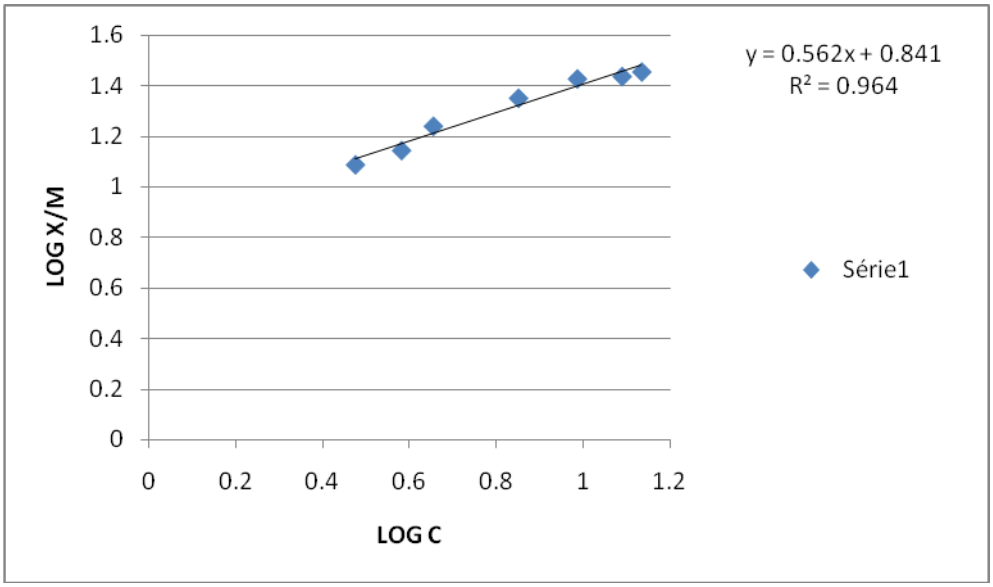


Figure IV.28 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c)

C=20mg/l

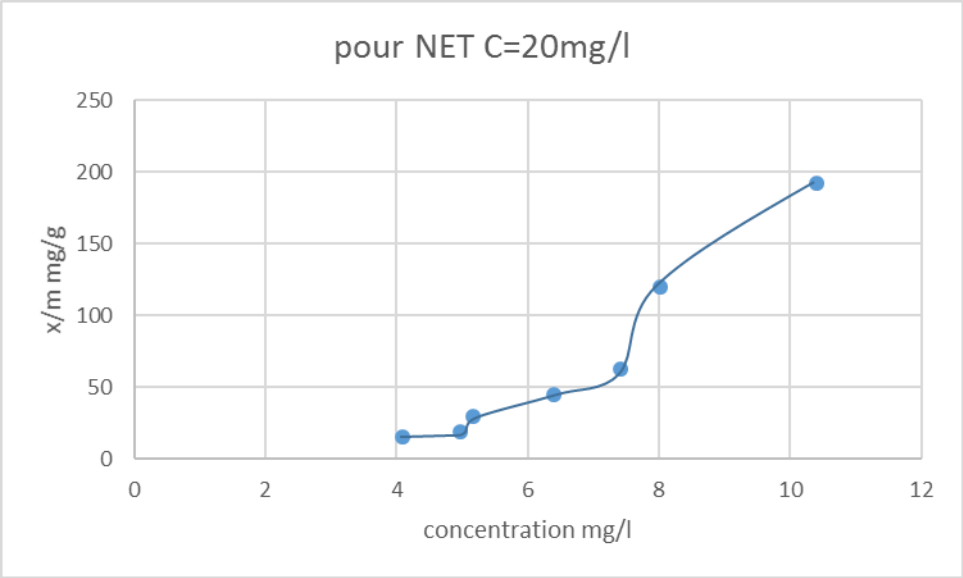


Figure IV.29 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c)

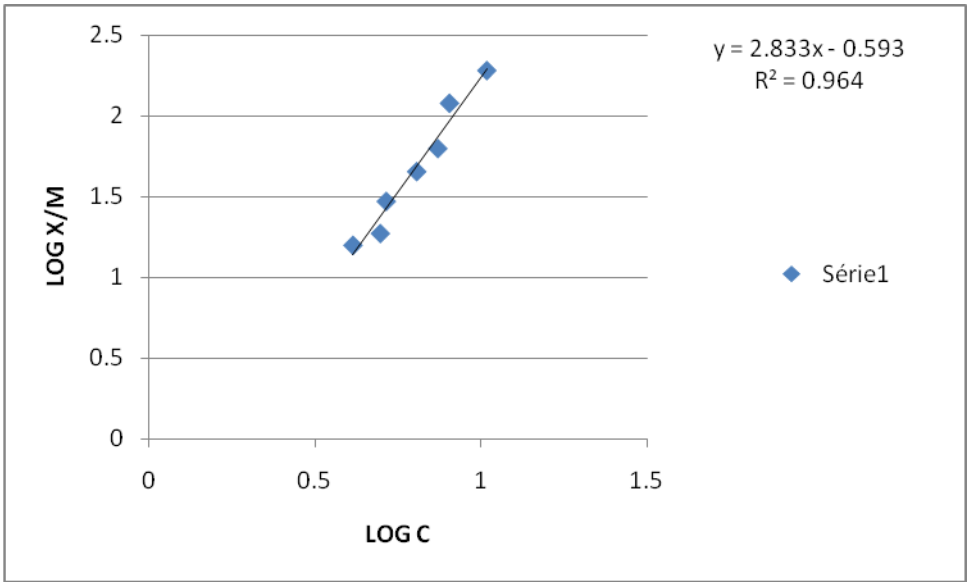


Figure IV.30 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c)

C=35 mg/l

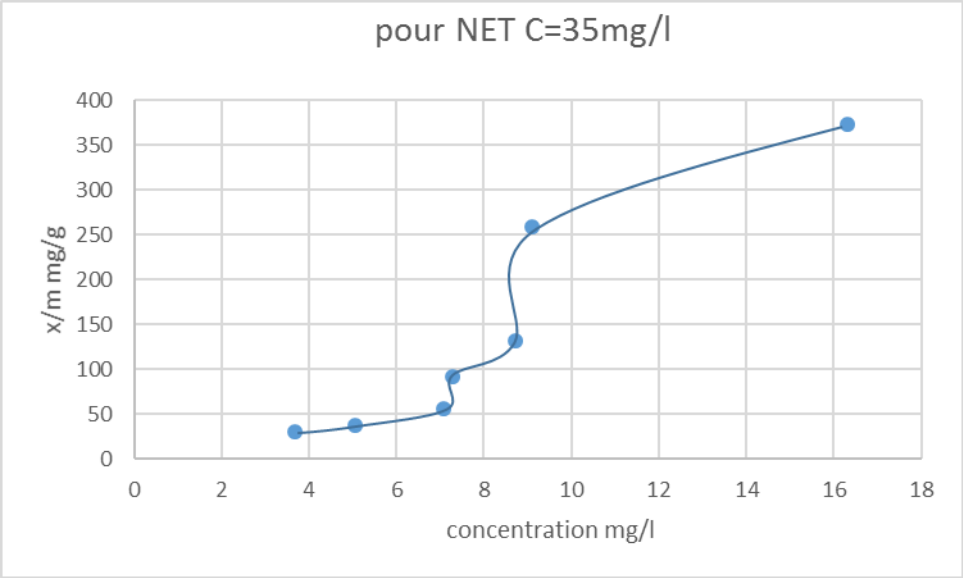


Figure IV.31 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c)

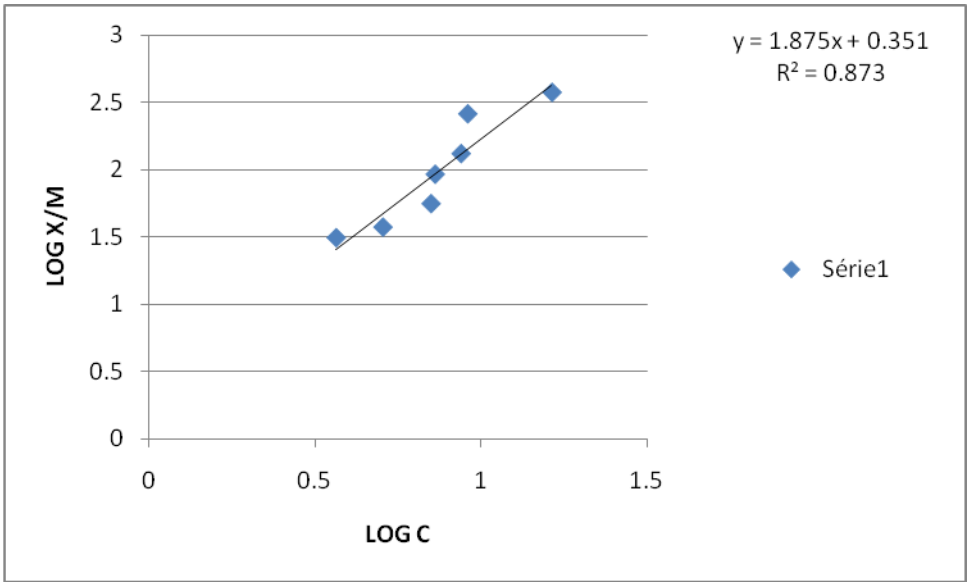


Figure IV.32 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c)

C=50mg/l

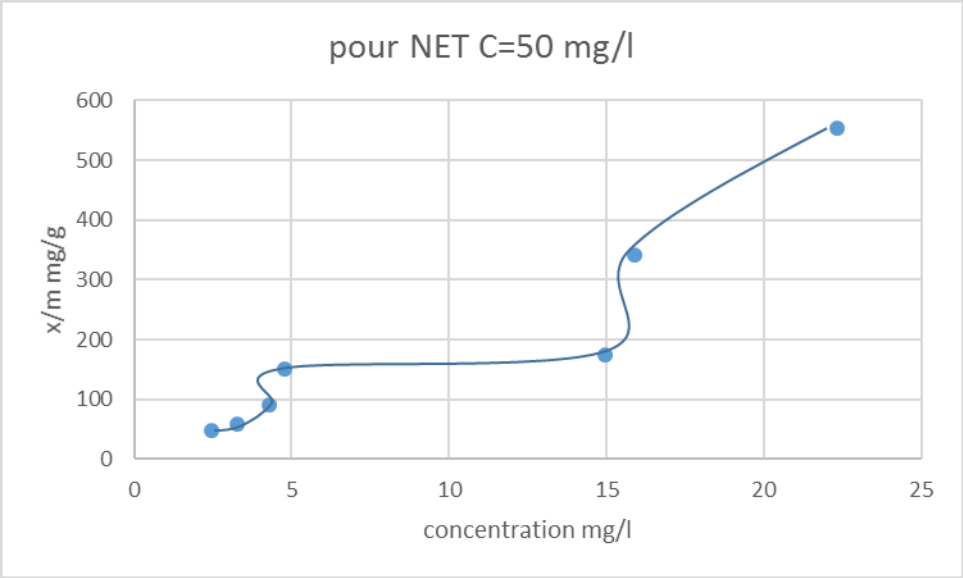


Figure IV.33 : Isotherme D'adsorption X/m=f(c)

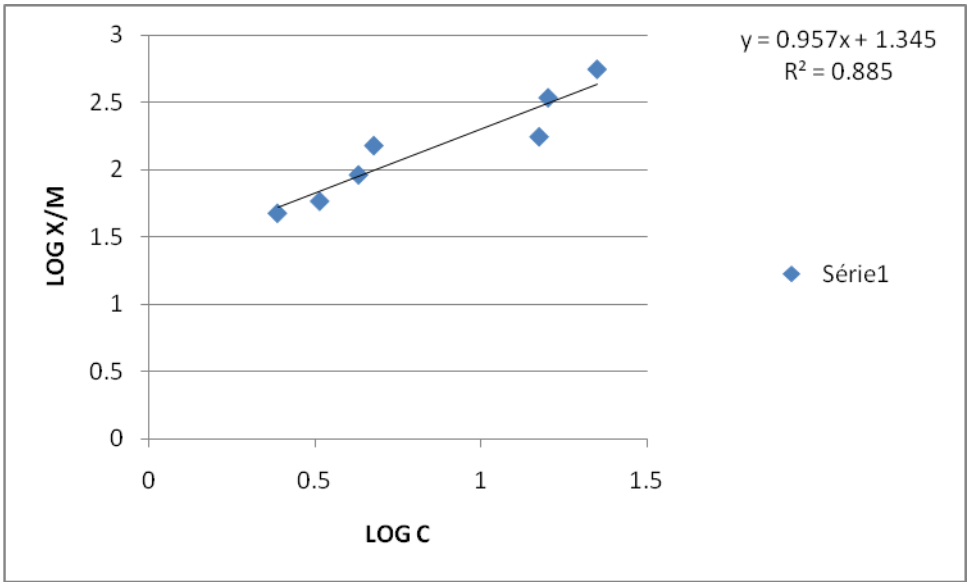


Figure IV.34 : Isotherme de FREUNDLICH log X/m= f (log c)

- **Détermination des paramètres de l'isotherme de FREUNDLICH :**

L'adsorption de BM : l'équation obtenue est suivant :

Pour C=15 mg/l :

$$\frac{X}{m} = 0.271C^{1.0662} \qquad \text{(IV.10)}$$

Ou : n=1.0662

K=0.271

C=20 mg/l :

$$\frac{X}{m} = -1.5769C^{2.792} \quad \text{(IV.11)}$$

Ou : n= 2.792

K=-1.5769

C=35mg/l :

$$\frac{X}{m} = -4.3592C^{5.3105} \quad \text{(IV.12)}$$

Ou : n=5.3105

K=-4.3592

C=50mg/l :

$$\frac{X}{m} = 0.4339C^{1.6994} \quad \text{(IV.13)}$$

Ou : n=1.6994

K=0.4339

L'adsorption de NET : l'équation obtenue est suivant :

Pour C=15 mg/l :

$$\frac{X}{m} = 0.8418C^{0.5629} \quad \text{(IV.14)}$$

Ou : n=0.5629

K=0.8418

C=20mg/l

$$\frac{X}{m} = -0.5931C^{2.83} \quad \text{(IV.15)}$$

Ou : n=2.8336

K=-0.5931

C=35mg/l :

$$\frac{X}{m} = 0.3518C^{1.8759} \quad \text{(IV.16)}$$

Ou : n=1.8759

K=0.3518

C=50mg/l :

$$\frac{x}{m} = 1.3454C^{0.9579} \quad \text{(IV.17)}$$

Ou : n=0.9579

K=1.3454

IV.7 Conclusion

Les résultats obtenus de l'adsorption des deux colorants utilisés dans l'industrie sur un bioadsorbant : l'aubergine, montrent l'existence, dans tus les cas, d'une adsorption confirmée par la diminution de la concentration en polluants pour des temps de contact choisis. Toutes les courbes obtenues montrent la présence de cette adsorption. Les résultats de l'adsorption ont été confirmés par le modèle de Freundlich.

Ces résultats montrent qu'on peut atteindre un grand rendement qui avoisine les 85%.

Une étude complémentaire et plus précise dans des conditions meilleures est souhaitée.

Conclusion générale

Conclusion général

Les colorants, plus particulièrement industriels (textiles), sont des sources dramatiques de pollution, d'eutrophisation et de perturbation non esthétique dans la vie aquatique et par conséquent présentent un danger potentiel de bioaccumulation qui peut affecter les espèces animales et végétales y compris l'homme par transport à travers la chaîne alimentaire. Il est devenu, alors impératif de réduire voire éliminer ces colorants par des voies de traitement biologique ou physico-chimique. Dans cette étude, nous avons opté pour le procédé d'adsorption qui est considéré comme l'une des techniques de traitement les plus utilisées pour enlever de l'eau les composés organiques. Le choix du matériau adsorbant dans ce type de traitement est primordial ; c'est le bon choix qui conditionne l'efficacité et la rentabilité du procédé. Les résultats obtenus dans cette étude ont montrés que l'aubergine est un bon adsorbant pour l'élimination de colorants (polluants) utilisés. Pour tester la performance de ce matériau, plusieurs essais d'adsorption pour deux colorants le NET et le BM, ont été réalisés en prenant en compte l'influence de quelques paramètres opératoires notamment le pH la concentration du milieu pollué.

La biosorption correspond à l'utilisation des matériaux biologiques ayant un grand potentiel de fixation des polluants par adsorption, dans notre travail, nous avons utilisé l'aubergine comme adsorbant après des opérations de préparations préliminaires (séchage, broyage et tamisage), quelques caractéristiques, comme d'analyse du spectre Infrarouge, ont été déterminées en vue de déterminer qualitativement les composés existant dans le matériau. Cette analyse a révélé la présence de groupements existants dans la composition chimique du matériau,

Les essais L'adsorption du NET et BM sur l'aubergine est conduite à différents temps de contact (2 à 1800min) et différentes concentrations initiales en colorants (15, 20,35 et 50 mg/l). Les résultats sont présentés dans les figuresIV.15 et IV.18. Ils illustrent que la réduction des deux colorants par adsorption sur l'aubergine, augmente avec l'augmentation du temps de contact. Cette adsorption est rapide et se réalise dans les 400 premières minutes, au-delà de ce temps, l'adsorption des colorants est constante à sa valeur maximale. On peut en déduire que le temps de contact ou temps d'équilibre adéquat se trouve au-delà de 400min.

La concentration initiale du polluant a une influence importante sur la capacité de rétention du support solide. Dans le but d'étudier son effet les valeurs suivantes : 15, 20, 35et 50mg/L, ont été considérées.

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (IV.15 etIV.18) ci-dessous. Pour tous les échantillons, les données montrent que la capacité d'adsorption des colorants augmente avec l'augmentation de la concentration initiale.

L'examen des courbes du rendements en fonction du temps de contact pour les deux colorants: figure IV.13 et figure IV.16 montrent que, dans le cas du NET, un rendement max (85%) est obtenu pour une concentration C0=20 mg/l correspondant à un temps de contact de 1800 min (figure IV.13) , alors que pour le cas du BM, un rendement maximum (90%) est obtenu pour une concentration C0=35mg/l. correspondant à un temps de contact voisin de 1600 min (figure IV.16).

Les courbes de cinétique d'adsorption (figures IV.14 et IV.17) montrent que l'équilibre d'adsorption obtenu est meilleur dans le cas du NET pour une concentration C0=20mg/l, ce qui correspond à un temps de contact voisin de 1600 min (figure IV.14). Dans le cas du BM, cet équilibre est obtenu pour une concentration C0=35mg/l, correspondant à un temps de contact voisin de 1500min.

Les courbes des figures IV.14 et IV.17 représentent la variation de la quantité adsorbée en fonction du temps. Ces dernières donnent une quantité optimale d'adsorption, dans le cas du NET, est obtenue pour une concentration C0=50mg/l (x/m= 48 mg/g) figure IV.14et pour une concentration en BM également pour une concentration de C0=50mg/l (x/m= 45 mg/g)

En conséquence, il peut être conclu que le biosorbant : l'aubergine, donne des résultats importants et concluants où l'on remarque que, pour les concentrations choisies, on peut atteindre un rendement d'adsorption important dans les deux cas de polluants testés : le NET et le BM. Ce dernier avoisine les 90% pour le BM et 85% pour le NET.

Le temps d'équilibre est voisin de 1600 min pour le les deux colorants et enfin la quantité adsorbée est voisine de 50 mg/g.

Para port de l'isotherme d'adsorption on a trace la quantité d'absorbée en fonction de la concentration on obtenez sur la loi d'henry ne pas linéaire donc ne pas vérifier ;Chaque courbe tracée correspondant à l'isotherme de Freundlich est vitrifie ; et détermination des paramètres de l'isotherme de FREUNDLICH on utilise de équation de FREUNDLICH par exemple pour BM C=15mg/l ; n=1.0662 ;k= 0.271 et C=50mg/l ; n=1.6994 ; K=0.4339 et pour NET C=15 mg/l n=0.562 ; K=0.8418 et C=50mg/l n=0.957 ; K=1.3454 .

Enfin on souhaitera que les résultats obtenus lors de cette étude soient confinés et complétés par des études plus poussées : microscopie électronique à balayage (MEB), caractérisation de la surface spécifique par la méthode de BET (Brunauer-Emett-Teller), et d'autres méthodes permettant de donner de valoriser ce travail.

Recherche bibliographique

[1] **Khalfaoui, A.** Etude expérimentale de l'élimination de polluants organique et inorganiques par adsorption sur des Matériaux Naturels .thèse doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012.

[2] **Mazighi Mouni.** Rétention du ‘‘Procion Rouge écarlate H3B’’ Dissous en milieu aqueux par du charbon Actif (application au traitement d'un Effluent aqueux d'industrie Textile).Thèse de magister, Université de Médéa, 1999.

[3] **Nozet, H**.Textiles chimiques - Fibres modernes. Edition Eyrolles, Paris, 1976.

[4] **Yao-tung, L ; Chen, Y ; Chen, F.** Effective removal of AB24 dye by nano/micro-size zero-valent iron. Séparation and Purification Technology, 2008

[5] **Vipasiri, V ; Shaomin, L ; Bojina, B. D ; Chrisw Chow, K.** Kinetic study and equilibrium isotherm analysis of Congo red adsorption by clay materials. Chemical Engineering Journal, 2009.

[06] **Emilian, K.** Traitement de pollutions industrielles. Technique et Ingénierie, (2004).

[07] **Inrs.** Dermatoses professionnelles aux colorants. document pour le médecin de travail N°100, France, 4éme trimestre, 2004.

[08] **Guillard, C ; H. Lachheb, H ; Houas, A ; Ksibi, A ; Elaloui, M ; J.M. Herrmann, J.M.** Photochem.Photobiol. A : Chem, 2003.

[19] **Chen, P ; Wang, L.** Chemosphere, 2004.

[20] **32- Robert, P ; Jean-Pierre, S.** Chimie industrielle, 2ème édition, Edition DUNOD ,1996.

[21] **Kebiche, O.** Biodégradabilité adsorbabilité et échange ionique de quelques colorants cationiques présents dans les effluents liquides de la teinturerie de l'unité couvertex de Ain.Djasser. Thèse de Magistère, Université Mentouri Constantine, 1996.

[22] **Baghriche, O.** Contribution de méthodes destructives (Photolyse et P.O.A's) et non destructives à l'élimination de deux colorants (Bleu de méthylène et rouge Congo) en solution aqueuse .Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, 2005.

[23] **Ayhan, D.** Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials : A review. Journal of Hazardous Materials, 2008.

[24] **Edeline, F.** L'épuration physico-chimique des eaux : Théorie et technologie. Edition cebedoc, Lavoisier, 1992.

[25] **Limousin, G ; Gaudet, J.P ; Charlet, L ; Szenknet, S ; Barthéses, V ; Krimissa, M.** Sorption isotherms: a revienw on physical bases, modelling and measurement, Applid Geochemistry, 2007.

[26] **Chitour, C.** Physicochimique des surfaces. Office des publications universitaires, 2004.

[27] **Stumm, W ; Morgan, J.** Aquatic chemistry, Ed.2,Wiley inter-science J., Wiley & sons, 1981.

[28] **Hiemenz, P.** in: Principales of colloid and surface chemistry, Ed., Marcel Dekker, 1986.

[29] **Chawki, DJ.** Expérimentation, Modélisation et optimisation de l'adsorption des effluents textiles .thèse doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.

[30] **Amirouche, L.** Etude du pouvoir de sorption du cuivre(II), du Zinc(II) et des poly phénols par les bentonites sous l'effet des irradiations micro-ondes. Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou ,2011

[31] **Ferrandon, H ; Bouabane, O.** Comptes Rendus de l'Académie des sciences. Science Direct, 2001

[32] **Al Mardini, F.** Etude de l'adsorption du pesticide Bromac il sur charbon actif en poudre en milieu aqueux. Effet compétiteur des matières organiques naturelles. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2008.

[33] **Ponnusami, V ; Vikram, S ; Nsrivastava, S.** Guava (Psidium guajava) leaf powder: Novel adsorbent for removal of methylene blue from aqueous solutions. Journal of Hazardous Materials, 2008

[34] **Ferrero, F.** Dye removal by low cost adsorbents: Hazelnut shells in comparison with wood sawdust. Journal of Hazardous Materials, 2007.

[35] **Hameed, B H.** Evaluation of papaya seeds as a novel non-conventional low-cost adsorbent for removal of methylene blue. Journal of Hazardous Materials, 2009.

[36] **Betina, R ; Eder, C ; Natali, F ; Clima, E .**Applications of Brazilian pine-fruit shell in natural and carbonized forms as adsorbents to removal of methylene blue from aqueous solutions : Kinetic and equilibrium study. Journal of Hazardous Materials, 2009.

[37] **Zhenhu, H ; Hui, C ; Feng, J ; Shoujun, Y.** Removal of Congo red from aqueous solution by cattail root, Journal of Hazardous Materials, 2010.

[38] **Etim, J ; Aumoren, S ; Eduok, U M.** Coconut coir dust as a low cost adsorbent for the removal of cationic dye from aqueous solution. Journal of Saudi Chemical Society, 2012.

[39] **Vesna, M ; Miodrag, N; Miodrag, N.** Methylene blue (cationic dye) adsorption onto sugar beet pulp: Equilibrium isotherm and kinetic studies. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2012.

[40] **Emilian, K.** génie chimique. Edition DUNOD, Paris 2001

[41] **Barrer, R.** Zéolites and clay minerals as sorbents and molecular sieves. Academic Press, 1978.

[42] **Nasser, M ; Hamoda, M ; Radwan, G H.** Utilization of palm-fruit bunch particles for the adsorption of dye stuff wastes, Adsorp. Sci. Technol, 1996.

[43] **Melo, J ; Airoldi, C.** Removal of textile dyes from aqueous solution by babassu coconut epicarp, Orbignya speciosa. Chem. Engg. J, 2011.

[44] **Merzoug, N.** application des tiges de dates dans adsorption de polluants organique .Mémoire de magister, Université Mohamed Cherif Massadia Souk Ahras, 2014.

[45] **Daunay, M C ; Chaput.** Production and characterization of fertile somatic hybrids of eggplant (Solanum -melongena L.) with Solanum aethiopicum L. Theor. Appl. Genet, 1993.

[46] **Grubben, G J M.** Tropical vegetables and their genetic resources. IBPGR, 1977.

[47] **Chen, N C ; M. Li, H.** Cultivation and Breeding of eggplant, Asian Vegetable Research and Development Center.

[48] **Djouadi, A.** Evaluation de l'activité antioxydant des polyphénols extraits de deux variétés de solanum melongena L.de la région d'El-Oued par

voltampérométrie cyclique et ondes carrées. Thèse master académique, Université D'El-Oued ,2012.

[49] **Freeman, B A ; O'Neil, J.** Tissue slices in the study of lung metabolism and toxicology. Environ Health Perspect, 1984.

[50] **Ichai, C ; Quintard, H ; Orban, J C.** Des ordres Métaboliques et Réanimation : De La Physiopathologie Au Traitement.Springer-Verlag, France, 2011.

[51] **Youdim, K A ; Shukitt- Hale, B ; MacKinnon, S ; Kalt, W ; Joseph, J A.** Polyphenolics enhance red blood cell resistance to oxidative stress in vitro and in vivo. Biochim.et Biophys, 2000.

[52] **Bandara, J ; Mielczarski, J ; Kiwi, J.** A., Langmuir 15, 1999.

[53] **Bouchemal, N ; Merzougui, Z ; Addoun, F.** Adsorption en milieux aqueux de deux colorants sur charbons actifs a base de noyaux de dattes, Journal de la société Algérienne de chimie, 2011.

[54] **Roussac, F ; Roussac,** Analyses chimique, méthodes et technique instrumentales modernes. 2ème édition, Edition Masson, 1994.

[55] **Norman L, A.** Chimie organique. Edi science International, 1900.

ANNEXE

ANNEXE

Les tableaux de La courbe d'étalonnage

Pour NET

PH=6

C (mg/l)	0	2	5	8	10	15	20	30	40	50
abs	0	0.055	0.101	0.180	0.22	0.32	0.43	0.708	0.881	0.500

Pour BM

PH=6

Cmg/l	0	2	5	8	10	15	20	30	40	50
abs	0	0.201	0.503	0.8048	1.006	1.509	2.012	3.018	4.024	5.03

Les tableaux de cinétique

Pour NET

C=15 mg/l m=0.1 g V=100ml

Temps min	2	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	360	420	1020	1200	1440	1560	1680	1800
DO	0.16	0.153	0.148	0.143	0.138	0.130	0.122	0.119	0.117	0.11	0.11	0.095	0.087	0.08	0.07	0.06	0.06	0.059	0.058	0.055	0.052
C_t mg/l	10.99	10.44	10.11	9.77	9.45	8.88	8.36	8.14	7.98	7.5	7.1	6.5	5.98	5.5	5.03	4.4	4.2	4.08	3.98	3.77	3.6
x/m	4.01	4.56	4.89	5.23	5.55	6.12	6.64	6.86	7.02	7.52	7.9	8.5	9.02	9.5	9.97	10.6	10.8	10.92	11.02	11.23	11.4
R%	0.267	0.304	0.326	0.348	0.37	0.408	0.442	0.457	0.468	0.501	0.526	0.566	0.601	0.633	0.664	0.706	0.72	0.728	0.734	0.748	0.76

C=20mg/l m=0.1 V=100ml

Temps min	2	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	360	420	1020	1200	1440	1560	1680	1800
DO	0.176	0.154	0.139	0.124	0.116	0.109	0.105	0.099	0.093	0.094	0.088	0.085	0.084	0.078	0.073	0.066	0.061	0.055	0.050	0.047	0.043
C_t mg/l	12	10.5	9.46	8.46	7.91	7.46	7.15	6.76	6.38	6.44	6.01	5.85	5.75	5.33	4.98	4.54	4.21	3.77	3.46	3.21	2.98
x/m mg/g	8.00	9.54	10.54	11.54	12.09	12.54	12.85	13.24	13.62	13.56	13.99	14.15	14.25	14.67	15.02	15.46	15.79	16.23	16.54	16.79	17.02
R%	0.4	0.475	0.527	0.577	0.604	0.327	0.642	0.662	0.681	0.678	0.699	0.707	0.712	0.733	0.751	0.773	0.789	0.811	0.827	0.839	0.851

C=35mg/l m=0.1g V=100ml

Temps min	2	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	360	420	1020	1200	1440	1560	1680	1800
DO	0.405	0.37	0.303	0.301	0.28	0.275	0.27	0.26	0.246	0.242	13.53	0.238	0.189	0.182	0.174	0.169	0.162	0.158	0.137	0.134	0.13
Ct mg/l	27.6	25.5	20.64	20.49	19.46	18.72	18.38	17.98	16.77	16.48	13.55	13.24	12.86	12.44	11.87	11.5	11.08	10.77	9.36	9.16	8.88
x/m (mg/g)	7.4	9.5	14.36	14.51	15.54	16.15	16.62	17.02	18.23	18.52	21.45	21.76	22.14	22.56	23.13	23.15	23.92	24.23	25.64	25.84	26.12
R%	0.21	0.27	0.410	0.414	0.444	0.461	0.474	0.486	0.521	0.529	0.612	0.621	0.632	0.644	0.660	0.671	0.683	0.692	0.732	0.738	0.746

C=50 m=0.1g V=100ml

Temps min	2	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	360	420	1020	1200	1440	1560	1680	1800
DO	0.508	0.502	0.46	0.44	0.43	0.429	0.389	0.381	0.355	0.316	0.286	0.271	0.246	0.23	0.222	0.182	0.179	0.172	0.169	0.164	0.161
Ct mg/l	34.62	34.2	31.5	30.51	29.75	29.25	26.5	25.97	24.2	21.5	19.5	18.5	16.8	15.75	15.13	12.44	12.2	11.76	11.54	11.2	10.98
x/m (mg/g)	15.38	15.8	18.5	19.48	20.25	20.75	23.5	24.03	25.8	28.5	30.5	31.5	33.2	34.25	34.87	37.56	37.8	38.24	38.46	38.8	39.02
R%	0.307	0.318	0.37	0.389	0.405	0.415	0.47	0.48	0.516	0.57	0.61	0.63	0.664	0.685	0.697	0.751	0.756	0.764	0.769	0.776	0.780

Pour BM

C=15mg/l m=0.1g V=100ml

Temps min	2	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	360	420	1020	1200	1440	1560	1680	1800
DO	1.458	1.423	1.389	1.223	1.205	1.131	1.008	0.969	0.938	0.907	0.882	0.853	0.835	0.824	0.806	0.803	0.782	0.711	0.706	0.704	0.684
Ct mg/l	14.5	14.15	13.81	12.16	11.98	11.25	10.02	9.64	9.33	9.02	8.77	8.48	8.31	8.2	8.02	7.99	7.78	7.07	7.02	7	6.8
x/m (mg/g)	0.5	0.85	1.19	2.84	3.02	3.75	4.98	5.36	5.67	5.98	6.23	6.52	6.69	6.8	6.98	7.01	7.22	7.93	7.98	8	8.2
R%	0.033	0.056	0.079	0.189	0.201	0.25	0.332	0.357	0.378	0.398	0.415	0.434	0.446	0.453	0.465	0.467	0.481	0.528	0.532	0.533	0.546

C=20mg/l m=0.1g V=100ml

Temps min	2	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	360	420	1020	1200	1440	1560	1680	1800
DO	1.659	1.55	1.485	1.376	1.287	1.239	1.152	1.082	1.004	0.916	0.855	0.802	0.649	0.486	0.467	0.437	0.414	0.378	0.348	0.323	0.288
Ct mg/l	16.5	15.41	14.77	13.68	12.8	12.32	11.46	10.76	9.99	9.11	8.5	7.98	6.46	4.84	4.65	4.35	4.12	3.76	3.46	3.22	2.87
x/m (mg/g)	3.5	4.59	5.23	6.32	7.2	7.68	8.54	9.24	10.01	10.89	11.5	12.02	13.54	15.16	15.35	15.65	15.88	15.24	16.54	16.78	17.13
R%	0.175	0.229	0.261	0.316	0.360	0.384	0.427	0.462	0.5005	0.544	0.575	0.601	0.677	0.758	0.767	0.782	0.794	0.812	0.827	0.839	0.856

C=35mg/l m=0.1g V=100ml

Temps min	2	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	360	420	1020	1200	1440	1560	1680	1800
DO	2.766	2.645	2.116	1.967	1.764	1.433	1.364	1.292	1.171	1.091	0.910	0.819	0.749	0.563	0.467	0.458	0.38	0.313	0.303	0.289	0.288
Ct mg/l	27.5	26.3	21.04	19.56	17.54	14.25	13.56	12.85	11.65	10.85	9.05	8.15	7.45	5.6	4.65	4.56	3.78	3.12	3.02	2.88	2.87
x/m (mg/g)	7.5	8.7	13.96	15.44	17.46	20.75	21.44	22.15	23.35	24.15	25.95	26.85	27.55	29.4	30.35	30.44	31.22	31.88	31.98	32.12	32.13
R%	0.214	0.248	0.398	0.441	0.49	0.59	0.61	0.63	0.667	0.69	0.74	0.767	0.787	0.84	0.867	0.869	0.892	0.91	0.913	0.917	0.918

C=50mg/l m=0.1g V=100ml

Temps min	2	5	10	15	20	30	40	50	60	120	180	240	300	360	420	1020	1200	1440	1560	1680	1880
DO	4.30	3.971	3.492	2.984	2.565	2.481	0.29	1.985	1.889	1.423	1.081	0.779	0.657	0.556	0.505	0.501	0.477	0.452	0.413	0.39	0.326
Ct mg/l	42.75	39.48	34.72	29.67	25.5	24.67	22.89	19.74	18.78	14.15	10.75	7.75	6.54	5.53	5.02	4.99	4.75	4.5	4.11	3.88	3.25
x/m (mg/g)	7.25	10.52	15.28	20.33	24.5	25.33	27.11	30.26	31.22	35.85	39.25	42.25	43.46	44.47	44.98	45.01	45.25	45.50	45.89	46.12	46.75
R%	0.145	0.210	0.305	0.406	0.49	0.506	0.542	0.605	0.625	0.717	0.785	0.845	0.869	0.889	0.899	0.902	0.905	0.91	0.917	0.922	0.935

Le tableau de l'isotherme

Pour NET

C=15mg/l

M(g)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.1
DO	0.199	0.180	0.142	0.103	0.066	0.056	0.043
$C_{t\,(}$mg/l)	13.58	12.27	9.66	7.07	4.508	3.81	2.98
X/m (mg/g)	28.4	27.23	26.7	26.4	20.98	13.98	12.28
Log C	1.133	1.088	0.985	0.85	0.654	0.581	0.475
Log X/m	1.48	1.435	1.65	1.447	1.13	0.961	0.758

C=20mg/l

M(g)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.1
DO	0.152	0.1179	0.1089	0.0939	0.6759	0.0729	0.0601
$C_{t\,(}$mg/l)	10.4	8.027	7.41	6.39	5.17	4.965	4.092
X/m (mg/g)	192	119.73	62.95	45.36	29.66	18.79	15.908
Log C	1.017	0.904	0.869	0.805	0.713	0.695	0.612
Log X/m	2.28	2.078	1.798	1.656	1.472	1.274	1.201

C=35mg/l

M(g)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.1
DO	0.2399	0.1339	0.127	0.106	0.1039	0.0743	0.0539
$C_{t\,(}$mg/l)	16.32	9.11	8.707	7.27	7.07	5.06	3.67
X/m (mg/g)	373.6	258.9	131.46	92.43	55.86	37.42	31.33
Log C	1.212	0.959	0.939	0.861	0.849	0.704	0.564
Log X/m	2.572	2.413	2.118	1.965	1.747	1.573	1.435

C=50mg/l

M(g)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.1
DO	0.327	0.233	0.2199	0.0699	0.0629	0.048	0.0358
$C_{t\,(}$mg/l)	22.31	15.91	14.96	4.76	4.285	3.27	2.44
X/m (mg/g)	553.8	340.9	175.2	150.8	91.43	58.41	47.56
Log C	1.348	1.201	1.174	0.677	0.631	0.514	0.387
Log X/m	2.743	2.532	2.243	2.178	1.961	1.766	1.677

Pour BM

C=15mg/l

M(g)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.1
DO	1.487	1.2373	1.1548	0.836	0.7056	0.683	0.6645
$C_{t\,(}$mg/l)	14.79	12.30	11.48	8.317	7.014	6.792	6.606
X/m (mg/g)	31.62	27	24.6	22.27	15.97	10.26	8.39
Log C	1.17	1.09	1.06	0.92	0.846	0.832	0.82
Log X/m	1.5	1.431	1.39	1.347	1.203	1.11	1.1

C=20mg/l

M(g)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.1
DO	1.558	1.4878	1.3882	1.3259	1.0106	0.9828	0.8366
$C_{t\,(}$mg/l)	15.48	14.79	13.80	13.18	10.046	9.77	8.317
X/m (mg/g)	90.4	52.1	31	22.73	19.908	12.78	11.68
Log C	1.19	1.17	1.14	1.12	1.002	0.99	0.92
Log X/m	1.956	1.716	1.491	1.356	1.299	1.106	1.067

C=35mg/l

M(g)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.1
DO	1.938	1.826	1.522	1.447	1.325	1.265	1.237
$C_{t\,(}$mg/l)	19.27	18.155	15.135	14.387	13.18	12.58	12.30
X/m (mg/g)	314.6	164.5	99.32	68.71	43.64	28.025	22.7
Log C	1.285	1.259	1.18	1.158	1.12	1.1	1.09
Log X/m	2.497	2.216	1.997	1.837	1.639	1.447	1.356

C=50mg/l

M(g)	0.005	0.01	0.02	0.03	0.05	0.08	0.1
DO	2.385	1.723	0.88	0.866	0.85	0.736	0.565
$C_{t\,(}$mg/l)	23.71	17.13	8.77	8.609	8.452	7.325	5.623
X/m (mg/g)	525.8	328.7	206.15	137.97	83.09	53.34	44.37
Log C	1.375	1.234	0.943	0.935	0.927	0.865	0.75
Log X/m	2.72	2.516	2.314	2.139	1.919	1.727	1.647