



## Mémoire de Master

Présenté par :

- AFTIS Sarra
- DJERROUD Hadja Ourdia

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Chimie*

*Spécialité : Chimie analytique*

**Thème :**

**Elimination d'un polluant organique –nitrophénol- par  
adsorption sur un matériau siliceux mésoporeux**

**Soutenu le : 12/10/2020**

**Devant le jury composé de :**

Nom & Prénom	Département d'affiliation	Qualité
Mme MEDDOURI Melaaz	Chimie	Présidente
Mme AMRAOUI Nour Elyakine	Chimie	Examinatrice
Mme BRAHMI Daouia	Chimie	Encadreur

## REMERCIEMENT

*On remercie Dieu en premier lieu, qu'il soit loué de nous avoir donné la force et la patience nécessaires pour accomplir ce travail.*

*Nos remerciements les plus vifs et sincères vont à nos parents pour leur soutien permanent.*

*On tient à remercier Mme Brahmi- Ingrachen. Daouia pour son encadrement chaleureux et ses*

*remarques éclairées, pour sa disponibilité et pour nous avoir motivé et soutenu, et permis de mener à bien ce travail dans de bonnes conditions.*

*Nos sincères remerciement a Mme Meddouri Melaaz, pour l'honneur qu'elle nous a fait de présider ce jury.*

*Toute notre respectueuse reconnaissance à Mme Amraoui Nour Eykine d'avoir accepté d'examiner ce mémoire et de faire partie de ce jury.*

*Aussi, un grand merci pour tous les enseignants du département de chimie qui nous ont tant appris.*

*On tient aussi à remercier tout nos camarades avec qui ont à passer de merveilleuses années.*

*Enfin nos remerciement a tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail*



## ***DEDICACE***

*Je dédie ce travail a :*

*Ma très chère mère et Mon très cher père qui m'ont  
toujours soutenu et encouragé dans les moments  
difficiles je leurs témoigne ici affection et gratitude.*

*A ma Famille ;*

*Ma grande sœur : Hafida*

*A mon cher frère : Fateh*

*Ma grande mère : tayakout*

*A mon binôme : wardoch*

*A mes chers amis(e) : Sabrina, Drifa , Souad, Khiereddin, Toufik.*

*A tous ceux qui tiennent une place dans mon cœur,  
avec les quels je partage les mots tendresse, amour et  
amitié.*

*Toute la promotion chimie analytique2019/2020*



## **DEDICACE**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes très chers parents.*

*A la mémoire de ma grand-mère Hlima.*

*A ma chère grand-mère Razika.*

*A mes chères sœurs : Sissa, Fifa Et Djedji.*

*A mes chers frères : Larbi, Younes, Slimane, Mokrane, Menad et Zidane.*

*A mes cousins et cousines.*

*A mes chères amis(e) : Amel, Nadira, Kahina, Sabrina, Jasmine et Amine.*

*A mon binôme Sara.*

*A tous ceux qui tiennent une place dans mon cœur,  
avec les quels je partage les mots tendresse, amour et  
amitié.*



**HADJA OURDIA**

# **Liste des abréviations**

## Liste des abréviations

- ATD:** Analyse Thermique Différentielle.
- ATG:** Analyse Thermogravimétrique.
- BET:** Brunauer, Emmet et Teller.
- CAG :** Charbon Actif Granulaire.
- CAP:** Charbon Actif en Poudre.
- CNAs:** Composés Nitroaromatiques.
- COT:** Carbone Total Organique.
- CTAB :** Cetyltrimethylammonium Bromide.
- DBO:** Demande Biochimique en Oxygène.
- DCO:** Demande Chimique en Oxygène.
- DDA:** Dodecylamine.
- DMDDA:** Dimethyldodecylamine.
- DRX:** Diffraction des rayons X.
- ERI:** Eux Résiduaire Industrielle.
- HA :** Hydrocarbure Aromatique.
- HAP:** Hydrocarbures Aromatiques Polynucléaires.
- IUPAC:** Union International de Chimie pure et Appliquée.
- KJ:** kilo joule.
- MCM:** Mobil Composition Matter.
- MEB :** Microscopie Electronique à Balayage.
- MES:** Matières en Suspension.
- NT:** Azote Total.
- OI:** Osmose Inverse.
- PCB:** polychlorobiphényle.
- pH:** Potentiel Hydrogéné.
- PNP :** Paranitrophénol.
- POA :** Procédés d'Oxydation Avancée.
- R<sup>2</sup>:** Coefficient de corrélation.
- THM:** Trihalométhanes.
- USEPA:** Agence de Protection Environnementale des états unis.
- UV:** Ultraviolet.

## **Liste des figures**

## Liste des figures

### Partie 1 : Généralités sur la pollution de l'eau

<b>Figure 1.</b> : Illustration schématique de cycle de l'eau .....	3
<b>Figure 2.</b> : Cycle de l'azote .....	7

### Partie 2 : Polluants organiques

<b>Figure 3.</b> : Exemples de colorants naturels.....	18
<b>Figure 4.</b> : Structure d'un colorant azoïque.....	19
<b>Figure 5.</b> : Structure d'un anthraquinonique.....	19
<b>Figure 6.</b> : Structure d'un colorant triphénylméthane.....	20
<b>Figure 7.</b> : Structure d'un colorant indigoïdes.....	20
<b>Figure 8.</b> : Structure d'un colorant xanthéne.....	20
<b>Figure 9.</b> : Structure d'un colorant phtalocyanine.....	21
<b>Figure 10.</b> : Structure des colorants nitrés et nitrosés.....	21
<b>Figure 11.</b> : Acide orange 7.....	22
<b>Figure 12.</b> : Bleu de méthylène.....	22
<b>Figure 13.</b> : Structure de colorant direct.....	23
<b>Figure 14.</b> : Exemple de colorant à mordants.....	23
<b>Figure 15.</b> : Exemple d'eutrophisation.....	25
<b>Figure 16.</b> : Structure chimique du 4-nitrophénol.....	28

### Partie 3 : Techniques de dépollution de l'eau

<b>Figure 17.</b> : Principe de chromatographie d'échange d'ion.....	30
<b>figure 18.</b> : Principe de l'électrolyse.....	31
<b>figure 19.</b> : Procédé d'osmose inverse.....	31
<b>figure 20.</b> : Mécanisme de coagulation-précipitation.....	32
<b>figure 21.</b> : Mécanisme réactionnel a la surface de la particule d'un semi-conducteur (TiO <sub>2</sub> ). .....	33
<b>figure 22.</b> : Phénomène d'adsorption.....	34
<b>figure 23.</b> : Schéma du mécanisme de transfert de matière dans le procédé d'adsorption.....	37
<b>figure 24.</b> : Facteurs influençant adsorption.....	38
<b>figure 25.</b> : Différents types d'isothermes d'adsorption.....	40
<b>figure 26.</b> : Modél d'adsorption de langmuir.....	42
<b>figure 27.</b> : Modèle d'adsorption de multicouches.....	43



#### Partie 4 : Travaux réalisés

<b>Figure 28.:</b> Diffractogrammes de rayons x des matériaux MCM-41 modifiés par DMDDA.	52
<b>Figure 29. :</b> Isothermes d'adsorption-désorption d'azote à 77k des matériaux MCM-41 modifiés par DMDDA.....	53
<b>Figure 30. :</b> Analyse thermogravimétrique comparative des matériaux MCM-41 modifiés par DMDDA.....	55
<b>Figure 31. :</b> Photos MEB de MCM-41 parent et aminé. ....	55
<b>Figure 32. :</b> Cinétique d'élimination du pnp par DMDDA-41B. ....	56
<b>Figure 33. :</b> Modèle du pseudo-premier ordre. ....	56
<b>Figure 34. :</b> Modèle du pseudo-second ordre.....	56
<b>Figure 35. :</b> Taux d'élimination du PNP sur DMDDA-41B en fonction du pH, $c_0 = 100$ mg/l. ....	57
<b>Figure 36. :</b> Adsorption du PNP sur différents matériaux MCM-41.....	57

# **Liste des tableaux**

# Liste des tableaux

## Partie 1 : Généralités sur la pollution de l'eau

**Tableau 1** : les différents types de maladies liés à l'eau polluée et les effets sur la santé..... 12

## Partie 2 : Polluants organiques

**Tableau 2** : groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante ..... 17

**Tableau 3** : les voies d'exposition possibles par le 4-NP et leurs conséquences sur la santé. 26

**Tableau 4** : les nitrophénols les plus communs; leurs utilisations et leurs origines. .... 27

**Tableau 5** : propriétés physico-chimiques du 4-nitrophénol..... 28

## Partie 3 : Techniques de dépollution de l'eau

**Tableau 6** : les critères de distinction entre la physisorption et la chimisorption ..... 36

## Partie 4 : Travaux réalisés

**Tableau 7** : caractéristiques physico-chimiques de CAP et CAG..... 50

**Tableau 8** : comparaison des données de l'adsorption-désorption d'azote à 77k de MCM-41 et des matériaux modifiés..... 54

**Tableau 9** : paramètres des deux modèles cinétiques appliqués à l'élimination du PNP par DMDDA-41B..... 56

**Tableau 10** : valeurs des paramètres de langmuir et freundlich pour l'adsorption du PNP par les différents matériaux. .... 58

**Tableau 11** : propriétés de l'adsorbant et des adsorbats ..... 60

# **Sommaire**

**Liste d'abréviations**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

## **Sommaire**

**Introduction générale** ..... 1

### **Partie théorique**

#### **Partie 1 : généralités sur la pollution de l'eau**

1. Introduction ..... 3

2. Cycle de l'eau ..... 3

3. Définition ..... 4

4. Origine des polluants et types de pollutions ..... 4

4.1. Pollution physique ..... 4

4.1.1. Pollution mécanique ..... 4

4.1.2. Pollution thermique ..... 4

4.2. Pollution radioactive ..... 5

4.2.1. Pollution organique ..... 5

4.2.2. Pollution minérale ..... 6

4.3. Pollution microbiologique ..... 7

5. Paramètres de mesure de la pollution ..... 7

5.1. Les paramètres physiques ..... 7

5.1.1. Température ..... 7

5.1.2. Potentiel d'hydrogène ..... 8

5.1.3. Turbidité ..... 8

5.1.4. Matières en suspension ..... 8

5.2. Les paramètres organoleptiques ..... 8

5.2.1. La couleur ..... 8

5.2.2. Les odeurs ..... 8

5.3.les paramètres chimiques .....	8
5.3.1. Demande biochimique en oxygène (DBO) .....	8
5.3.2. Demande chimique en oxygène (DCO) .....	9
5.3.3. Carbone total organique (COT) .....	9
5.3.4. Azote total (Nt).....	9
5.4. Autres paramètres .....	9
5.4.1. Micropolluants .....	9
6. Les principaux polluants .....	10
6.1. Les polluants organiques .....	10
6.2. Les polluants inorganiques .....	10
7. Conséquence de la pollution de l'eau .....	11
7.1. Effets sanitaires .....	11
7.2. Effets sur l'agriculture .....	12
7.3. Effets au niveau des ressources environnementales.....	13
7.4. Effets sur l'économie .....	14

## **Partie 2 : polluants organiques**

1. Introduction .....	14
2. Les polluants organiques .....	15
3. Quelques familles des composés organiques .....	15
4. Toxicité .....	15
5. Généralités sur les colorants .....	16
6. Origine de la couleur .....	16
7. Classification des colorants .....	17
7.1. Classification technologique .....	17
7.2. Classification technique .....	17
7.3classification chimique .....	19
7.4. Classification tinctoriale .....	21
8. Utilisation des colorants .....	24

9. Aspect toxicologique .....	24
9.1. Couleur, turbidité, odeur.....	24
9.2. Sous-oxygénation .....	24
9.3. Eutrophisation .....	25
10. Généralités sur nitrophénol .....	25
11. Toxicité .....	26
12. Le para-nitrophenol .....	28
13. Propriétés physico-chimiques du 4-nitrophénol .....	28
14 utilisation .....	29

### **Partie 3 :Techniques de dépollution de l'eau**

1. Les techniques de dépollution des eaux .....	30
1.1. L'échange d'ions .....	30
1.2. L'électrolyse .....	31
1.3. Osmose inverse .....	31
1.4. La coagulation-précipitation .....	32
1.5. Les procédés d'oxydation avancée.....	32
1.5.1. La photocatalyse hétérogène .....	33
1.6. L'adsorption .....	33
2. Définition de l'adsorption .....	34
3. Les types d'adsorption .....	35
3.1. Adsorption physique .....	35
3.2. Adsorption chimique .....	35
4. Description du mécanisme d'adsorption .....	36
5. Nature du mode d'adsorption .....	37
6. Les facteurs influençant l'adsorption .....	38
6.1. Porosité.....	38
6.2. Polarité .....	38

6.3. Nature de l'adsorbat .....	39
7. Isothermes d'adsorption .....	39
7.1. Classification des isothermes d'adsorption .....	39
7.1.1. Classification de Giles et Coll .....	39
7. 2. Modèles d'isothermes d'adsorption .....	41
7.2.1. Modèle de Langmuir .....	41
7.2.2. Modèle de Freundlich .....	42
7.2.3. Isotherme de BET .....	43
7.2.4. Modèle d'elovich .....	43
7.2.5. Isotherme de Temkin .....	44
7.2.6. L'isotherme de Dubinin–Radushkevich .....	44
7.2.9. Isotherme de Langmuir–Freundlich .....	45
7.3. La cinétique d'adsorption .....	46
7.3.1. Modèle cinétiques .....	46
7.3.1.1. Modèle de pseudo premier ordre .....	46
7.3.1.2. Modèle pseudo-second ordre .....	46
7.3.1.3. Modèle de la diffusion intra particule .....	47
8. Les différents types d'adsorbants .....	47
8.1. Gels de silice .....	48
8.2. Charbon actif .....	48
8.3. Argiles .....	48
9. Critères du choix d'un adsorbant .....	48
10. Les applications de l'adsorption .....	49
Partie 4: Travaux réalisés	
Travaux réalisés.....	50
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>62</b>
<b>Références bibliographiques</b>	



# **Introduction générale**

## Introduction

Le problème de la pollution de l'environnement reste toujours d'actualité car de nombreuses activités industrielles continuent à générer des polluants divers, notamment certains produits chimiques d'origine industrielle (hydrocarbures, métaux lourds ...) ou agricole (pesticides, engrais,...) susceptibles de créer des nuisances importantes.

Les effluents industriels et les polluants résultant de l'utilisation intensive de fertilisants, de pesticides, de produits sanitaires, agricoles, pharmaceutiques constituent les causes majeures de pollution de l'environnement.

Ces polluants possèdent la capacité de se concentrer le long de la chaîne alimentaire et de s'accumuler dans certains organes du corps humain. Il est donc indispensable d'éliminer ces éléments toxiques présents dans les différents effluents industriels ou de réduire leur quantité en dessous des seuils admissibles définis par les normes.

Les pesticides ainsi que les teintures et les produits pharmaceutiques contiennent aussi des produits organiques très dangereux qui rentrent dans leur fabrication ou qu'ils se forment après leur dégradation telle que le 4-nitrophénol. L'Agence de Protection Environnementale des Etats Unis (USEPA) a classé le paranitrophénol dans la première classe des produits dangereux, il pénètre dans l'environnement par les eaux usées et les eaux agricoles. De plus il est soluble, stable dans l'eau donc il peut affecter les sols. Le 4-NP a un effet nuisible sur la santé publique; il est mutagène et cancérogène et il s'accumule dans la chaîne alimentaire.

De nombreuses méthodes et techniques de dépollution sont développées au cours de ces dernières années. Parmi ces techniques, il y'a lieu de citer les procédés de précipitation chimique, la floculation, l'échange d'ions, l'électrolyse, les procédés membranaires et l'adsorption. La méthode d'élimination des polluants par adsorption présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre mais l'inconvénient d'être chère à cause des adsorbants utilisés. C'est pour cette raison qu'un grand nombre de travaux récents sont consacrés à la recherche d'adsorbants naturels, peu onéreux et efficaces pour l'élimination des polluants

Divers chercheurs ont ainsi montré qu'une variété de matériaux d'origine naturelle ou biologique avait l'aptitude de fixer des quantités importantes en métaux lourds et en composés organiques à partir de solutions. Les solides mésoporeux ordonnés sont très largement étudiés par de nombreux chercheurs de différents horizons pour des applications variées dont notamment l'adsorption et la catalyse. Des différents matériaux mésoporeux tel que : MCM-41 et MCM 48, ont été fonctionnalisés par divers groupements pour l'adsorption des ions métalliques et divers polluants organiques.

## Introduction générale

---

L'objectif essentiel de notre travail consiste à expérimenter de nouvelles conditions de sorption d'un composé organique (nitrophénol) sur des matériaux mésoporeux élaborés à partir des sous-produits siliceux du kaolin Algérien, vu la crise sanitaire de COVID19, on n'a pas pu réaliser cet objectif, donc on s'est limité à la synthèse bibliographique.

Ce mémoire comporte plusieurs parties:

La première partie présente un aperçu sur la pollution des eaux et des sols par les colorants.

Dans la deuxième partie nous présenterons l'aspect des colorants et leur impact sur l'environnement

La troisième partie est consacrée à la description de quelques techniques de dépollution telle que l'adsorption

A la dernière partie, nous donnerons des résumés de quelques travaux antérieurs en relation avec notre thème.

Et nous terminerons par une conclusion générale.

# **Partie 1 : Généralités sur la pollution de l'eau**

## 1. Introduction

La pollution constitue un sujet majeur de santé publique et de l'environnement. Le problème de la pollution des eaux représente sans aucun doute un des aspects les plus inquiétant de la dégradation du milieu naturel et donc de son équilibre. Les rejets urbain, industriel et agricole de plus en plus importants, constituent un danger croissant pour le milieu naturel, leurs charges en matières en suspension et en substances dissoutes souvent toxiques altèrent et dégradent la qualité des eaux de surface, des eaux du littoral et des eaux souterraines. En Algérie, le développement industriel, la croissance démographique et la grande densité des zones urbaines contribuent à la pollution des ressources naturelles [1].

## 2. Cycle de l'eau

L'eau recouvre 72 % de la surface de la terre, elle est indispensable au maintien de la vie. Les océans représentent le réservoir le plus important, avec un pourcentage de 97.2%, et seul 0,63% de cette eau est disponible dans les nappes souterraines qu'on appelle eau douce. Les lacs et les rivières n'en représentent que 0,02%. L'eau glacée ne représente, pour sa part, que 2,15% de l'eau potable [2].



Figure.1. : Illustration schématique de cycle de l'eau [2].

### 3. Définition

La pollution de l'eau indique la présence des substances chimiques, matières solubles ou non solubles, organismes, déchets industriels, des ordures ménagères directes ou indirectes dans l'eau, qui modifient les qualités organoleptiques, les compositions chimiques et les propriétés physiques de l'eau. Elle entraîne des caractères gênants ou nuisibles pour les usages humains et l'espèce aquatique, ainsi que la flore et la faune terrestre. Cette dernière est principalement liée aux activités humaines ou puisse avoir une origine entièrement naturelle (éruption volcanique) [3].

### 4. Origine des polluants et types de pollutions

On distingue trois types de pollution

#### 4.1. Pollution physique

C'est une pollution due aux agents physiques (tout élément solide entraîné par l'eau). On peut la répartir en trois classes: mécanique, thermique et radioactive [4]

##### 4.1.1. Pollution mécanique

Elle résulte des décharges de déchets et de particules solides apportés par les eaux résiduaires industrielles (ERI), ainsi que les eaux de ruissellement. Ces polluants sont soit les éléments grossiers soit du sable ou bien les matières en suspension MES [4].

##### 4.1.2. Pollution thermique

Les eaux rejetées par les usines utilisant un circuit de refroidissement de certaines installations (centrales thermiques, nucléaires, raffineries, aciéries..); ont une température de l'ordre de (70 à 80) °C. Elle diminue jusqu' à (40 à 45) °C lorsqu'elle contacte les eaux des milieux aquatiques entraînant un réchauffement de l'eau, qui influe sur la solubilité de l'oxygène [4].

En outre tout changement de température cause des effets significatifs sur la survie des organismes aquatiques. Un abaissement important de température ralenti la plupart des réactions chimiques vitales voire les arrêter. Au contraire, des augmentations de température peuvent tuer certaines espèces, mais également

favoriser le développement d'autres organismes causant ainsi un déséquilibre écologique [5].

### 4.2. Pollution radioactive

C'est celle occasionnée par une éventuelle radioactivité artificielle des rejets qui trouvent leur source dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ces formes (installations et centrales d'exploitation de mine d'uranium, traitement des déchets radioactifs). Les éléments radioactifs s'incorporent dans les molécules des organismes vivants. Plus on s'élève dans la chaîne alimentaire plus les organismes sont sensibles aux rayonnements [5].

Elle résulte des rejets chimiques. La pollution chimique des eaux est regroupée dans deux catégories :

- Organiques (hydrocarbures, pesticides, détergents, phénols..) ;
- Minérales (métaux lourds, cyanure, azote, phosphore...)

#### 4.2.1. Pollution organique

C'est les effluents chargés de matières organiques fermentescibles (biodégradables), fournis par les industries alimentaires et agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries...). Ils provoquent une consommation d'oxygène dissous de ces eaux, entraînant la mort des poissons par asphyxie et le développement (dépôts de matières organiques au fonds des rivières) de fermentation anaérobie (putréfaction) génératrices de nuisances olfactives [6].

##### a.Hydrocarbures

La pollution par les hydrocarbures résulte de plusieurs activités liées à l'extraction du pétrole, à son transport et en aval à l'utilisation de produits finis (carburants et lubrifiants), ainsi qu'aux rejets effectués par les navires (marées noires). Les effets des hydrocarbures dans le milieu marin sont considérables. Ils dépendent largement de leur composition [6].

##### b.Phénols

Ils désignent un ensemble de composés hydroxylés du benzène. La présence du phénol dans l'eau a pour origine les polluants industriels (usine chimique, cokeries, industries pétrochimique, raffineries...), ainsi que les revêtements bitumeux des

canalisations et des réservoirs, la décomposition des produits végétaux et la dégradation des pesticides. Ces produits s'oxydent faiblement, se fixent peu, se filtrent facilement et ils sont souvent biodégradables; alors ils ne se trouvent qu'en faible quantité.

Leur inconvénient principal est qu'ils donnent à l'eau un goût extrêmement désagréable et très persistant marqué de chlorophénol lorsqu'ils sont en présence de chlore.

Les poissons, accumulent les phénols jusqu'à 30 mg/kg, ils sont alors impropres à la consommation. Les phénols peuvent être séparés des eaux résiduaires par extraction liquide-liquide, oxydé par le chlore ou l'ozone ou bien détruits par un traitement biologique [7].

### 4.2.2. Pollution minérale

#### a.Métaux lourds

La présence des métaux lourds dans l'eau, l'atmosphère et par conséquent la chaîne alimentaire est le cas le plus intéressant parmi les problèmes posés à la pollution. Par ordre décroissant de toxicité spécifique. Les métaux sont classés comme suit:  $Hg < Cr < Ti < Cu < Co < Ni < Pb < Zn$ .

Les métaux lourds sont susceptibles d'être métabolisés et concentrés par les organismes vivants et mis en circulation dans la chaîne alimentaire ou leur toxicité augmente. L'irréversibilité de cette pollution est préoccupante du fait qu'il est impossible de les récupérer, une fois dissipés dans la nature [8].

#### b.Pollution d'azote

Les activités industrielles, peuvent être à l'origine des rejets plus ou moins riches en azote (élément nutritif) issus des fabrications d'engrais, des cokeries, et des industries chimiques et agroalimentaires [5]. L'azote existe sous deux formes: la forme réduite qui regroupe l'azote ammoniacal ( $NH_3$  OU  $NH_4^+$ ) et l'azote organique (protéine, créatine, acide urique). Plus une forme oxydée en ions nitrites ( $NO_2^-$ ) et nitrates ( $NO_3^-$ ).



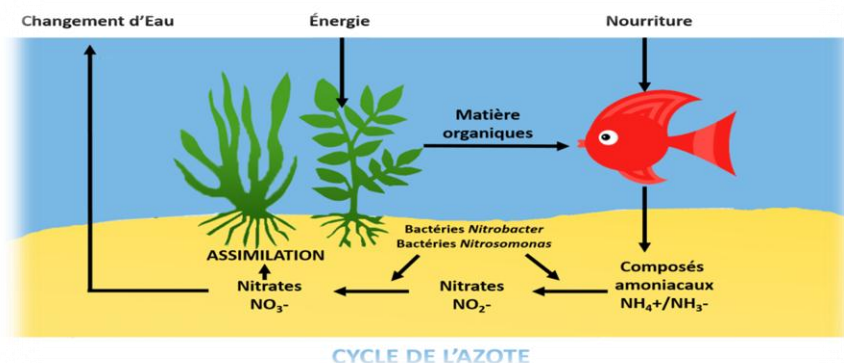


Figure 2 : Cycle de l'azote [9].

### 4.3. Pollution microbiologique

L'eau peut contenir des microorganismes pathogènes (virus, bactéries, parasites) ils sont dangereux pour la santé humaine, et limitent donc les usages que l'on peut faire de l'eau (industrie, utilisation domestique...) [10].

## 5. Paramètres de mesure de la pollution

L'estimation de la pollution est un problème complexe et délicat, qui fait appel à des dosages et des tests de différents paramètres, servant à caractériser de manière globale et pertinente, le niveau de la pollution présente dans les effluents, parmi ces paramètres on cite les plus importants :

### 5.1. Les paramètres physiques

#### 5.1.1. Température

La température agit, comme un facteur physiologique, sur le métabolisme de croissance des microorganismes vivants dans l'eau. Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz (en particulier l'O<sub>2</sub>) dans l'eau, ainsi que la détermination du pH et la vitesse des réactions chimiques [11].

### 5.1.2. Potentiel d'hydrogène

Sa valeur caractérise un grand nombre d'équilibre physicochimique. La valeur du pH altère la croissance des microorganismes existant dans l'eau (leur gamme de croissance est comprise entre 5 et 9) [4].

### 5.1.3. Turbidité

Elle caractérise le degré de non transparence de l'eau, elle traduit la présence de MES [12].

### 5.1.4. Matières en suspension

Les matières en suspension (MES) comprennent toutes les matières minérales de type sable ou organiques de type mucilagineux, qui ne sont pas solubles dans l'eau. La teneur en matières en suspension est obtenue par la pesée après filtration ou centrifugation et séchage à 105°C. Elles sont exprimées en milligramme par litre (mg/l) [12].

## 5.2. Les paramètres organoleptiques

### 5.2.1. La couleur

La coloration due à la présence des matières organiques dissoutes ou des colloïdes par des composés chimiques solubles qui sont colorés [11].

### 5.2.2. Les odeurs

Les odeurs proviennent généralement des substances volatiles. Un changement anormal ou une apparition d'une odeur sont la caractéristique d'une dégradation de la qualité qui est souvent le précurseur d'une pollution. Les paramètres d'odeurs disposent d'une référence de qualité pour les eaux d'alimentation et les eaux brutes [11].

## 5.3. Les paramètres chimiques

### 5.3.1. Demande biochimique en oxygène (DBO)

La demande biochimique en oxygène (DBO) correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour dégrader, par oxydation et par l'intervention des bactéries aérobies, les

matières organiques de l'eau usée. Elle s'exprime en mg d'O<sub>2</sub>/l. Par convention la DBO5 est la valeur obtenue après cinq jours d'incubation à une température de 20°C. Plus la valeur de la DBO5 est faible, plus est meilleure la qualité de l'eau [13]

### 5.3.2. Demande chimique en oxygène (DCO)

C'est la mesure de la quantité d'oxygène nécessaire qui correspond à la quantité des matières oxydables par oxygène renfermé dans un effluent. Elles représentent la plus part des composés organiques (détergents, matières fécales). Elle est mesurée par la consommation d'oxygène par une solution de dichromate de potassium en milieu sulfurique en présence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure II (complexant des chlorures), à chaud pendant 2h [14].

### 5.3.3. Carbone total organique COT

Détermine des propriétés variables du carbone organique dissous et particulaire, du carbone organique provenant de substances volatils et du carbone minéral dissous. Sa mesure est réalisée par un analyseur de CO<sub>2</sub> à infrarouge après combustion catalytique à haute température de l'échantillon [14].

### 5.3.4. Azote total NT

Exprimé en mg/l, ce paramètre devient de plus en plus important. C'est la somme d'azote des formes réduites (organiques et ammoniacal) est appelé azote de KJELDAL et l'azote des formes oxydées (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) [4].

## 5.4. Autres paramètres

### 5.4.1. Micropolluants

Le terme micropolluant désigne un ensemble de substance qui, en raison de leur toxicité, de leur persistance et de leur bioaccumulation sont de nature à engendrer des nuisances même lorsqu'elles sont rejetées en très faibles quantités [15].

Les principaux micropolluants sont :

- Certains métaux lourds et métalloïdes (Cd, Pb, Cr, Cu, ...Hg);

- Composés phénoliques, organohalogéniques, organophosphorés, huiles minérales, hydrocarbures aromatiques polycycliques.
- Certains dérivés nitrés [4].

### 6. Les principaux polluants

Les rejets contenant des substances organiques sont à l'origine d'une consommation de l'oxygène présent dans le milieu récepteur et peuvent, s'ils sont trop abondants, entraîner la mortalité des poissons par asphyxie. La pollution organique présente également un impact sur la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.

#### 6.1. Les polluants organiques

Les polluants organiques sont les plus nombreux et les plus dangereux. Certaines de ces substances sont même cancérogènes ou mutagènes, d'où l'importance de les éliminer.

Ils peuvent être classés en phénols, hydrocarbures, colorants, détergents et pesticides, formant de loin, la première cause de pollution des ressources en eaux. Ces matières organiques sont notamment issues des effluents domestiques (déjections animales et humaines, graisses, etc.) mais également des rejets industriels.

Elles provoquent l'appauvrissement en oxygène des milieux aquatiques, avec des effets bien évidents sur la survie de la faune. Ce sont aussi tous les déchets carbonés tels que la cellulose produite par les papeteries, le sucre ou le lactosérum des industries agroalimentaires. À l'inverse des matières en suspension (MES), elles constituent une nourriture de choix pour les micro-organismes de l'eau et provoquent leur prolifération. Les matières organiques se mettent alors à vider le milieu de son oxygène, ce qui s'avère fatal pour la vie aquatique et les micro-organismes vont le chercher dans les sulfates dissous ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), qu'elles réduisent en sulfure, qui se dégage sous forme de sulfure d'hydrogène, engendrant une odeur d'œufs pourris [16].

#### 6.2. Les polluants inorganiques

Les polluants inorganiques sont essentiellement des métaux lourds, généralement présents à de faibles concentrations, à l'exception du fer et du manganèse. Ils sont habituellement présents sous forme de sels métalliques peu solubles dans l'eau.

Les métaux lourds sont présents le plus souvent dans l'environnement sous forme de traces: mercure, plomb, cuivre, arsenic, nickel, zinc, cobalt, manganèse. Les plus toxiques d'entre eux sont le plomb, le cadmium et le mercure.

De nombreuses activités industrielles telles l'électronique, les traitements de surface, l'industrie chimique, utilisent des métaux d'où la possibilité de rejets dans l'environnement [17].

Généralement, l'implantation d'unités industrielles privilégie les sites à proximité des fleuves pour le transport de matières premières, pour l'alimentation en eau de refroidissement des installations et aussi pour les possibilités de rejets des effluents industriels. En effet l'eau a longtemps été l'exutoire qui permettait d'évacuer ces déchets, sans respect des normes [3].

## **7. Conséquence de la pollution de l'eau**

### **7.1. Effets sanitaires**

La pollution de l'eau peut avoir des conséquences sur la santé de l'homme. L'eau polluée peut transmettre un certain nombre de maladies : maladies hydriques, maladies aquatiques et maladies dues aux vecteurs de l'eau représentée dans le tableau1.

## Généralités sur la pollution de l'eau

**Tableau 1:** Les différents types de maladies liés à l'eau polluée et les effets sur la santé (3).

Type des Maladies	Maladies	Agents responsables	Mode de contamination	Effet sur la sante
<b>Hydrique</b>	Cholera	Bactéries vibro cholera	Consommation d'eau	-Diarrhées, vomissements graves, déshydratation. -Période d'incubation de 1 à 3 jours.
	Fièvres Typhoïdes	Bactéries salmonelles	Consommation d'eau ou d'aliments souillés	-Diarrhées graves, vomissement, douleurs abdominales. -Périodes d'incubation de 1 à 3 semaines.
<b>Maladies aquatiques</b>	Schistosomiase, Bilharziose	Vers parasitaire, famille des schistosomes	Contamination par les eaux de baignade (pénétration dans la peau)	-Douleurs abdominales, éruption cutanée, -Période d'incubation de 2 à 6 semaines (schistosomiase) et 5 à 15 jours (bilharziose)
<b>Maladies dues aux vecteurs de l'eau</b>	Paludisme	virus	Piqûre de moustique	-Fièvre, anémie. -Période d'incubation de 7 à 14 jours

### 7.2. Effets sur l'agriculture

Les activités agricoles peuvent influencer sur la pollution de l'eau. L'utilisation des eaux usées en agriculture peut avoir des impacts positifs ou négatifs. Les eaux usées, surtout les eaux usées domestiques, contiennent souvent des substances nutritives (composés azotés et phosphorés) qui sont indispensables pour les plantes. Elles constituent parfois la seule source d'eau pendant la saison de culture et elles sont utilisées aussi pour l'irrigation. La

présence de ces éléments nutritifs peut remplacer l'utilisation des engrais et rendre le sol fertile.

En revanche, l'utilisation des eaux usées industrielles en irrigation peut entraîner des risques graves pour l'agriculture : contamination des produits et dégradation de la fertilité des sols. Ces eaux contiennent des impuretés diverses comme des substances chimiques très toxiques et mortelles (métaux lourds, solvants organiques, hydrocarbures, éléments radioactifs).

Ainsi, l'irrigation par les eaux usées industrielles apporte des risques sur la santé des agriculteurs et des consommateurs [3].

### 7.3. Effets au niveau des ressources environnementales

Le déversement incontrôlé des eaux usées dans le milieu naturel peut entraîner une dégradation conséquente de l'écosystème. Ce changement de l'écosystème entraîne non seulement des impacts négatifs aux ressources vivantes du milieu mais aussi sur l'équilibre global du système environnemental. En général, le mauvais assainissement est une source majeure de la pollution des eaux naturelles (rivière, fleuve, lac, eau souterraine). Cette pollution résulte souvent d'un apport trop riche en substances nutritives ou toxiques.

Grace à ces substances nutritives, on observe parfois une forte prolifération d'algues dans le milieu. Ce phénomène s'intensifie surtout dans les eaux immobiles, notamment dans les lacs profonds. Cet état se traduit par l'accumulation des algues et des bactéries aérobies, qui absorbent l'oxygène présent dans l'eau et provoquent la mort de l'écosystème aquatique qui conduit à ce qu'on appelle « une zone morte » [18].

La présence des substances toxiques dans les effluents provoque des effets immédiats ou à long terme sur l'écosystème. Lorsque la substance est introduite brutalement à une concentration élevée dans le milieu, on observe un déséquilibre brusque de l'écosystème, avec mortalité massive d'un grand nombre d'organismes appartenant à des niveaux trophiques différents. Par contre, lorsque cette substance est introduite à faible dose mais prolongée dans le milieu, on observe alors une modification progressive de l'écosystème, qui pourra au final entraîner des changements aussi graves que la précédente. (18)

### **7.4. Effets sur l'économie**

Les conséquences de la pollution des ressources en eau sur l'économie d'une ville, d'une région ou d'un pays peuvent prendre plusieurs formes.

Les exemples sont nombreux de sites ayant fondé leur prospérité sur l'exploitation de riches ressources en eau et qui échouèrent durement d'une gestion inconsidérée de cette même ressource, estimée à tort comme inépuisable et souillable à volonté. Les sociétés économiquement développées ont fini par prendre conscience, ces dernières décennies, que l'augmentation continue des pollutions et des prélèvements d'eau risquaient de compromettre le développement futur [18].



## **Partie 2 : Les polluants organiques**

## 1. Introduction

D'une manière générale, les polluants organiques sont des substances chimiques aromatiques ou polyaromatiques rejetés dans l'environnement provenant de différentes sources, telles que, les déchets domestiques (ordures ménagères), agricoles ou industrielles. Les polluants organiques sont des substances toxiques et dangereuses pour l'homme, la faune et la flore qui se retrouve dans l'atmosphère et qui se mélange avec l'air sous forme de gaz vapeurs et aérosols ou dans l'eau sous forme de rejets d'eaux usées ou dans le sol sous forme de contaminants de nature et de taille variées. Il existe dans la nature plusieurs types des polluants organiques ; aromatiques (HA), polyaromatiques (HPA), polychlorobiphényle (PCB) et pesticides,....etc [19].

## 2. Les polluants organiques

Ce sont les substances composées de chaînes d'atomes de carbone qui constituent les êtres vivants. Le carbone (C) et l'oxygène (O) constituent 95 % de la matière organique : azote (N), phosphore (P), soufre (S) et hydrogène (H) environ 5 % ; les autres éléments sont en quantités infimes, introduites par l'homme dans l'environnement et qui provoquent des effets dommageables pour celui-ci (la faune, la flore) voire aussi pour la santé humaine [20].

## 3. Quelques familles des composés organiques [21]

- ✓ Les détergent ionique ou non.
- ✓ Les hydrocarbures halogénés et surtout les THM (trihalométhanés)
- ✓ Les phénols et leurs dérivés nitrés et chlorés.
- ✓ Les hydrocarbures aromatiques polynucléaires (HAP).
- ✓ Les pesticides, organochlorés, organophosphorés ou carbamates

## 4. Toxicité

La dispersion de composés organiques du type aromatique et plus précisément celles des dérivés phénoliques, les colorants, les pesticides et même les polluants médicamenteux dans les eaux ont un impact important sur la faune et la flore. Ces substances généralement biorécalcitrantes et /ou toxiques peuvent entraîner une contamination chez les êtres vivants. Certains de ces composés sont reconnus pour causer des effets cancérigènes et mutagènes, ou

peuvent interférer avec le système hormonal des êtres vivants (perturbateurs endocriniens) [22].

### 5. Généralités sur les colorants

Les colorants constituent un groupe très diversifié de composés ayant en commun la propriété de colorer d'une manière permanente les tissus, cuirs ou papiers. Tous ces colorants sont des composés aromatiques dont les électrons très délocalisés peuvent absorber la lumière pour certaines longueurs d'ondes. Les propriétés colorantes des composés organiques dépendent de leur structure et de leur composition chimique.

En général, les produits utilisés comme colorants sont des composés organiques insaturés et aromatiques. Les colorants rejetés par les industries textiles et les officines de nettoyage des vêtements, sont peu ou pas biodégradables et résistent bien aux traitements classiques d'épuration. Ils créent surtout une nuisance visuelle dans les eaux contaminées bien qu'un certain nombre d'entre eux est mutagène et cancérigène [23].

### 6. Origine de la couleur

C'est en 1876 que Witt remarqua que les substances colorées renfermaient tout un groupement caractéristique qu'il appela chromophore. Il constata qu'en introduisant un chromophore dans un hydrocarbure (composé non coloré) celui-ci se colorait. Il devient donc un chromogène; c'est à dire une molécule plus ou moins fortement colorée. Les chromophores sont des groupes portant des doubles liaisons. Le tableau 2 répertorie quelques chromophores identifiés par Witt. La présence d'un groupe chromophore est donc responsable de la coloration de la molécule. De plus si le chromogène possède un deuxième groupe appelé auxochromes alors il devient un colorant. Les groupes auxochromes permettent la fixation des colorants sur les substrats. En effet, l'auxochromes a la propriété d'augmenter sa coloration. Les groupes amine (-NH<sub>2</sub>) et hydroxyle (-OH) sont deux exemples d'auxochromes. Les chromophores sont donc des groupes aromatiques, conjugués, comportant des liaisons non liantes ou de complexes de métaux de transition [24].

**Tableau 2 :** Groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante [24].

Groupement chromophores	Groupement auxochromes
N=N : groupe azoïque	NH <sub>2</sub> : amino
N=O : groupe nitro	NHCH <sub>3</sub> : méthylamino
C=O : groupe cétonique ou carbonyle	N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> : diméthylamino
C=C : groupe vinyle	OH : hydroxyle
C=S : groupethiocarbone	OR : alkoxy
C=S : sulfure	Groupes donneurs d'électrons

## 7. classification des colorants

La classification des colorants la plus utilisée est celle du indice de couleur qui répertorie la majorité des colorants mis sur le marché. Elle comprend deux systèmes de classification

complémentaires : l'un utilise l'appellation usuelle (ou référence nombre) basé sur le mode d'utilisation et d'application du colorant, l'autre la structure chimique (numéros du color index).

### 7.1. Classification technologique ou (appellation usuelle)

La classification technologique permet à l'utilisateur de connaître le mode d'application du colorant, et donc ses domaines d'utilisation, ses propriétés (solubilité, affinité pour tel type de fibres ou matériaux, nature de la fixation ...). Il est souvent difficile de connaître la composition chimique des colorants car la confidentialité sur la composition chimique est généralement préservée. Cette classification comprend trois éléments [25] :

- ❖ Le nom générique de la classe d'application ;
- ❖ La couleur ;
- ❖ Le numéro d'ordre chronologique d'inscription au " colore index ".

### 7.2. Classification technique

Les colorants utilisés dans l'industrie textile contiennent habituellement des groupes acides sulfoniques qui leur confèrent une hydro-solubilité appropriée et qui permettent à la

molécule du colorant de se lier ioniquement aux sites chargés du réseau polymérique du tissu [26]. On peut classer les colorants organiques en deux catégories suivant leur synthèse :

- Colorants naturels
- Colorants synthétiques

### a. Les colorants naturels

Vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, les couleurs ne pouvaient être obtenues qu'à partir d'éléments naturels. Les premiers colorants connus sont ceux utilisés à Lascaux (France) ou à Altamira (Espagne), datant du Magdalénien. Ces colorants étaient des pigments minéraux : oxydes de fer pour les jaunes, les ocres et les rouges, oxydes de manganèse pour les bruns. Dès 1500 avant notre ère, les Égyptiens réalisent des teintures avec le safran (jaune), le pastel (bleu) et la garance (rouge) (Figure 3)[27].



**Figure 3** : Exemples de colorants naturels.

Dès lors, la majorité des colorants utilisés était d'origine végétale. Ils sont extraits des plantes, des arbres ou des lichens, ou bien d'origine animale, extraits des insectes comme le kermès ou des mollusques comme la pourpre [28].

### b.les colorants synthétiques

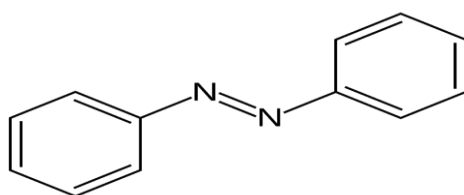
Les colorants synthétiques dominent aujourd'hui le marché surtout que leurs propriétés peuvent être précisément adaptées à leur utilisation. Tous ces colorants sont synthétisés principalement à partir des produits pétroliers, notamment du benzène et de ses dérivés (toluène, naphtalène, xylène et anthracène) [29]. Ils sont de plus en plus utilisés dans les industries de coloration et des textiles grâce à leur synthèse assez facile, à leur production rapide et à la variété de leurs couleurs comparées aux colorants naturels [30].

### 7.3 Classification chimique

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

#### a. Les colorants azoïques

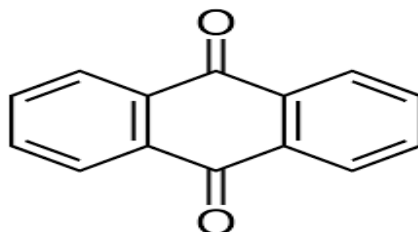
Les colorants azoïques sont caractérisés par la présence au sein de la molécule d'un groupement azoïque (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques. Cette catégorie de colorant est actuellement la plus répandue sur le plan de l'application, puisqu'ils représentent plus de 50% de la production mondiale de matières colorantes [31].



**Figure 4.** : Structure d'un colorant azoïque.

#### b. Les colorants anthraquinoniques

Les colorants anthraquinoniques sont d'un point de vue commercial, les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène, montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amino. Ces produits sont utilisés pour la coloration des fibres polyester, acétate et triacétate de cellulose [32].

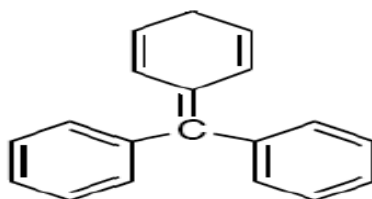


**Figure 5:** Structure d'un anthraquinonique.

#### c. Les colorants triphénylméthanés

Les colorants triphénylméthanés la plus ancienne classe de colorants synthétiques résultent du triphénylméthane, un hydrocarbure avec une structure qui possédant trois cycles

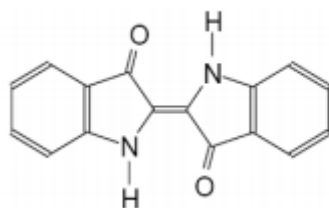
phényle liés à un carbone central. On retrouve cette combinaison dans un grand nombre de composés organiques colorés [33].



**Figure 6 :** Structure d'un colorant triphénylméthane.

### d. Les colorants indigoïdes

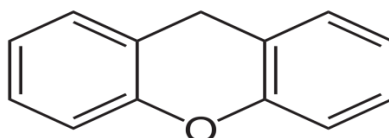
Les colorants indigoïdes tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues séléniés, soufrés et oxygénés du bleu indigo provoquent d'importants effets hypsochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise. Les colorants indigoïdes sont utilisés comme colorant en textile, comme additifs en produits pharmaceutiques, la confiserie, ainsi que dans des diagnostics médicales [34].



**Figure 7 :** Structure d'un colorant indigoïdes.

### e. Les colorants xanthines

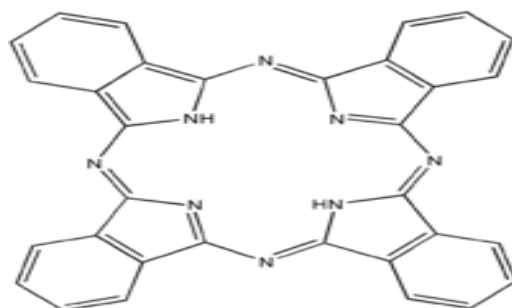
Ces colorants sont dotés d'une intense fluorescence. Le composé le plus connu est la fluorescéine. Peu utilisé en tant que teinture, le faculté de marqueurs lors d'accident maritime où des traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines est malgré tout bien établie [35].



**Figure 8 :** Structure d'un colorant xanthène.

### f.les phtalocyanines

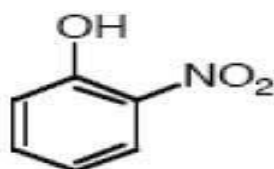
Ils ont une structure complexe basée sur l'atome central de cuivre. Les colorants de ce groupe sont obtenus par réaction du dicyanobenzène en présence d'un halogénure métallique (Cu, Ni, Co, Pt, etc.) [35].



**Figure 9** : Structure d'un colorant phtalocyanine.

### g.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 (-NO<sub>2</sub>) en position ortho d'un groupement électro-donneur (hydroxyle ou groupes aminés) [35].



**Figure 10** : Structure des colorants nitrés et nitrosés.

### 7.4. Classification tinctoriale

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 [36] : entre la partie acide sulfonique du colorant et les groupes amino des fibres textiles [36].



### a.les colorants acides ou anioniques

Ils sont solubles dans l'eau, grâce à leurs groupes sulfonates ou carboxylates 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 groupes amino des fibres textiles [36].

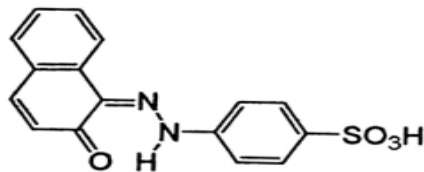


Figure 11 : Acide orange 7.

### b.les colorants basique ou cationiques

Ce sont des sels d'amines organiques, donc ayant une bonne solubilité dans l'eau. Les liaisons se font entre les sites cationiques des colorants et les sites anioniques des fibres. En passe 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 très résistantes [36].

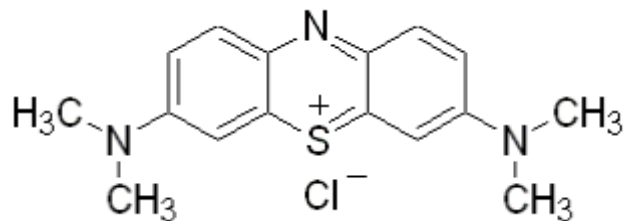


Figure 12 : Bleu de méthylène.

### c.les colorants directs

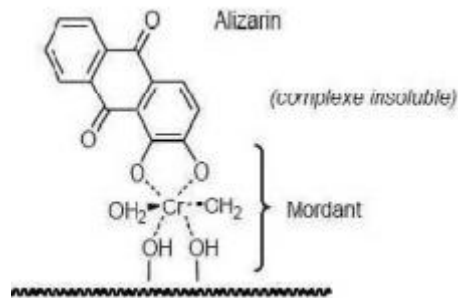
Ils sont capables de former des charges positives ou négatives électrostatiquement attirées par les charges des fibres. Ils se distinguent par leur affinité pour les fibres cellulosiques sans application de mordant, liée à la structure plane de leur molécule [36].



**Figure 13.** : Structure de colorant direct.

### d.les colorants à mordants

Ils 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 [36].



**Figure 14** : Exemple de colorant à mordants.

### e.Les colorants réactifs

Ces colorants contiennent des groupes chromophores issus essentiellement des familles azoïques, anthraquinonique et phtalocyanine. Leur appellation est liée à la présence d'une fonction chimique réactive, de type triazinique ou vinylsulfone assurant la formation d'une liaison covalente forte avec les fibres. Solubles dans l'eau, ils entrent de plus en plus fréquemment dans la teinture du coton et éventuellement dans celle de la laine et des polyamides [36].

### f.Les colorants dispersés

Ces colorants sont très peu solubles dans l'eau et sont appliqués sous forme d'une fine poudre dispersée dans le bain de teinture. Ils sont en mesure, lors d'une teinture à haute température, de diffuser dans les fibres synthétiques puis de s'y fixer [36].

### 8. Utilisation des colorants

Les applications des colorants sont nombreuses, dont voici quelques-unes essentielles [37] :

- en chimie, comme indicateur colorés pour suivre l'évolution d'une réaction chimique
- Ou d'un dosage ;
- dans l'imprimerie (encres) ;
  - comme adjuvants pour colorer les denrées alimentaires ;
  - teinture des tissus et des fibres textiles ;
  - comme pigments de peintures des matériaux de construction, céramiques (industrie des édifices) ;
  - pour les usages médicaux, pharmaceutiques et cosmétiques (dont les colorants capillaires) ;
  - Dans diverses industries, utilisées pour des carburants et des huiles.

### 9. Aspect toxicologique

#### 9.1. Couleur, turbidité, odeur

L'accumulation des matières organiques dans les cours d'eau, induit l'apparition de mauvais goûts, prolifération bactérienne, odeurs pestilentielles et colorations anormales. La coloration du milieu peut être perçue par l'œil humain à partir de 5 mg/L. En dehors de l'aspect inesthétique, les agents colorants ont la capacité d'interférer avec la transmission de la lumière dans l'eau bloquant ainsi la photosynthèse des plantes aquatiques [38].

#### 9.2. Sous-oxygénation

Lorsque des charges importantes de matière organique sont apportées au milieu *via* des rejets ponctuels, les processus naturels, de régulation ne peuvent plus compenser la consommation bactérienne d'oxygène. Il est estimé que la dégradation de 7 à 8 mg de matière organique par des micro-organismes suffit pour consommer l'oxygène contenu dans un litre d'eau [38].

### 9.3. Eutrophisation

Sous l'action des micro-organismes, les colorants libèrent des nitrates dans le milieu naturel. Ces ions minéraux introduits en quantité importante conduisent à la prolifération anarchique des plantes aquatiques à la surface (figure 15), par conséquent ils empêchent le passage de la lumière dans les strates les plus profondes des cours d'eau et des eaux stagnantes, causant ainsi l'inhibition de la photosynthèse des plantes se trouvant à ce niveau [39].



**Figure 15 :** Exemple d'eutrophisation [39].

## 10. Généralités sur nitrophénol

Les composés nitroaromatiques (CNAs) sont largement distribués dans l'environnement dû à leur utilisation étendue comme herbicides, fongicides, insecticides, explosifs, et précurseurs pour des colorants et des plastifiants. Les CNAs peuvent provoquer l'écotoxicité, mutagénicité, carcinogénèse, immunotoxicité, toxicité reproductrice et tumeurs de l'appareil urinaire. Parmi les mononitrophenols, le para-nitrophénol (p-NP, aussi connu sous le nom de 4-nitrophénol ou 4-NP), est le plus commun et le plus important polluant de l'environnement (en termes de quantités construites) [40].

## 11. Toxicité


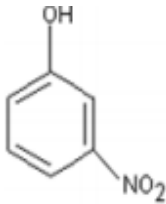
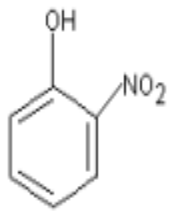
**Tableau 3:** les voies d'exposition possibles par le 4-NP et leurs conséquences sur la santé [41].

Voies d'exposition probables	Conséquences
- la peau	-Inflammation de la peau
- les yeux	-Provoque une irritation pour les yeux
<b>-Inhalation</b>	-Peut être nocif si inhalé.
<b>-Ingestion</b>	-Peut être nocif si avalé.
<b>Organes/systèmes ciblés</b>	-Cette substance entraînera très probablement des changements dans les cellules sanguines, diminuant le pouvoir oxyphorique du sang. Cet état est appelé méthémoglobinémie. À mesure que ce problème évolue, le manque d'oxygène augmente (une cyanose se produit), ce qui cause des maux de tête, une faiblesse, une irritabilité, une somnolence, un essoufflement et une perte de connaissance. L'apparition de la méthémoglobinémie peut être retardée de six à douze heures au maximum après exposition

## Polluants organiques

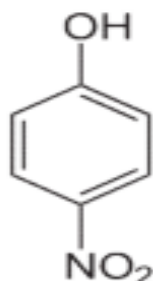
-Quelques exemples des nitrophénols monocycliques : le tableau 4 représente les nitrophénols les plus utilisés.

**Tableau 4 :** Les nitrophénols les plus communs; leurs utilisations et leurs origines.

Nomenclatureur	Formule brute	Structure chimique	Origines, Caractéristiques et Utilisations	Références
Para-nitrophénol (4-nitrophénol)	$C_6H_5NO_3$		-Il rentre dans la fabrication des herbicides, fongicides, insecticides, matières explosives, teintures. -Résulte aussi de la dégradation des produits pharmaceutiques et des résines.	42
Métanitrophénol (3-Nitrophénol)	$C_6H_5NO_3$		-Résulte de la dégradation biologique des composés nitroaromatiques.	43
Orthonitrophénol (2-Nitrophénol)	$C_6H_5NO_3$		-Il rentre dans la synthèse des colorants, des produits photochimiques, des pesticides, des préservatifs de bois, des explosifs et des traitements de cuir.	44

## 12. Le para-nitrophénol

Le 4-Nitrophénol (4-NP) aussi appelé *p*-nitrophénol (pNP) est un composé phénolique qui comporte un groupe nitro à l'opposé du groupe hydroxyle sur le cycle benzylique. Sa formule moléculaire est  $C_6H_5NO_3$  (figure 16) [45].



**Figure 16. :** Structure chimique du 4-nitrophénol.

Le 4-Nitrophénol est un solide très stable d'odeur caractéristique. Il apparait sous forme de cristaux jaunes pâles [45].

## 13. Propriétés physico-chimiques du 4-Nitrophénol

**Tableau 5 :** Propriétés physico-chimiques du 4-Nitrophénol [45].

Nomenclatureur	4-Nitrophénol
Formule brute	$C_6H_5NO_3$
Structure chimique	
Couleur	Jaune pâle
Etat physique	Solide cristallin
Masse molaire (g/mol)	139.20
Densité (à 20°C)	1.270
PKa	7.08
Température d'ébullition (Téb) en °C	279°C
Température de fusion (Tf) en °C	113-114 °C
Solubilité dans l'eau à T ≈ 20 °C (.L-1)	11.6 g/L

### 14. Utilisation

Le 4-NP rentre dans la fabrication des teintures, des textiles comme Il sert de précurseur pour la synthèse de la phénétidine et de l'acétophénétidine, d'indicateur et de matière première pour les pesticides (comme le parathion et le méthyl-parathion). Il est également un intermédiaire de synthèse et un produit de dégradation des produits pharmaceutiques (exemple: paracétamol). Dans la synthèse de peptides, les esters carboxyliques dérivés du 4-nitrophénol peuvent servir d'activant [43].



**Partie 3:**  
**Techniques de dépollution des eaux**

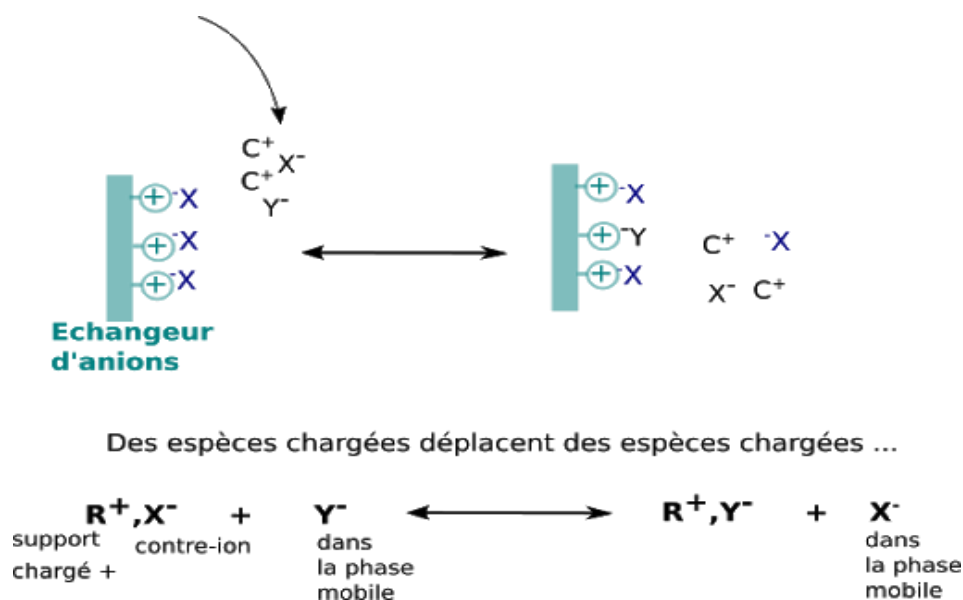
## 1. Les techniques de dépollution des eaux

Un procédé de traitement est choisi en fonction de la nature et de l'origine de la pollution visée, autrement dit des propriétés physico-chimiques des polluants contenus dans l'effluent traité et de leur concentration. En effet, un procédé efficace contre une pollution donnée peut s'avérer inadapté contre une autre pollution.

Différents procédés de traitement, tels que l'échange d'ion, l'électrolyse, osmose inverse, coagulation-précipitation, adsorption sont souvent appliquées aux eaux pour en extraire ions, polluants, matière, germe et d'autres résidus avant d'être rejetée propre et purifiée [46].

### 1.1. L'échange d'ions

L'échange d'ions est un procédé dans lequel les ions d'une certaines charges (positive ou négative) contenues dans une solution (par exemple des cations) sont éliminées de cette solution pour être remplacées par une quantité équivalente d'autres ions de même charge émis par le solide (l'échangeur d'ion). Les ions de charge opposée ne sont pas affectés [47]. Cette technique est généralement utilisée pour l'épuration des solutions de faibles concentrations en impuretés (<10mg/L), les échangeurs d'ions sont rapidement saturés, ce qui entraîne une régénération fréquente et onéreuse, Le principe est illustré par la figure 17 :



**Figure 17:** Principe de chromatographie d'échange d'ion [48].

## 1.2. L'électrolyse

L'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes plongées dans un bain électrolytique (solution contenant des ions) figure 18, crée un champ électrique orienté dans lequel les ions se mettent en mouvement: les cations se dirigent vers la cathode, les anions vers l'anode. Quand la tension appliquée est suffisante, les réactions suivantes se produisent aux interfaces électrolyte électrodes [49].

- ❖ à l'anode: oxydation avec émission d'électrons :  $A^- \rightarrow A + e^-$
- ❖ à la cathode: réduction avec capture d'électrons :  $C^+ + e^- \rightarrow C$

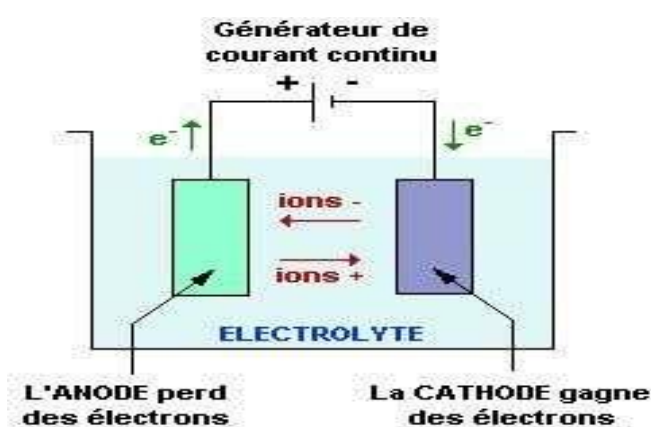


Figure 18: Principe de l'électrolyse [50].

## 1.3. Osmose inverse (OI)

L'osmose inverse est un procédé mettant en œuvre des membranes semi perméables qui laissent passer facilement l'eau pure et retiennent les différents sels, Rappelons son principe qu'on appelle le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane sous l'action d'un gradient de concentration [51].

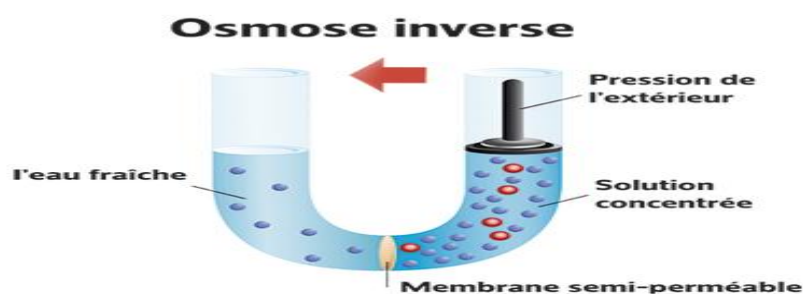
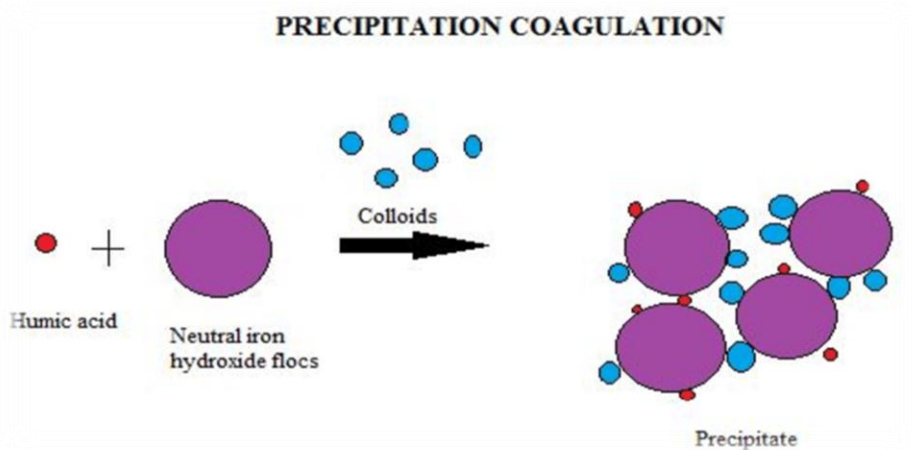


Figure 19 : Procédé d'osmose inverse [52].

### 1.4. La coagulation-précipitation

Cette technique permet l'élimination des colorants et des ions métalliques par coagulation-floculation-décantation, grâce à l'ajout de cations trivalents, tels que  $\text{Fe}^{3+}$  ou  $\text{Al}^{3+}$  [18].



**Figure 20** : Mécanisme de coagulation-précipitation [53].

### 1.5. Les procédés d'oxydation avancée

C'est dans l'intention de développer des techniques de traitement rapides, moins onéreuses et plus adaptées aux composés organiques réfractaires ou toxiques que les procédés d'oxydation avancée (POA) ont vu le jour. Les POA sont des techniques de traitement faisant appel à des intermédiaires radicalaires très réactifs, particulièrement les radicaux hydroxyles ( $\text{OH}^\bullet$ ), à température ambiante. Le développement des POA pour le traitement des eaux contaminées par les matières organiques, est une tentative de tirer avantage de la non sélectivité et de la rapidité de réaction des  $\text{OH}^\bullet$  [45].

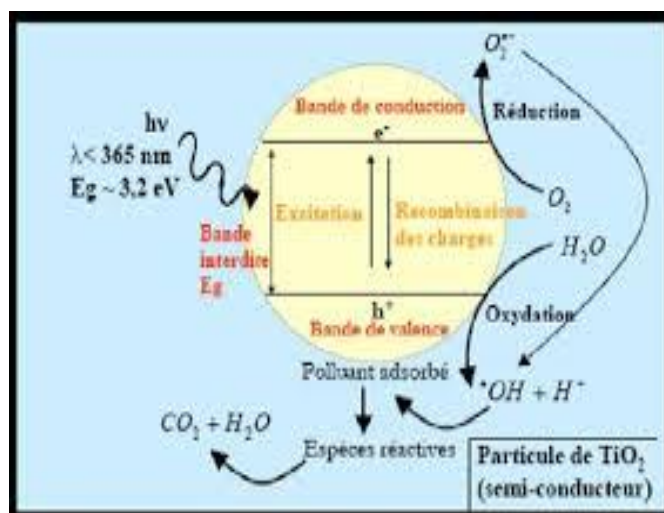
Les radicaux libres  $\text{HO}_2^\bullet$  et leur base conjuguée  $\text{O}_2^\bullet$  sont également utilisés dans les processus de dégradation, mais ces radicaux sont moins réactifs que les radicaux hydroxyles libres. Les POA peuvent être regroupés en cinq catégories :

- 1- Les procédés d'oxydation homogène : les radicaux sont générés par la réaction de Fenton, ozone à pH élevé ou  $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ .
- 2- La photocatalyse homogène UV : des procédés employant la photolyse UV de  $\text{H}_2\text{O}$  et /ou  $\text{O}_3$  en solution homogène pour générer les radicaux  $\text{HO}^\bullet$

- 3- La photocatalyse hétérogène : une source lumineuse induit des réactions photochimiques à la surface d'un semi-conducteur tel que  $\text{TiO}_2$ .
- 4- La radiolyse : des espèces  $\text{HO}^\bullet$ ,  $\text{H}^\bullet$ ,  $e_{\text{aq}}^-$  sont générés par irradiation de forte énergie (rayons  $\gamma$ ) des solutions à traiter.
- 5- Les procédés électrochimiques d'oxydation : les radicaux sont générés dans le milieu à partir de réactifs formés par électrochimie (électro-Fenton) ou à partir du solvant aqueux (oxydation anodique de l'eau).

### 1.5.1. La photocatalyse hétérogène

Parmi les techniques d'oxydation avancée, la photocatalyse hétérogène (figure 21), particulièrement sur le dioxyde de titane, s'est révélée comme un moyen potentiel pour l'élimination des micropolluants présents dans l'eau. La technique repose sur l'excitation d'un semi-conducteur ( $\text{TiO}_2$ ) par une source de lumière ultraviolette en phase aqueuse. Le traitement de l'eau par photocatalyse hétérogène utilise la partie la plus énergétique de la région UV ( $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) afin d'induire des réactions d'oxydo-réduction. On cherche dans ce contexte à ce qu'une substance toxique se trouvant dans le milieu soit soumise à une oxydation qui modifie sa structure la rendant moins toxique et plus biodégradable [45]



**Figure 21:** Mécanisme réactionnel à la surface de la particule d'un semi-conducteur ( $\text{TiO}_2$ ) [45].

### 1.6. L'adsorption

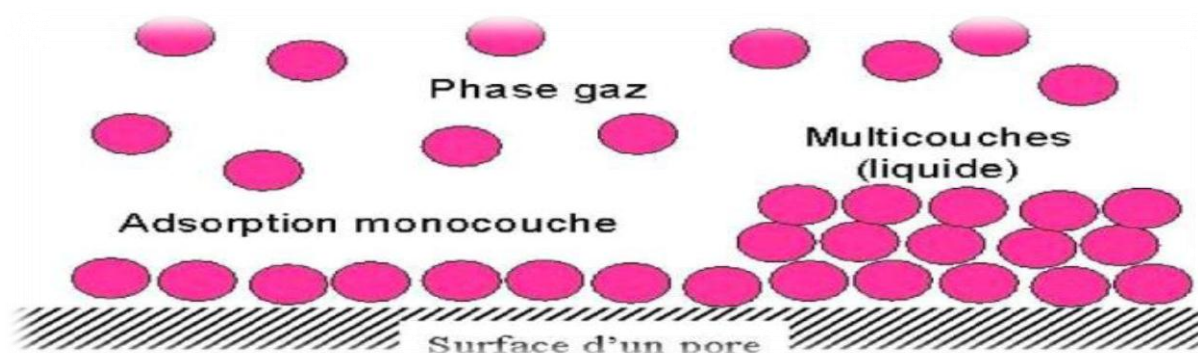
Dans le domaine de la dépollution, l'adsorption constitue une technique de choix pour l'élimination d'éléments dissous, le plus souvent organiques et à l'état de traces.

En comparaison avec les méthodes ci-dessus, l'application de procédés d'adsorption garantit un rendement relativement élevé ainsi qu'un fonctionnement plus simple. L'adsorption définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des molécules (gaz, ions métalliques, molécules organiques, etc.) d'une manière plus ou moins réversible [54].

### 2. Définition de l'adsorption

Plusieurs définitions ont été données par divers auteurs, les plus usuels parmi celles-ci sont:

- L'adsorption est un procédé de traitement, pour éliminer une très grande diversité de composés toxiques dans notre environnement. Elle est essentiellement utilisée pour le traitement de l'eau et de l'air [55].
- L'adsorption est un phénomène d'interface, pouvant se manifester entre un solide et un gaz ou entre un solide et un liquide [56].
- L'adsorption est un phénomène physico-chimique se traduisant par une modification de la concentration à l'interface de deux phases non miscibles: (liquide/solide) ou (gaz/solide), on parlera donc du couples (adsorbat/adsorbant). On appelle « adsorbat » la molécule qui s'adsorbe et « adsorbant » le solide sur lequel s'adsorbe la molécule. Le phénomène inverse par lequel les molécules se détachent est la désorption. [57].
- L'adsorption est un phénomène de surface, qui est à distinguer de l'absorption qui est un phénomène de profondeur. Le terme surface doit s'étendre à la totalité des surfaces externe et interne, engendrée par les fissures, cavernes ou capillaires [57].
- L'adsorption peut aussi être définie comme étant une opération physique de séparation des mélanges, celle-ci permet une élimination d'une substance par une autre de la phase gazeuse ou liquide, dans laquelle elle se trouve [58].



**Figure 22** : Phénomène d'adsorption [59].

### 3. Les types d'adsorption

Selon les forces d'interaction intervenant entre les molécules de l'adsorbat et la surface d'adsorption (l'adsorbant), on distingue les types d'adsorption suivants :

#### 3.1. Adsorption physique (ou physisorption)

L'adsorption physique est un phénomène réversible qui résulte de l'attraction entre les molécules d'adsorbant composant la surface du solide et les molécules du soluté de la phase fluide, ces forces attractives sont de nature physique, comprenant les forces dites de Van Der Waals ne détruisant pas l'individualité des molécules et lorsqu'elles opèrent, correspondent à des énergies faibles qui sont de l'ordre de quelques KJ par mole [46].

Ce phénomène consiste essentiellement dans la condensation de molécules sur la surface du solide et il est favorisé en conséquence par un abaissement de la température [46].

Ce type d'adsorption se caractérise par [60] :

- ❖ la rapidité dans l'établissement de l'équilibre entre la phase adsorbée et la phase fluide.
- ❖ la diminution de la capacité de l'adsorption avec l'élévation de la température.
- ❖ une réversibilité relativement facile et une absence de spécificité.
- ❖ l'énergie d'interaction est faible (jusqu'à 50 kJ), il n'y a pas de formation de liaison chimique.

#### 3.2. Adsorption chimique (ou chimisorption)

Elle résulte d'une interaction chimique entre les molécules d'adsorbant composant la surface du solide et les molécules du soluté. Ces forces attractives de nature chimique provoquent un transfert ou mise en commun d'électrons et en conséquence, destruction de l'individualité des molécules et formation d'un composé chimique à la surface de l'adsorbant [61].

Ce type d'adsorption se développe à haute température et met en jeu une énergie élevée [61].

La chimisorption se caractérise par [60] :

- ❖ un équilibre long à atteindre entre la phase adsorbée et le milieu fluide.
- ❖ l'augmentation de la capacité d'adsorption avec l'élévation de la température.
- ❖ la non réversibilité.

- ❖ l'énergie d'interaction est forte (40 à 400 KJ), environ 10 fois supérieure à l'adsorption physique, donc il y'a formation de liaisons chimiques.

Les caractéristiques qui permettent de distinguer l'adsorption physique de la chimisorption sont récapitulées dans le tableau 6.

**Tableau 6 :** Les critères de distinction entre la physisorption et la chimisorption [62].

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
<b>Energie d'adsorption</b>	5 à 10 Kcal/mole	20 à 100 Kcal/mole
<b>Température de processus</b>	Inférieure à la température d'ébullition de l'adsorbat	Elevée
<b>Nature de liaison</b>	Physique (Van der Waals)	Chimique
<b>La désorption</b>	Plus ou moins parfaite	Difficile
<b>Energie d'activation</b>	Non appréciable	Peut être mise en jeu
<b>La cinétique</b>	Très rapide	Lente
<b>Etat de surface</b>	Formation de multicouches	Conduit tout ou plus à une Monocouche

#### 4. Description du mécanisme d'adsorption

Le phénomène d'adsorption, contrôlé par la diffusion des molécules, atteint son équilibre relativement rapidement (quelques secondes à quelques minutes). Mais, peut se prolonger sur des temps très longs pour les adsorbants microporeux en raison du ralentissement de la diffusion des molécules dans ces structures de dimensions voisines du diamètre des molécules du fluide.

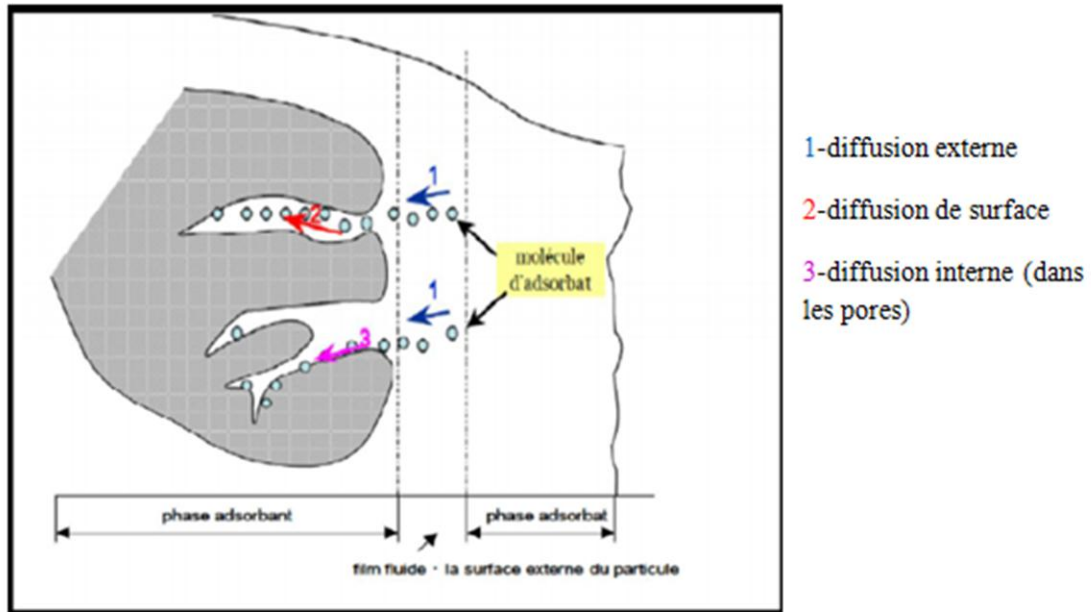
Le transfert d'une phase liquide contenant l'adsorbat vers une phase solide avec rétention de soluté à la surface de l'adsorbant se fait en plusieurs étapes (figure 23) [63].

**1-**Transfert de masse externe (diffusion externe) qui correspond au transfert du soluté (molécules de la phase liquide) du sein de la solution à la surface externe des particules.

**2-**Transfert de masse interne dans les pores (diffusion interne) qui a lieu dans le fluide remplissant les pores ; les molécules se propagent de la surface des grains vers leur centre à travers les pores.

**3-** Diffusion de surface Pour certains adsorbants, il peut exister également une contribution de la diffusion des molécules adsorbées le long des surfaces des pores à l'échelle d'un grain d'adsorbant.





**Figure 23:** Schéma du mécanisme de transfert de matière dans le procédé d'adsorption [62].

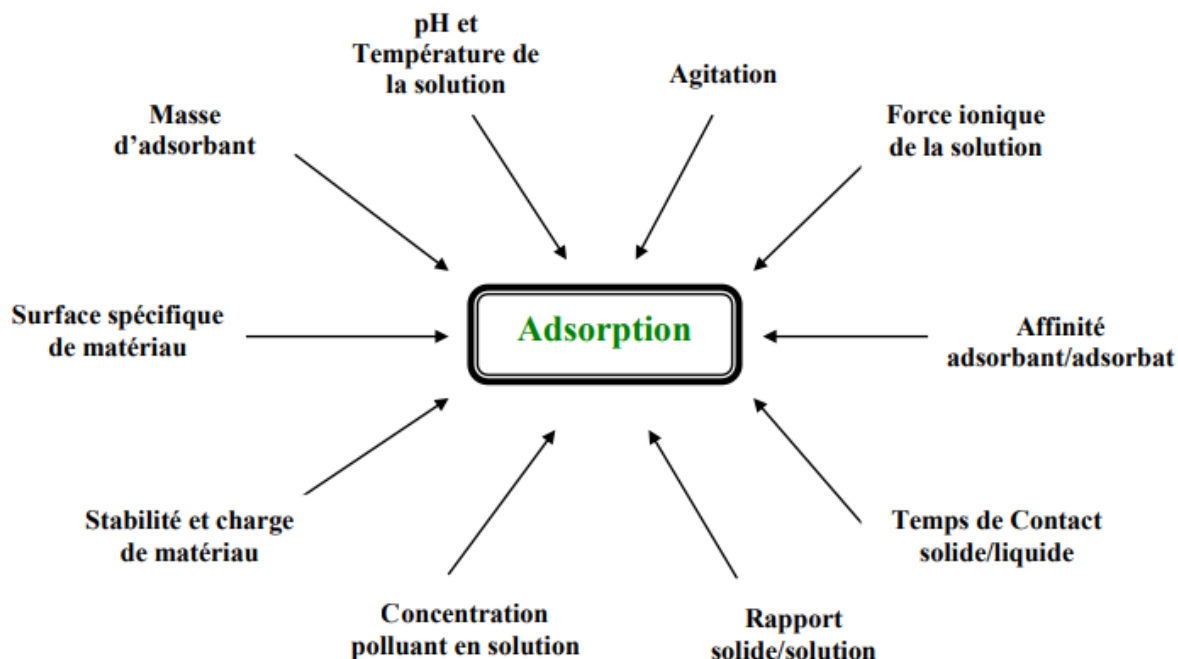
### 5. Nature du mode d'adsorption

Selon la nature des constituants de l'adsorbant et des molécules adsorbées. L'adsorption d'une substance est gouvernée par de multiples types d'interaction. Différents types de liaisons peuvent exister simultanément [49]. Les liaisons les plus importantes sont:

- Liaison de Van Der Waals.
- Liaison ionique.
- Liaison hydrogène.
- Liaison covalente.
- Liaison par transfert de charge [49].

### 6. Les facteurs influençant l'adsorption

L'adsorption peut être influencée par différents paramètres présentés sur la figure 24 :



**Figure 24** : Facteurs influençant adsorption [64].

#### 6.1. Porosité

La porosité est liée à la répartition de la taille des pores. Elle reflète la structure interne des adsorbants microporeux [65].

#### 6.2. Polarité

Un soluté polaire aura plus d'affinité pour un solvant ou pour l'adsorbant le plus polaire. L'adsorption préférentielle des composés organiques à solubilité limitée en solutions aqueuses (hydrocarbures, dérivés chlorés, phénol et autres dérivés benzéniques) est importante avec les adsorbants hydrophobes (charbons actifs, polymères poreux). Elle est par contre insignifiante avec les adsorbants polaires très hydrophiles (gel de silice, alumine...) [65].

### 6.3. Nature de l'adsorbat

D'après la règle de LUNDENIUS: "moins une substance est soluble dans le solvant, mieux elle est adsorbée". D'après la règle de Traube, l'adsorption à partir des solutions aqueuses, croit lorsqu'on parcourt une série d'homologues [66].

## 7. Isothermes d'adsorption

L'isotherme d'adsorption est généralement représentée sous forme graphique. Il représente la relation entre la quantité adsorbée  $q_e$  (mg/g) et la concentration en soluté adsorbé  $c_e$  (mg/L) à une température constante.

La relation obtenue est appelée « isotherme d'équilibre » [67] :

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)}{m} * v \quad (1)$$

Où :

- ❖ V : volume de la solution (L) ;
- ❖ m : masse de solide adsorbant (g) ;
- ❖  $C_0$  : concentration initiale du soluté en phase (mg/L).

### 7.1. Classification des isothermes d'adsorption

Plusieurs auteurs, ont proposé une classification des isothermes d'adsorption basée sur leur forme et leur pente initiale.

#### 7.1.1. Classification de Giles et Coll

On distingue quatre classes principales (figure 25) qui sont :

##### **Classe S** (Sigmoide)

A faible concentration, les isothermes de cette classe présentent, une concavité tournée vers le haut. Les molécules adsorbées favorisent l'adsorption ultérieure d'autres molécules (adsorption coopérative). Ceci est dû aux molécules qui s'attirent par des forces de Van Der Waals et se regroupent en ilots dans lesquels elles se tassent les unes contre les autres [67].

##### **Classe L** (Langmuir)

Les isothermes de classe L présentent, à faible concentration en solution, une concavité tournée vers le bas qui traduit une diminution des sites libres au fur et à mesure de

la progression de l'adsorption. Ce phénomène se produit lorsque les forces d'attraction entre les molécules adsorbées sont faibles. Elle est souvent observée quand les molécules sont adsorbées horizontalement, ce qui minimise leur attraction latérale. Elle peut également apparaître quand les molécules sont adsorbées verticalement et lorsque la compétition d'adsorption entre le solvant et le soluté est faible. Dans ce cas, l'adsorption des molécules isolées est assez forte pour rendre négligeable les interactions latérales [67].

### Classe H (Haute affinité)

La partie initiale de l'isotherme est presque verticale, la quantité adsorbée apparaît importante à concentration quasiment nulle du soluté dans la solution. Ce phénomène se produit lorsque les interactions entre les molécules adsorbées et la surface du solide sont très fortes. L'isotherme de classe H est observée lors de l'adsorption de micelles ou de polymères formées à partir des molécules de soluté [67].

### Classe C (partition Constante)

Les isothermes de cette classe se caractérisent par une partition constante entre la solution et le substrat. La linéarité montre que le nombre de sites libres reste constant au cours de l'adsorption. Ceci signifie que les sites sont créés au cours de l'adsorption. Ce qui implique que les isothermes de cette classe sont obtenues quand les molécules de soluté sont capables de modifier la texture du substrat en ouvrant des pores qui n'avaient pas été ouverts préalablement par le solvant [67].

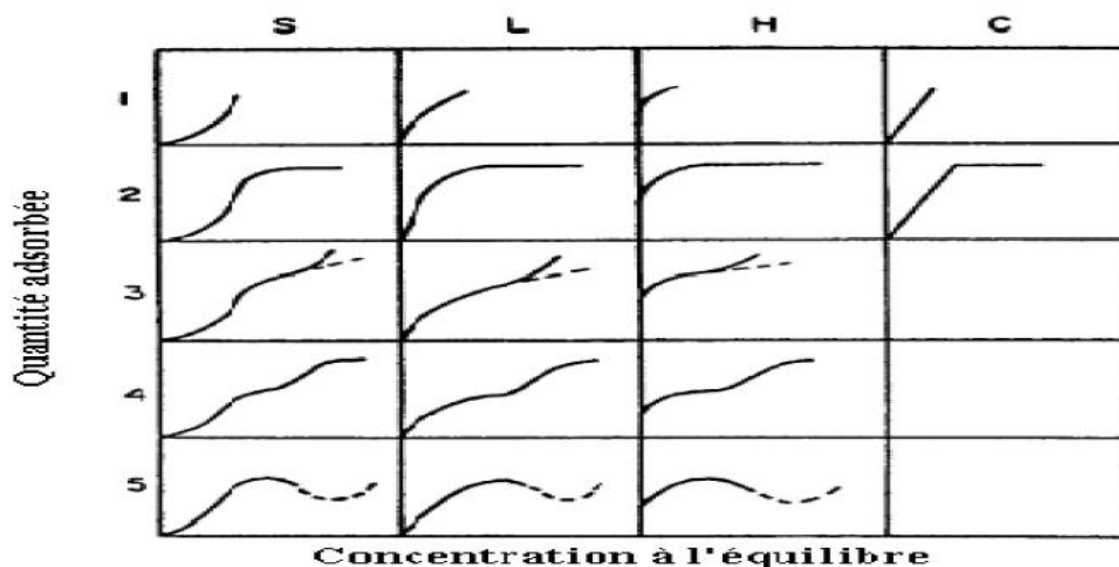


Figure 25 : Différents types d'isothermes d'adsorption [67].

### 7. 2. Modèles d'isothermes d'adsorption

Il existe différents modèles théoriques qui décrivent la relation entre la masse d'adsorbat fixée à l'équilibre et la concentration. Il s'agit de relations non cinétiques que l'on nomme isothermes. Ces modèles peuvent illustrer des adsorptions en mode statique ou dynamique. Dans ce qui suit, nous exposerons quelques modèles :

#### 7.2.1. Modèle de Langmuir

L'isotherme de Langmuir, proposée en 1918 repose sur les hypothèses ci-dessous :

- Chaque site peut adsorber une seule molécule; par conséquent, une seule couche de molécules peut être adsorbée par l'adsorbant.
- Les sites ont la même affinité pour les impuretés en solution.
- L'activité d'un site donné n'affecte pas l'activité des sites adjacents.
- La surface du solide est uniforme.
- la chaleur d'adsorption est indépendante du taux de recouvrement de la surface du solide.
- L'adsorption est localisée et ne donne lieu qu'à la formation d'une monocouche.
- Il y a équilibre entre les molécules des deux phases [67].

L'équation de l'isotherme de Langmuir est la suivante:

$$q_e = \frac{q_m \cdot k_L \cdot c_e}{(1 + k_L \cdot c_e)} \quad (2)$$

La forme linéaire de cette équation s'écrit comme suit :

$$\frac{c_e}{q_e} = \frac{1}{q_m} c_e + \frac{1}{k_L q_m} \quad (3)$$

En traçant la droite:

$$\frac{c_e}{q_e} = f(c_e) \quad (4)$$

Où :

- ❖  $C_e$  : Concentration du soluté en phase liquide à l'équilibre, en (mg/l) ;
- ❖  $q_e$  : quantité adsorbée à l'équilibre, en (mg/l) ;
- ❖  $q_m$ : capacité maximale d'adsorption de la mono couche, en (mg/g) ;
- ❖  $k_L$  : constante de Langmuir.

On détermine la valeur de la capacité maximum d'adsorption de la monocouche  $q_m$  et la constante de Langmuir  $k_L$  [67].



Figure 26 : Model d'adsorption de Langmuir [68].

### 7.2.2. Modèle de Freundlich

Ce modèle est donné par l'équation suivante :

$$q_e = k_f c_e^{1/n} \quad (5)$$

- ❖  $k_f$  : Constante relative à la capacité de l'adsorption de l'adsorbant (constante de Freundlich)  $(mg^{1-(\frac{1}{n})}L^{1/n}g^{-1})$
- ❖  $n$  : Constante indicatrice de l'intensité de l'adsorption.

Le modèle de Freundlich repose sur l'hypothèse suivante :

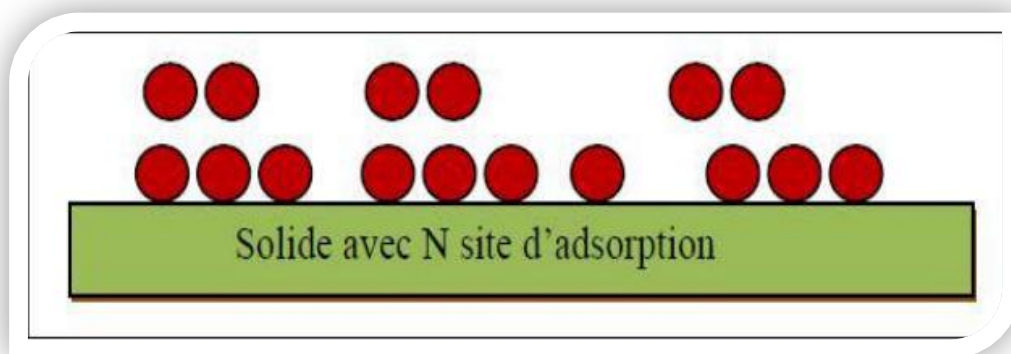
- L'énergie d'adsorption varie selon le site mis en jeu et donc la surface de l'adsorbant n'est pas énergétiquement uniforme.

La forme linéaire est donnée par l'expression suivante

$$\ln q_e = \ln k_f + \left(\frac{1}{n}\right) \ln(c_e) \quad (6)$$

La droite obtenue en portant  $\ln k_f$  en fonction de  $\ln C_e$  permet de déterminer les paramètres  $k_f$  et  $n$  [69].

- $1/n$  nous donne la forme de l'isotherme et l'intensité de l'adsorption :
- $1/n = 1$  : l'isotherme est linéaire type C ;
- $1/n > 1$  : l'isotherme est convexe type S ;
- $1/n < 1$  : l'isotherme est concave type L ;
- $1/n \ll 1$  : l'isotherme est de type H.



**Figure 27:** Modèle d'adsorption de multicouches [68].

### 7.2.3. Isotherme de BET (BRUNAUER, EMMET ET TELLER)

Ce modèle plus récent admet la formation de multicouches d'adsorbat, et rend compte également du phénomène de saturation. Il fait intervenir la solubilité du soluté dans son solvant, sous la forme de sa concentration  $C_0$  de saturation. Il est représenté par l'équation suivante :

$$\frac{q_t}{q_m} = \frac{k \left(\frac{c_t}{c_0}\right)}{\left(1 - \frac{c_t}{c_0}\right) \left[1 + (k - 1) \frac{c_t}{c_0}\right]} \quad (7)$$

Où :

- ❖  $q_t$  : la capacité de rétention au temps  $t$  ;
- ❖  $q_m$ : la capacité de rétention mono moléculaire ;
- ❖  $C_t$  : la concentration au temps  $t$  ;
- ❖  $C_0$ : la concentration initiale ;
- ❖  $k$  : La constante d'adsorption.

$$\frac{c_t}{q_t(c_0 - c_t)} = \frac{1}{q_m k} + \frac{k - 1}{q_m k} \left[\frac{c_t}{c_0}\right] \quad (8)$$

L'isotherme B.E.T. a peu d'application en phase aqueuse, et sert surtout à déterminer les surfaces d'adsorption des charbons par l'azote gazeux [69].

### 7.2.4. Modèle d'Elovich

Ce modèle est représenté par l'équation suivante:

$$q_t = \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln(\alpha \beta) + \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln t \quad (9)$$

Où :

- ❖  $\alpha$ : le taux d'adsorption initial en (mg/g min).
- ❖  $\beta$ : constante reliée à la surface externe et à l'énergie d'activation de la chimisorption en (g/mg).

Ce modèle n'apporte pas des hypothèses évidentes pour le mécanisme de rétention. Mais, il est recommandé pour des systèmes hautement hétérogènes [69].

### 7.2.5. Isotherme de Temkin

La dérivation de l'isotherme de Temkin suppose que l'abaissement de la chaleur d'adsorption est linéaire plutôt que logarithmique, comme appliqué dans l'équation de Freundlich. L'isotherme de Temkin a été généralement présentée par l'équation suivante [70]:

$$q_e = \left(\frac{RT}{b_T}\right) \ln(A_T \cdot C_e) \quad (10)$$

Où :

- ❖  $b_T$  et  $A_T$  sont des constantes d'isotherme de Temkin ;
- ❖  $R$ : constante de gaz l'universel (8.314 K J/ mol) ;
- ❖  $C_e$ : la concentration à l'équilibre des ions métallique (mg/l) ;
- ❖  $T$  : la température absolue ;

### 7.2.6. L'isotherme de Dubinin–Radushkevich (D–R) [71]

Cette isotherme suppose une surface hétérogène et est exprimée comme suit :

$$q_e = X'_m \exp(-K' \varepsilon^2) \quad (11)$$

- ❖  $\varepsilon$ : le potentiel de Polanyi  $\varepsilon = RT \ln(1 + 1/C_e)$  ;
- ❖  $q_e$ : la quantité d'ions métallique adsorbés par poids spécifique (mg/g) ;
- ❖  $X'$  : la capacité d'adsorption (mg/ g) ;
- ❖  $C_e$ : la concentration en équilibre des ions métalliques en solution (mg/ L) ;
- ❖  $K'$ : une constante liée à l'énergie d'adsorption ( $\text{mol}^2 \text{kJ}^{-2}$ ) ;
- ❖  $R$ : la constante universelle de gaz ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) ;
- ❖  $T$ : température (K) ;



L'isotherme de D–R peut être exprimée par sa forme linéaire comme suit :

$$\ln q_e = \ln X_m - k' \varepsilon^2 \quad (12)$$

$K'$  est calculé à partir de la pente du tracé de  $\ln q_e$  en fonction de  $\varepsilon^2$ , et l'énergie moyenne d'adsorption  $E$  ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ) peut être obtenue à partir des valeurs de  $K'$ .

$$E = (-2K')^{-1/2} \quad (13)$$

Les constantes d'isotherme de Langmuir n'expliquent pas les propriétés du processus d'adsorption physique ou chimique. Cependant, l'énergie moyenne d'adsorption ( $E$ ) calculée à partir de l'isotherme de D–R fournit des informations importantes au sujet de ces propriétés :

- $E < 8 \text{ kJ mol}^{-1}$ : la physisorption domine le mécanisme de sorption.
- $E$  est entre 8 et 16  $\text{kJ mol}^{-1}$ , l'échange ionique est le facteur dominant.
- $E > 16 \text{ kJ mol}^{-1}$ : la sorption est dominée par diffusion intra particule [44].

### 7.2.8. Isotherme de Toth

Toth a modifié l'isotherme de Langmuir pour minimiser l'erreur entre les données expérimentales de l'équilibre d'adsorption et les valeurs prédites. L'application de cette équation est plus convenable pour l'adsorption en multicouches, similairement à l'isotherme de BET qui est un type spécifique de l'isotherme de Langmuir [72].

L'équation peut être écrite comme :

$$q_e = C_e Q_{mT} / \left( \frac{1}{K_T} + C_e^{mT} \right)^{1/mT} \quad (14)$$

Où :

- ❖  $K_T$ : la constante d'équilibre de Toth ;
- ❖  $C_e$ : la concentration à l'équilibre ( $\text{mg/l}$ ) ;
- ❖  $Q_{mT}$ : la capacité maximum de Toth ( $\text{mg/g}$ ) ;
- ❖  $m_T$ : l'exposant du modèle de Toth ;

### 7.2.9. Isotherme de Langmuir–Freundlich

C'est une équation basée sur les isothermes de Langmuir et Freundlich. Elle décrit bien les surfaces hétérogènes. L'équation peut être écrite comme :

$$q_e = \frac{Q^0 (K C_e)^n}{[1 + (K C_e)]} \quad (15)$$

Où :

- ❖  $q_e$ ,  $K$ ,  $C_e$ ,  $Q^0$ , et  $1/n$  correspondent à ceux dans l'isotherme Langmuir et de Freundlich [67].

### 7.3. La cinétique d'adsorption

La connaissance de la cinétique d'adsorption dans des opérations fondées sur les phénomènes d'adsorption présente un intérêt pratique considérable pour la mise œuvre optimale d'un adsorbat ainsi que pour les facteurs qu'il faut optimiser pour fabriquer ou améliorer un adsorbat conduisant à la cinétique la plus rapide possible [73].

#### 7.3.1. Modèle cinétiques

Plusieurs modèles ont été développés afin d'examiner le mécanisme du processus d'adsorption d'un liquide sur la surface d'un solide, parmi ces modèles, on retient :

##### 7.3.1.1. Modèle de pseudo premier ordre

Le modèle de pseudo premier ordre a été décrit par Lagergren [73] :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (16)$$

Où :

- ❖  $q_e$  : quantité de polluant adsorbée par un gramme de solide à l'équilibre (mg/g) ;
- ❖  $q_t$  : quantité de polluant adsorbée par un gramme de solide à temps  $t$  (mg/g) ;
- ❖  $K_1$  : constante de vitesse du modèle cinétique du pseudo-premier ordre (min<sup>-1</sup>).

L'intégration de l'équation (16) entre 0 et  $t$ , conduit à l'équation suivante :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \cdot t \quad (17)$$

L'application de ce modèle pour un système donné peut être vérifiée en examinant la linéarité de la droite obtenue en portant  $\ln(q_e - q_t)$  en fonction de  $t$ . L'ordonnée à l'origine et la pente de la droite permettent de calculer  $q_e$  et  $k_1$  [73].

##### 7.3.1.2. Modèle pseudo-second ordre

L'équation du pseudo-second ordre est souvent utilisée avec succès pour décrire la cinétique de la réaction de fixation des solutés sur l'adsorbant. Le modèle de pseudo-second ordre permet de caractériser la cinétique d'adsorption en prenant compte, à la fois, le cas

d'une fixation rapide des solutés sur les sites les plus réactifs et celui d'une fixation lente sur les sites d'énergie faible

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (18)$$

L'intégration conduit à l'équation suivante :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (19)$$

❖  $K_2$ : Constante de vitesse de second ordre (mg. g-1. min-1).

La quantité adsorbée à l'équilibre  $q_e$  et  $k_2$  peuvent être déterminées expérimentalement à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de  $\frac{t}{q_t} = f(t)$  [74].

### 7.3.1.3. Modèle de la diffusion intra particule

Le modèle de la diffusion intra particule est proposé par Weber et Morris. Il est représenté par l'équation suivante [62] :

$$q_t = k_{int} t^{1/2} + c \quad (20)$$

Où :

- ❖  $k_{int}$ : Constante de vitesse de diffusion intra-particulaire (mg.g-1.min-1/2)
- ❖  $C$  : Constante liée à l'épaisseur de la couche limite (mg/g).

La représentation de  $q_t$  en fonction de  $\sqrt{t}$  permet de calculer la constante de vitesse et de mettre en évidence les différentes étapes du processus.

## 8. Les différents types d'adsorbants

Les solides agissant comme adsorbants sont caractérisés par une structure microporeuse développée, ce 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. Ils sont employés tels quels ou après un traitement d'activation ayant pour but d'augmenter la porosité [75].

Les adsorbants les plus utilisés dans les applications industrielles sont les suivants

### 8.1. Gels de silice

Les gels de Silice ( $\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$ ) se présentent sous la forme de grains durs et poreux avec une surface spécifique de 600 à 800  $\text{m}^2/\text{g}$ , dont la taille des pores varie de 20 à 50 Å. Ils s'obtiennent par action de l'acide chlorhydrique sur une solution de silicate de sodium [75]. Ils sont utilisés pour ôter l'eau de divers gaz, mais aussi, parfois, pour la séparation d'hydrocarbures [76].

### 8.2. Charbon actif

Le charbon activé élimine les impuretés de l'eau en les fixant et en les faisant s'accumuler à sa surface, c'est pourquoi une grande surface par unité de volume et une forme poreuse constituent les caractéristiques les plus essentielles d'un charbon actif. La fixation des impuretés dépend de la grosseur des pores de charbon actif. Ainsi, certaines molécules ne peuvent pas être adsorbées par des pores de trop petites tailles par rapport à leur grosseur. Les qualités d'adsorption du charbon actif sont fonction des matières premières et des procédés d'activation. Ce type d'adsorbant peut être produit à partir de différents matériaux comme le bois, le charbon, les noyaux de fruits [18].

### 8.3. Argiles

Parmi les matériaux naturels, l'argile est considérée comme un bon adsorbant suite à son faible coût, sa disponibilité en abondance, et surtout grâce à ses bonnes propriétés d'adsorption. Il existe différents types d'argiles telles que bentonite, argile commune, l'argile réfractaire, terre de Fuller et de kaolinite. On obtient les argiles activées par addition d'eau à certaines qualités d'argiles (bentonite, kaolinite, terre de Fuller,...), puis incorporation à la pâte ainsi obtenue d'une certaine quantité d'acide chlorhydrique. L'opération est suivie d'un lavage et séchage. Ils sont généralement utilisés pour la décoloration et la purification des huiles minérales [75].

## 9. Critères du choix d'un adsorbant

Un bon adsorbant doit avoir les qualités suivantes [77] :

- Une haute capacité d'adsorption.
- Une grande efficacité pour adsorber des substances de faibles concentrations.

- Une sélectivité élevée.
- Une aptitude à être facilement régénéré et utilisé de nouveau.
- Une grande inertie chimique.
- Un prix peu élevé.

### 10. Les applications de l'adsorption

De nombreuses applications de l'adsorption résultent des trois caractéristiques qui la différencient des autres procédés de séparation, à savoir [75] :

- ❖ La rétention des très petites particules, comme par exemple les colloïdes ;
- ❖ La rétention des composants à très faible concentration, par exemple, des impuretés ou des molécules et ions métalliques qui confèrent aux produits, couleurs, odeurs ou saveurs désagréables, voire une toxicité ;
- ❖ La sélectivité de l'adsorbant par rapport à certains constituants du mélange.

Parmi les applications, on cite :

- ✚ Le séchage, la purification et la désodorisation des gaz ;
- ✚ Le traitement des eaux (élimination des métaux lourds, des odeurs et de la matière organique) ;
- ✚ Le raffinage des produits pétroliers ;
- ✚ La catalyse de contact ;
- ✚ La récupération de solvants volatils et d'alcool dans les processus de fermentation;
- ✚ La décoloration des liquides ;
- ✚ La chromatographie gazeuse (méthode de fractionnement basée sur les différences de vitesse d'adsorption de substances différentes, sur un adsorbant donné) ;
- ✚ Dessiccation des gaz et des produits organiques industriels.

**Partie 4 :**  
**Travaux réalisés**

## Travaux réalisés

Dans la partie suivante nous présentons quelques résultats obtenus lors de travaux récents portant sur l'adsorption du polluant nitrophenol.

Abdoulaye Demba N'diaye et autres [78] ont étudié l'adsorption de paranitrophenole (PNP) en solution aqueuse sur charbon actif en poudre (CAP) et granulaire (CAG). Les adsorbants sont des produits commerciaux.

Les propriétés physico-chimiques des deux adsorbants utilisés (CAP et CAG) sont représentées dans le tableau 7 ci-dessous.

**Tableau 7 :** caractéristiques physico-chimiques de CAP et CAG.

Paramètres	CAP	CAG
Surface spécifique m <sup>2</sup> /g	1002	1045
Taille des particules μm	10-50	2000-3000

Pour réaliser leur étude, ils ont opté au mode opératoire suivant :

Une masse de 0.015 g de CAP ou 0.5 g de CAG est ajoutée à un volume de 25 ml de PNP à 5 mg/L puis agité à 70 tr/min à température ambiante. L'étude cinétique est réalisée pour le CAP et le CAG afin d'estimer le temps d'équilibre d'adsorption et le pseudo-premier ordre et pseudo-second ordre. Les isothermes d'adsorption Langmuir et Freundlich sont obtenues en faisant varier la concentration de PNP initial (5-100 mg.L<sup>-1</sup>).

Les résultats expérimentaux ont montré que l'adsorption était relativement plus rapide sur CAP que sur CAG, l'équilibre est atteint après de 90 min et 120 min d'adsorption sur CAP et CAG respectivement.

La capacité d'adsorption des deux adsorbants peut être classée comme suit CAP (6.8mg/g), CAG (0.248mg/g). Les données de l'étude cinétique ont été jugées le mieux adaptées au model Pseudo second ordre suggérant que l'adsorption est régi par la chimisorption.

L'isotherme le mieux adapté pour ce système est Freundlich. L'adsorption sur CAP s'est avérée être faisable et spontanée, avec une capacité d'élimination des PNP supérieure à 30 mg.g<sup>-1</sup>. En ce qui concerne la zone de rétention, cette capacité d'élimination (30.98 μg PNP/ m<sup>-2</sup> CAP) était 79% meilleure que celle sur CAG (6.55 μg PNP m<sup>-2</sup> CAG). Les résultats de la présente étude ont montré l'efficacité de l'utilisation du CAP comme adsorbant pour l'élimination du PNP d'une solution aqueuse.

### A.BENHAMOU [41]

Ce travail de recherche consiste à contrôler la taille des pores de deux matériaux mésoporeux de type MCM-41 (hexagonale) et MCM-48 (cubique) en deux étapes. La première consiste à synthétiser la MCM-41 et MCM-48 à des températures comprises entre (70 et 100°C) « matériaux parents », puis en deuxième étape, on ajoute une émulsion aqueuse d'amine (DMDDA, DDA) entre (120 et 130°C) « matériaux aminés », l'extraction sélective de l'amine « matériaux désaminés » et enfin une calcination des matériaux aminés et désaminés donne les « matériaux calcinés ». Les différents matériaux seront testés pour l'adsorption de quelques polluants organiques et inorganiques.

Les protocoles mis en œuvre pour produire les différents matériaux sont :

**Si-MCM-41 (en moles):** 1SiO<sub>2</sub>, 0.45 CTAB, 0.32 TMAOH, 67H<sub>2</sub>O

Tout d'abord le mélange (eau ultra pure et NaOH) est agité durant 5 minutes. Ajouter le CTAB par petites quantités et agiter pendant 30 minutes, enfin ajouter le SiO<sub>2</sub>. L'agitation est poursuivie jusqu'à obtention d'un gel, environ 2 heures. Le mélange est transvasé dans un réacteur en téflon, qu'on place dans une étuve réglée entre 90 et 100°C pendant 2 jours. Filtrer et laver plusieurs fois le mélange avec l'eau ultra pure et sécher à l'air libre.

**NH<sub>2</sub>-MCM-41 :** 5g Si-MCM-41, 7g (DMDDA/DDA) + 78g H<sub>2</sub>O

Si-MCM-41 dénommé Matériau « **P** » est ajouté à une émulsion (DMDDA/DDA, eau ultra-pure). Le mélange est laissé sous agitation pendant 30 minutes, transvaser ensuite dans un réacteur en téflon qu'on met dans une étuve réglée entre 120 et 130°C pendant 3 jours. Le matériau obtenu est filtré et lavé plusieurs fois par l'eau ultra-pure et enfin séché à température ambiante : Matériau « **A** ».

L'extraction sélective de DMDDA/ DDA, se fait à l'aide d'un solvant spécifique (éthanol) et on utilisant un soxhlet (est une pièce de verrerie utilisée en chimie analytique et en chimie organique qui permet de faire l'extraction). La disparition des dernières traces d'amines des matériaux « **A** » est vérifiée par la technique de chromatographie à couche mince (c. c. m) ; les matériaux obtenus sont dénommés « **B** ».

La calcination des matériaux « **A** » et « **B** » pendant 5 heures 30 minutes à 550°C, donne les matériaux dénommés « **C** ».

### Techniques de caractérisation

A l'issue de toute synthèse, la caractérisation physico-chimique se révèle indispensable. L'utilisation d'un produit pour une application quelconque nécessite des propriétés adéquates



et des performances bien spécifiques, d'où l'importance de vérifier la conformité ou non de ses caractéristiques trouvées vis-à-vis de la réaction envisagée.

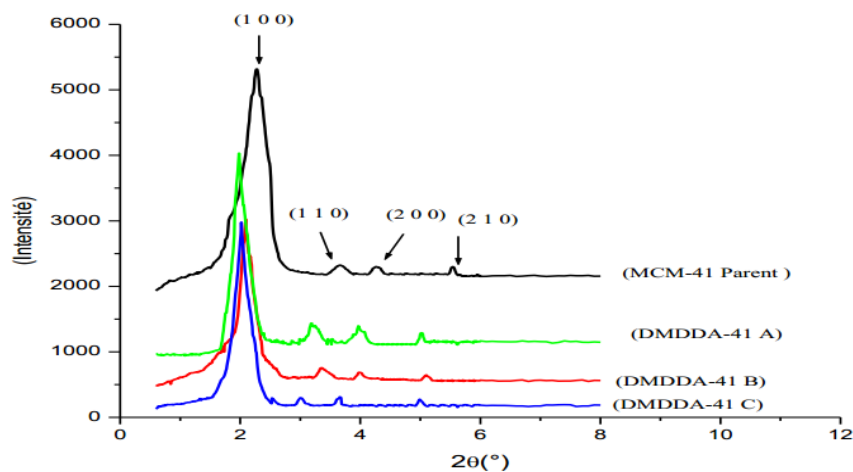
### Diffraction des rayons X (DRX)

Cette technique non destructive pour l'échantillon est basée sur la diffraction d'un faisceau mono-chromatique de rayons X par les plans réticulaires dans un solide ordonné (Figure 28). La loi de Bragg établit que l'on peut relier une distance inter-réticulaire à l'angle d'incidence du faisceau, selon l'équation  $2d \sin(\theta) = n\lambda$ .  $d$  représente la distance entre deux plans réticulaires indexés dans le système de Miller (hkl),  $n$  l'ordre de diffraction,  $\lambda$  la longueur d'onde du faisceau de rayons X et  $\theta$  le demi angle de déviation. Les données ont été collectées sur un diffractomètre Bruker AXS D-8, en utilisant la raie  $K\alpha$  du cuivre ( $\lambda = 0.154184$  nm).

Les échantillons ont été broyés puis déposés en couche mince (1 mm) sur un support PVC et recouverts d'une lame de verre. Le balayage est effectué entre 1 et  $10^\circ$  en  $2\theta$  pour les matériaux MCM-41 avec un pas de  $0.020^\circ$  et un temps d'acquisition de 10 secondes par pas.

La figure 28 montre les diffractogrammes mesurés entre  $0.6$  et  $8$  degrés ( $2\theta$ ) des matériaux DMDDA-41, DMDDA-41B et DMDDA-41C qui sont respectivement le matériau aminé par la DMMA, le précédent matériau après désamination et le matériau carbonisé. Ces trois matériaux sont comparés au MCM-41 qui est le matériau parent.

Les quatre matériaux présentent un diffractogramme semblable. Il y a un pic principal situé vers  $2.2^\circ$  suivi de trois pics moins intenses entre  $3.6$  et  $5.5^\circ$ . Remarquons aussi, que le pic 100 des matériaux modifiés devient moins intense que celui de MCM-41 parent mais la structure n'est pas altérée.



**Figure28:** Diffractogrammes de rayons X des matériaux MCM 41 modifiés par DMDDA.

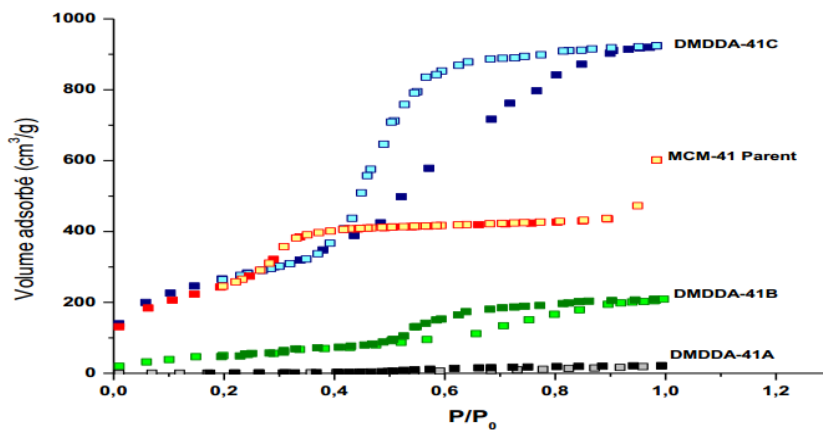
**Isothermes d'adsorption – désorption d'azote à 77 K (analyse BET)**

Les isothermes d'adsorption-désorption d'azote à la température du diazote liquide – 196°C permettent de caractériser les propriétés texturales des matériaux mésoporeux c'est-à-dire la taille des pores, la surface spécifique et le volume poreux.

L'exploitation des résultats peut être faite à l'aide de la classification des isothermes d'adsorption physique en cinq étapes très distinctes, décrite initialement par Brunauer, et al, c'est cette classification qui a été reprise par l'IUPAC en 1985 à laquelle a été ajoutée une isotherme d'adsorption à marches, observée plus récemment, notée VI.

Les isothermes d'adsorption-désorption à 77K de MCM-41(parent) et des matériaux fonctionnalisés par DMDDA (aminé, désaminé et calciné) et notés DMDDA-41A, DMDDA-41B et DMDDA-41C sont représentés sur la figure 29. Elles sont tous de type IV selon la nomenclature de l'IUPAC et sont donc caractéristiques des matériaux à pores mésostructurés.

Les données de surface spécifique, diamètre poreux et volumes poreux des différents matériaux sont récapitulés dans le tableau 8.



**Figure 29 :** Isothermes d'adsorption-désorption d'azote à 77K des matériaux MCM-41 modifiés par DMDDA.

**Tableau 8** : comparaison des données de l'adsorption-désorption d'azote à 77K de MCM-41 et des matériaux modifiés.

Matériau	$S_{BET}(m^2/g)$	$D_p(nm)$	$V_p(cm^3/g)$
<b>MCM-41 (calciné)</b>	1207	3.42	0.85
<b>DMDDA-41A</b>	63	-	0.28
<b>DMDDA-41B</b>	373	5.84	0.97
<b>DMDDA-41C</b>	1216	11.6	1.66
<b>DDA-41B</b>	89	-	0.31
<b>DDA-41B</b>	439	4.85	0.92
<b>DDA-41C</b>	994	10.94	1.61

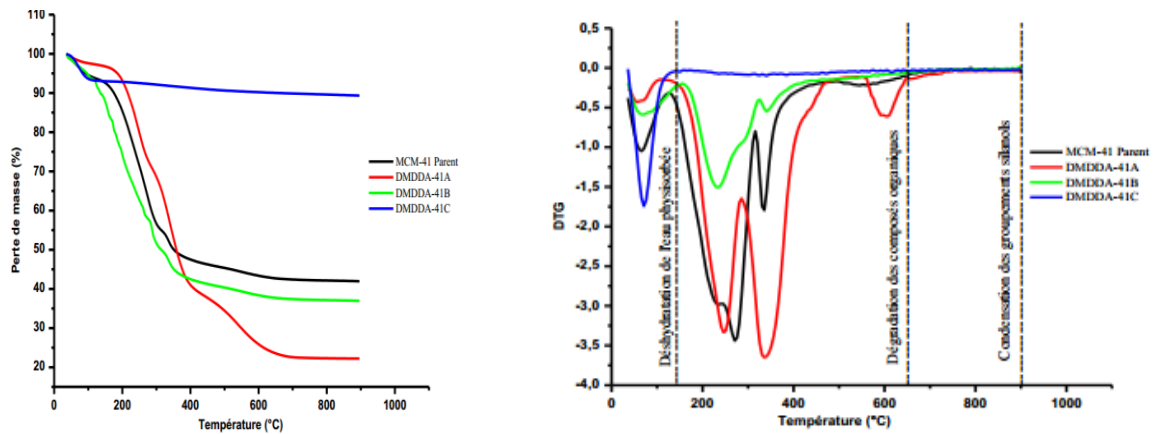
Nous constatons tout d'abord une diminution de la surface spécifique des matériaux aminés et désaminés et une légère augmentation dans le cas des matériaux calcinés. Le diamètre des pores augmente pour les matériaux désaminés et calcinés. La même tendance est observée pour les volumes poreux. Ceci montre que la surface et une partie du volume poreux sont occupées par les amines.

#### **Analyse thermogravimétrique (ATD/TG)**

Les appareils d'analyse thermogravimétrique mesurent de manière très précise la variation de masse d'un échantillon subissant une montée en température généralement linéaire dans une atmosphère contrôlée.

Les pertes de masse de tous les matériaux peuvent être découpées en trois zones de température : une zone à basse température jusqu'à 160°C correspond à une déshydratation du matériau, une zone intermédiaire jusqu'à 650°C correspond à la décomposition et la volatilisation des composés organiques (tensioactifs et amine), puis une dernière zone jusqu'à 900°C est assignée aux phénomènes de déshydroxylation de la silice (condensation des silanols restants provoquant l'élimination de molécules d'eau) .

Ce découpage est mis en évidence par la courbe dérivée car elle permet de mieux appréhender les variations.



**Figure 30 :** Analyse thermogravimétrique comparative des matériaux MCM-41 modifiés par DMDDA.

### Microscopie électronique à balayage (MEB)

Cette technique est devenue essentielle pour l'étude des matériaux, elle a pour principaux objectifs de mesurer la taille des cristaux et de déterminer leur morphologie au cours de la cristallisation.

Les clichés de microscopie électronique à balayage des Si-MCM-41 sont présentés sur les figures 31 ci-dessous. Les images 1et 2 ci-dessous mettent en évidence des particules hexagonales des matériaux MCM-41(parent et modifiés)

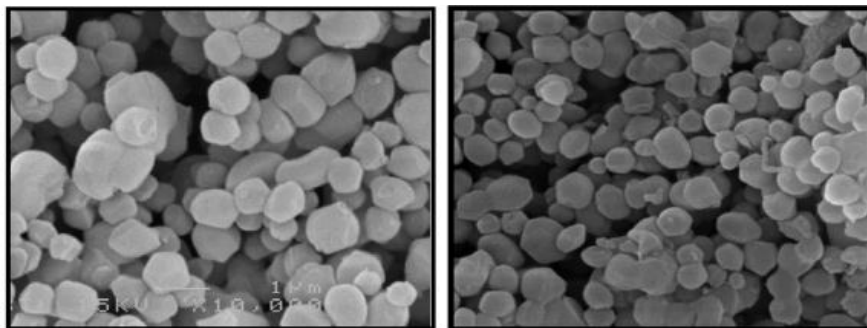


Image1. Photo MEB de MCM-41 Parent

Image2. Photo MEB de MCM-41Aminé

**Figure 31 :** photos MEB de MCM-41 parent et aminé.

### Application à l'Adsorption Polluants organiques (4-nitrophenol)

L'étude cinétique a été effectuée sur le matériau: DMDDA-41B

L'étude cinétique montre deux phases d'adsorption (figure 32), la première entre 0 et 30 minutes qui est rapide et a lieu au niveau des sites accessibles sur la surface, suivie d'une phase lente sous forme de plateau due à la diffusion à l'intérieur des pores du matériau, l'équilibre est atteint au bout de 60 minutes.

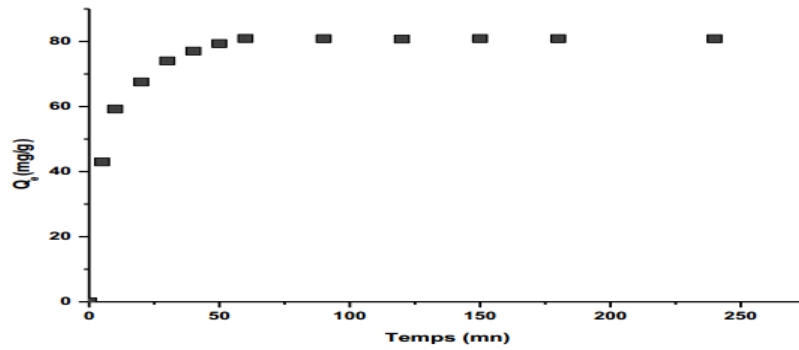


Figure 32 : Cinétique d'élimination du PNP par DMDDA-41B.

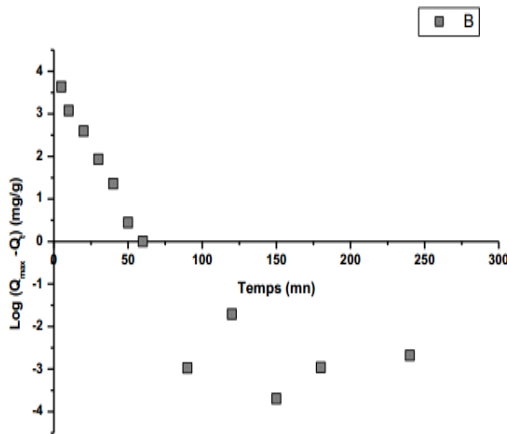


Figure 33 : modèle du pseudo-premier ordre.

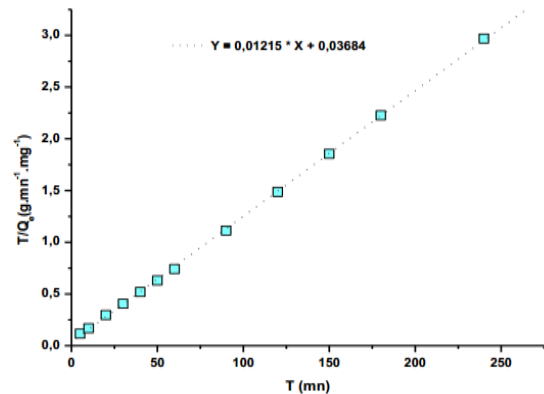


Figure 34 : modèle du pseudo-second ordre.

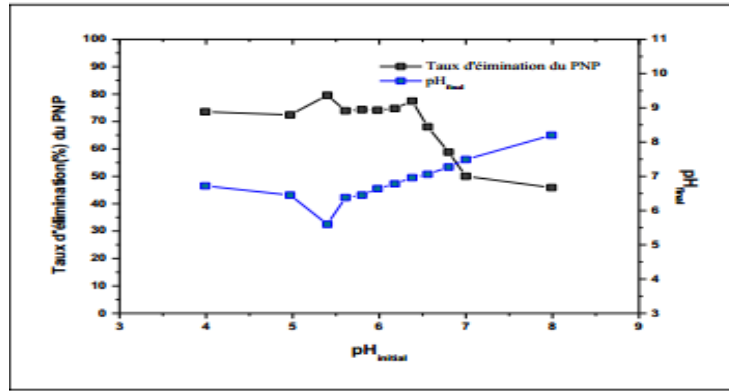
Tableau 9 : Paramètres des deux modèles cinétiques appliqués à l'élimination du PNP par DMDDA-41B.

Matériau	Pseudo-premier ordre			Second pseudo-ordre		
	$K_1$ ( $\text{mn}^{-1}$ )	$Q_e$ (mg /g)	$R^2$	$K_2$ ( $\text{g.mn}^{-1}.\text{mg}^{-1}$ )	$Q_e$ (mg/g)	$R^2$
DMDDA-41B	0.070	11.7	0.87	$4.00.10^{-3}$	82.3	0.99

D'après les valeurs des constantes cinétiques, la cinétique du PNP suit le modèle du pseudo second ordre.

### Effet du pH

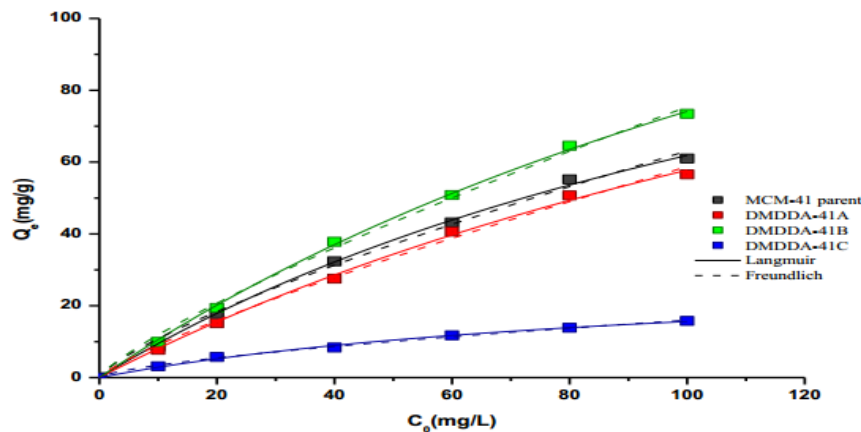
Sur la figure 35 qui représente l'effet du pH dans le cas d'adsorption du PNP, on remarque que l'absorbance est maximale (taux d'élimination du PNP) pour un pH = 5.5. Cette valeur est choisie pour les isothermes d'adsorption du PNP. Au-delà de pH =7, qui correspond à la valeur du pKa du PNP, la forme dissociée est majoritaire et l'adsorption fortement réduite.



**Figure 35 :** Taux d'élimination du PNP sur DMDDA-41B en fonction du pH,  $C_0 = 100$  mg/L.

### Adsorption du PNP sur les différents matériaux MCM-41

Les isothermes d'adsorption du PNP par les différents matériaux sont représentées par la figure 36. On remarque que matériaux parents, aminés et désaminés ont une grande capacité d'adsorption à l'opposé des matériaux calcinés qui ont une très faible capacité d'adsorption



**Figure 36 :** Adsorption du PNP sur différents matériaux MCM-41.

Les matériaux calcinés ne possèdent que des groupements siloxanes (Si-O-Si), ayant une faible énergie d'adsorption

L'amélioration de l'adsorption sur les formes désaminés est due à l'amélioration de leurs surfaces spécifiques, du diamètre des pores et du volume poreux

Les isothermes sont modélisées par les modèles de Langmuir et de Freundlich et les résultats sont regroupés dans le tableau 10.

**Tableau 10** : Valeurs des paramètres de Langmuir et Freundlich pour l'adsorption du PNP par les différents matériaux.

Matériau	Langmuir			Freundlich		
	Q (mg/g)	K (L.g <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>	K <sub>F</sub> (L.g <sup>-1</sup> )	1/n	R <sup>2</sup>
MCM-41 parent	161	6.26	0.99	1.86	0.766	0.99
DMDDA-41 A	181	4.68	0.99	1.40	0.812	0.99
DMDDA-41B	224	4.96	0.99	1.87	0.803	0.99
DMDDA-41C	31	10.19	0.99	0.74	0.668	0.99

Il ressort des valeurs de R<sup>2</sup>, que l'élimination du PNP par les différents matériaux peut être décrite par les deux modèles Langmuir et Freundlich. Le paramètre 1/n < 1 signifie que l'adsorption est favorable pour les faibles concentrations.

### Conclusion

Les taux d'élimination des différents micropolluants par les différents matériaux dépendent du type de structure du matériau (MCM-41 ou MCM-48), de la charge de surface, la surface spécifique, et de longueur de la chaîne alkyl de l'amine utilisée (DMDDA ou DDA). La modélisation des résultats par les équations cinétiques montre que le modèle de pseudo-second ordre est celui qui décrit mieux le processus d'adsorption.

Yehia M. Magdy et autres [79] ont étudié l'élimination de trois nitrophénol des solutions aqueuses par adsorption sur des cendres d'os d'animaux, équilibre et modélisation cinétique.

Dans cette recherche, l'élimination du 2,4 -dinitrophénol, 2-nitrophénol et 4-nitrophénol d'une solution aqueuse à l'aide des cendres d'os d'animaux ont été étudiés en utilisant la technique batch. Trois isothermes à 2 paramètres (Freundlich, Langmuir et Temkin) ont été appliquées pour analyser les données expérimentales. Des analyses de régression linéaire et non linéaire ont été effectuées pour ces modèles afin d'estimer leurs paramètres. Trois isothermes à 3 paramètres (Redlich-Peterson, Sips, Toth) ont également été testées. De plus, les données cinétiques ont été testées en utilisant les méthodes du pseudo-premier ordre, du pseudo-second ordre, d'Elovich, de diffusion intraparticulaire et de Boyd.

Les paramètres affectant le processus d'adsorption tels que le pH et la température ont également été pris en compte.

Pour évaluer le comportement d'adsorption de l'adsorbant et les adsorbats, il est important de déterminer leurs propriétés physico-chimiques.

Les données présentées dans le tableau 11 illustrent les différentes propriétés de l'adsorbant et les adsorbats.



**Tableau 11** : propriétés de l'adsorbant et des adsorbats

<b>Adsorbant</b>							
<b>Élémentaire une analyse</b>	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>Cl</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>Cendre</b>	
	10.8	1.3	1.9	3.6	-	81.5	
<b>Contenu en métal (ppm)</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Sr</b>	<b>Zn</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>CD</b>
	0.0016	0.0133	0.004	0	0	0	0
<b>Divers</b>	<b>Analyse d'écran</b>	<b>Densité g /cm<sup>3</sup></b>	<b>Point de charge zéro</b>	<b>Surface de BET m<sup>2</sup>/g</b>			
	99% moins de 459 μm	7.5	7.5	72.9			
<b>Adsorber</b>	<b>Mwt</b>	<b>Solubilité (g/L)</b>	<b>Taille moléculaire (A°)</b>	<b>Point d'ébullition (C°)</b>	<b>Point de fusion (C°)</b>	<b>Pka</b>	
<b>2,4dinitrophénol</b>	185	13.7	6.84	107	112-114	4.09	
<b>2 nitrophénol</b>	139	2	8.1	216	46	7.24	
<b>4 nitrophénol</b>	139	17	6.7	297	113-114	7.16	

Il est clair d'après l'analyse élémentaire que la cendre est le principal constituant de cet adsorbant. C'est normal puisque les os d'animaux sont le précurseur de l'adsorbant. La présence de quelques métaux comme Cu, Fe et Sr n'a posé aucun problème car le test lixiviation a prouvé que leurs concentrations étaient inférieures au niveau admissible selon les normes égyptiennes.

**Les resultants obtenus lors de cette étude montrent que**

- L'isotherme d'adsorption de Langmuir a fourni le meilleur ajustement pour les données expérimentales indiquant l'adsorption monocouche. La capacité d'adsorption

maximale était de 8.624, 7.55, 7.384 mg / g pour le 2 nitrophénol, le 2,4 dinitrophénol et le 4 nitrophénol, respectivement.

- Les données expérimentales sont bien adaptées au modèle du pseudo-second, suggéraient un processus d'adsorption de type chimique (chimisorption). Les valeurs  $R^2$  pour ce modèle étaient de 0.973 à 0.999. Ce résultat est soutenu par le modèle Temkin indiquant que la chaleur d'adsorption est supérieure à 10 kJ/mol.

Le pH et la température de la solution ont un effet considérable, la capacité d'adsorption des trois phénols diminue avec l'augmentation de la température, cela signifie que le processus d'adsorption est exothermique. Ce résultat est en accord avec le résultat obtenu par l'isotherme Temkin.

- La capacité d'adsorption maximale a été obtenue à pH=9 et 25°C. le point zéro charge de l'adsorbant est de 7.5, la surface de l'adsorbant sera chargée négativement à des valeurs de pH supérieurs à cette valeur et positivement chargée à un pH inférieur à cette valeur.
- La cendre de charbon produite à partir d'os d'animaux est un bon adsorbant pour éliminer les phénols des systèmes aqueux.

# **Conclusion**

### **Conclusion générale**

Le travail réalisé dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre général de la dépollution des Eaux. Il a eu pour objectif d'étudier l'élimination d'un polluant organique qui est le nitrophénol, par le procédé d'adsorption sur un matériau siliceux mésoporeux.

La pollution de l'hydrosphère est l'un des problèmes environnementaux les plus graves engendré par les activités humaines. Une attention a été portée sur les polluants organiques, dans notre étude on s'est concentré sur les colorants qui causent de sérieux souci à l'environnement en raison de leur stabilité et de leur faible biodégradation. Le p-nitrophénol est un colorant persistant, bioaccumulable et hautement toxique même à très faible concentration.

Divers procédés ont été étudiés pour traiter les eaux contaminées, tels que la coagulation, l'oxydation avancée et l'adsorption ....etc. Notre choix s'est fait sur l'adsorption, et ceci grâce à ses nombreux avantages.

L'adsorption est la technique la plus utilisée son rendement dépend de l'adsorbant utilisé. Elle est souvent répondue dans les usines.

Pour obtenir des meilleures performances d'adsorption et définir un processus d'adsorption approprié il est essentiel d'optimiser les principaux paramètres opératoires tels que le pH, la concentration, la température, la quantité d'adsorbant ...

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

- [1]: Zaimeche, S. Contribution à l'étude de l'action d'agents polluants sur des végétaux bio indicateurs. Thèse doctorat. Université des frères mentouri Constantine. 2015.
- [2]: Amourache, M. Etude de l'élimination du bleu de méthylène et de composés organiques toxiques à partir de solutions aqueuses par un biosorbant non conventionnel. Thèse de doctorat. Université 8 Mai 1945 Guelma. 2019.
- [3]: Keddal, H., Yao, J. Impacts de l'intensification agricole sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Revue de l'art 1. 2008.
- [4]: Mizi, A. Traitement des eaux de rejets d'une raffinerie des corps gras région de Bejaia et valorisation des déchets oléicoles. Thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar Annaba. 2006.
- [5]: Mekhlif, F. Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d'appoint dans un circuit de refroidissement. Mémoire de magister. Université du 20 Août 1955 Skikda. 2009.
- [6]: Galaf, F., Ghannam, S. Contribution à l'élaboration d'un manuel et d'un site web sur la pollution du milieu marin. Mémoire d'ingénieur d'état. Université Hassan II Maroc. 2003.
- [7]: Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J-P. L'analyse de l'eau; eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 8<sup>ème</sup> édition Dunod. France. 1996.
- [8]: Ramdan, N. Etude comparative de la dépollution des eaux de la station de Skikda par adsorption sur charbon actif et sur bentonite. Mémoire de magister. Université du 20 Août 1955 Skikda. 2006.
- [9]: Azouaou, N. Sadaoui, Z. Removal of lead from aqueous solution onto untreated coffee grounds: a fixed-bed column study. The Journal of Chemical. Vol, 38, no 7. 2014.
- [10]: Soror, W. Traitement des eaux usées urbaines par boues activées au niveau de la ville de Bordj Bou Arreridj en Algérie effectué par la station d'épuration des eaux usées ONA. Mémoire de Master. Université de Bourdj bou Arreridj. 2012.
- [11]: Thomas, O. Métrologie des eaux résiduaires. Edition Cebedoc. Paris. 1995.
- [12]: Salghi, R. Différents filières de traitement des eaux. Cours. Ecole nationale des sciences appliquées d'Agadir. 2006.
- [13]: Debray, B. Système d'aide à la décision pour le traitement des déchets spéciaux. Thèse de doctorat. Université de Lyon. 1977.
- [14]: Benelmouaz, A. Performances épuratoires d'une station d'épuration de Maghnia. Mémoire de master. Université de Tlemcen. 2015.
- [15]: Larkem, F., Bacel, S. Traitements des eaux usées effluents de la raffinerie de Skikda. Mémoire d'ingénieur. Université de Constantine. 2005.

## Références bibliographiques

---

- [16]: Koller, E. Traitement des pollutions industrielles: eau, air, déchets, sols, boues. 1<sup>er</sup> édition Dunod. Paris. 2004.
- [17]: Ferjani, A. Indicateurs environnementaux pour l'agriculture. Volume 3. Édition OCDE. Suisse. 2001.
- [18]: Cardot, C. Les traitements de l'eau pour l'ingénieur. Édition ellipses. France. 2010.
- [19]: Amiard, J-C. Les risques chimiques environnementaux, méthodes d'évaluation et impacts sur les organismes. 2<sup>ème</sup> édition Lavoisier. 2016.
- [20]: Hanna, K. Etude de faisabilité de l'utilisation de molécules " cage" dans la dépollution des sols: solubilisation et extraction de polluants organiques par les cyclodextrines. Thèse de doctorat. France. 2004.
- [21]: Monique, T-H. Chimie des eaux. 2<sup>ème</sup> édition le griffon d'argile. Canada. 2007.
- [22]: Maddaluno, J. Chimie organique. 2<sup>ème</sup> édition Dunod. France. 2013.
- [23]: Ramade, F. Encyclopedic dictionary of pollutions. France. 2000.
- [24]: Juster, N. Color and Chemical Constitution. Journal of Chemical Education. 1962.
- [25]: Shore, J., Peterson, D. Colorant and auxiliaries. Organic chemistry and application properties volume 1-colorants; BTTG-Shirley. Manchester. 1990.
- [26]: Benamraoui, F. Élimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas Sétif. 2018.
- [27]: Guillermo, C. L'évolution des colorants à travers les âges. Revue d'histotechnologie. Vol, 11, no 1. France. 1998.
- [28]: Benaissa, A. Etude de la dégradation photocatalytique d'un colorant synthétique et d'un tensioactif. Thèse de Doctorat. Université Mentouri Constantine. 2011.
- [29]: Bouafia, S. Dégradation des colorants textiles par procédés d'oxydation avancée basée sur la réaction de fenton, application à la dépollution des rejets industriels. Thèse de doctorat. Université Paris–Est. 2010.
- [30]: Chebli, D. Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique. Thèse de doctorat. Université Farhat Abbas Sétif. 2018.
- [31]: Abouzaid, A. Etude de différents traitements des effluents de l'industrie textile. Thèse de doctorat. Thèse de doctorat. Université Chouaib Doukkali Maroc. 2001.
- [32]: Mittal, A., Kurup, L. Utilization of henfeathers for the adsorption of indigo carmine from simulated effluents. Environ. Prot. Sci, vol, 1, no 1. 2007.

## Références bibliographiques

---

- [33]: Merouani, D-R. Traitement de colorants azoïque et anthraquinonique par procédés d'oxydation avancée (POA). Thèse de doctorat Lille 1. 2011.
- [34]: Chen, J., Wang, L. Characterization of metal adsorption kinetic properties in batch and fixed-bed reactors. *Chemosphere*, vol. 54, no 3. 2004.
- [35]: Saidi, F-Z. Elimination du bleu de méthylène par des Procédés d'oxydation avancée. Thèse de doctorat. Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen. 2013.
- [36]: Bousnoubra, I. Contribution à l'élimination de colorants (vert de méthyle et bromocrésol pourpre) par procédés photochimiques en phase homogène (séparés et mélangés), en phase hétérogène en milieu aqueux et par adsorption (Vert de méthyle) sur ZnO. Thèse de doctorat. Université des frères mentouri Constantine 1 .2011.
- [37]: Nicolas, W. Chimie organique hétérocycles. Cours. 2009.
- [38]: Elodie, Z. Traitement des polluants organiques au milieu aqueux par procédé électrochimique d'oxydation avancée « Electro-Fenton ». Application à la minéralisation des colorants synthétiques. Thèse doctorat. Université de Marne-La-Vallée France. 2004.
- [39]: Bliefert, C., Perraud, R. Chimie de l'environnement. Air, eau, sols, déchets. 2<sup>ème</sup> édition De Boeck. 2001.
- [40]: Du, Y., Zhou, M., et Lei, L. Role of the intermediates in the degradation of phenolic compounds by Fenton-like process. *Journal of hazardous materials*. Vol, 136, no 3. 2006.
- [41]: Benhamou, A. Utilisation des matériaux mésoporeux fonctionnalisés dans le traitement des eaux. Thèse de doctorat. Université d'Oran. 2010.
- [42]: Salehi, Z., Yoshikawa, H., Mineta, R. Aerobic biodegradation of p-nitrophenol by acclimated waste activated sludge in a slurry bubble column. *Process Biochemistry*. Vol, 46, no 1. 2011.
- [43]: Kulkarni, M., Chaudhari, A. Microbial remediation of nitro-aromatic compound: an overview. *Journal of Environmental Management*. Vol, 85, no 2.2007.
- [44]: Aktaş, Ö., Çeçen, F. Adsorption and cometabolic bioregeneration in activated carbon treatment of 2-nitrophenol. *Journal of hazardous materials*. Vol, 177, no 1-3. 2010.
- [45]: Gaffour, H. Elimination du 4-Nitrophénol par des procédés d'oxydation avancée. Mémoire de magister. Université Abou Bakr belkaid Tlemcem. 2011.
- [46]: Arris, S. Etude expérimentale de l'élimination des polluants organiques et inorganiques par adsorption sous-produits de céréale .Thèse de doctorat. Université de Constantine. 2008.
- [47]: Arden, T-V., Dardel, F. Echange d'ions. Cours de techniques de l'ingénieur. 1986.
- [48]: Menouer, S. Étude de la qualité des rejets liquides industriels en aval du Complexe GL1/Z. Mémoire de Fin d'Études. Université d'Oran. 2014.



## Références bibliographiques

---

- [49]: Degrémont, M. Technique de l'eau. 9<sup>ème</sup> éditions Lavoisier. Paris. 1989.
- [50]: Cendres, A. Procédé novateur d'extraction de jus de fruits par micro-onde : viabilité de Fabrication et qualité nutritionnelle des jus. Thèse de doctorat. Université d'Avignon. 2010.
- [51]: Kettab, A. Traitement des eaux potables édition OPU. Alger. 1992.
- [52]: Kouidri, Z. Etude de traitement de l'eau du barrage Djorf-El Torba de la wilaya de Becher par filtration sur sable. Mémoire de magister. Université Hassiba Benbouali-Chlef. 2016.
- [53]: Graini, L. Contrôle de la pollution de l'eau par méthode acousto-optique. Mémoire de magister. Université Farhat Abbas-Sétif. 2011.
- [54]: Choi, J-Y., Kim, D-S. Adsorption behavior of zinc and cadmium ion on granular activated carbon in singular and binary systems and the influence of nitrilotricetic acid as a complexing agent. Journal of environmental science and health. Vol, 37, no 9. 2002.
- [55]: Desjardins, R. Le Traitement des Eaux. 2<sup>ème</sup> édition Revue. Ecole Polytechnique. Montréal. 1990.
- [56]: Boualla, N., Benziane, A. Étude expérimentale sur l'élimination des nitrates par adsorption sur des argiles activées et non activées de la sebkha d'Oran. Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie. Vol, 7, no 2. 2011.
- [57]: Yahiaoui, N. Etude de l'adsorption des composés phénoliques des margines d'olive sur carbonate de calcium, hydroxyapatite et charbon actif. Mémoire de magister. Université de Tizi Ouzou. 2012.
- [58]: Masmoudi, T. Etude de l'incidence de la présence simultanée de la cytosine et de la caféine au cours de la chloration et de l'adsorption sur charbon actif des substances humiques en eaux minéralisées. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra. 2014.
- [59]: Laurette, S. Utilisation des fibres de carbone activé comme catalyseurs de O-et N-glycosylation: Application à la synthèse d'analogues de saponines et de nucléosides. Thèse de doctorat. Université de Limoges. 2004.
- [60]: Terchi, S. Adsorption du bore en solution aqueuse essais de dépollution. Mémoire de magistère. Université Mentouri de Constantine. 2009.
- [61]: Ouffad, Z. Etude de la sorption des composés phénoliques sur des bentonites modifiées. Thèse de doctorat. Université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou. 2011.
- [62]: Vanvliet, B-M., Weber, W-J., et Hozumi, H. Modeling and prediction of specific compound adsorption by activated carbon and synthetic adsorbents. Water Research journal-Elsevier. Vol, 14, no 12. 1980.

## Références bibliographiques

---

- [63]: Manole, C. Procédé AD-OX d'élimination de polluants organiques non biodégradables: par adsorption puis oxydation catalytique. Thèse de doctorat. Institut national de Toulouse. 2007.
- [64]: Tizaoui, K. Elimination des métaux lourds par une argile marneuse. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen. 2019.
- [65]: Liang-Ming, S., Meunier, F. Adsorption Aspects théoriques. Cours de techniques de l'Ingénieur. France. 2003.
- [66]: Hemsas, S. Contribution à l'étude de la décoloration des eaux sur grignons d'olives valorisés étude dynamique. Mémoire de magister. Université d'Adrar. 2008.
- [67]: Errais, E. Réactivité de surface d'argiles naturelles: étude de l'adsorption de colorants anioniques. Thèse de doctorat. Université de Strasbourg. 2011.
- [68]: Bouacherine, S. Eliminations des polluants spécifiques par adsorption sur charbon actif et argile traitée et non traitée. Thèse de doctorat. Université de Souk Ahras. 2013.
- [69]: Freundlich, H. Hatfield, H- S. Colloid and capillary chemistry. Methuen and Co. Print book. London. 1926.
- [70]: Sawalha, F., Peralta-Videa, R. Thermodynamic and isotherm studies of the biosorption of Cu (II), Pb (II), and Zn (II) by leaves of saltbush (*Atriplex canescens*). The Journal of Chemical Thermodynamics. Vol, 39, no 3. 2007.
- [71]: Argun, M. E., Dursun, S. Heavy metal adsorption by modified oak sawdust: Thermodynamics and kinetics. Journal of hazardous materials. Vol, 141, no 1. P 77-85. 2007.
- [72]: Loux, N. T., Brown, D. S., Chafin, C. R., Allison, J. D., Hassan, S. M. Chemical speciation and competitive cationic partitioning on a sandy aquifer material. Journal Chemical Speciation & Bioavailability. Vol, 1, no 3. 1989
- [73]: Cochrane, E-L., Lu, S., Gibb, S. W., Villaescusa, I. A comparison of low-cost biosorbents and commercial sorbents for the removal of copper from aqueous media. Journal of hazardous materials. Vol, 137, no 1. 2006.
- [74]: Barbey, F., Cachat, F., Nguyen, Q. V., Rotman, S., Burnier, M., Daudon, M. Hyperoxaluries massives. Revue médicale romande. Vol, 124, no 8. Suisse. 2004.
- [75]: Koller, E. Génie chimique. Edition Dunod. France. 2001.
- [76]: Boultif, A., Madani, H. Application d'algorithmes évolutionnistes avec hybridation aux calculs des Equilibres liquide-liquide dans les systèmes ternaires. Thèse de doctorat. Université d'Ouargla. 2017.
- [77]: Chitour, S-E. Chimie des surfaces, Introduction à la catalyse. Edition OPU. Alger. 1981.

## Références bibliographiques

---

[78]: N'diaye, A. D., Bollahi, M. A., & Kankou, M-S-A. Removal of Paranitrophenol from aqueous solution onto activated Carbons. *Journal of Materials and Environmental Science* .Vol, 10, no 8. 2019.

[79]: Magdy, Y-M., Altaher, H., & El Qada, E. Removal of three nitrophenols from aqueous solutions by adsorption onto char ash: equilibrium and kinetic modeling. *Journal of Springer applied water science*. Vol, 8, no 1. 2018.

## **Résumé**

Le problème de la pollution reste le sujet d'intérêt de nombreux scientifiques, car il touche plusieurs secteurs vitaux. Dans ce travail, nous nous intéressons aux ressources en eau contaminées par des colorants pouvant causer divers problèmes.

L'objectif de cette étude est l'élimination d'un polluant organique -nitrophénol- par adsorption qui se présente comme le procédé le plus adapté pour le traitement des eaux contaminées. L'efficacité de ce procédé revient aux propriétés de l'adsorbant (porosité, polarité) et aux grandeurs (pH, temps de contact, concentration...).

**Mots clés :** pollutions des eaux, colorants, nitrophénol, adsorption.

## **Abstract**

The problem of pollution remains the subject of interest of many scientists, because it affects several vital sectors. In this work, we are interested in water resources contaminated by dyes that can cause various problems.

The objective of this study is the elimination of an organic pollutant -nitrophenol- by adsorption which appears to be the most suitable process for the treatment of contaminated water. The effectiveness of this process comes down to the properties of the adsorbent (porosity, polarity) and the quantities (pH, contact time, concentration, etc.).

**Key words :** water pollution, dyes, nitrophenol, adsorption.