



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITE DE 20 AOUT 1955 SKIKDA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE PETROCHIMIE ET GENIE DES PROCEDES

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie de l'environnement

**Étude l'efficacité de rétention du colorant sur la
Bentonite**

Soutenu le/06/2023

Réalisé par :

Roumaïssa BEN MOUSSA

Amira TABBANI

Rayen BEN MOUSSA

Encadré par :

M^{me} CHEKROUD Hassina

Année Universitaire 2022 – 2023



Remerciements

Nous commençons d'abord par remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de terminer nos études et d'atteindre ce stade.

Nous souhaitons remercier notre promotrice Mme CHEKROUD Hassina, pour son encadrement, ses orientations, ses conseils judicieux, sa patience et sa disponibilité.

Nos sincères remerciements s'adressent plus spécialement à Mme Lounas Amel, pour son aide précieuse, sa compétence scientifique et ces conseils techniques.

Tenons à leur exprimer ici toute ma reconnaissance.

Les membres de jury qui ont pris la peine d'examiner et de Juger notre travail.

Nous exprimons toute ma gratitude à nos meilleurs Enseignants qui Ont éclairé notre chemin depuis les cinq ans de la graduation pour Leurs avis et leurs conseils, tant leur soutien.

Ma gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué à la préparation de ce mémoire de fin de formation et également à toute personne ayant concouru à ma formation durant mon cursus

Des remerciements particuliers à nos parents pour leur grand soutien
Enfin, merci du fond de cœur à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Roumaissa, Amira et Rayan



Dédicaces



Je dédie ce modeste travail à mes généreux parents,
Qu'ils trouvent ici toute ma gratitude pour leur aide précieuse et leur
soutien tout le long de mes études

Que Allah les bénisse, protège et leur accorde une longue et bonne
vie.

A :

Mes très chers frères et sœurs qui m'ont toujours encouragé à aller de
l'avant

Toute ma famille

Et surtout à mes binôme « Amira et Rayan », avec qui j'ai passé des
jours et des nuits pleines de fatigue afin de mener à bien ce travail



Ben moussa Roumaïssa



Dédicaces



Au début je dédie dieu pour la réussite dans mon parcours d'étude

Et je remercie moi-même parce que ce n'était pas facile mais hamdollah

Et avec un grand plaisir je Dédé ce mémoire à mes chers parents et mes frères pour tout leur amour et leur soutien durant toute mon parcours d'étude

Et je tiens à dédier infiniment mon marié qu'il m'a toujours encouragé et a été à côté de moi

Est avec un grand plaisir j'avais l'occasion de travailler et élaborer avec mon binôme « Roumaissa et Rayan Ben Moussa » notre mémoire que ce n'était pas facile à réaliser vu que tout ce qu'on a passé hamdollah on mérite ce travail et on était à la hauteur merci à nous, c'est le début de notre chemin on est capable et on est là



Taabni Amira



Dédicace



Je Dédie ce travail

A ma mère pour son amour ses encouragements et ses sacrifices

A mon père pour son soutien son affection et la confiance qu'il
m'accorde

Tout d'abord, je tiens à remercier infiniment ma magnifique
Famille, qui m'a guidé et soutenu tout au long des étapes de ma vie

A mes enseignants et professeurs

Car sans leurs enseignements de qualité leur patience,

Dévouement et sacrifice rien de cela ne serait possible



Ben moussa Rayan

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale 01

Première partie : Synthèse bibliographique

Chapitre I : Pollution des eaux 03

I.2. Introduction 03

I.2. Définition 03

I.3. Types de pollution 03

I.3.1. La pollution ponctuelle 03

I.3.2. La pollution diffuse 03

I.4. Sources de pollution 04

I.4.1. La Pollution industrielle 04

I.4.2. La pollution urbaine 04

I.4.3. La pollution agricole 05

I.4.4. La pollution atmosphérique 05

I.5. Les principaux polluants des eaux 05

I.5.1 Les matières en suspension 05

I.5.2. La pollution organique 05

I.5.3. Les matières fertilisantes 06

I.5.4. Les polluants métalliques et les polluants chimiques persistants 06

I.5.5. Les sels minéraux 06

I.6. Conséquences de la pollution 06

I.7. Origine des polluants et types de pollutions industrielles 07

I.7.1 Pollution physique 07

I.7.2. Pollution chimique 07

I.7.3. Pollution microbiologique 09

I.8. Paramètres de mesure de la pollution 10

I.8.1. Paramètres organoleptiques 10

I.8.2. Paramètres physiques 11

I.8.3. Paramètres chimiques 12

I.9. Autres paramètres 13

I.9.1 Alcalinité de l'eau 13

I.9.3. La dureté de l'eau	15
I.9.4. Résidu sec : matières sèches (MS)	16
I.9.5. Les micropolluants	16
I.9.6. Carbone organique total (COT)	16
I.9.7. Métaux lourds	17
I.9.8. Substances tensioactives	18
I.10. Les substrats polluants	18
I.10.1. Matières décantables ou flottantes	18
I.10.2. Matières fines en suspension	18
I.10.3. Matières colloïdales	19
I.10.4. Matières solubles	19
I.10.5. Matières biodégradables	19
I.10.6. Matières non-biodégradables	19
I.10.7. Matières organiques	19
I.10.8. Matières inorganiques	19
I.11. Conclusion	20
Chapitre II : Les colorants	21
II.1. Introduction	21
II.2. Définition	21
II.3. L'origine des colorants	22
II.3.1. Origine naturelle	22
II.3.2. Origine artificielle	22
II.4. Classification des colorants	23
II.4.1. Classification tinctoriale	23
II.4.2. Classification chimique	25
II.5. L'effet toxique du colorant	27
II.5.1. L'effet toxique sur l'environnement	27
II.5.2. L'effet toxique sur la santé humaine	28
II.6. Traitement des colorants	29
II.6.1. Méthode physique	29
II.6.2. Méthode chimique	31
II.6.3. Les traitements thermiques	32
II.6.4. Les traitements biologiques	32

II.7. Conclusion	32
Chapitre III : phénomène d'adsorption	33
III.1. Introduction	33
III.2. Définition	33
III.3. Les adsorbants	34
III.3.1. Définition	34
III.3.2. Les types d'adsorbant	34
III.3.3. Structure de l'adsorbant	35
III.4. Type de phénomène d'adsorption	36
III.4.1. Adsorption chimique	36
III.4.2. Adsorption physique	36
III.5. Mécanisme d'adsorption	37
III.5.1. L'adsorption par liaison ioniques ou échange des ions	38
III.5.2. Rétention hydrophobe	38
III.5.3. L'adsorption par liaison hydrogène	39
III.5.4. L'adsorption par la force de van der Waals	39
III.6. La cinétique d'adsorption	39
III.6.1. Modélisation des cinétiques d'adsorption	40
III.7. Isotherme d'adsorption	42
III.7.1. Classification d'isothermes	42
III.7.2. Modélisation des isothermes d'adsorption	44
III.8. Conclusion	46
Chapitre IV : Etude d'adsorption	47
IV.1. Introduction	47
Partie 01 : Matériels et méthodes	47
IV.2. Produits et matériels utilisés	47
IV.2.1. Matériels utilisés	47
IV.2.2. Produits utilisés	47
IV.2.3. Techniques d'analyses	48
IV.2.4. Préparation d'une solution de (RC, CV)	50
Partie 02 : Résultats et discussions	53
1) Mode opératoire (RC)	53
IV.3. L'efficacité de l'adsorption par l'argile	53

IV.4. L'efficacité de quelques paramètres sur l'adsorption	54
IV.4.1. Temps de contact	54
IV.4.2. Influence de la masse	54
IV.4.3. Influence de la concentration du CV	55
IV.4.4. Influence de la température	56
IV.4.5. Modélisation des isothermes d'adsorption	57
IV.4.5.1. Modèle de Langmuir	57
IV.4.5.2. Modèle de Freundlich	58
IV.6. Modélisation des cinétiques d'adsorption	59
IV.6.1. Modèle de pseudo premier ordre (PPO)	59
IV.6.2. Modèle de pseudo second ordre (PSO)	60
2) Mode opératoire (RC)	61
IV.7. L'efficacité de quelques paramètres sur l'adsorption	61
IV.7.1. Temps de contact	62
IV.7.2. Influence de la masse	62
IV.7.3. Influence de la concentration du RV	63
IV.7.4. Influence de la température	65
IV.7.5. Modélisation des isothermes d'adsorption	65
IV.7.5.1. Modèle de Langmuir	65
IV.7.5.2. Modèle de Freundlich	66
IV.8. Modélisation des cinétiques d'adsorption	67
IV.8.1. Modèle de pseudo premier ordre (PPO)	67
IV.8.2. Modèle de pseudo second ordre (PSO)	68
Conclusion général	71
Références bibliographie	72

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des substrats polluants	20
Tableau II.1 : Groupe chromophores et auxochromes classés par intensité décroissante	22
Tableau II.2 : Les différentes méthodes de traitement des colorants.	29
Tableau III.1 : Les principaux types d'adsorbants employés	34
Tableau III.2 : Les différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.	37
Tableau IV.1 : Produits chimiques utilisés	47
Tableau IV.2 : Absorbance du CV pour différentes concentration	51
Tableau IV.3 : Absorbance de RC pour différentes concentrations	51
Tableau IV.4 : Résultats des modèles cinétiques de l'adsorption du CV et RC sur différents adsorbants	70

Liste des figures

Figure I.1 : les pollutions produites par l'urbanisme	04
Figure II.1 : la capacité d'absorption des couleurs des rayonnements lumineux dans le spectre visible de 380 à 750 nm.	22
Figure II.2 : Structure chimique de colorants acides ou anioniques	24
Figure II.3 : structure chimique de colorants basiques ou cationiques	24
Figure II.4 : structure chimique de colorants de cuve.	25
Figure II.5 : structure chimique de colorants directs.	25
Figure II.6 : structure chimique de colorants anthraquinoniques.	26
Figure II.7 : structure chimique de colorants indigoïdes.	26
Figure II.8 : structure chimique de colorants xanthènes	26
Figure II.9 : structure chimique de colorants phtalocyanines.	27
Figure II.10 : structure chimique de colorants nitrés et nitrosés.	27
Figure III.1 : Représentation schématique des différents types de pores.	35
Figure III.2 : Représentation schématique de la surface interne et externe d'un adsorbant.	36
Figure III.3 : Schéma de l'adsorption physique,	37
Figure III.4: Mécanisme d'adsorption,	38
Figure III.5: Schéma de mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain	40
Figure III.6 : Les isothermes de type I	42
Figure III.7 : Les isothermes de type II	43
Figure III.8 : Les isothermes de type III	43
Figure III.9: Les isothermes de type IV	43
Figure III.10 : Les isothermes de type V	44
Figure III.11 : Représentation graphique de l'isotherme de Freundlich.	45
Figure IV.1 : A : Cristal Violet, B : Rouge Congo	48
Figure IV.2 : argile	48
Figure IV.3 : Thermomètre	48
Figure IV.4 : centrifugation DLAB DM 0412	49
Figure IV.5 : Spectrophotomètre UV/Visible spectroscopy (1900i-UV-VIS)	49
Figure IV.6 : Courbe d'étalonnage de CV	51
Figure IV.7 : Courbe d'étalonnage de RC	52

Figure IV.8 : Expériences d'adsorption de Cristal Violet	53
Figure IV.9 : influence de la concentration initiale du CV sur le rendement d'élimination	53
Figure IV.10 : Influence de la capacité d'adsorption en fonction du temps.	54
Figure IV.11 : influence de masse de bentonite sur le rendement d'élimination du CV par l'adsorption	55
Figure IV.12 : influence de la concentration du CV sur leur rendement d'élimination par l'adsorption	55
Figure IV.13 : Influence de la concentration initiale du CV sur la capacité d'adsorption	56
Figure IV.14 : Influence du rendement d'adsorption en fonction du temps	56
Figure IV.15 : Isotherme de Langmuir de l'adsorption du CV sur bentonite	57
Figure IV.16 : Isotherme de Freundlich de l'adsorption du CV sur bentonite	58
Figure IV.17 : Modélisation de la cinétique d'adsorption du CV par le modèle de pseudo premier ordre	59
Figure IV.20 : Modélisation de la cinétique d'adsorption du CV par le modèle de pseudo second ordre.	60
Figure IV.21 : Expériences d'adsorption de Rouge Congo	61
Figure IV.22 : influence de la concentration initiale du RC sur le rendement d'élimination	61
Figure IV.23 : Influence de la capacité d'adsorption en fonction du temps.	62
Figure IV.24 : influence de masse de bentonite sur le rendement d'élimination du RC par l'adsorption	63
Figure IV.25 : influence de la concentration du RC sur leur rendement d'élimination par l'adsorption	63
Figure IV.26 : Influence de la concentration du RC sur le rendement d'élimination par l'adsorption	64
Figure IV.27 : Influence de la concentration initiale du RC sur la capacité d'adsorption	64
Figure IV.28 : Influence du rendement d'adsorption en fonction du temps	65
Figure IV.29 : Isotherme de Langmuir de l'adsorption du RC sur bentonite	66
Figure IV.30 : Isotherme de Freundlich de l'adsorption du RC sur bentonite	67

Figure IV.31 : Modélisation de la cinétique d'adsorption du RC par le modèle de pseudo premier ordre 68

Figure IV.32 : Modélisation de la cinétique d'adsorption du RC par le modèle de pseudo second ordre. 69

Liste des abréviations

qe :	Quantité adsorbée par gramme du solide [mg/g]
qm :	Capacité de rétention mono moléculaire [mg/g]
KL :	La constante de Langmuir [l/mg]
C0 :	Concentration initiale [mg/l]
T :	Température [°C]
qt :	Capacité adsorbée au temps [mg/g]
C :	Concentration au temps [mg/l]
M :	La masse Molaire [g/mole]
m :	Masse de l'adsorbant [g]
V :	Volume de la solution [L]
R :	Rendement [%]

Introduction générale

Introduction générale

La communauté de recherche scientifique accorde de l'intérêt à la qualité de la vie sur la terre, c'est-à-dire à la préservation de l'environnement, qui est mise à mal par les rejets des différents déchets, telle que les déchets gazeux, liquides et solides générés par les catastrophes naturelles et les activités humaines. Comme le cas des industries textiles qui génèrent de grandes quantités d'effluents fortement contaminés par des polluants en occurrence les colorants. Ces substances se retrouvent dans l'environnement, et très dangereuses, A cet effet, plusieurs techniques ont été employées pour le traitement des effluents industriels, parmi lesquelles on peut citer, la méthode l'électrocoagulation, l'adsorption par charbon actif ou les argiles et la coagulation- floculation.

Les colorants sont des matières non dégradables par les micro-organismes, ces rejets toxiques et nocifs pour les parties environnementaux, présentent un danger certain pour l'homme et l'animal. Les colorants synthétiques ont presque complètement supplanté les colorants naturels. Le procédé d'adsorption sur l'argile est le procédé le plus utilisé et recommandé pour le traitement des eaux résiduaires dans les industries textiles. Les eaux résiduaires industrielles sont chargées par des colorants ont été largement étudiées, en vue de les traiter avant leur rejet dans les milieux naturels. L'origine des eaux résiduaires colorées est généralement par les pratiquement industrielle telle que du textile, du cuir des entreprises cosmétique, pharmaceutique et agroalimentaire. Les colorants sont par définition c'est des composés aromatiques et hétérocycliques, leur structure complexe et stable comprend des chromophores et des groupements fonctionnels polaires qui sont difficilement dégradables. L'élimination de ces colorants dans les solutions aqueuses par la technique d'adsorption sur différents matériaux solides, en particulier sur l'argile, a fait l'objet de beaucoup de travaux. Pour que l'utilisation de ces adsorbants devienne plus effective, les recherches se sont concentrées particulièrement à l'étude des mécanismes régissant la fixation des molécules de colorants sur les grains (fibres) des adsorbants. Il est évident que l'interaction entre les colorants et ces adsorbants dépend du type de groupements réactifs sur la molécule du colorant, ainsi que les fonctions de surface que renferme le solide. Durant les deux dernières décennies, de nombreux chercheurs scientifique se sont focalisés sur la préparation de certains adsorbants, comme les argiles sont les plus utilisés, fabriqués à partir d'une variété de précurseurs à teneur élevée en carbone, comme le bois, les algues filamenteuses les noyaux du jujubier sauvage, les noyaux des fruits jaunes du prunier mombin, les bois des noix et de peuplier Le point d'intéressé à ces matériaux, elle est renouvelable et potentiellement moins chère à fabriquer.

Dans ce travail, nous avons utilisé l'argile pour l'étude d'isothermes d'adsorption, d'une part, et la cinétique, d'autre part, permet de contrôler la conception et le dimensionnement des ouvrages assurant l'épuration des eaux colorées par adsorption. Le taux de transfert du colorant à partir de la solution jusqu'à l'adsorbant nécessite de savoir la nature de rétention des molécules du colorant : adsorption sur la surface ou diffusion dans les espaces internes de l'adsorbant.

L'objectif de notre étude est donc de tester l'efficacité de la rétention du colorant sur l'argile. Nous tenterons, en comparant leur différente efficacité. Ce travail est structuré en deux partie :

- ❖ La première partie sera consacré à une étude bibliographique subdivisée en trois chapitres :
 - ☞ Le premier chapitre contient des généralités sur la pollution des eaux,
 - ☞ Le second chapitre, présent des rappels théoriques sur les colorants,
 - ☞ Dans le troisième chapitre nous abordons le phénomène d'adsorption et les différents matériaux adsorbant, les mécanismes, les caractéristiques, les types d'adsorption, la cinétique, et isothermes d'adsorption ainsi que les meilleurs adsorbants utilisés.
- ❖ La deuxième partie, nous présentons comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus sur deux types de colorants différents ; ainsi que leurs discussions et l'influence des différents paramètres sur l'adsorption, telles que : la concentration initiale du colorants, temps de contact, le pH, la température, et la validation des quelques modèles des isothermes et cinétique d'adsorption.
- ❖ Le manuscrit se termine par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus et les perspectives du présent travail.

Partie bibliographie

Chapitre I : pollution des eaux

I.2. Introduction

L'eau est une substance unique parce qu'elle se renouvelle et se nettoie naturellement en permettant aux polluants de s'infiltrer (par le processus de sédimentation) ou de se détruire, en diluant les polluants au point qu'ils aient des concentrations qui ne sont pas nuisibles. Cependant, ce processus naturel prend du temps et devient très difficile lorsqu'il y a une quantité importante de polluants qui sont ajoutés à l'eau. Les gens utilisent de plus en plus des matières qui polluent nos sources d'eau potable. Dans les neuf des dix dernières années, des algues bleues-verts sont apparues dans le nord du lac Winnipeg. Ils ont causé un excès de phosphore dans l'eau. L'utilisation d'engrais est 15 fois plus importante qu'en 1945. La fermeture de plusieurs plages devient de plus en plus commune. La liste des polluants est longue et les signes de la pollution de l'eau sont évidents, mais un problème majeur reste : nous déposons des polluants dans la petite partie de la planète qui nous est bonne à boire.

I.2. Définition

On appelle pollution de l'eau toute modification défavorable chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants qui consomment cette eau. Quand les êtres humains consomment de l'eau polluée, il y a en général des conséquences sérieuses sur leur santé. La pollution de l'eau peut aussi rendre l'eau inutilisable pour l'usage désiré [1].

I.3. Types de pollution

On distingue deux types de pollutions

I.3.1. La pollution ponctuelle

Elle est formée de rejets localisés, plus ou moins abondants relativement faciles à identifier. Chronique ou accidentelle, cette pollution est provoquée par des déversements domestiques, urbains, agricoles ou industriels peu ou non traités [2].

I.3.2. La pollution diffuse

Elle est due au lessivage et à l'érosion plus ou moins rapide et accusée des sols, où différentes substances sont entraînées vers les nappes et les rivières tel que les hydrocarbures, les métaux lourds, les pesticides, cette pollution peut s'étendre sur de grandes surfaces, elle est difficile à identifier et donc difficile à maîtriser [2].

I.4. Sources de pollution

I.4.1. La Pollution industrielle

Une usine doit être équipée d'une station d'épuration (STEP). Un traitement primaire élimine les matières en suspension (résidus de lavage, corps gras, huiles), puis un traitement secondaire élimine les matières en solution (ex : métaux lourds). En réalité, seulement 65% des eaux usées passent en station d'épuration ou le traitement secondaire n'est généralement pas mis en application (bien souvent pour des raisons de coût) [3].

I.4.2. La pollution urbaine

Les eaux usées transportent des corps en suspension (matières organiques) et des corps en solution comme les produits ménagers. Les stations d'épuration ne traitent que 65% des eaux usées et ne traitent généralement pas les composés chimiques en solution. Certaines composées organiques notamment les phosphates sont à l'origine de déséquilibres des écosystèmes en favorisant par excès le développement de certains végétaux indésirables qui consomment de l'oxygène du milieu jusqu'à priver les animaux qui s'y trouvent [3].

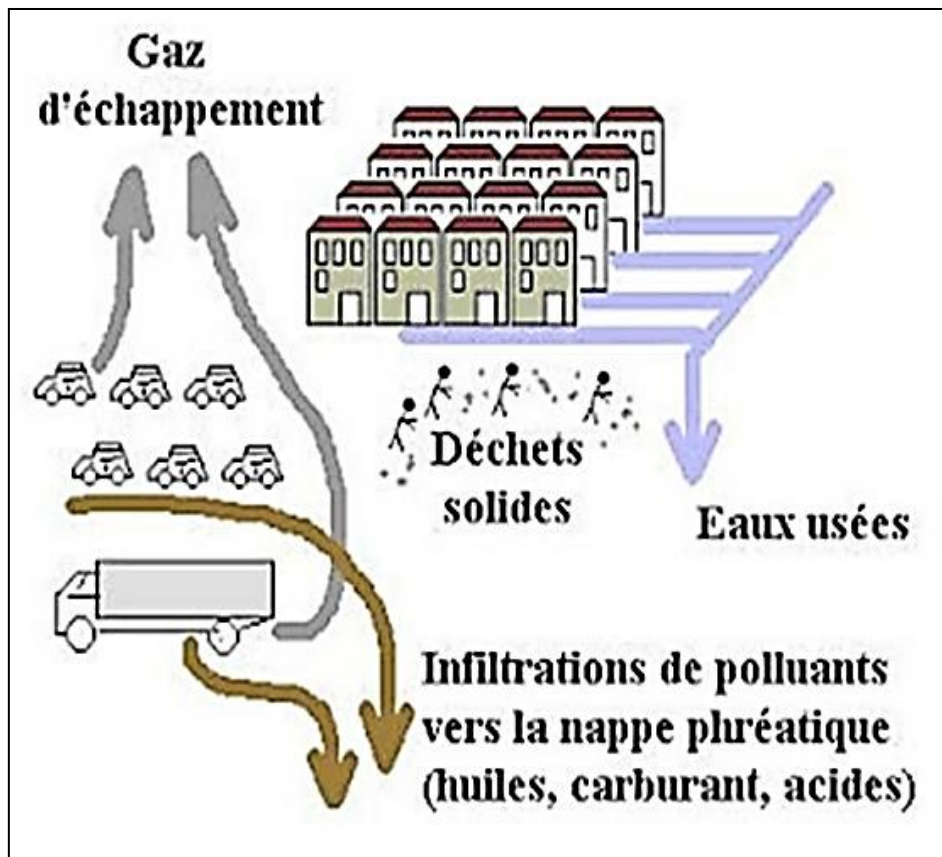


Figure I.1 : les pollutions produites par l'urbanisme

I.4.3. La pollution agricole

Les engrais apportent aux végétaux cultivés les éléments nécessaires à leur croissance notamment l'azote, le potassium, et le phosphore. Les dérivés azotés (spécialement les nitrates) et les phosphates provoquent des déséquilibres dans les milieux qui reçoivent les eaux de ruissellement et les eaux d'infiltration issues de l'agriculture en favorisant le développement des algues qui prennent place à toute autre forme de vie à cause de leur surdéveloppement. Les pesticides sont des produits chimiques destinés à détruire les champignons (fongicides), les mauvaises herbes (herbicides), les vers de terre (hématicides) et les insectes (insecticides) qui parasitent les agricultures. Ces produits sont développés pour être rapidement neutralisés avec une durée de vie courte une fois dissous dans le sol, mais l'utilisation de mauvaise préparation peut avoir des effets d'intoxication significatifs. L'accumulation de ces produits dans les cours d'eau peut avoir un impact important sur le milieu marin, à l'endroit même où se déverse des fleuves, ou bien par le retour des nappes souterraines qui forment des sources sous-marines ou proches du bord de la mer [4].

I.4.4. La pollution atmosphérique

L'atmosphère terrestre s'il contient des polluants peut être une source non négligeable de pollution. En effet en cas d'orage les sols seront contaminés et le ruissellement et l'infiltration des polluants menacent à la fois les eaux superficielles et les eaux souterraines. Cette contamination qui risque d'être durable cause de grande difficulté de traitement [5].

I.5. Les principaux polluants des eaux

I.5.1 Les matières en suspension

Les matières en suspension sont de fines particules. Présentes naturellement dans l'eau des rivières pour certains (planctons, débris végétaux fins, minéraux), elles sont aussi des polluants d'origine humaine pour d'autres (matières organiques et minérales). Elles peuvent réduire la transparence de l'eau (turbidité), ce qui est néfaste pour la biologie des cours d'eau [5].

I.5.2. La pollution organique

Certains rejets contiennent des matières organiques, Ces polluants sont biodégradables : ils peuvent être transformés en eau et en CO₂ par des micro-organismes (bactéries, algues). Mais cette biodégradation consomme de l'oxygène, qui ne sera donc plus disponible pour la faune aquatique (poissons, crustacés...). C'est pourquoi l'on mesure souvent la pollution organique par la « demande biologique en oxygène », autrement dit la quantité d'oxygène qui

sera consommée par des micro-organismes pour sa biodégradation. On mesure également la « demande chimique en oxygène » (DCO), c'est à dire la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder tout ce qui peut l'être par voie chimique [6].

I.5.3. Les matières fertilisantes

La présence d'azote et de phosphore en quantité excessive dans les cours d'eau entraîne la prolifération d'algues qui diminuent la luminosité et surtout consomment l'oxygène dissous dans l'eau (phénomène d'eutrophisation}). Cette pollution est produite par les eaux usées urbaines, certains effluents industriels, et le ruissellement des eaux chargées d'engrais apportés en excès aux cultures [6].

I.5.4. Les polluants métalliques et les polluants chimiques persistants

Certains polluants chimiques (des pesticides par exemple) sont particulièrement persistants : ils résistent à la dégradation chimique et biologique. Avec les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium, cuivre, zinc, nickel, chrome...) ils forment une famille de polluants très dangereux : absorbés par des plantes ou des petits animaux, ils s'accumulent et se concentrent tout au long de la chaîne alimentaire, au sommet de laquelle se trouve l'homme.

I.5.5. Les sels minéraux

Présents naturellement dans l'eau en faible quantité, les sels minéraux (chlorures ou sulfates de calcium, de magnésium, de sodium ou de potassium) peuvent voir leur concentration s'élever à la suite de rejets industriels. Cela peut nuire à la biologie aquatique.

I.6. Conséquences de la pollution

- Les matières organiques solubles abaissent la teneur en Oxygène dans les cours d'eau, ce qui conduit à la réduction et à la mort de la faune aquatique
- Les matières en suspension, s'accumulent au fond des cours d'eau, lacs et étangs et causent l'augmentation de la turbidité.
- Les acides sont toxiques à la vie aquatique et détériorent les réseaux d'égouts.
- Les huiles et les graisses flottants conduisent au colmatage des conduites et donnent un aspect esthétique indésirable.
- Les matières toxiques et métaux lourds sont toxiques à la vie aquatique.
- Le phosphore et l'azote conduisent à l'eutrophisation des cours d'eau.
- Le phosphore est un élément limitant la croissance des plantes et du phytoplancton [7]

I.7. Origine des polluants et types de pollutions industrielles

Les eaux résiduaires industrielles sont spécifiques par leur volume et leur composition. On distingue trois types de pollution :

I.7.1 Pollution physique

C'est une pollution due aux agents physiques (tout élément solide entraîné par l'eau), elle est d'origine domestique, essentiellement industrielle. On peut la répartir en trois classes : mécanique, thermique et radioactive [7].

➤ **Pollution mécanique**

Elle résulte des décharges de déchets et de particules solides apportés par les ERI, ainsi que les eaux de ruissellement. Ces polluants sont soit les éléments grossiers soit du sable ou bien les matières en suspension MES [7].

➤ **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 [8].

➤ **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 suivants. Plus on s'élève dans la chaîne alimentaire plus les organismes sont sensibles aux rayonnements [8].

I.7.2. Pollution chimique

Elle résulte des rejets chimiques, essentiellement d'origine industrielle. La pollution chimique des eaux est regroupée dans deux catégories [8]:

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

I.7.3. 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, en 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 [9].

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. En fait leurs activités peuvent s'exercer selon plusieurs modalités très différentes.

b. Phénols

Is 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.

○ 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 [10]. 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 difficile de les récupérer, une fois dissipés dans la nature.

b. Cyanure

Les cyanures, c'est un poison à action rapide qui peut se rencontrer sous plusieurs formes, y compris les formes gazeuses, liquides et solides. Bien que les cyanures se rencontrent naturellement dans beaucoup d'aliments et de plantes.

L'industrie rejette d'autres composés cyanogènes (installation de cyanuration, Galvanoplastie, traitement de minerais...). L'ion CN^- est toxique en raison de l'acide Cyanhydrique qui se produit en présence d'eau.

c. 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 [2]. 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^-).

d. Pollution par le phosphore

Le phosphore a pour origine les industries du traitement de surfaces des métaux, les Laveries industrielles des fabrications, d'engrais agroalimentaire. Comme l'azote, le Phosphore est un élément nutritif, il est à l'origine du phénomène d'eutrophisation c'est-à-dire la prolifération excessive d'algues et de plancton dans les milieux aquatiques.

I.7.3. 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) [11].

○ Bactéries

Les bactéries sont des micro-organismes unicellulaires et procaryotes (une seule cellule sans noyau), de tailles de 0.5 à 15 μm , de formes sphériques ou cylindriques Classification des bactéries selon leur affinité avec l'oxygène On distingue :

- % Les bactéries anaérobies strictes
- Les bactéries aérobies strictes
- Les bactéries facultatives : survivent avec ou sans oxygène dissous (condition d'anoxie)
- **Les virus**

- Les virus sont des agents pathogènes extrêmement petits et qui ne peuvent se multiplier qu'à l'intérieur d'une cellule vivante.
- Leur concentration dans les eaux usées urbaines est comprise entre 10^0 et 10^6 "particules par litre.
- Certains entérovirus peuvent être à l'origine de maladies graves comme la poliomyélite ou l'hépatite virale.

- **Les protozoaires**

Ce sont des organismes unicellulaires munis d'un noyau, plus complexes et plus gros que les bactéries. La plupart des protozoaires pathogènes sont des organismes parasites.

- **Les helminthes**
- Plats helminthes : (ou vers plats).
- Némathelminthes : (ou nématodes, ou vers ronds).

- **Les champignons**

Ce sont des organismes pluricellulaires ; certains sont pathogènes.

I.8. Paramètres de mesure de la pollution

L'estimation de la pollution industrielle 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 [12].

I.8.1. Paramètres organoleptiques

- **Couleur**

La couleur des ERI est en général grise, signe de présence de matières organiques dissoutes, de MES, du fer ferrique précipité à l'état d'hydroxyde colloïdale, du fer ferreux lié à des complexes organiques et de divers colloïdes.

- **Odeur**

Les ERI se caractérisent par une odeur de moisi. Toute odeur est signe de pollution qui est due à la présence de matières organiques en décomposition.

I.8.2. Paramètres physiques

○ **Température**

Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et surtout des gaz (en particulier O₂) dans l'eau ainsi que, la détermination du pH et la vitesse des réactions chimiques. La température agit aussi comme facteur physiologique sur le métabolisme de croissance des microorganismes vivants dans l'eau.

○ **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).

○ **pH**

Le pH est une mesure de l'acidité de l'eau c'est-à-dire de la concentration en ions d'hydrogène (H⁺). L'échelle des pH s'étend en pratique de 0 (très acide) à 14 (très alcalin) la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre à 25°C. Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4 à 10 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. Des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons.

En région bruxelloise, on admet généralement qu'un pH naturel situé entre 6,5 et 8,5 caractérise des eaux où la vie se développe de manière optimale.

Couleur - Les eaux usées fraîches sont normalement brunes et jaunâtres, mais avec le temps, elles deviennent noires.

○ **Matières en suspension**

Ce paramètre exprimé en mg/l correspond à la pollution insoluble particulaire, c'est-à-dire la totalité des particules solides véhiculées par les ERI. Mesuré par peser après filtration ou centrifugation et séchage à 105°C. Les procédés de séparation par filtration font appel, soit à des disques en fibres de verre, soit à des couches d'amiante. La méthode par centrifugation est plus particulièrement réservée au cas où les méthodes par filtration ne sont pas applicables par suite d'un risque élevé de colmatage des filtres.

I.8.3. Paramètres chimiques

○ 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 plupart 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.

○ Demande biologique en oxygène (DBO5)

Exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la destruction ou à la dégradation des matières organiques par les microorganismes du milieu. Mesurée par la consommation d'oxygène à 20°C à l'obscurité pendant 5 jours d'incubation d'un échantillon préalablement ensemencé, temps qui assure l'oxydation biologique des matières organiques carbonées. L'épuration biologique aérobie complète d'une ERI exige en fait un temps de 21 jours (DBO21 dit ultime) nécessaire pour l'oxydation des composés azotés biodégradables, ou de 28 jours sinon 35 jours, qui représentent le temps de dégradation de certaines familles d'hydrocarbures.

Le rapport DCO/DBO5 est l'indice de la biodégradabilité d'une eau. Pour qu'une pollution soit dégradable le rapport est inférieur à 2,5.

La moyenne pondérée de la DCO et la DBO mesurée après décantation pendant 2h suivant la formule : $(DCO + 2 DBO5) / 3$ correspond aux matières existantes MOX.

○ Hydrocarbures

Ce terme fait la plupart du temps référence aux huiles minérales qui comportent des substances telles que les alcanes, les alcènes, etc. Outre leur toxicité, ces substances peuvent limiter l'apport d'oxygène dans les eaux de surface lorsqu'elles sont présentes en concentrations élevées. Ces polluants incluent également les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ainsi que les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM). Les HAP sont des combinaisons organiques résultant de l'assemblage de plusieurs noyaux benzéniques. Ces composés sont relativement stables et peu solubles dans l'eau. Ils s'adsorbent fortement aux sols et aux matières en suspension et sont, en outre, très solubles dans les graisses ce qui favorise leur bioaccumulation dans les tissus humains et animaux.

Plusieurs HAP sont classés comme agents cancérigènes possibles par l'OMS. Les HAM incluent des polluants comme le benzène, le toluène, l'éthylbenzène et le xylène dont les

impacts sur la santé peuvent être très importants (diminution de la réponse immunitaire, effet neurotoxique, irritation des voies respiratoires...).

○ Azote total N

Exprimé en mg/l, ce paramètre devient de plus en plus important. Sa valeur globale dans les ERI recouvre toutes les formes déjà citées. C'est la somme d'azote des formes réduites (organiques et ammoniacal) est appelé azote de KJELDAL et l'azote des formes oxydées (NO_2^- , NO_3^-).

○ Phosphore total PT

Le phosphore se trouve dans les ERI sous formes :

- D'ortho phosphate, soluble PO_4H^{2+}
- De poly phosphate qui a tendance à s'hydrolyser en ortho phosphate
- De phosphore non dissous

La somme de ces diverses formes constitue le phosphore total, dont chaque forme peut être mesurée indépendamment des autres par spectrométrie.

I.9. Autres paramètres

I.9.1 Alcalinité de l'eau

L'alcalinité de l'eau se définit comme la somme des charges des acides inactifs (conjugués des bases fortes) tels que Na^+ , Ca^{2+} , diminuée de la charge des bases inactives (conjuguées des acides forts) telles que Cl , NO_3^- , SO_4^{2-} .

Par suite de la neutralité électrique de la solution, c'est aussi la somme des charges des bases faibles (carbonate, hydrogénocarbonate, borate, silicate, phosphate...). L'alcalinité des eaux naturelles résulte de l'altération des minéraux des roches. Ainsi l'altération des feldspaths des granites libère les cations inactifs Na^+ , K^+ , Ca^{2+} alors que les anions (aluminat et silicate) sont des bases faibles et surtout sont incorporés dans des minéraux argileux. De même, les pyroxènes des basaltes libèrent le cation Mg^{2+} et l'anion silicate. La dissolution de la calcite des calcaires fournit l'ion Ca^{2+} inactif et l'ion carbonate CO_3^{2-} base faible ; elle augmente donc l'alcalinité. Par contre, la dissolution du gypse (sulfate de calcium hydraté), produisant les ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} tous deux inactifs et de charges opposées, ne la modifie pas.

L'examen simultané des variations de l'alcalinité et du carbone inorganique dissous (C.I.D.), somme des concentrations des ions HCO_3^- , CO_3^{2-} et de CO_2 dissous, est la façon la plus

exacte et la plus simple d'étudier des problèmes tels que l'équilibre calco-carbonique, l'absorption du CO₂ atmosphérique par l'océan et l'acidification de l'eau de mer. L'alcalinité est mesurée par titrages avec un acide fort (HCl, HNO₃).

Au fur et à mesure du titrage, le pH diminue. Lorsque l'échantillon contient des carbonates, un premier point d'équivalence peut être observé aux environs de pH 8,3. Ce point correspond à la transformation des ions carbonates en bicarbonates. L'alcalinité est mesurée au deuxième point d'équivalence, celui correspondant à la transformation du bicarbonate en acide carbonique. Ce point d'équivalence se trouve aux environs de pH 4,3. La nitrification et la précipitation de carbonate de calcium diminuent l'alcalinité. La dissolution de carbonate de calcium l'augmente.

○ Titre Alcalimétrique TA

C'est le volume d'acide exprimé en ml à 0.02 mol. L⁻¹ en ions H₃O⁺ nécessaire pour doser 100 ml d'eau. Cette analyse se fait en présence de phénolphaléine qui vire de l'incolore au rose-fuchsia à un pH de 8,2. Le T.A. s'exprime en degrés français (°f) : 1 °f = 3,4 mg/l d'ion hydroxyde HO⁻ ou 6,0 mg/l d'ion carbonate CO₃²⁻.

○ Titre Alcalimétrique Complet TAC

Le titre alcalimétrique complet correspond au volume d'acide nécessaire pour neutraliser les ions bicarbonates HCO₃⁻ en complément des ions carbonates CO₃²⁻ contenus dans 100 ml d'échantillon (Savi, Yehouenou Azehoun Pazou et al. 2010) :

- TAC = [HO⁻] + [CO₃²⁻] + [HCO₃⁻]
- Le TAC s'exprime en degrés français (°f) :
- 1 °f = 3,4 mg/l HO⁻ (seuls ions hydroxydes si [CO₃²⁻] = [HCO₃⁻] = 0)
- 1 °f = 6,0 mg/l CO₃²⁻ (seuls ions carbonates si [HO⁻] = [HCO₃⁻] = 0)
- 1 °f = 12,2 mg/l HCO₃⁻ (seuls ions bicarbonates si [HO⁻] = [CO₃²⁻] = 0)

○ Normes sur l'alcalinité dans l'eau :

- La norme NF EN ISO 9963-1 de février 1996 traite de l'alcalinité totale et composite de l'eau.
- L'alcalinité d'eau doit se situer entre 80 et 120 voire 140 mg/l selon le traitement utilisé.

▪ TDS -Total des solides dissous

TDS (de l'anglais Total Dissolved Solides) ou, Total des Solides Dissous“ est une valeur utilisée pour évaluer la qualité de l'eau. L'unité de mesure pour le TDS est exprimée en

microgramme par litre ou encore en ppm (parts per millions). Elle détermine la quantité totale des substances organiques et inorganiques dissoutes dans un liquide. Dans les eaux usées se trouvent souvent du calcium, du magnésium, du nitrate, du phosphate ou du sodium. Tous ces composés ont tendance à précipiter et former des dépôts (Tropicaux and Kinshasa 2018).

Le TDS-mètre mesure une conductivité électrique du liquide en question. Plus une eau est concentrée en particules ionisées, tel que les sels et les minéraux, plus la conductivité est élevée. Par contre, le TDS ne donne pas d'indication sur la qualité générale de l'eau, car beaucoup de polluants et de particules solides n'ont pas de grande influence sur la conductivité de l'eau. Ce qui est testé ici, c'est surtout la quantité des minéraux.

Le calcium et le magnésium sont souvent en ligne de mire quand il s'agit de dépôts calcaires dans les tuyaux et machines. Pour savoir à partir de quand surviennent les dépôts, le paramètre TDS ne suffit pas, car la valeur du pH a également un rôle majeur dans la solubilité des substances. Néanmoins, on peut dire en règle générale que des valeurs de $\text{pH} < 7$, donc pour des eaux plutôt acides, ont tendance à contribuer à la solubilité du De manière pratique, le TDS est utilisé par exemple pour évaluer la qualité de l'eau dans un système de refroidissement. Il y a des limites fixées par l'utilisateur d'un système de refroidissement. Si le TDS atteint une certaine valeur, une purge (ou Blow down) est alors de rigueur pour faire diminuer la concentration des solides dissous. Ainsi, les utilisateurs en industrie essaient toujours de garder une valeur de TDS aussi basse que possible pour éviter toute forme d'entartrage ou d'encrassement dans leurs systèmes.

Une autre application pratique pour le TDS est de tester l'efficacité d'un système de filtration. Par exemple, s'il s'agit d'évaluer la performance d'un système d'osmose inverse ou d'un système d'ultrafiltration, une comparaison de TDS avant/après peut être effectué.

I.9.3. La dureté de l'eau

La dureté résulte du passage de l'eau sur les roches (calcaires en général). L'eau dissout les éléments minéraux au passage et la dureté en est le reflet. Elle représente les ions calcium et magnésium dissous, et elle peut varier au fil du temps. On parle généralement du calcaire dissous.

Il n'y a pas de limite, car la dureté n'est pas du tout dangereuse pour la boisson. Cette dureté est gênante pour les appareils de production d'eau chaude et les différentes machines domestiques. On considère habituellement que de 0° à 25°f (degrés Français), l'eau n'a pas besoin d'être traitée. Au-delà de 25°f on considère l'eau comme étant « dure ». Les valeurs

idéales sont comprises entre 7 et 20°f, car il en faut un peu pour la santé (C'est les besoins en calcium de notre organisme). Les adoucisseurs peuvent être utilisés alors, mais ils devraient être limités aux appareils avec chauffage de l'eau, tout en sachant que ces appareils sont souvent des réceptacles à toute sortes de bactéries et qu'il y a lieu d'être très vigilant sur les procédures de nettoyages des filtres et autres accessoires. Les adoucisseurs fonctionnent par substitution des ions calcium par des ions sodiums (sel). Les adoucisseurs produisent une eau agressive qui ronge les tuyauteries (mais aussi le corps humain). C'est pourquoi leur eau doit toujours être en mélange avec de l'eau d'origine. Cette eau ne devrait pas servir à la boisson humaine par sécurité

I.9.4. Résidu sec : matières sèches (MS)

La teneur en matières sèches inclut à la fois les matières en suspension et les sels dissous. Le résidu sec est utilisé aussi pour déterminer la siccité de la boue (exprimée en %)

Temps de lecture : 5 minutes Soit M1 la masse de l'échantillon humide et M2 sa masse après séchage.

I.9.5. Les micropolluants

Nos modes de consommation contemporains génèrent l'apparition de nouveaux polluants dans les eaux, des substances organiques ou minérales qui peuvent induire un effet négatif sur le milieu naturel et/ou sur les organismes. Ces substances sont présentes dans de nombreux produits consommés ou utilisés par les particuliers et les entreprises (médicaments, produits cosmétiques ou phytosanitaires, insecticides, etc.).

Appelés « micropolluants », ces polluants émergents se retrouvent dans l'eau à des concentrations très faibles, de l'ordre du micro ou du nano gramme par litre. Les progrès dans le domaine des analyses en laboratoire mettent de plus en plus en évidence leur présence dans l'eau, et leurs effets potentiels chroniques directs ou indirects sur les écosystèmes, même à de très faibles concentrations.

Les recherches se poursuivent, mais pour éliminer les micropolluants de l'eau potable il existe d'ores et déjà plusieurs traitements efficaces.

I.9.6. Carbone organique total (COT)

Le carbone organique est constitué d'une grande diversité de composés organiques à plusieurs états d'oxydation, dont certains sont susceptibles d'être oxydés par des procédés chimiques ou biologiques. Ces fractions sont caractérisées par la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène.

Certaines matières organiques échappent à ces mesures ; dans ce cas, le dosage du COT est mieux adapté. Il est indépendant de l'état d'oxydation de la matière organique et ne mesure pas les éléments inorganiques tels que l'azote et l'hydrogène qui peuvent être pris en compte par la DCO et la DBO

La détermination porte sur les composés organiques fixés ou volatils, naturels ou synthétiques, présents dans les eaux résiduaires (celluloses, sucres, huiles, etc.). Suivant que l'eau a été préalablement filtrée ou non, on obtiendra le carbone dissous (DCO) ou le carbone organique total (COT). Cette mesure permet de faciliter l'estimation de la demande en oxygène liée aux rejets, et d'établir éventuellement une corrélation avec la DBO et la DCO.

I.9.7. Métaux lourds

Le suivi des concentrations en métaux lourds (densité $>$ à 5 g/cm³) est particulièrement important vu leur toxicité et leur capacité de bioaccumulation le long des chaînes alimentaires. Contrairement aux polluants organiques, les métaux ne peuvent pas être dégradés biologiquement ou chimiquement.

Les concentrations en cuivre, nickel, chrome, plomb, zinc, cadmium, arsenic sont régulièrement mesurées.

Les métaux lourds caractérisent certains types de pollution, comme par exemple :

La présence de cuivre et de nickel signe des rejets provenant d'industries de traitement de surface des métaux.

- Le chrome dénonce la présence d'une tannerie.
- Le plomb est lié à des pollutions diffuses (apports dus aux transports routiers et à l'existence de sites industriels désaffectés).
- Le zinc est évacué par des industries qui pratiquent la galvanisation ou la préparation d'alliages tels que le laiton et le bronze, il est également libéré lors du contact entre les eaux de ruissellement et les matériaux galvanisés (toitures métalliques, gouttières).
- Le cadmium peut notamment être rejeté par des usines de galvanoplastie et des industries chimiques de textiles et de teintures.
- Les métaux lourds se dissolvent très bien dans une eau acide (pH faible). Dans des eaux neutres ou basiques, ils précipitent et s'accumulent principalement dans la phase solide (boues). L'analyse de ces boues permet ainsi d'obtenir une vue de l'ensemble des déversements en métaux lourds qui ont eu lieu, tant en nature qu'en quantité.

La toxicité du zinc, influencée par la dureté de l'eau, son contenu en oxygène et la température, concerne l'alcalinité, du pH et de la présence de matières organiques. De manière générale, les salmonidés (saumons, truites) sont très sensibles au cuivre et au zinc.

I.9.8. Substances tensioactives

Les substances tensioactives sont constituées de molécules possédant une partie hydrophobe et une partie hydrophile. Ces tensioactifs sont qualifiés d'anioniques, cationiques, amphotères (substances pouvant à la fois se comporter comme un acide et comme une base) ou non ioniques selon la charge de leur groupe hydrophile. La configuration chimique des tensioactifs leur confère des propriétés de nettoyage importantes (dégraissage). Ces substances interviennent donc dans la composition des détergents, savons, etc. Si les tensioactifs sont en eux-mêmes relativement peu toxiques, leur impact environnemental est lié au fait qu'ils peuvent rendre les membranes des cellules perméables à certaines substances qui habituellement les traversent peut ou ne les traversent pas.

I.10. Les substrats polluants

A la différence de divers phénomènes de pollution, celle des eaux se traduit par les effets particuliers liés aux spécificités écologiques propres aux milieux aquatiques. En effet, l'eau peut dissoudre, souvent avec facilité, de nombreuses substances chimiques et biologiques. Par conséquent, tout polluant peut être véhiculé fort loin de la source de contamination. On distingue quatre catégories principales liées aux différentes caractéristiques de ces substances qui déterminent le type de procédé efficace pour leur purification :

I.10.1. Matières décantables ou flottantes

Elles représentent la fraction des composés grossiers (galets, graisses). Ces substances sont soumises à des prétraitements ou éventuellement à un traitement primaire. En fonction de leur nature, on peut recourir aux procédés de flottation ou de décantation.

I.10.2. Matières fines en suspension

Elles sont formées de particules visibles à l'œil nu (de 0.1 à 1 mm) qui contribuent à la turbidité de l'eau. Leur traitement s'effectue par des techniques de sédimentation ou de centrifugation.

I.10.3. Matières colloïdales

Dissoute dans l'eau, elles sont constituées de particules d'un diamètre de 0.01 à 100 µm. À la limite entre les phases solide et soluble, ces éléments sont éliminés par Dégradation biologique ou par décantation associée à un mécanisme de coagulation.

I.10.4. Matières solubles

Leur taille est inférieure à 0.01 µm. Ces substances sont directement consommées par les populations biologiques au cours de traitement secondaire. La partie biodégradable peut se retrouver dans l'effluent de sortie ; si leur quantité est importante un traitement tertiaire s'impose. Une autre classification très importante est fondée sur le pouvoir de dégradation des déchets polluants. On distingue ainsi deux classes principales.

I.10.5 Matières biodégradables

Affectées par les activités biologiques des micro-organismes, ces substances sont Soumises aux divers processus biochimiques de conversion.

I.10.6. Matières non-biodégradables

Ces substances inertes ne subissent aucun phénomène biologique de transformation. Ces matières sont soit présentes dans les eaux résiduaires, comme les métaux lourds, soit issues des phénomènes de mortalité des micro-organismes au cours des processus biologiques d'épuration. Les composants non-biodégradables solubles peuvent traverser la station d'épuration sans être modifiés mais les matières inertes en suspension peuvent être éliminées par les mécanismes de décantation.

I.10.7. Matières organiques

Elles sont constituées d'un grand nombre de composés qui ont la particularité Commune de posséder au moins un atome de carbone, d'où leur nom de substances carbonées. Ces atomes de carbone sont oxydés biologiquement par les micro-organismes pour fournir l'énergie nécessaire à leur croissance.

I.10.8. Matières inorganiques

Sont des substances ne contenant pas de carbone. La fraction minérale des eaux Résiduaires représente principalement les produits azotés et phosphorés.

Tableau I.1 : Classification des substrats polluants

Classification selon	Polluants
Taille	<ul style="list-style-type: none">▪ Matière d'écantables ou flottantes▪ Matières fines en suspension▪ Matières colloïdales▪ Matières solubles
Pouvoir de dégradation	<ul style="list-style-type: none">▪ Matières biodégradables▪ Matières non-biodégradables
Structure chimique	<ul style="list-style-type: none">▪ Matières organiques▪ Matières inorganiques

I.11. Conclusion

Le développement des activités humaines s'accompagne inévitablement d'une production croissante de rejets polluants qui ont des conséquences quelquefois dramatiques pour les espèces naturelles présentes dans les milieux aquatiques.

Les ressources en eau ne sont pas inépuisables et leur dégradation sous l'effet des rejets d'eaux polluées, peut non seulement détériorer gravement l'environnement, mais aussi entraîner des risques de pénurie, et sans une action énergique, nous risquons en fin de compte de scier la branche sur laquelle nous sommes assis. C'est pourquoi il faut traiter les eaux usées pour limiter le plus possible la pollution de nos réserves en eaux : rivières, lacs et nappe souterraines

Chapitre II : les colorants

II.1. Introduction

D'après Jésus Christ, les seuls colorants au l'année 1500, étaient d'origine naturelle soit d'origine végétale ; animale et minéraux l'indigo pour le bleu, le bois de Campeche pour le noir, les cochenilles pour le rouge et oxyde de fer pour le jaune, etc. Le premier colorant de synthèse a été découvert à la moitié du XIX^e siècle, la mauvéine été découvert par un jeune chimiste anglais, William Henry Perkin en 1856 (Bajda 2018). Elle se synthétise par l'oxydation de l'aniline (tirée de goudron de houille) par l'action de l'acide sulfurique en présence de bicarbonate de potassium pour produire un solide noir. Aujourd'hui compte plus de 10000 colorants synthétiques [13].

Utilisation des colorants généralement dans les imprimeries, les produits alimentaires, cosmétiques et cliniques, mais en particulier dans les industries textiles pour leur stabilité chimique et la facilité de leur synthèse et leur variété de couleurs, La production mondiale des colorants est d'environ à plus de 800 000 tans et les colorants azoïques sont majoritaires et représentent 60-70 %. Ces colorants sont provoqués une toxicité pour l'homme et l'environnement.

II.2. Définition

Les colorants sont des produits capables de teindre une substance d'une manière durable qui, mélangés à des charges incolores ou des huiles (peintures, encres), ou bien encore fixés sur des supports textiles ou plastiques (teintures), ils caractérisés par un assemblage de groupements chromophores, autochromes et des structures aromatiques conjuguées, ces groupements possèdent la propriété de transformer la lumière blanche dans le spectre visible (de 380 à 750 nm), en lumière colorée. Leurs capacités, les autochromes sont des groupes d'atomes ionisables capables de changer la fréquence d'adsorption d'un chromophore. Ils permettent la fixation des colorants sur la substance, la transformation de la lumière blanche en lumière colorée, par la réflexion ou par la transmission ou diffusion sur un corps, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés chromophores, la molécule colorante étant le chromogène. Aussi les colorants sont capables de modifier temporairement ou définitivement la répartition des longueurs d'onde de la lumière transmise ou réfléchi par la surface ainsi colorée. Tout d'abord en remarquant que la modification donne une teinte qui n'est pas forcément celle du colorant seul, en raison de la couleur propre du support et des interactions physicochimiques entre le support et le colorant.

D'appuis SEYEWETZ ; « On appelle couleur propre d'un corps, la propriété qu'il possède de d'absorber une partie des rayons colorés du spectre et de laisser traverser les autres, s'il est transparent, ou de les réfléchir, s'il est opaque » [14].

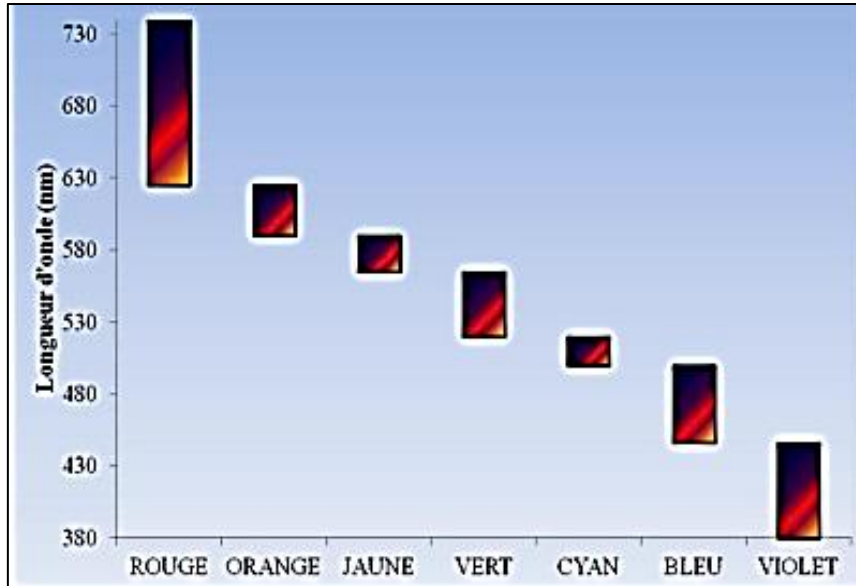


Figure II.1 : la capacité d'absorption des couleurs des rayonnements lumineux dans le spectre visible de 380 à 750 nm.

Tableau II.1 : Groupe chromophores et auxochromes classés par intensité décroissante [15].

Groupement chromophores	Groupement auxochromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO= ou -N-OH)	Méthylamine (-NHCH ₃)
Carbonyl (=C=O)	Diméthylamine (-N(CH ₃) ₂)
Vinyl (-C=O)	Hydroxyl (Daira, Maazi et al.)
Nitro (-NO ₂ ou NO ₃)	Alkoxy (-OR)
Sulfures (>C-S)	Groupements donneurs d'électrons

II.3. L'origine des colorants

En 1876, Witt remarque 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. L'origine de colorants se divise en des colorants d'origine naturelle ou artificielle [15].

II.3.1. Origine naturelle

Les Égyptiens avant 1500 d'année réalisèrent des teintures avec le safran (jaune), le pastel (bleu), la garance, l'indigo et la pourpre. Dès lors, la majorité des colorants utilisés sont d'origine naturelle, soit d'origine végétale, comme l'extraits des plantes, des arbres ou des lichens, ou bien d'origine animale, extraits des insectes comme le kermès et la cochenille ou des mollusques comme la pourpre, ou bien encore dans les micro-organismes. Cependant, le nombre de colorants d'origine naturels n'a jamais excédé quelques dizaines. Les colorants d'origine naturels sont donne à partir l'extraits des éléments naturels par des procédés simples comme le chauffage ou le broyage ; parmi l'ensemble de ces colorants naturels, on distingue deux catégories :

- Les colorants à mordant et les colorants de cuve.

II.3.2. Origine artificielle

Les colorants d'origine artificielle ou synthétiques sont des composés à partir d'une matière première comme des molécules telles que le benzène, issu de la distillation de la houille. C'est à partir des matières première grâce à une série de procédés chimiques, qui correspondent en général au transformé d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène de la matière première par des éléments ou des radicaux particuliers, que sont fabriqués les intermédiaires, ces fabrications intermédiaires serviront ensuite à la fabrication du colorant final. Particulièrement de 8000 colorants synthétiques chimiquement différents sont dénombrés, répertoriés et classés dans le ColourIndex (base de données de références maintenues conjointement par la Society of Dyers and Colourists et par l'American Association of Textile Chemists and Colorists).

II.4. Classification des colorants

Les principales modes de classification des colorants reposent soit sur leur constitution chimique qui s'appuie principalement sur la nature du chromophore, soit sur leurs méthodes d'application aux différents substrats que sont les fibres textiles, le papier, le cuir et les matières plastiques ; qui t'appelé, la classification tinctoriale.

II.4.1. Classification tinctoriale

La classification des colorants selon leur méthode d'application aux différents substrats son celle-ci est de force variable selon que la liaison colorant - substrat est du types ionique, hydrogène, de Van der Waals ou covalente. On distingue différentes catégories tinctoriales définies cette fois par les auxochromes :

- **Les colorants acides ou anioniques** : c'est colorant est très solubles dans l'eau grâce à leurs propriétés de groupes sulfonate ou carboxylate, ils sont ainsi dénommés parce qu'ils permettent de teindre les fibres animales (laine et soie) et quelques fibres acryliques modifiées (nylon, polyamide) en bain légèrement acide. L'affinité colorant - fibre est le résultat de liaisons ioniques entre la partie acide sulfonique du colorant et les groupes Amino des fibres textiles [16].

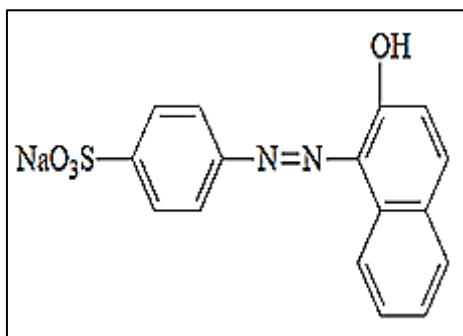


Figure II.2 : Structure chimique de colorants acides ou anioniques

- **Les colorants basiques ou cationiques** : Ce classe des colorants basiques ou cationiques porteurs d'ions positifs et reconnus pour leurs nuances brillantes. Les colorants basiques se composent par de grosses molécules et ce sont des sels solubles dans l'eau. Ils ont une affinité directe pour la laine et la soie et peuvent être utilisés sur le coton. La solidité de ces colorants basiques sur ces fibres est très faible. Ces colorants ont bénéficié d'un regain d'intérêt avec l'apparition des fibres acryliques, sur lesquelles ils permettent des nuances très vives et résistantes [17].

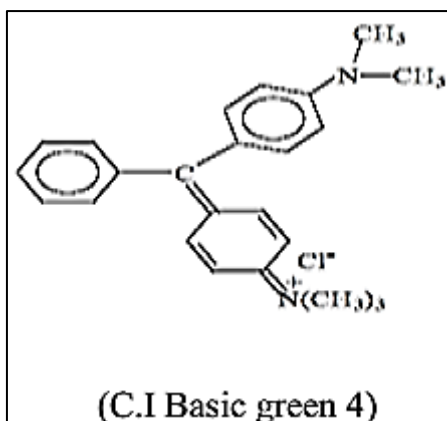


Figure II.3 : structure chimique de colorants basiques ou cationiques

- **Les colorants de cuve** : ces colorants possèdent des propriétés de l'insolubilisation dans l'eau, appliqués sur la fibre après transformation par réduction alcaline en leuco dérivés. La teinture se termine par la réoxydation in situ du colorant sous sa forme insoluble initiale. Réputés pour leur bonne résistance aux agents de dégradation (lavage,

rayons solaires), les colorants de cuve sont largement utilisés sur le coton, le lin, la rayonne et autres fibres cellulosiques, à l'image de l'indigo pour la teinture des articles jean ou denim [18].

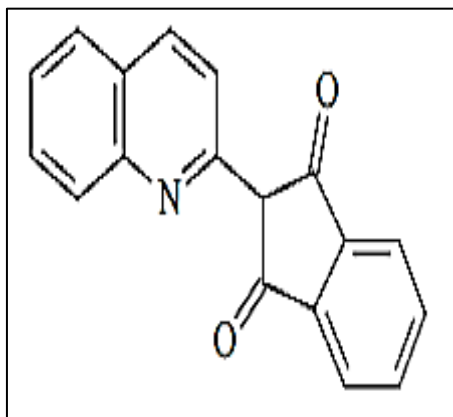


Figure II.4 : structure chimique de colorants de cuve.

- **Les colorants directs**, contiennent ou sont capables de former d'une charges positives ou négatives électro-statiquement pour l'attraction [19].

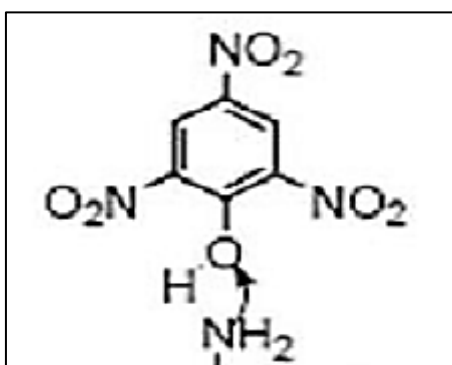


Figure II.5 : structure chimique de colorants directs.

II.4.2. Classification chimique

La classification chimique présente généralement pour le fabricant de matières colorantes, le teinturier préfère le classement par domaines d'application. Ainsi que renseigné sur la solubilité du colorant dans l'eau, son affinité pour les diverses fibres et sur la nature de la fixation. La classification des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupe chromophore est comme la suite :

- **Les colorants anthraquinoniques** : sont des colorants les plus importants commerciaux, après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène montre que le chromophore est un noyau qu'ionique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou Amino [20].

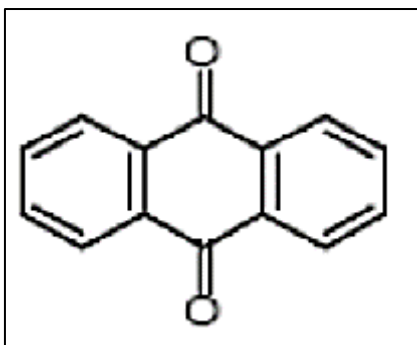


Figure II.6 : structure chimique de colorants anthraquinoniques.

- **Les colorants indigoïdes** : ils ont possédé une propriété de solidification à la lumière très moyenne et tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent, ainsi que les homologues sélénié, soufré et oxygéné du bleu indigo provoquent d'importants effets hypsochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise [21].

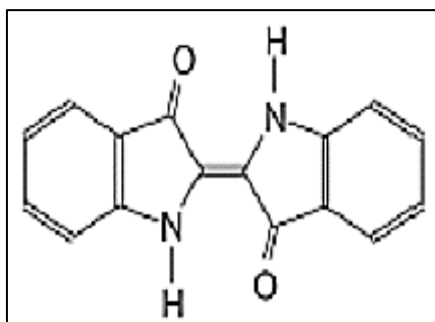


Figure II.7 : structure chimique de colorants indigoïdes.

- **Les colorants xanthènes** ; leur composé le plus connu est la fluorescéine, sont dotés d'une intense fluorescence. Peu utilisés en tant que teinture, leur usage est bien établi comme marqueurs lors d'accidents maritimes ou comme traceurs d'écoulement pour des rivières souterraines, des flux de rejets, etc. Ils sont aussi utilisés comme colorants en alimentaire, cosmétique, textile et impression [22].

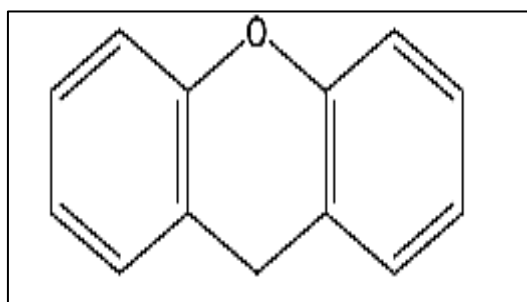


Figure II.8 : structure chimique de colorants xanthènes

- **Les colorants phtalocyanines** : possède 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 métalloïdes (Cu, Ni, Co, Pt, etc.) ou même

des non-métaux tels que le phosphore peuvent donner une couleur allant du bleu rougeâtre au vert jaunâtre à travers des ces réaction [22].

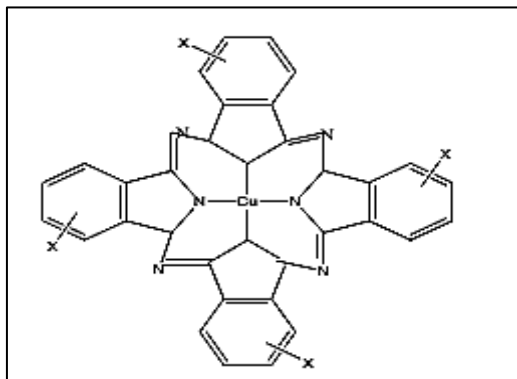


Figure II.9 : structure chimique de colorants phtalocyanines.

- **Les colorants nitrés et nitrosés :** Sont des colorants très limités en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés, du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire caractérisée par la présence d'un groupe nitro (-NO₂) en position ortho par rapport à un groupement électrodonneur (hydroxyle ou groupes aminés) [23].

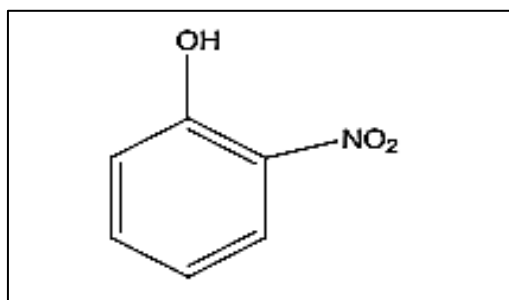


Figure II.10 : structure chimique de colorants nitrés et nitrosés.

II.5. L'effet toxique du colorant

Les colorants sont des composés difficilement biodégradables par les microorganismes, donc ils sont et par conséquent présente un danger certain pour l'homme et les écosystèmes [24] :

II.5.1. L'effet toxique sur l'environnement

Certain nombre de colorants présente un caractère toxique sur les milieux environnementaux telle que le milieu aquatique, ces colorants provoquant la destruction directe des communautés aquatique.

Les colorants rejetés par les industries textiles et les usines de teinturerie, sont à l'origine de diverses pollutions et sont peu ou pas biodégradables et résistent bien aux traitements

classiques d'épuration, dont résulte souvent une diminution de la capacité de réparation des cours d'eau retardant ainsi l'activité de photosynthèse. Ils créent une nuisance visuelle dans les eaux contaminées contribuant ainsi aux problèmes de pollution liés à la génération d'une quantité considérable d'eau usée contenant des colorants résiduels parce qu'une très petite quantité de colorants synthétiques dans l'eau (inférieur de 1mg/ L) est très visible. Le rejet de ces eaux résiduaires dans l'écosystème est une source de pollution, et de perturbation non esthétique dans la vie aquatique.

Une DL50 signifie la mort de 50% des espèces animales testées en expérimentation. Comme par exemple, le bleu de victoria, le violet de méthyle, le noir anthracite BT et le vert diamant sont très toxiques pour la faune et la flore à partir de concentrations de 1mg/l. Donc, le traitement des effluents chargés en colorants s'avère indispensable pour la sauvegarde de l'environnement. Aussi les colorants cationiques sont très toxiques pour les micro-organismes. En effet, après un temps de contact de 5 jours, le taux d'inhibition a été de l'ordre de 96,5% [25].

II.5.2. L'effet toxique sur la santé humaine

Certaines études scientifiques ont montré que les colorants aminés sont souvent aptes à provoquer des irritations de la peau et des dermites humine. Ces effets avec manifestation d'eczéma et d'ulcération ont été observés chez les ouvriers d'usine de fabrication des colorants de la série du triphénylméthane. Des réactions allergiques, asthme quelquefois et surtout des dermites eczémateuses ont été observés avec divers colorants aminés azoïques, anthraquinoniques, ainsi qu'avec certains colorants du groupe des naphthalènes (chéilite de rouge). L'allergie respiratoire aux colorants réactifs son rapportée pour la première fois en 1978 par Alanko chez des sujets employés à la pesée et au mélange de ces colorants en poudre depuis deux ans et présentant un asthme et / ou rhinite d'origine professionnelle [26].

Les colorants de synthèse à base d'amines entraînent des risques cancérogènes, des tumeurs urinaires et plus spécialement les tumeurs bénignes et malignes de la vessie. D'autres recherches ont montré que la tartrazine développe un certain nombre de réactions adverses chez certains individus comme le purit, l'œdème, l'urticaire, l'asthme et la rhinite. Les colorants azoïques sont aussi responsables d'apparition de hépatomes chez l'homme [27].

Les colorants métallifères sont des substances qui représentent de grands risques pour la santé de l'homme. Ils peuvent également causer des dégâts sur les réseaux d'assainissement et des perturbations des traitements biologiques dans les stations d'épuration à cause de leur toxicité élevée. L'utilisation des colorants à base d'arsenic tels que le vert de Scheele (arsénite

de cuivre), vert de Schweinfurt (acétoarsénite de cuivre) provoquent des troubles digestifs comme la digestion pénible, nausées, diarrhée et peuvent être à l'origine des irritations de peau, des muqueuses oculaires et pulmonaires et surtout de cancer. La granulomatose pulmonaire fut observée chez les femmes qui son utilisant des laques colorées et parfumées plusieurs fois par jour pendant des années [27].

II.6. Traitement des colorants

La plupart des colorants utilisés dans l'industrie, sont toxiques et non biodégradable par les microorganismes et sont détruits par les traitements physicochimiques et biologiques classiques [28]. (Tableau II.2).

Tableau II.2 : Les différentes méthodes de traitement des colorants.

Méthode de traitement	Procédé de traitement
Traitement physique	<ul style="list-style-type: none">▪ Adsorption▪ Filtration sur membrane▪ Coagulation floculation
Traitement chimique	<ul style="list-style-type: none">▪ L'oxydation classique (oxygène, ozone, oxydants tels que NaOCl, H₂O₂).▪ L'oxydation avancée.
Traitement thermique	<ul style="list-style-type: none">▪ L'incinération
Traitement biologique	<ul style="list-style-type: none">▪ Le traitement aérobie,▪ Le traitement anaérobie

II.6.1. Méthode physique

La méthode physique sont les procédés les plus simples et les plus anciens d'élimination des polluants bio-réfractaires aux sons des méthodes physiques de transfert de masse : en général, la floculation et l'adsorption sur charbon actif. Ces méthodes sont possédées des inconvénients, principalement [29] :

- Ces déplacent simplement la pollution dans les grandes quantités de boues ainsi créées,
- Cette méthode n'est pas suffisamment active pour résoudre les problèmes liés à la coloration.

La coagulation et la floculation sont, par ailleurs, inefficaces en ce qui concerne les colorants basiques, et la récupération des colorants de cuve par adsorption sur le charbon actif est médiocre.

a. Adsorption

L'adsorption est une méthode de traitement physique utilisé pour l'élimination des colorants par l'adsorption sur les phases solides est une méthode qui a donné des résultats prometteurs. De nombreux matériaux ont montré des capacités considérables de rétention des polluants colorants, telle que le charbon actif est parmi les adsorbants le plus utilisé. Sa surface spécifique importante riche en sites actifs d'adsorbé la plupart des colorants toxique.

b. Filtration sur membrane

La filtration sur membrane pilotée par pression hydraulique se décline en micro filtration, ultrafiltration, nano filtration et osmose inverse. L'effluent passe à travers une membrane semi-perméable qui retient en amont les contaminants de taille supérieure au diamètre des pores d'adsorbant, pour produire un perméat purifié et un concentré qui reçoit les impuretés organiques. Parmi les types de procédés, la nano filtration et l'osmose inverse sont les plus adaptés à la réduction partielle de la couleur et des petites molécules organiques, par contre l'osmose inverse reste la plus répandue [29].

c. Coagulation floculation

Cette méthode physique est basée principalement par l'addition d'un coagulant qui va former des floes avec les polluants organiques sous le terme de coagulation floculation, on entend tous les processus physicochimiques par lesquels des particules colloïdales ou des solides en fine suspension sont transformés par des floculants chimiques en espèces plus visibles et séparables (les floes). Les floes formés sont ensuite séparés par décantation et filtration puis évacués. Les coagulants inorganiques tels que l'alun donnent les résultats les plus satisfaisants pour la décoloration des effluents textiles contenant des colorants dispersés, de cuve et soufrés, mais sont totalement inefficaces pour les colorants réactifs, azoïques, acides et basiques, la coagulation floculation ne peut être utilisée pour les colorants fortement solubles dans l'eau. D'importantes quantités de boue sont formées avec ce procédé : leur régénération ou réutilisation reste la seule issue mais demande des investissements supplémentaires. Les floes sont ensuite éliminés par décantation et filtration [30].

Les principaux coagulants utilisés pour déstabiliser les particules en suspension et produire des floccs, sont :

- Le sulfate d'aluminium (alun) $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, l'aluminate de sodium NaAlO_2 , le chlorure ferrique $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, le sulfate ferreux $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, le sulfate ferrique $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$.

II.6.2. Méthode chimique

La méthode de traitement chimique est généralement liée à la méthode d'oxydation chimique, qu'est distingué en deux types d'oxydation, oxydation chimique classique et oxydation avancée. L'oxydation chimique est une voie de traitement utilisée lorsque les concentrations de polluants sont assez faibles et que la quantité d'oxydant requise n'est donc pas très importante.

L'oxydation chimique classique est basée sur l'ajout d'un agent oxydant dans la solution à traiter, et l'oxydation avancée intervient lorsque l'oxydation classique, il est inefficace, elle consiste à générer des espèces radicalaires très oxydantes pour dégrader les polluants organiques. Ces derniers sont des oxydants peu sélectifs, qui sont capables de dégrader toutes sortes de polluants organiques ou organométalliques. Les techniques d'oxydation chimiques sont généralement appliquées pour [31] :

- Le traitement des substances organiques dangereux présents en faibles concentrations ;
- En prétraitement avant les procédés biologiques pour diminuer la charge polluante ;
- Le traitement d'eaux usées chargées de constituants résistants aux méthodes de biodégradation ;
- En post-traitement pour réduire la toxicité aquatique.

Les réactifs les plus utilisés dans les procédés de traitement chimique sont H_2O_2 et le chlore. Le peroxyde d'hydrogène est un oxydant fort et son application pour le traitement des polluants organiques et inorganiques est bien établie.

a. L'échange d'ions

L'échange d'ions est une méthode par laquelle, dans certaines conditions, un matériau solide (résines échangeuses d'ions) attire les ions positifs ou négatifs d'une solution et rejette un aux trois ions de même signe (Guillon, Colonos et al. 1963). L'utilisation de ce procédé est beaucoup plus de traitement des eaux par échange d'ions s'applique aux effluents contenant des colorants [32].

II.6.3. Les traitements thermiques

Les traitements thermiques utilisent de températures très élevées pour décomposer les molécules organiques en dioxyde de carbone, eau et halogènes. Le procédé thermique le plus utilisé industriellement est l'incinération. Ces procédés génèrent de fortes dépenses énergétiques et devraient donc être limités au traitement d'effluents fortement concentrés en matière organique dont la combustion compense au mieux l'énergie de vaporisation de l'eau. Ils peuvent nécessiter la mise en place d'un dispositif de traitement des fumées émises [33].

II.6.4. Les traitements biologiques

Les traitements biologiques est une méthode réalisée par la dégradation de contaminants par des microorganismes. De plus ils peuvent détruire la plupart des composés carbonés présents sous forme soluble tels que les sucres, graisses, protéines, etc. Ce sont actuellement les procédés de traitement d'effluents les plus répandus dans l'industrie. Mais, les procédés biologiques ne peuvent pas être utilisés sur certains polluants au-delà d'une concentration seuil, sous peine d'une inhibition de l'activité microbienne voire d'une destruction des microorganismes pour les composés les plus toxiques. Par exemple, les composés phénols peuvent inhiber la croissance des microorganismes présents dans les boues activées dès 400 mg/l. Ces procédés biologiques se produisent selon deux modes : traitements aérobies, ils sont effectués en présence de l'oxygène et le traitement anaérobie, les microorganismes dégradent la matière organique en absence de l'oxygène [34].

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des chercheurs bibliographiques ont proposé différentes informations générales sur les colorants, leurs classes et leurs propriétés, ainsi que leur toxicité et les différentes méthodes de traitement.

Chapitre III : phénomène d'adsorption

III.1. Introduction

La connaissance des phénomènes d'adsorption, d'échange ou de rétention entre les minéraux et leur milieu adsorbant par des mécanismes variés, la nucléation et la croissance sur support, la passivation des matériaux, l'altération des minéraux, la gestion et le contrôle de la qualité des eaux, la neutralisation de certains déchets, la valorisation des minerais par flottation, l'utilisation des solides en tant que charge minérale, etc.. Les phénomènes d'adsorption sont importants pour la plupart de ces éléments, surtout si l'on considère des modifications d'équilibres des systèmes à l'intérieur de périodes relativement courtes comme les polluants. Pour comprendre les mécanismes de rétention des adsorbats à l'interface solide-gaz ou à l'interface solide-solution aqueuse, il importe, avant tout, de connaître les propriétés superficielles du solide, par ce que d'une part, les propriétés extensives (texturales) et, d'autre part, les propriétés intensives (énergétiques) du solide aux différentes échelles macroscopique, semilocale et locale. Autrement dit l'adsorption est un procédé de traitement, bien adapté pour éliminer une très grande diversité de composés toxiques dans notre environnement, ce phénomène est essentiellement utilisé pour le traitement de l'eau et de l'air. Au cours de ce processus les molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé adsorbat, viennent se fixer sur la surface d'un solide, appelé adsorbant.

III.2. Définition

Le mot adsorption indique qu'il s'agit d'un phénomène de surface et ne doit pas être confondu avec le mot absorption qui indiquerait que le fluide a pénétré dans la masse du solide, l'adsorption est une opération fondamentale de Génie Chimique qui exploite l'aptitude de certains solides à concentrer à leur surface les constituants d'une solution permettant ainsi leur séparation. Autrement dit c'est un processus complexe au cours duquel des molécules viennent se fixer sur la surface de l'adsorbant, les forces de fixation sont liées à des interactions physiques ou chimiques selon la nature du système, cette interface soluté/solide est un phénomène de nature physique ou chimique par lequel une espèce chimique peut s'accumuler à la surface d'un solide ou des effluents liquides ou gazeux, se fixent à la surface d'un solide [35].

La nature des liaisons entre les molécules fixées et la surface solide est formée ainsi que la quantité d'énergie dégagée lors de la rétention d'une molécule à la surface d'un solide permettent de distinguer deux types d'adsorption : adsorption physique et adsorption chimique ces sites vont être occupés par les espèces adsorbantes selon la réaction suivante, $S+A = SA$, et ce processus de la plus grande importance en ce qui concerne le comportement des substances

tant inorganiques qu'organiques dans les eaux naturelles car il influe tant sur la distribution des substances dissoutes et particulaires que sur les propriétés des particules en suspension. L'adsorption joue un rôle très important dans le comportement des polluants dans les milieux aquatiques liée à la nature de la surface absorbante vont jouer un rôle essentiel dans ce phénomène [36].

III.3. Les adsorbants

Historiquement, les premiers adsorbants utilisés, il y a plusieurs siècles, furent les argiles et les terres décolorantes, puis à la fin du XIX^{ème} siècle furent développés les charbons actifs. Seuls les adsorbants ayant une surface spécifique suffisante peuvent avoir un intérêt pratique. Les adsorbants industriels ont généralement des surfaces spécifiques supérieures à 100 m².g⁻¹. Ces adsorbants sont nécessairement microporeux avec des tailles de pores inférieures à 2 nm ou mésoporeux avec des tailles de pores comprises entre 2 nm et 50 nm [37].

III.3.1. Définition

Les adsorbants par leur caractéristique est possèdent une propriété extérieures telles que leur surface spécifique ou leur polarité, est préférable pour avoir une grande capacité d'adsorption. La taille des micropores détermine l'accessibilité des molécules adsorbables à la surface interne d'adsorption, il est donc possible de caractériser les adsorbants par la distribution de la taille des pores, et donc de choisir tel ou tel adsorbant pour une séparation particulière [38].

III.3.2. Les types d'adsorbant

Tableau III.1 : Les principaux types d'adsorbants employés [38] :

Adsorbant	Surface spécifique (m ² .g ⁻¹)	Taille des pores (nm)	Porosité interne
Charbon actif	400 à 2000	1.0 à 4.0	0.4 à 0.8
Zéolithes	500 à 800	0.3 à 0.8	0.3 à 0.4
Gels de silice	600 à 800	2.0 à 5.0	0.4 à 0.5
Alumines activées	200 à 400	1.0 à 6.0	0.3 à 0.6

III.3.3. Structure de l'adsorbant

a. Structure poreuse

L'adsorbant poreux défini à partir du volume de substance adsorbée nécessaire pour saturer tous les pores ouverts d'un gramme de ce solide, ce pore ouvert est un pore dont l'accès se situe à la surface du grain, il est donc accessible au fluide. Ce volume poreux, en $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, est donc uniquement caractéristique de la porosité ouverte. Selon la classification International Union of Pure and Applied Chemistry, les tailles de pores sont regroupées en [39] :

- **Groupe 01** : Les micropores de diamètre inférieur à 2 nm ; permettent au fluide d'accéder à la surface interne du charbon actif.
- **Groupe 02** : Mésoporeuse de diamètre compris entre 2 et 50 nm, ils ont favorisé le transport de ce fluide et les micropores sont les sites de l'adsorption
- **Groupe 03** : Macropores de diamètre supérieur à 50 nm, déterminent pratiquement à eux seuls la capacité d'adsorption d'un charbon actif, ils représentent presque la totalité de la surface offerte à l'adsorption

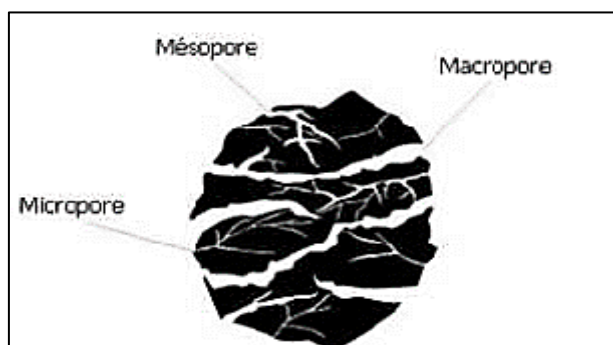


Figure III.1 : Représentation schématique des différents types de pores.

b. La surface spécifique

La surface spécifique ou aire massique d'adsorbant c'est la surface totale par unité de masse d'adsorbant accessible aux molécules. La surface spécifique comprend la surface externe et interne d'adsorbant [40] :

- **La surface interne** : c'est la surface microporeuse représentée par les parois des micropores.
- **La surface externe** : c'est la surface non-microporeuse qui comprend les parois des mésoporeuse et des macropores, ainsi que la surface non poreuse de l'échantillon.

Physiquement, la différence entre les deux surface interne et externe c'est la valeur de l'énergie d'adsorption peut être jusqu'à deux fois plus grande sur les parois des micropores de la surface interne que sur la surface externe, c'est à dire que s'explique par la présence de deux parois opposées proches créant une double interaction pour une molécule adsorbée dans un micropore.

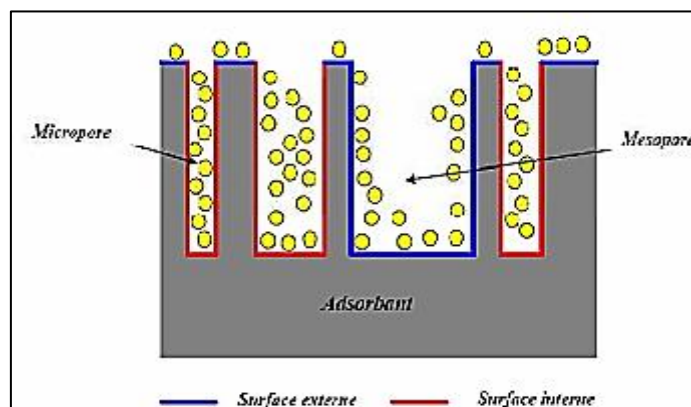


Figure III.2 : Représentation schématique de la surface interne et externe d'un adsorbant.

III.4. Type de phénomène d'adsorption

III.4.1. Adsorption chimique

Les techniques d'oxydation chimique ou la chimisorption est un phénomène irréversible due à une liaison chimique forte de type covalente entre les atomes superficiels du solide et les molécules adsorbées, l'adsorption chimique met en jeu des énergies d'attractions élevées, qui conduisent à des chaleurs d'adsorption élevées, approchant souvent aux énergies de liaisons chimiques covalentes de l'ordre de 200 kJ/mole (~20 kJ/mole dans le cas de l'adsorption physique). D'après WEBER, ce type d'adsorption ne concerne qu'une fraction très petite de la surface est complète quand tous les centres actifs présents à la surface ont établi une liaison avec les molécules de l'adsorbat intra particulaire totale du charbon actif par exemple. Il est intervenu dans le mécanisme des réactions catalytiques hétérogènes, où le catalyseur crée des liaisons fortes avec le gaz adsorbé. La chimisorption est complète quand tous les centres actifs présents à la surface ont établi une liaison avec les molécules de l'adsorbat [41].

III.4.2. Adsorption physique

L'adsorption physique ou adsorption de Van Der Waals, est un phénomène réversible et rapide, se produit à des températures basses, 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 (Larher 1965) ne détruisant pas l'individualité des molécules et lorsqu'elles opèrent, correspondent à des énergies faibles, ces interactions entre les adsorbats et l'adsorbant sont assurées par des forces électrostatiques type dipôles, liaison hydrogène ou Van der Waals (La liaison physique est plus faible). 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 [42].

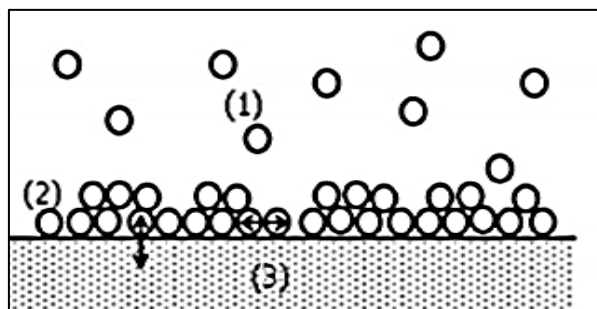


Figure III.3 : Schéma de l'adsorption physique,

1 : molécules adsorbables ; 2 : molécules adsorbées (adsorbats) ; 3 : solide (adsorbant)

Tableau III.2 : Les différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Energie d'adsorption	5 à 10 Kcal/mole	20 à 100 Kcal/mole
Température de processus	< À la température d'ébullition d'adsorption	Élevée
Nature de liaison	Physique (Van der Waals)	Chimique
La désorption	+/- parfaite	Difficile
Energie d'activation	Non appréciable	Peut être mise en jeu
La cinétique	Très rapide	Lent
État de surface	Formation de multicouches	Conduit tout ou plus à une monocouche

III.5. Mécanisme d'adsorption

La qualité et la quantité de rétention est convient par phénomènes de produisant à l'échelle moléculaire, c'est-à-dire aux mécanismes d'adsorption. Les liaisons (composés-adsorbant) sont divisées en deux types [43] :

- **Liaisons de fortes énergies (>80 kJ/mol) :** sont des liaisons ioniques et échanges de ligands (Abidi 2015) ;
- **Liaisons de faibles énergies (< 80 kJ/mol) :** formé par l'interactions dipôle-dipôle, liaisons hydrogène, interactions hydrophobes.

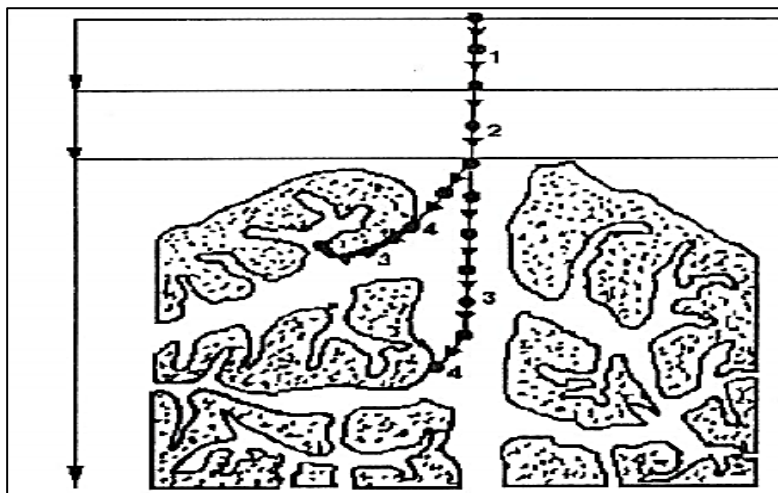


Figure III.4: Mécanisme d'adsorption,

1 : phase liquide ; 2 : film liquide externe ; 3 : diffusion intraparticulaire ; 4 : adsorption

III.5.1. L'adsorption par liaison ioniques ou échange des ions

L'adsorption par liaison ioniques (échange des ions) est le plus souvent peu réactives, et ne concerne que les produits sous forme cationique ou ceux qui peuvent le devenir, comme les bases faibles. Donc l'interaction entre la molécule et les groupements ionisés est facilement ionisable de l'adsorbant, surtout les groupements phénoliques et carboxyliques présents dans la structure des charbons.

III.5.2. Rétention hydrophobe

La rétention hydrophobe est un type de mécanisme concerne particulièrement les composés non-ioniques et apolaires. Elle est distinguée en :

- Un mécanisme d'adsorption hydrophobe est lié à pH, les molécules des produits phytosanitaires apolaires interagissent avec les sites hydrophobes du support comme les chaînes aliphatiques, les fractions lipidiques, les dérivés de la lignine (riches en carbone avec peu de groupes fonctionnels).
- Certaines molécules assimilent la surface de l'adsorbant à un solvant liquide non-miscible à l'eau.

III.5.3. L'adsorption par liaison hydrogène

L'interaction entre certains supports peuvent présenter à leur surface de nombreuses fonctions (oxygénées, hydroxyles...), qui peuvent interagir par liaisons hydrogène avec les groupes complémentaires des molécules adsorbant, à une forte compétition avec les molécules d'eau pour ces sites d'adsorption.

III.5.4. L'adsorption par la force de van der Waals

Les forces de Van der Waals sont formé à partir des attractions dipolaires de faible intensité qui agissent à courte distance. Leur action s'additionne à d'autres types d'interactions plus fortes. Dans le cas de molécules non-ioniques et d'attraction apolaires, leur participation à la rétention n'est pas négligeable. Si la molécule est assez volumineuse et qu'elle peut s'adapter à la surface de l'adsorbant.

III.6. La cinétique d'adsorption

Le phénomène d'adsorption, contrôlé par une diffusion moléculaire, atteint son équilibre relativement rapidement. Elle 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 (Laabd, El Jaouhari et al. 2015). Le transfert d'une phase liquide contenant l'adsorbant vers une phase solide avec rétention de soluté à la surface de l'adsorbant se fait par les étapes [44] :

- 1) **Transfert de masse externe (diffusion externe)** : qui correspond au transfert d'un 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)** : où le fluide remplissant les pores ; les molécules se propagent de la surface des grains vers leur centre à travers les pores.
- 3) **La diffusion intra particulaire**, cette division où les molécules se diffusent à travers des réseaux de micropores.
- 4) **Diffusion de surface pour certains adsorbants**, est existée également une contribution de la diffusion des molécules adsorbées le long des surfaces des pores à l'échelle d'un grain d'adsorbant.

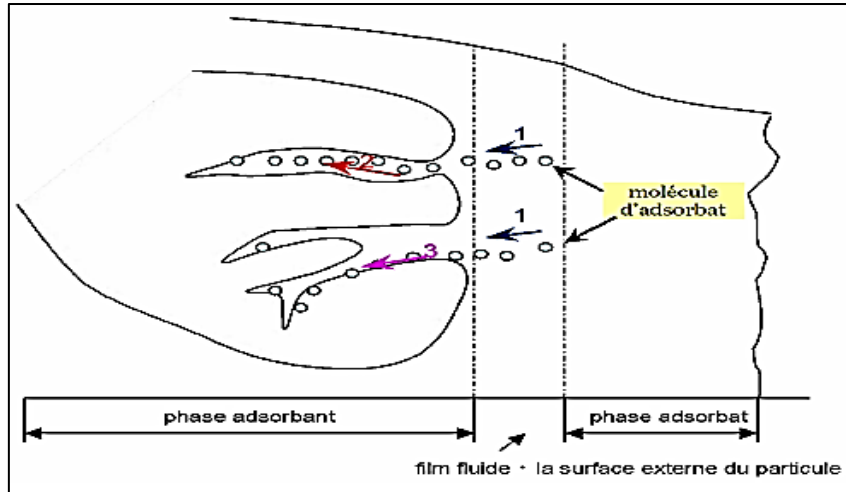


Figure III.5: Schéma de mécanisme de transport de l'adsorbat au sein d'un grain :

1- diffusion externe, 2- diffusion interne (dans les pores), 3- diffusion de surface

III.6.1. Modélisation des cinétiques d'adsorption

Selon les recherches scientifiques peuvent être modélisées par des équations mathématiques. Il existe des nombreux modèles cinétiques, les modèle le plus fréquents sont les modèles du pseudo premier et du second ordre, le modèle de Weber et Morris, etc. [45].

a. Modèle de la cinétique du pseudo premier ordre (modèle Lagergren) :

Lagergren en 1898 a proposé un modèle d'ordre 1 basé sur une relation linéaire entre la quantité de soluté fixé à la surface du matériau en fonction du temps. Le modèle cinétique ordre proposé par Lagergren est exprimé par l'équation suivante :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1 (q_e - q_t)$$

Où :

- k_1 : La constante de vitesse pour une cinétique du pseudo premier ordre (min^{-1}),
- q_t : La capacité d'adsorption à l'instant t (mg/g d'adsorbant sec),
- q_e : La capacité d'adsorption à l'équilibre (mg/g d'adsorbant sec).

Après intégration et l'application des conditions aux limites ($t = 0, q_t = 0$) et ($t = t, q = q_t$), l'équation 1 devient :

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

En traçant $\text{Log}(q_e - q_t)$ en fonction du temps t , on peut déterminer les paramètres cinétiques du modèle Lagergren

b. Le modèle pseudo-second-ordre (PSO) :

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

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

Où

- k_2 : Constante de vitesse de réaction de second ordre en (g/mg/min).
- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre en (mg/g),
- q_t : quantité adsorbée au temps t en (mg/g).

La linéarisation de l'équation précédente donne :

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{K_2 - qt^2} + \frac{1}{qe} t$$

$(K_2 qe^2)$ Est la vitesse initiale d'adsorption en (mg /g min). On trace $t/qt = f(t)$, on obtient une droite qui donne k_2 et qe

c. Le modèle de Weber et Morris (modèle de diffusion intra particulaire) :

L'équation de Weber et Morris permet la détermination de la vitesse de diffusion dans les pores en utilisant l'équation suivante :

$$qt = K_{int} t^{\frac{1}{2}} + C$$

Où :

- K_{INT} : La constante de la diffusion intra particule en (mg/g min^{1/2}) ;
- q_e : Quantité adsorbée au temps t (mg/g) ;
- C : représente la valeur de l'épaisseur de la couche limite ;
- t : temps (min).

La constante k est déduit de la pente de la partie linéaire de l'équation représentant ce modèle

III.7. Isotherme d'adsorption

Tous les systèmes d'interaction adsorbant/adsorbât ne se comportent pas de la même manière. Les phénomènes d'adsorption sont souvent abordés par leur comportement isotherme [46].

III.7.1. Classification d'isothermes

La classification d'isotherme selon Brunauer, son divise en 5 types comme suivant, avec $x = P / P_0$; P : pression à l'équilibre ; P_0 : pression de vapeur saturante ; m : masse de produit adsorbé par unité de matériau sorbant :

a. Les isothermes de type I : est un modèle d'adsorption en monocouche, ou correspondant au remplissage de micropores avec saturation lorsque le volume à disposition est totalement rempli. Cette isotherme crée une interaction relativement forte entre l'adsorbât et l'adsorbant.

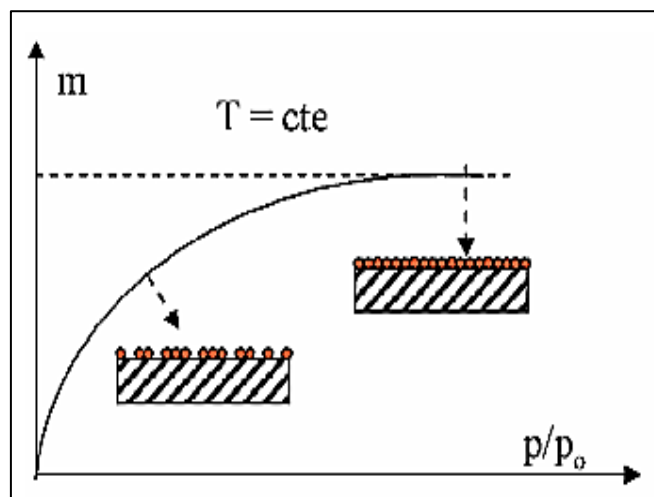


Figure III.6 : Les isothermes de type I

b. Les isothermes de type II : l'isothermes de type II correspondent à l'adsorption multicouche sur des surfaces non microporeuses. Ou d'une combinaison d'un type I et une isotherme de type II c'est le remplissage de micropores suivi d'une adsorption multicouche sur une surface externe.

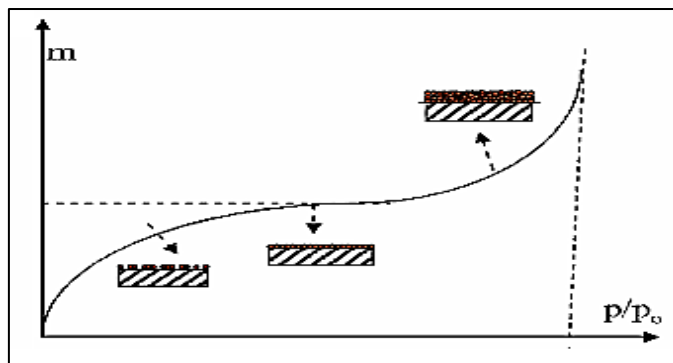


Figure III.7 : Les isothermes de type II

c. **Les isothermes de type III :** Ce type d'isotherme est relativement rare elle indique la formation des couches poly moléculaires dès le début de l'adsorption. Elle reflète un manque d'affinité entre l'adsorbat et l'adsorbant, et crée des interactions adsorbat-adsorbat relativement fortes.

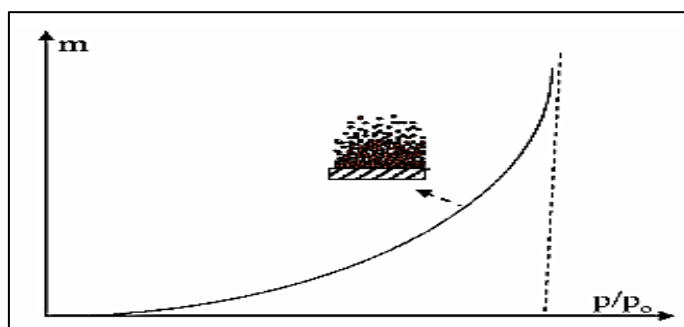


Figure III.8 : Les isothermes de type III

d. **Les isothermes de type IV :** ce type est résulter de la combinaison ' isotherme de type II (adsorption forte, mais limitée). Ces isothermes présentent des marches caractéristiques d'une adsorption multicouche sur une surface non poreuse très homogène.

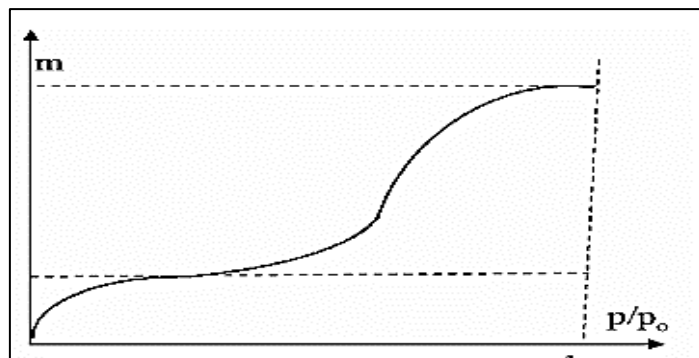


Figure III.9: Les isothermes de type IV

e. Les isothermes de type V : cette classe est reflète une forte interaction entre les adsorbats. De plus, l'existence d'une hystérésis au cours de la désorption reflète la présence de mésoporeuse dans lesquels la vapeur se condense en formant un ménisque de forte courbure.

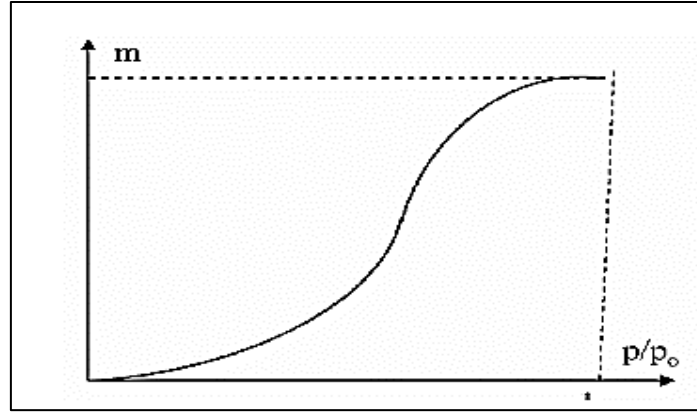


Figure III.10 : Les isothermes de type V

III.7.2. Modélisation des isothermes d'adsorption

La modélisation mathématique liée à la concentration du soluté en solution et la quantité adsorbée par unité de masse. Il existe un nombre important de modèles mathématiques disponibles (simples ou complexes) dans la littérature [47].

Isotherme de Langmuir

Le modèle d'adsorption d'isotherme de Langmuir est un modèle monocouche très simple et considère uniquement l'espèce issue de la solution adsorbée sur un unique adsorbant composée d'un nombre fini de sites d'adsorption. La relation connue sous l'appellation isotherme de Langmuir est le plus souvent formulée par :

$$Q_e = (q_{max} b C_e) / (1 + b C_e)$$

Où :

- C_e : concentration résiduelle du soluté à l'équilibre dans la solution (mg / l).
- Q_e : quantité adsorbée du soluté par unité de masse du solide à l'équilibre (mg /g).
- Q_{max} : capacité maximum d'adsorption du solide (mg / g) ou capacité maximale de sorption du solide.
- b : constante de Langmuir est une fonction de l'énergie d'adsorption dépend de la température et croit avec la force d'interaction entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant (L /g) ou (dm³ / g).

Isotherme de Freundlich

Freundlich, en 1926 établit une isotherme très satisfaisante qui peut s'appliquer avec succès à l'adsorption des gaz, utilisé principalement pour l'adsorption en solution dilués. Il a constaté que le mécanisme de ce processus est assez complexe, du fait de l'hétérogénéité de la surface. L'équation de Freundlich s'écrit comme suit :

$$q_e = K_f (C_e)^{\frac{1}{n}}$$

Où :

- K_f et n : constantes caractéristiques.
- K_f (mg/g) : peut être prise comme capacité relative d'adsorption.
- $1/n$: indique l'intensité de la réaction ou l'hétérogénéité de la surface

Selon Freundlich, cette équation admet les hypothèses suivantes :

- Adsorption en multicouche /-Site d'adsorption énergétiquement hétérogène ;
- Pas de capacité maximale d'adsorption /-Interaction adsorbant- adsorbat prise en compte. /- Limitation en milieu dilué ; le modèle n'est utilisable que dans le domaine des faibles concentrations. /-Les sites d'absorption les plus forts vont être occupés les premiers et la force de liaison diminue avec l'augmentation du degré d'occupation de sites

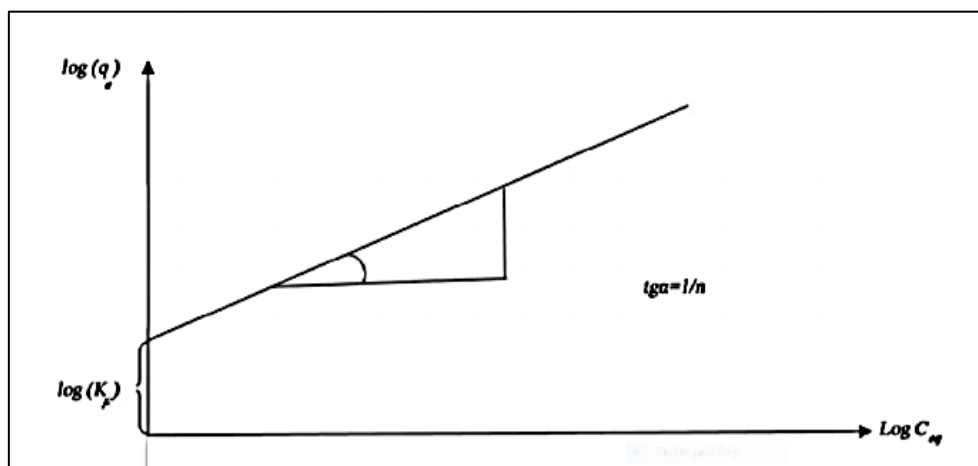


Figure III.11 : Représentation graphique de l'isotherme de Freundlich.

III.8. Conclusion

Le traitement par la technique d'adsorption est plus utilisé pour son efficacité dans l'abattement des micropolluants organiques, en mettant en jeu des interactions solide -liquide. Plusieurs travaux ont montré que l'adsorption sur le charbon actif est aisément réalisable, mais les argiles ont montré également une capacité d'adsorption, dégraissant et décolorant des eaux polluées par des rejets industriels.

Partie expérimentale

Chapitre IV : Etude d'adsorption

IV.1. Introduction

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié la composition entre les résultats expérimentaux sur deux types de colorants différents : Cristal Violet et Rouge Congo et la différence entre eux en termes de concentration initiale de colorants, de température et de masse

Partie 01 : Matériels et méthodes

IV.2. Produits et matériels utilisés

IV.2.1. Matériels utilisés

- Des béchers
- Fioles jaugées
- Entonnoir
- Mélangeuses magnétiques
- Seringues
- Papier aluminium
- Des tubes à essai pour les prélèvements
- Thermomètres
- Equilibre
- Centrifugeuse
- Spectrophotomètre

IV.2.2. Produits utilisés

Pour étudier la différence entre deux types de couleurs par le procédé d'adsorption, les caractéristiques générales de chacune ont été précisées :

Tableau IV.1 : Produits chimiques utilisés

Produits	Formule chimique	Fournisseur	Pureté	Masse molaire (g/mol)
Cristal violet	$C_{25}H_{30}ClN_3$	Biochem	99%	407.99
Rouge Congo	$C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$	Biochem	/	696.663

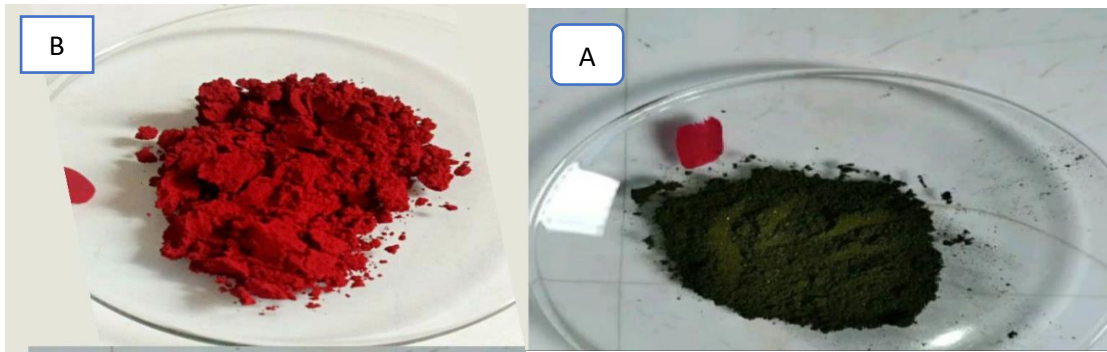


Figure IV.1 : A : Cristal Violet, B : Rouge Congo

Tous les résultats expériences dans ce travail ont été réalisés sur un même lot de bentonite provenant gisement de Roussel [48]

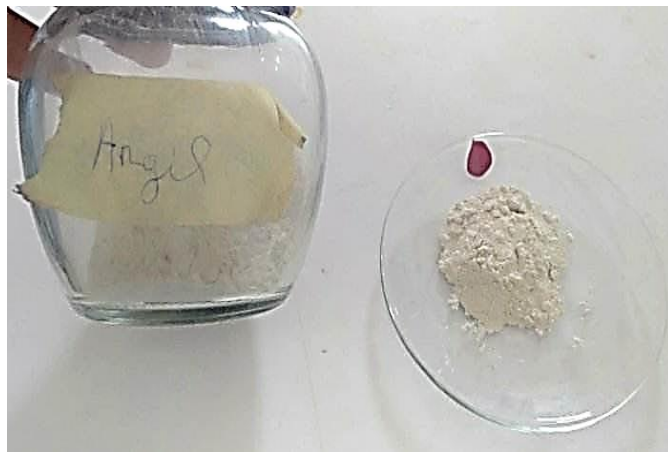


Figure IV.2 : argile

IV.2.3. Techniques d'analyses

a) Le thermomètre :

Les mesures de la température ont été effectuées avec un thermomètre. On a mesuré 2 valeurs ($T= 35^{\circ}$, 45).

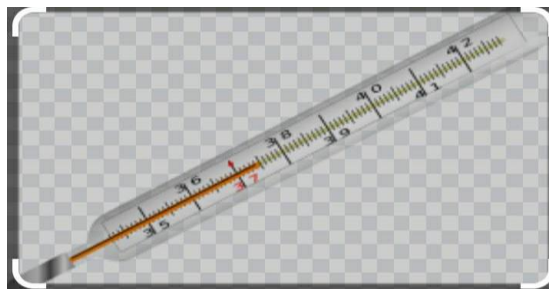


Figure IV.3 : Thermomètre

b) La centrifugation :

La centrifugation a été effectuée à l'aide d'une centrifugeuse de type DLAB DM 0412 pour assurer la séparation de la solution hétérogène du colorant avant de faire les analyse UV/Vis.



Figure IV.4 : centrifugation DLAB DM 0412

c) Le spectrophotomètre UV/Visible :

Le spectrophotomètre UV-Vis optique à double faisceau de LG Ce système dispose du logiciel interne de Shimadzu qui le rend indépendant. L'absorption UV-Vis peut également être piloté par la nouvelle generation de logiciels, qui se décline en plusieurs versions pour répondre au mieux à des besoins simples mais aussi à des exigences réglementaires plus poussées le colorant (RC) et (CV) ainsi que les échantillons dégradés par le procédé d'adsorption sont analyse par spectrophotomètre UV-Vis en utilisant le spectrophotomètre SHIMADZU technologie type 1900i-UV.



Figure IV.5 : Spectrophotomètre UV/Visible spectroscopy (1900i-UV-VIS)

IV.2.4. Préparation d'une solution de (RC, CV)

Une solution de cristal Violet et de Rouge Congo est préparée à raison de 0.1g/l dans de l'eau distillée, puis on met 0.1g des deux solutions dans une fiole jaugée de 1000ml après addition d'une quantité d'eau distillée et agitation pendant une quelques heures afin de diluer les deux solutions, puis on remplir avec de l'eau distillée jusqu'à de trie jauge

Pour la préparation des solutions étalon on utilise la loi suivante : $C_1V_1 = C_2V_2$

Telle que :

- Cristal Violet

C_0 : 100mg/l

V_0 : doit être calculée à chaque fois qui on change la concentration de la solution étalon ;

C_1 : variable à chaque fois (20mg/l, 40mg/l, 60mg/l, 80mg/l et 100mg/l)

V_1 : 200ml

On calcule maintenant V_1 , telle que : $V_0 \frac{C_1 V_1}{C_0} \rightarrow V_0 = \frac{20 \times 200}{100} = 40ml$

- Rouge Congo

C_0 : 80mg/l

V_0 : doit être calculée à chaque fois qu'on change la concentration de la solution étalon ;

C_1 : (200mg/l - 40mg/l)

V_1 : 100ml

On calcule maintenant V_0 telle que : $V_0 \frac{C_1 V_1}{C_0} \rightarrow V_0 = \frac{20 \times 100}{80} = 25ml$

- De la même manière on continue avec les autres concentration C_1

✚ Courbe d'étalonnage

- a) En solution aqueuse, le Cristal Violet possède un pouvoir d'absorption dans le domaine visible (λ max = 582). L'absorbance a été mesurée solution de Cristal Violet a des concentrations connues, les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau IV.2 et représentés dans la figure IV.4.

Tableau IV.2 : Absorbance du CV pour différentes concentration

C (mg/l)	2	4	8	10	12	14
Abs	0.13	0.287	0.561	0.667	0.805	0.93

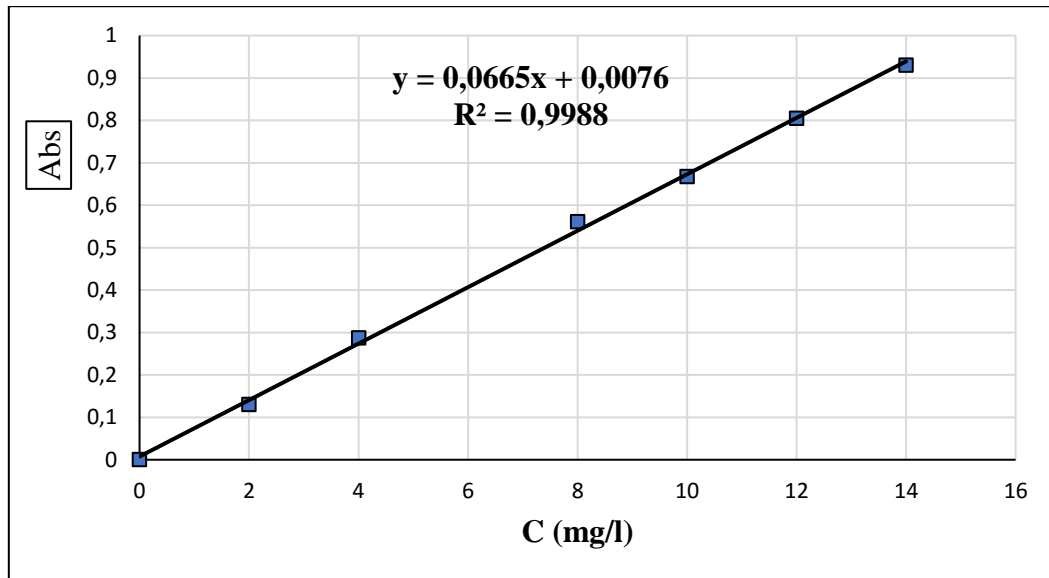


Figure IV.6 : Courbe d'étalonnage de CV

b) En solution aqueuse la Rouge Congo possède un pouvoir d'absorption dans le domaine visible ($\lambda = 498$), l'absorbance a été mesurée solution de Rouge Congo a des concentration connus, les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau IV.3 et représentés dans la figure IV.5.

Tableau IV.3 : Absorbance de RC pour différentes concentrations

C (mg/l)	5	10	15	20	25	30
Abs	0.255	0.346	0.522	0.718	0.891	1.092

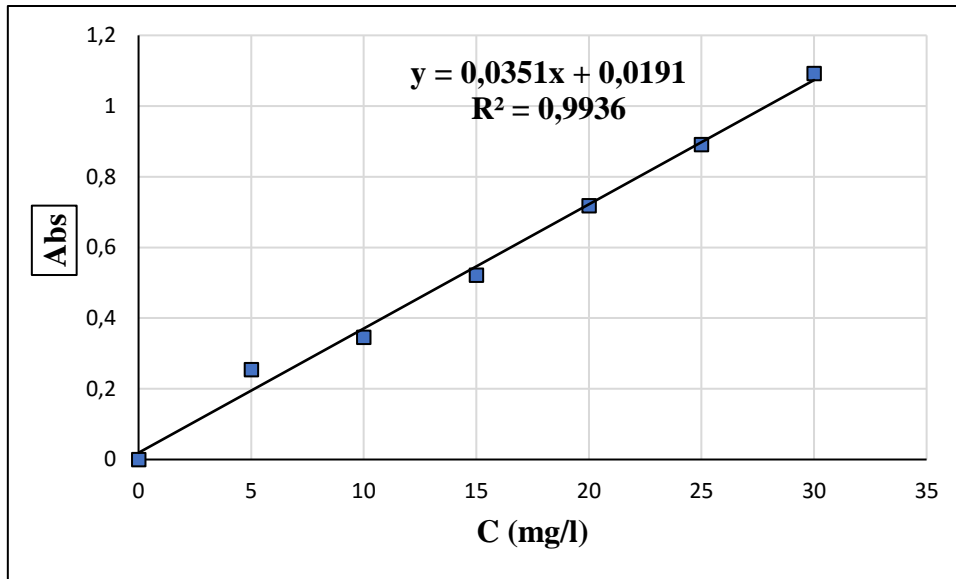


Figure IV.7 : Courbe d'étalonnage de RC

Les deux courbes obtenus sont un droit qui passe par l'origine, le coefficient de corrélation a été trouvé proche de 1. Ceci signifie que la concentration de la solution étalon préparée est exacte, les absorbances correspondantes le sont donc aussi.

Partie 02 : Résultats et discussions

IV.3. L'efficacité de l'adsorption par l'argile

1) Mode opératoire (CV)

Dans un bécher, on met un mélange de : 200ml de solution de Cristal Violet à concentration 20mg/l et 0.1g d'adsorbant on laisse sous agitation.



Figure IV.8 : Expériences d'adsorption de Cristal Violet

Pour comparer entre les différentes conditions, on doit quantifier la quantité ou la capacité d'absorption de ces matériaux. Par le calcul du rendement d'élimination du composé adsorbé CV, défini par R% : $R\% = \frac{c_0 - c_T}{c_0} \times 100$(Eq IV.1)

✚ Résultats et discussion :

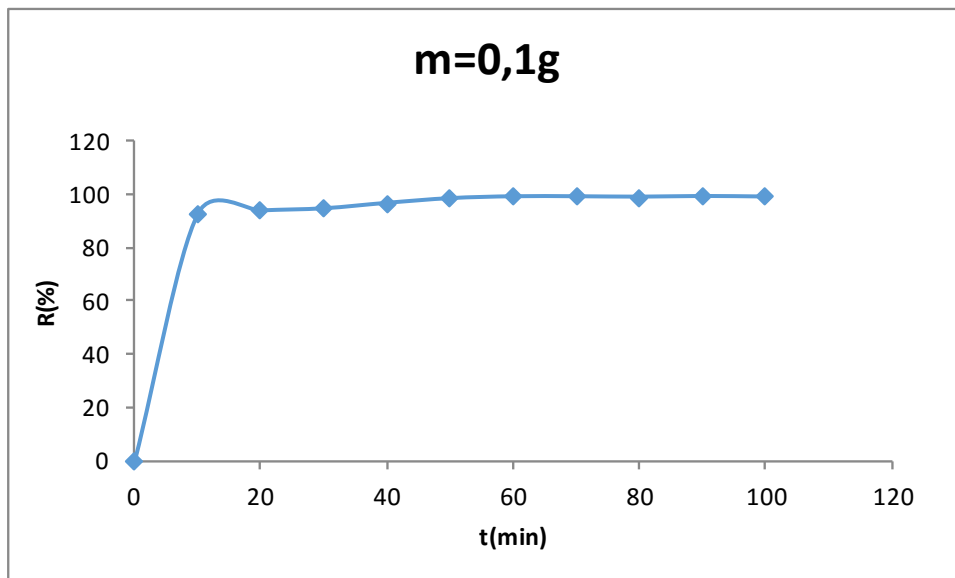


Figure IV.9 : influence de la concentration initiale du CV sur le rendement d'élimination

D'après la figure IV.9 nous remarquons que tout ce qui augmente le temps augmente le rendement jusqu'à ce qu'il soit fixé dans les derniers temps.

IV.4. L'efficacité de quelques paramètres sur l'adsorption

IV.4.1. Temps de contact

L'étude de l'influence du temps de contact est réalisée sous les conditions expérimentales étudiées sur la bentonite (Argile) : le volume : 200ml, vitesse d'agitation : 350tours/min, masse de bentonite présentée graphiquement comme suit :

La capacité d'absorption est calculée par l'équation : $q_t \left(\frac{mg}{g} \right) = \left(\frac{C_0 - C_e}{m} \right) \times V \dots \dots \dots$ (Eq IV.2)

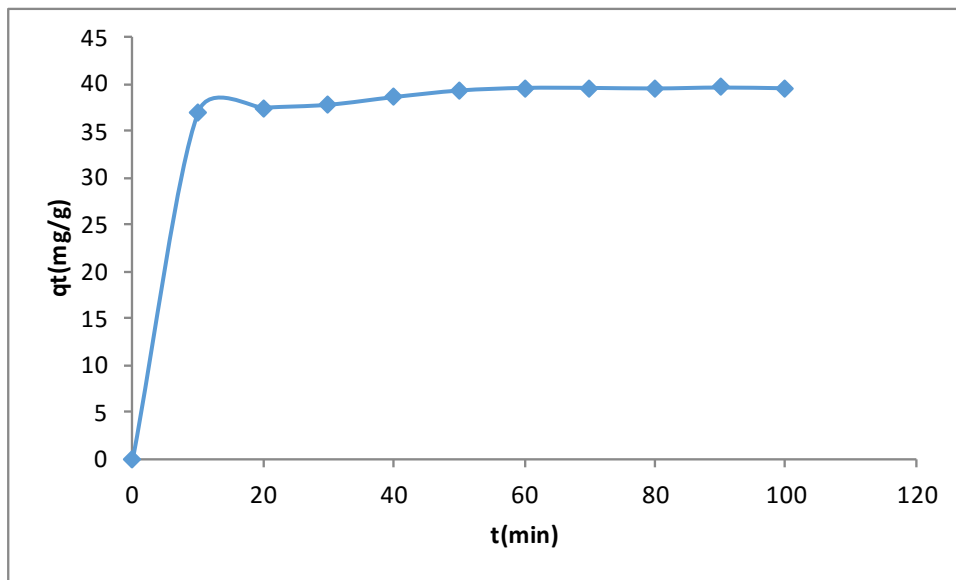


Figure IV.10 : Influence de la capacité d'adsorption en fonction du temps.

D'après la figure IV.10, on remarque une augmentation de la capacité adsorbée du CV en fonction de temps puis l'évolution de processus d'adsorption reste constante (t = 60min)

Les résultats montrent que l'équilibre est atteint à 60 - 70min.

IV.4.2. Influence de la masse

L'effet de la masse de bentonite a été étudié en testant différentes valeurs : 0.0125g, 0.05g, 0.025g, 0.19g, 0.2g de la solution de Cristal Violet à 200mg/l

➦ Résultat et discussion

La figure IV.11 montre la variation de rendement d'élimination de CV décoloré en fonction du temps et en présence des différentes masses de bentonite.

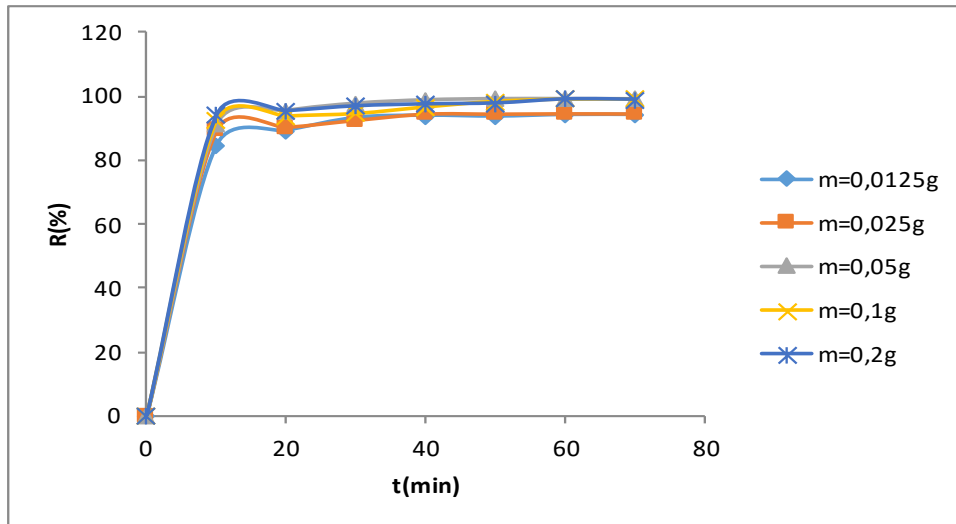


Figure IV.11 : influence de masse de bentonite sur le rendement d'élimination du CV par l'adsorption

D'après la figure IV.11, on remarque que le rendement d'adsorption augmente avec l'augmentation de la masse de bentonite

IV.4.3. Influence de la concentration du CV

La figure IV.12 représente l'effet de la concentration initiale de la bentonite sur l'adsorption, les essais ont été réalisés en mettre 0.0125g de l'adsorbant prépare pendant 70 minutes en concentration varie de 10 à 100 mg/l. Les tests ont été réalisées à pH = 4.9 de la solution et a température de 23°C.

➤ Résultats et discussion

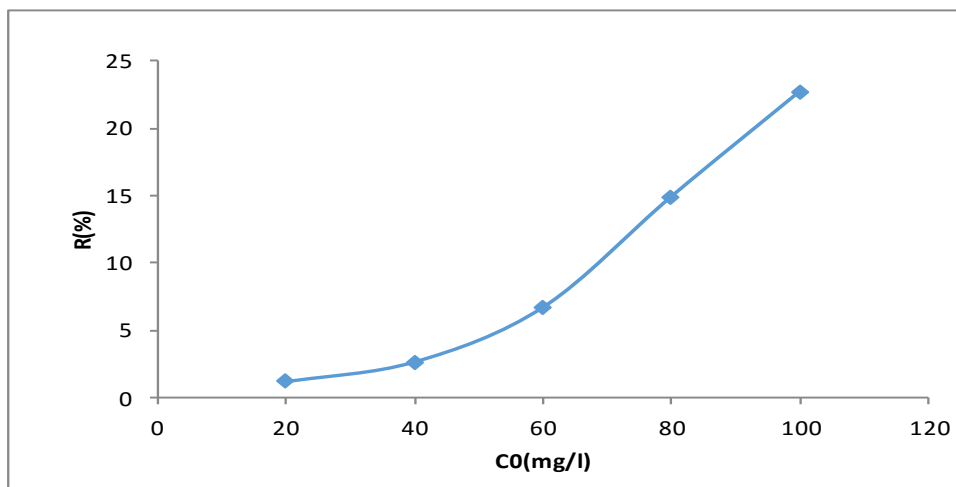


Figure IV.12 : influence de la concentration du CV sur leur rendement d'élimination par l'adsorption

D'après la courbe obtenue, le rendement d'adsorption a une relation inverse avec la concentration, le rendement d'adsorption augmente avec l'augmentation de la concentration initiale.

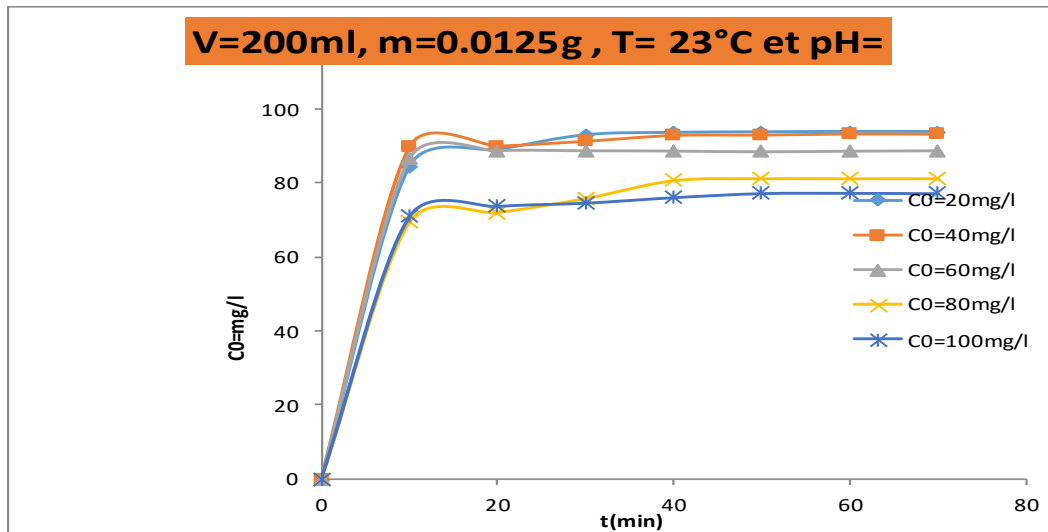


Figure IV.13 : Influence de la concentration initiale du CV sur la capacité d'adsorption

D'après la figure IV.13, on remarque que la quantité adsorbée augmente avec l'augmentation de la concentration initial du CV.

IV.4.4. Influence de la température

L'effet de la température sur la fixation du colorant (Cristal Violet) sur la bentonite a été étudié avec 200 ml de la solution de concentration 0 mg/l et pH = 4.9.

Sur un agitateur magnétique avec plaque chauffante pour garder la température désirée constante à l'aide d'un thermomètre (45°C, 35°C), la solution mis sous l'agitateur.

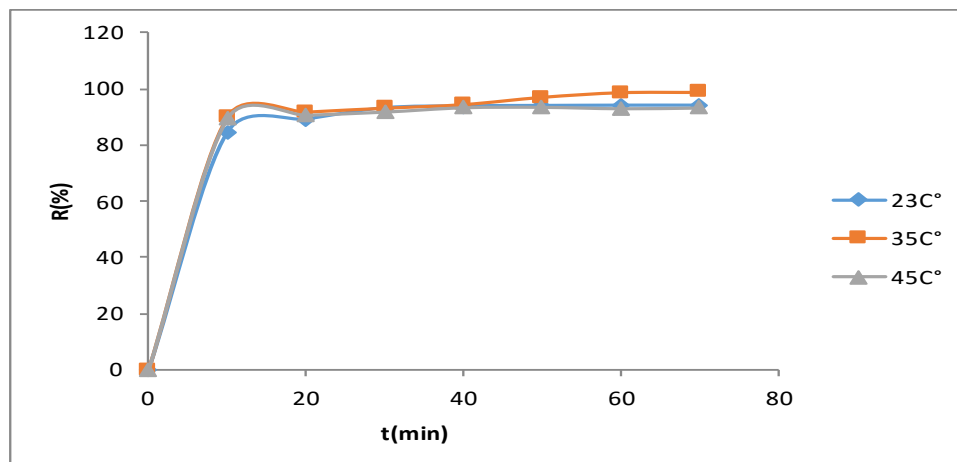


Figure IV.14 : Influence du rendement d'adsorption en fonction du temps

D'après la figure IV.14, on remarque que :

- Dans cette expérience, nous constatons que la température de 35°C a donné de bons résultats

IV.4.5. Modélisation des isothermes d'adsorption

La dernière étape de l'étude des isothermes consiste à modéliser la courbe, ou plus précisément, à rendre compte par une équation mathématique de l'ensemble de la courbe. Les modèles classiques de Langmuir et de Freundlich caractérisant la formation d'une monocouche seront utilisés pour leur simplicité de mise en œuvre.

IV.4.5.1. Modèle de Langmuir

L'équation de Langmuir est de la manière suivante :

$$q_e = \frac{X}{m} = q_m \frac{K_L \times C_e}{1 + K_L C_e}$$

La forme linéaire de Langmuir :

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \times \frac{1}{C_e}$$

- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre, exprimé en (mg/g).
- q_m : Capacité maximale d'adsorption de la monocouche, exprimé en (mg/g).
- K_L : Paramètre de Langmuir
- C_e : Concentration à l'équilibre, exprimé en (mg/L).
- En trace la courbe : $\frac{1}{q_e} = f\left(\frac{1}{C_e}\right)$

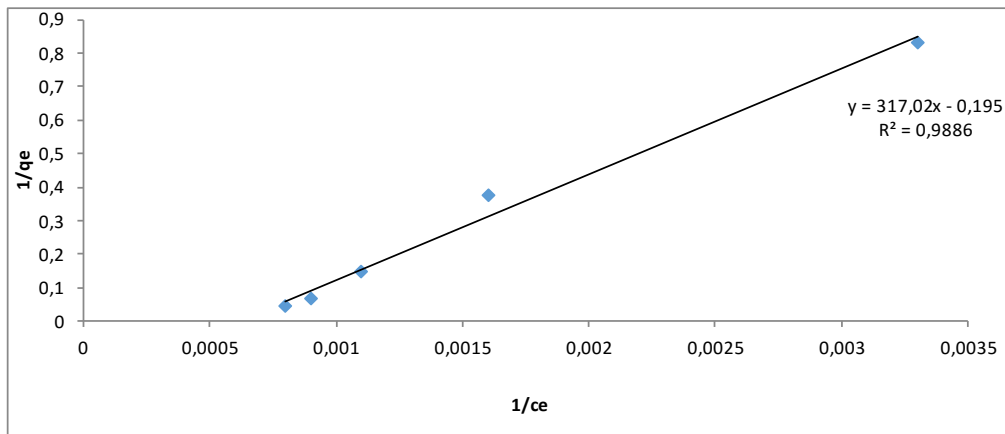


Figure IV.15 : Isotherme de Langmuir de l'adsorption du CV sur bentonite

IV.4.5.2. Modèle de Freundlich

Modèle valable pour des solutions diluées.

L'équation de Freundlich est de la manière suivante :

$$q_e = K_f \times C_e^{\frac{1}{n}}$$

La forme linéaire du modèle est :

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$$

- K_F et $\frac{1}{n}$: sont les constantes de Freundlich
- En trace la droite dont l'équation se forme : $\ln(q_e) = f(\ln(C_e))$.

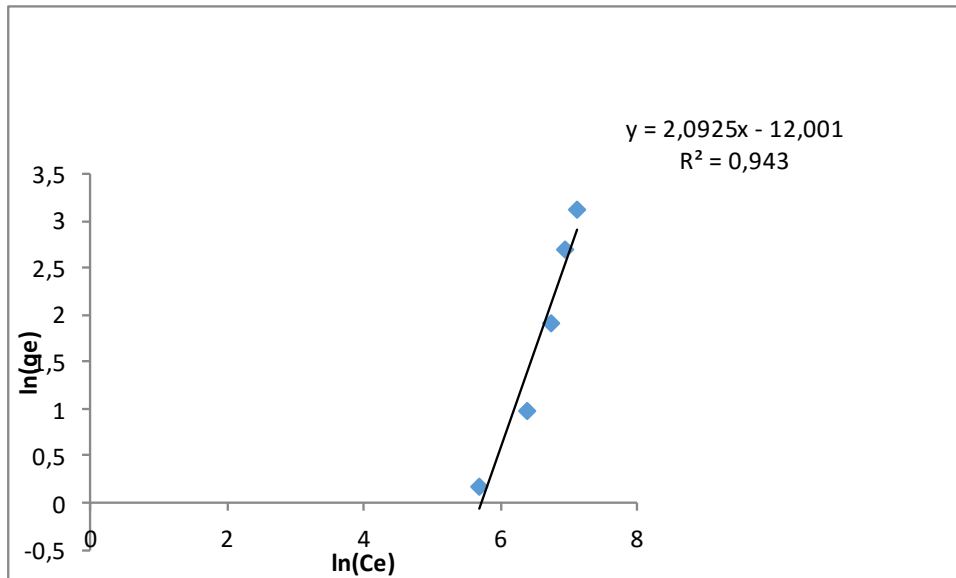


Figure IV.16 : Isotherme de Freundlich de l'adsorption du CV sur bentonite

Les résultats expérimentaux d'isotherme d'adsorption sont en bon accord avec le modèle de Freundlich que le modèle de Langmuir

IV.6. Modélisation des cinétiques d'adsorption

IV.6.1. Modèle de pseudo premier ordre (PPO)

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t)$$

Où :

- K_1 : constante de vitesse de réaction d'adsorption du CV sur la bentonite de premier ordre, en (min^{-1}) ;
- q_e : quantité du CV adsorbée à l'équilibre en (mg/g) ;
- q_t : quantité du CV adsorbée à l'instant t en (mg/g) ;
- t : temps de contact en (min).

Après intégration dans les conditions initiales $q_t = 0$ à $t = 0$, l'équation devient :

$$q_t = q_e (1 - e^{-K_1 t})$$

La linéarisation de l'équation précédente donne

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

On trace $\ln(q_e - q_t) = f(t)$, on obtient une droite qui donne k_1 et q_e . Ce modèle permet de décrire les phénomènes ayant lieu lors des premières minutes du processus d'adsorption.

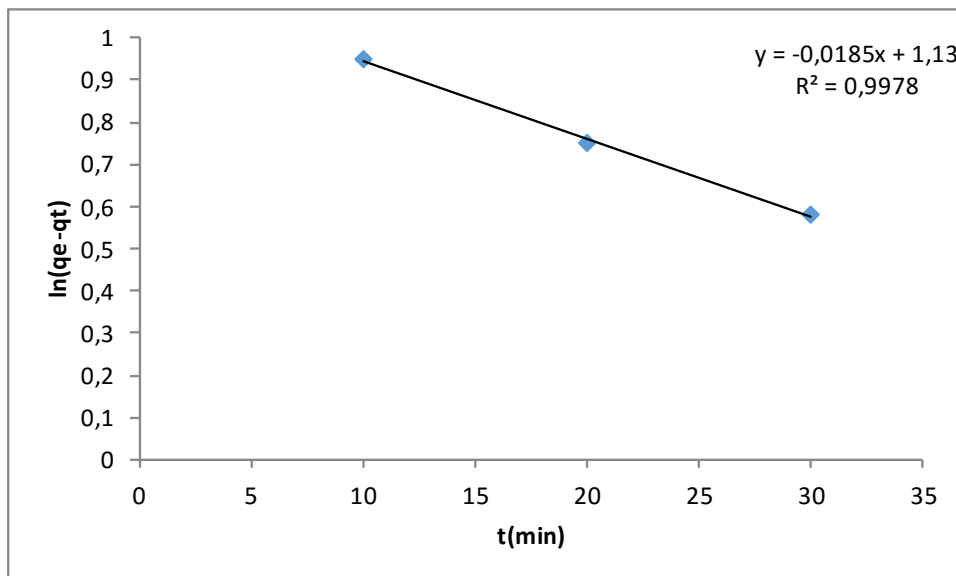


Figure IV.17 : Modélisation de la cinétique d'adsorption du CV par le modèle de pseudo premier ordre

IV.6.2. Modèle de pseudo second ordre (PSO)

Le modèle pseudo-second-ordre (PSO) est donné par l'expression suivante :

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

Où :

- K_2 : constante de vitesse de réaction d'adsorption du CV sur la bentonite, de second ordre, en (g/mg/min).
- q_e : quantité adsorbée à l'équilibre en (mg/g) ;
- q_t : quantité adsorbée au temps t en (mg/g) ;
- t : temps de contact en (min).

Après intégration de l'équation précédente on obtient :

$$q_t = \frac{K_2 q_e^2 t}{K_2 q_e t + 1}$$

La linéarisation de l'équation précédente donne :

- $h = K_2 q_e^2$: est la vitesse initiale d'adsorption en (mg /g min).

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

On trace $t/q_t = f(t)$, on obtient une droite qui donne k_2 et q_e . Contrairement au modèle du premier ordre, le modèle de pseudo second ordre est applicable à un intervalle de temps plus large (généralement l'ensemble du processus d'adsorption).

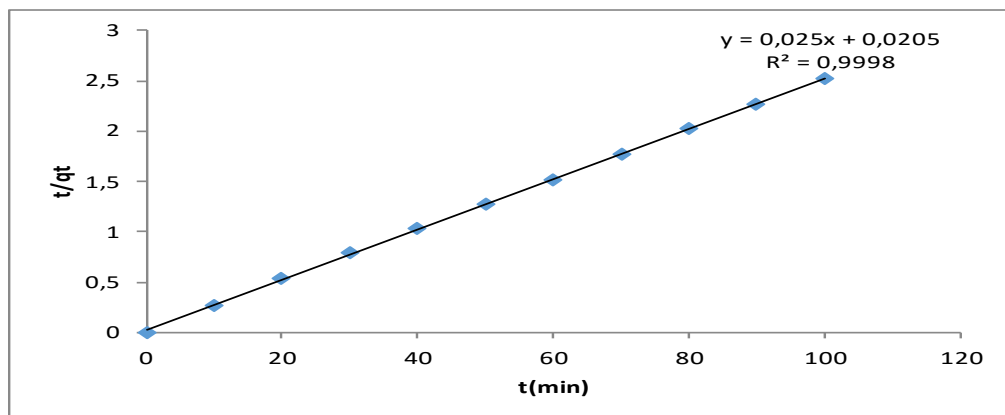


Figure IV.20 : Modélisation de la cinétique d'adsorption du CV par le modèle de pseudo second ordre.

2) Mode opératoire (RC)

Dans un bécher, on met un mélange de : 100ml de solution de Rouge Congo à concentration 40mg/l et 0.1g d'adsorbant on laisse sous agitation.



Figure IV.21 : Expériences d'adsorption de Rouge Congo

Pour comparer entre les différentes conditions, on doit quantifier la quantité ou la capacité d'absorption de ces matériaux. Par le calcul du rendement d'élimination du composé adsorbé RC, défini par $R\% = \frac{c_0 - c_e}{c_0} \times 100$(Eq IV.3)

✚ Résultats et discussion :

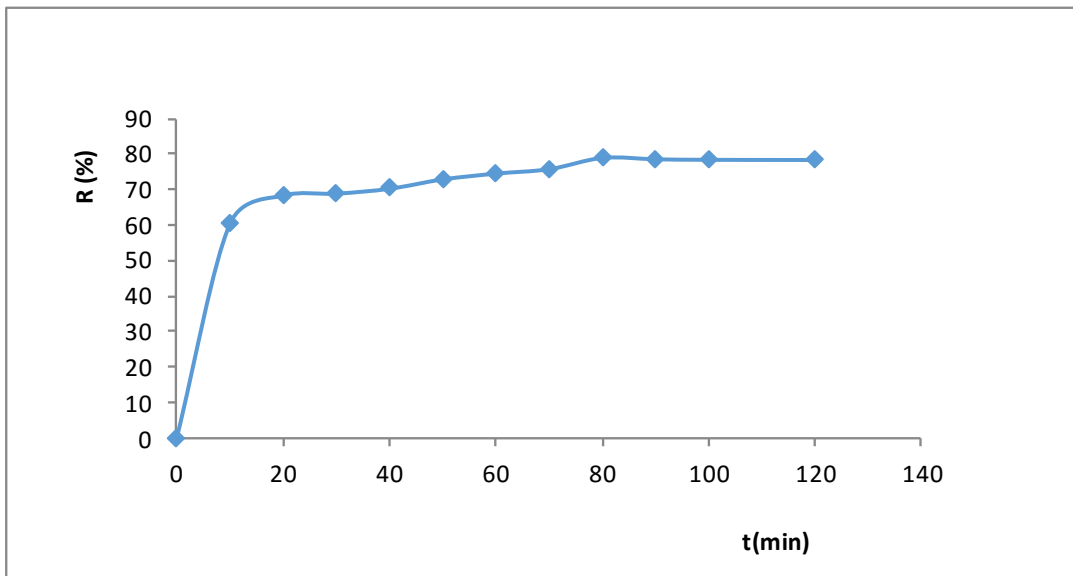


Figure IV.22 : influence de la concentration initiale du RC sur le rendement d'élimination

D'après la figure IV.22 nous remarquons que tout ce qui augmente le temps augmente le rendement jusqu'à ce qu'il soit fixé dans les dernière temps.

IV.7. L'efficacité de quelques paramètres sur l'adsorption

IV.7.1. Temps de contact

L'étude de l'influence du temps de contact est réalisée sous les conditions expérimentales étudiées sur la bentonite (Argile) : le volume : 100ml, vitesse d'agitation : 350tours/min, masse de bentonite présentée graphiquement comme suit :

La masse de bentonite, $m = 0.1\text{g}$ et $C_0 = 40\text{mg/L}$

Les résultats obtenus présentés graphiquement comme suit :

La capacité d'absorption est calculée par l'équation (Eq VI.4):

$$q_t \text{ (mg/g)} = (C_0 - C_e) \times V/m \dots \dots \dots \text{ (Eq IV.4)}$$

q_t : quantité du produit adsorbé par unité de masse d'adsorbant (mg/g),

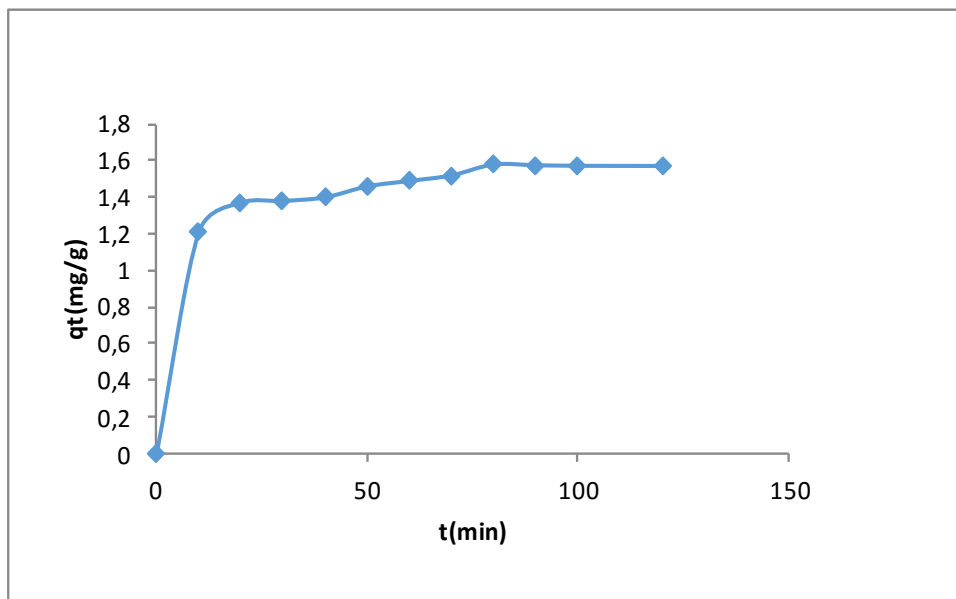


Figure IV.23 : Influence de la capacité d'adsorption en fonction du temps.

D'après la figure IV.23, on remarque une augmentation de la capacité adsorbée du RC en fonction de temps puis l'évolution de processus d'adsorption reste constante ($t = 80\text{min}$)

Les résultats montrent que l'équilibre est atteint à 80min.

IV.7.2. Influence de la masse

L'effet de la masse de bentonite a été étudié en testant différentes valeurs : 1g, 0.05g, 0.8g, 0.6g, 0.2g de la solution de Rouge Congo à 100mg/l

✚ Résultat et discussion

La figure IV.23 montre la variation de rendement d'élimination de RC décoloré en fonction du temps et en présence des différentes masses du bentonite.

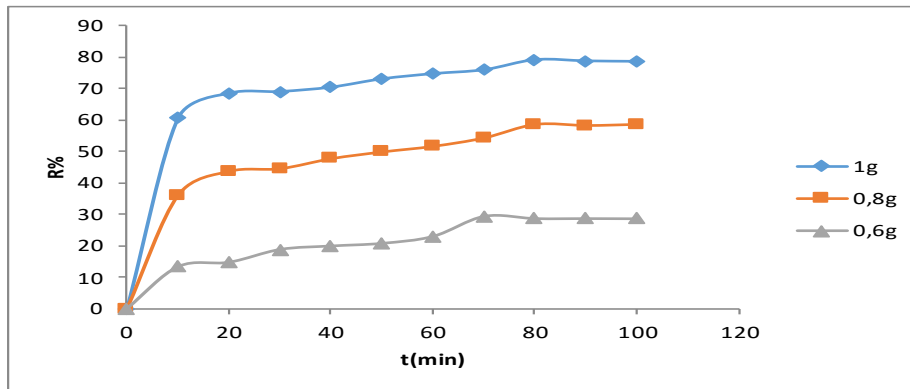


Figure IV.24 : influence de masse de bentonite sur le rendement d'élimination du RC par l'adsorption

D'après la figure IV.24, on remarque que le rendement d'adsorption augmente avec l'augmentation de la masse de bentonite

IV.7.3. Influence de la concentration du RV

La figure IV.24 représente l'effet de la concentration initiale de la bentonite sur l'adsorption, les essais ont été réalisés en mettre 0.1g de l'adsorbant prépare pendant 70 minutes en concentration varie de 5 à 40 mg/l. Les tests ont été réalisées à pH = 5.7 de la solution et a température de 23°C.

✚ Résultats et discussion

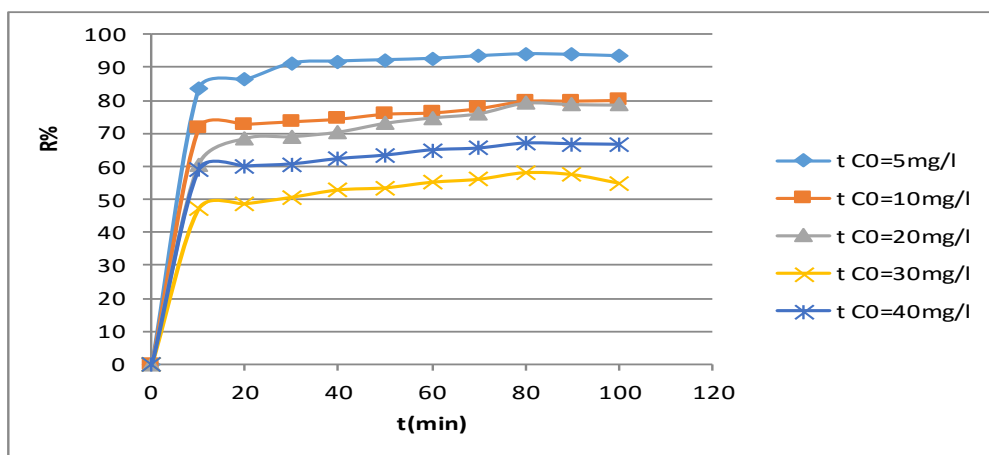


Figure IV.25 : influence de la concentration du RC sur leur rendement d'élimination par l'adsorption

D'après la courbe obtenue, le rendement d'adsorption a une relation inverse avec la concentration, le rendement d'adsorption augmente avec l'augmentation de la concentration initiale.

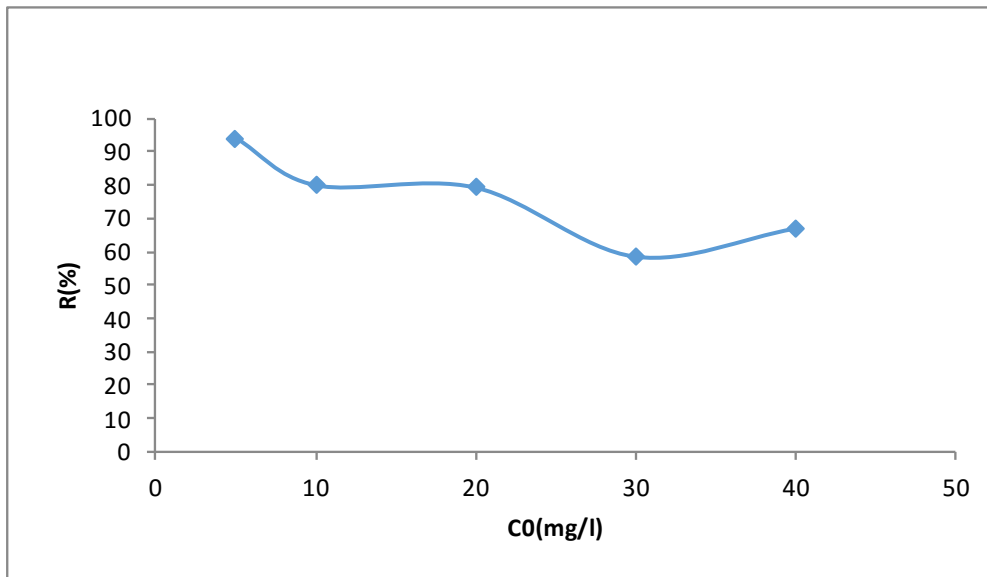


Figure IV.26 : Influence de la concentration du RC sur le rendement d'élimination par l'adsorption

D'après la courbe obtenue le rendement d'adsorption a une relation inverse avec la concentration, le rendement d'adsorption augmente avec l'augmentation de la concentration initiale

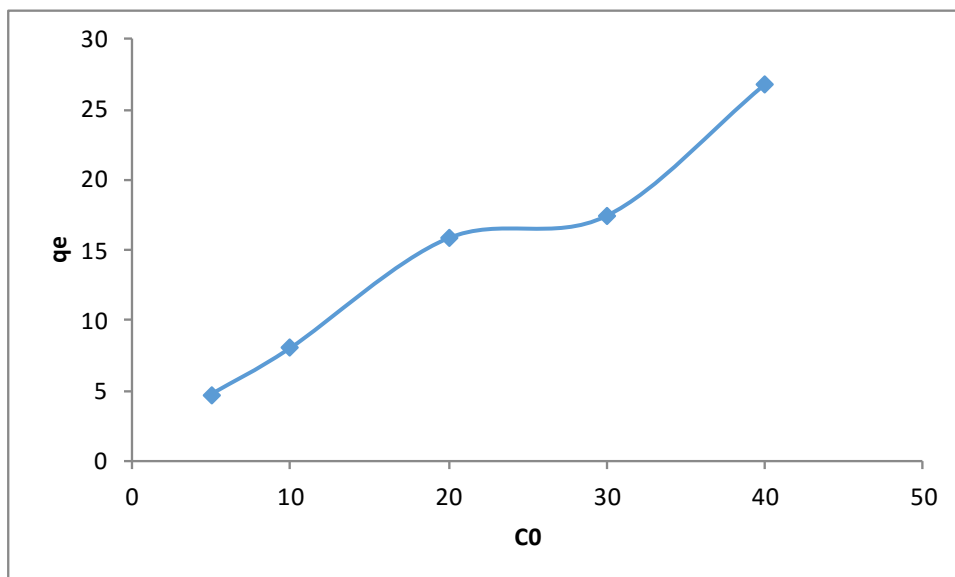


Figure IV.27 : Influence de la concentration initiale du RC sur la capacité d'adsorption

D'après la figure IV.27, on remarque que la quantité adsorbée augmente avec l'augmentation de la concentration initial du RC.

IV.7.4. Influence de la température

L'effet de la température sur la fixation du colorant (Rouge Congo) sur la bentonite a été étudié avec 100 ml de la solution de concentration 20 mg/l et pH = 5.7.

Sur un agitateur magnétique avec plaque chauffante pour garder la température désirée constante à l'aide d'un thermomètre (45°C, 35°C), la solution mis sous l'agitateur.

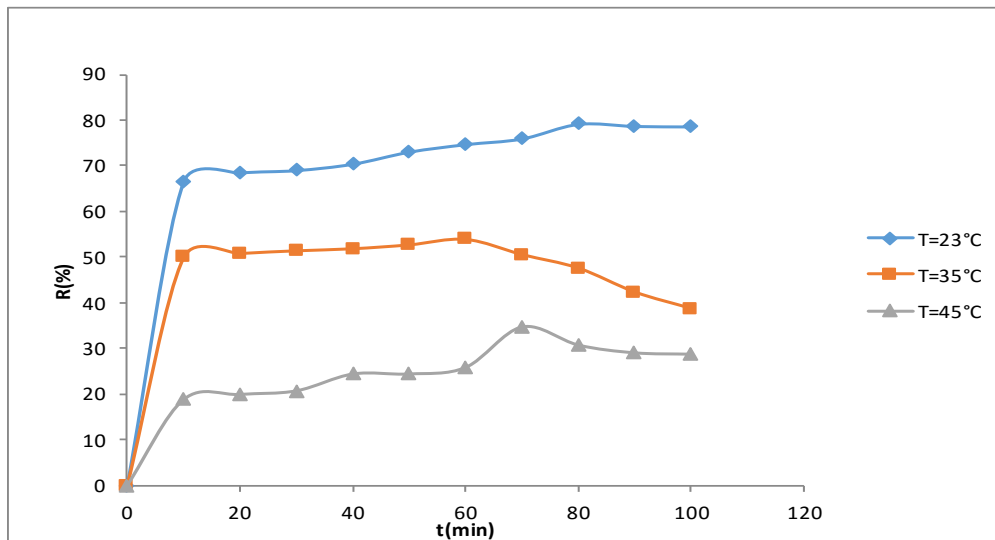


Figure IV.28 : Influence du rendement d'adsorption en fonction du temps

D'après la figure IV.28, on remarque que :

- Dans cette expérience, nous constatons que la température de 23°C a donné de bons résultats

IV.7.5. Modélisation des isothermes d'adsorption

La dernière étape de l'étude des isothermes consiste à modéliser la courbe, ou plus précisément, à rendre compte par une équation mathématique de l'ensemble de la courbe. Les modèles classiques de Langmuir et de Freundlich caractérisant la formation d'une monocouche seront utilisés pour leur simplicité de mise en œuvre.

IV.7.5.1. Modèle de Langmuir

L'équation de Langmuir est de la manière suivante :

$$q_e = \frac{X}{m} = q_m \frac{K_L \times C_e}{1 + K_L C_e}$$

La forme linéaire de Langmuir :

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \times \frac{1}{C_e}$$

- q_e : Quantité adsorbée à l'équilibre, exprimé en (mg/g).
- q_m : Capacité maximale d'adsorption de la monocouche, exprimé en (mg/g).
- K_L : Paramètre de Langmuir
- C_e : Concentration à l'équilibre, exprimé en (mg/L).
- En trace la courbe : $\frac{1}{q_e} = f\left(\frac{1}{C_e}\right)$

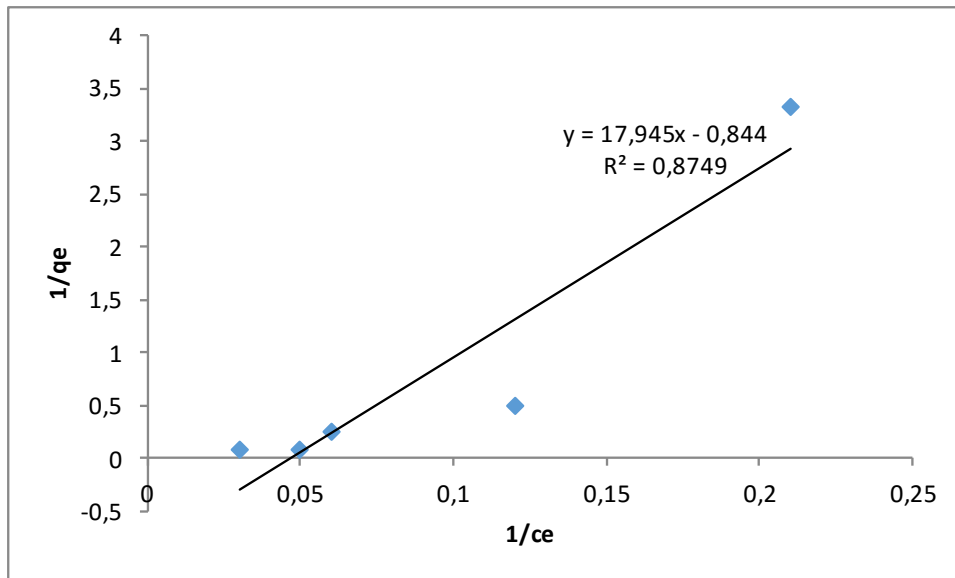


Figure IV.29 : Isotherme de Langmuir de l'adsorption du RC sur bentonite

IV.7.5.2. Modèle de Freundlich

Modèle valable pour des solutions diluées.

L'équation de Freundlich est de la manière suivante :

$$q_e = K_F \times C_e^{1/n}$$

La forme linéaire du modèle est :

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$$

- K_F et $\frac{1}{n}$: sont les constantes de Freundlich
- En trace la droite dont l'équation se forme : $\ln(q_e) = f(\ln(C_e))$.

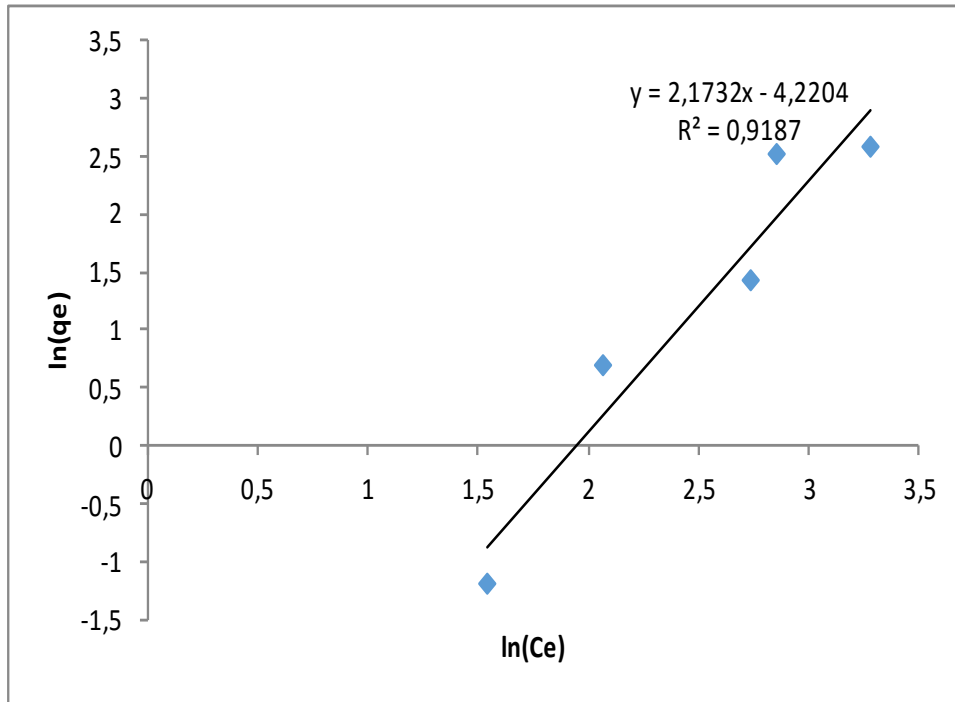


Figure IV.30 : Isotherme de Freundlich de l'adsorption du RC sur bentonite

Les résultats expérimentaux d'isotherme d'adsorption sont en bon accord avec le modèle de Freundlich que le modèle de Langmuir

IV.8. Modélisation des cinétiques d'adsorption

IV.8.1. Modèle de pseudo premier ordre (PPO)

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t)$$

Où :

- K_1 : constante de vitesse de réaction d'adsorption du RC sur la bentonite de premier ordre, en (min^{-1}) ;
- q_e : quantité du RC adsorbée à l'équilibre en (mg/g) ;
- q_t : quantité du RC adsorbée à l'instant t en (mg/g) ;
- t : temps de contact en (min).

Après intégration dans les conditions initiales $q_t = 0$ à $t = 0$, l'équation devient :

$$qt = qe (1 - e^{-K_1 t})$$

La linéarisation de l'équation précédente donne

$$\ln(qe - qt) = \ln qe - K_1 t$$

On trace $\ln(qe - qt) = f(t)$, on obtient une droite qui donne k_1 et q_e . Ce modèle permet de décrire les phénomènes ayant lieu lors des premières minutes du processus d'adsorption.

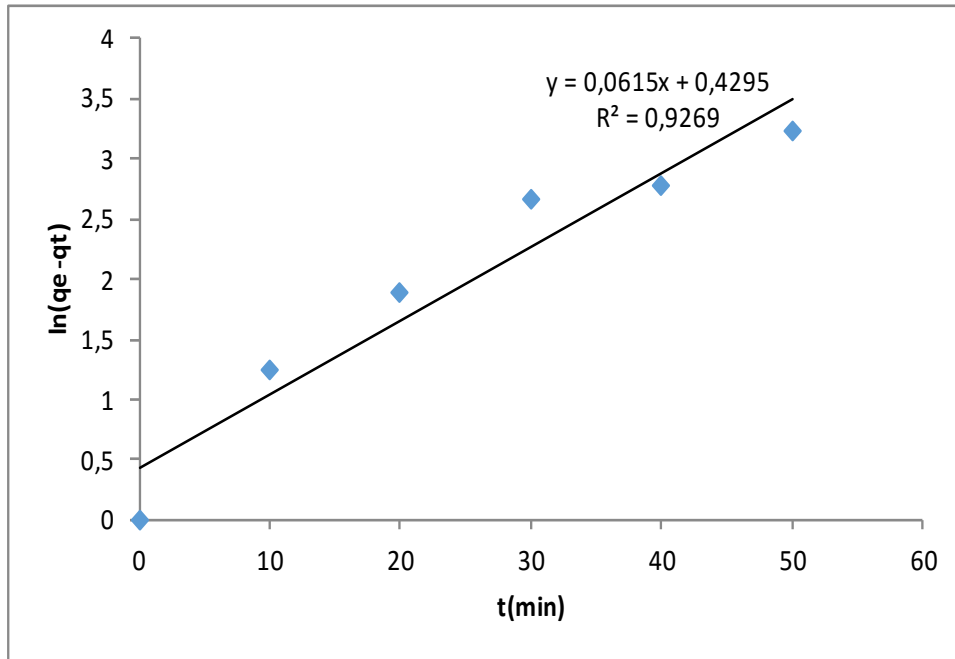


Figure IV.31 : Modélisation de la cinétique d'adsorption du RC par le modèle de pseudo premier ordre

IV.8.2. Modèle de pseudo second ordre (PSO)

Le modèle pseudo-second-ordre (PSO) est donné par l'expression suivante :

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

Où :

- K_2 : constante de vitesse de réaction d'adsorption du RC sur la bentonite, de second ordre, en (g/mg/min).
- q_e : quantité adsorbée à l'équilibre en (mg/g) ;
- q_t : quantité adsorbée au temps t en (mg/g) ;
- t : temps de contact en (min).

Après intégration de l'équation précédente on obtient :

$$qt = \frac{K_2 qe^2 t}{K_2 qe t + 1}$$

La linéarisation de l'équation précédente donne :

- $h = K_2 qe^2$: est la vitesse initiale d'adsorption en (mg /g min).

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{K_2 qe^2} + \frac{t}{qe}$$

On trace $t/qt = f(t)$, on obtient une droite qui donne k_2 et qe . Contrairement au modèle du premier ordre, le modèle de pseudo second ordre est applicable à un intervalle de temps plus large (généralement l'ensemble du processus d'adsorption).

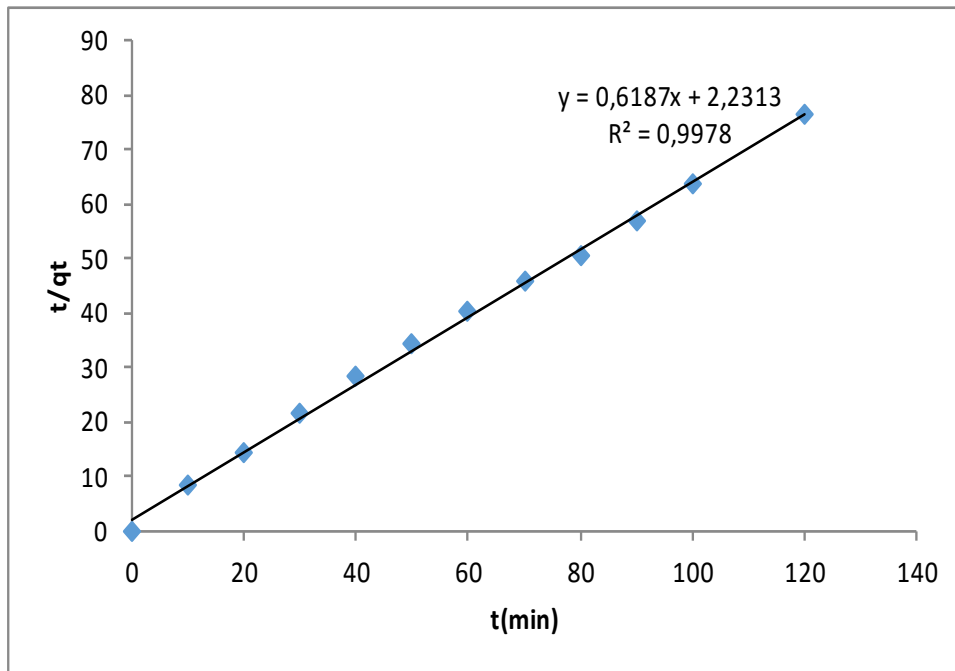


Figure IV.32 : Modélisation de la cinétique d'adsorption du RC par le modèle de pseudo second ordre.

Tableau 04 : résultats des modèles cinétiques de l'adsorption du CV et RC sur différents adsorbants

Modèle	Paramètre	CV	RC
Pseudo-première ordre PPO	K1	0.0185	0.0015
	qe théo	3.095	1.53
	qe exp	39.6	1.58
	R ²	0.9978	0.9263
Pseudo-second ordre (PSO)	K2	0.025	0.6187
	qe théo	48.78	0.44
	qe exp	39.6	1.58
	R ²	0.9998	0.9978

- L'étude de la cinétique d'adsorption a montré que le modèle des pseudo second-ordre est celui qui décrit mieux le processus d'adsorption de Cristal Violet parce que les résultats sont similaires
- L'étude de la cinétique d'adsorption a montré que le modèle des première-ordre est celui qui décrit mieux le processus d'adsorption de Rouge Congo parce que les résultats sont similaires

Conclusion

Conclusion

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif la valorisation des propriétés adsorptives d'un matériau argileux bentonite, dans le domaine de l'élimination des colorants (Cristal Violet et Rouge Congo), substances susceptibles d'être présente dans l'environnement et qui est fortement impliquée dans les systèmes pollués.

L'étude des phénomènes physico-chimiques qui régissent les interactions entre bentonite vis -à-vis de Cristal Violet et Rouge Congo révèle que :

- ✓ Bentonite a une capacité de rétention du CV élevé en fonction de temps puis l'évolution de processus d'adsorption reste constante ($t = 60\text{min}$), pour la capacité adsorbée du RC ($t = 80\text{min}$) et le rendement d'adsorption augmente avec l'augmentation de la masse de bentonite pour les deux colorant ;
- ✓ La variation de la concentration initiale à un effet significatif sur l'adsorption de CV et RC ;
- ✓ Le pouvoir de rétention sur le matériau Bentonite est bonne à 35°C de RC et à 23°C de CV ;
- ✓ L'isotherme d'adsorption de ces substances sur Bentonite augmente avec sa concentration initiale et le modèle de Freundlich convient parfaitement pour décrire le processus d'adsorption ;
- ✓ La cinétique d'adsorption sur le matériau Bentonite est rapide et suit une expression de vitesse de second ordre de CV, et modèle de premier ordre pour RC.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Belsher, T. (1979). Essai de définition d'un indice de pollution. Rapp. Commun. Int. Expl. Sci. Médit, 25(26), 4.
- [2] Chippaux, J. P., Houssier, S., Gross, P., Bouvier, C., & Brissaud, F. (2002). Etude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. Bull Soc Pathol Exot, 94(2), 119-123.
- [3] Garcier, R. (2005). La pollution industrielle de la Moselle française. Naissance, développement et gestion d'un problème environnemental, 1850-2000 (Doctoral dissertation, Université Lumière-Lyon II).
- [4] Soulard, C. T. (2005). Les agriculteurs et la pollution des eaux. Proposition d'une géographie des pratiques. Natures Sciences Sociétés, 13(2), 154-164.
- [5] Elichegaray, C., Bouallala, S., Maitre, A., & Ba, M. (2009). État et évolution de la pollution atmosphérique. Revue des maladies respiratoires, 26(2), 191-206.
- [6] Derradji, F., Bousnoubra, H., Kherici, N., Romeo, M., & Caruba, R. (2007). Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien. Science et changements planétaires/Sécheresse, 18(1), 23-27.
- [7] Ringot, G. (2018). Conséquences de la pollution environnementale sur l'évolution des traits d'histoire de vie: l'exemple de la Daphnie (Doctoral dissertation, Sorbonne université).
- [8] Bodoy, A. (1976, January). Etude de l'influence de la température, liée à la pollution thermique, sur la survie et la biologie de quelques mollusques des substrats meubles. In Journées de la thermoécologie.
- [9] Leclercq, L., & Vandevenne, L. (1987). Impact d'un rejet d'eau chargée en sel et d'une pollution organique sur les peuplements de diatomées de la Gander (Grand-Duché de Luxembourg). Cahiers de biologie marine, 28(2), 311-318.
- [10] Vincent, M., & Chemarin, C. (2011). Impact sanitaire de la pollution particulaire minérale à l'intérieur des locaux. Revue des maladies respiratoires, 28(4), 496-502.
- [11] Adjiri, O. A., Goné, D. L., Kouamé, I. K., Kamagaté, B., & Biemi, J. (2008). Caractérisation de la pollution chimique et microbiologique de l'environnement de la décharge d'Akouédo, Abidjan-Côte d'Ivoire. J. Biol. Chem. Sci, 2(4), 401-410.

Références bibliographiques

- [12] ZINSOU, H. L., ATTINGLI, A. H., GNOHOSSOU, P., ADANDEDJAN, D., & LALEYE, P. (2016). Caractéristiques physico-chimiques et pollution de l'eau du delta de l'Oueme au Benin. *Journal of applied Biosciences*, 97, 9163-9173.
- [13] Fleuriet, A., Uhel, C., & Dédaldéchamp, F. (1996). Les composés phénoliques et la qualité des produits d'origine végétale consommés par l'homme. *Acta botanica gallica*, 143(6), 493-500. Ben Mansour, H., & Latrach Tlemcani, L. (2009). Les colorants naturels sont-ils de bons additifs alimentaires?. *Phytothérapie*, 7(4), 202-210.
- [14] Mameri, N., & Chergui Née Bouafia, S. (2012). Traitement d'effluent issu de l'industrie du textile par photocatalyse homogène (Doctoral dissertation).
- [15] Benguella, B., & Yacouta-Nour, A. (2009). Elimination des colorants acides en solution aqueuse par la bentonite et le kaolin. *Comptes Rendus Chimie*, 12(6-7), 762-771.
- [16] Benamraoui, F. (2018). Elimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture (Doctoral dissertation).
- [17] Deghfel, N., Benyahia, A., Guerfi, K., Errachid, A., & Belmokre, K. (2017). Étude comparative de l'adsorption d'un colorant de cuve sur différents adsorbants à base d'un matériau inorganique la Bentonite et l'argile de la région de M'sila. *Matériaux & Techniques*, 105(4), 405.
- [18] Kondo, T., Meguro, K., & Nito, H. (1959). Interaction entre les colorants et les surfactifs. II. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 32(8), 857-861.
- [19] Cognard, J., & Phan, T. H. (1981). Colorants Anthraquinoniques Stables de Parametre D'Ordre Eleve en Solution Dans les Cristaux Liquides. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 70(1), 1-19.
- [20] Hammami, S. (2008). Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels (Doctoral dissertation, Université de Marne la Vallée).
- [21] BOUAZIZ, T. (2019). Adsorption de colorant anionique «méthylorange» sur un biosorbant (coquille d'amande) (Doctoral dissertation, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila).
- [22] Harrlekas, F. (2008). Couplage des procédés membranaires aux techniques physico-chimiques ou biologiques pour le traitement des rejets liquides de l'industrie de textile. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine.

Références bibliographiques

- [23]Tebessi, S., & Hafsi, S. (2011). Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption d'un colorant organique sur le charbon actif.
- [24] ALBRECHT, R., & MANCHON, P. (1973, January). Metabolisme et toxicité des colorants azoïques. In *Annales de la nutrition et de l'alimentation* (pp. 1-9). CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE.
- [25] Samet, S., Sid Ahmed, N., & Chayeb, Y. (2019). Elimination d'un colorant cationique (le rouge GRL 180) dans une solution aqueuse par adsorption sur lichen modifier: *pseudevriinafuracea* (L).
- [26]Boudjerda, N., Boughidah, A., Moussaoui, I., & Boulassel, A. E. (2020). Evaluation des risques toxiques des colorants alimentaires: étude bibliographique (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [27]Chenichene Amel Halaci Hanane, Z. S. (2014). Évaluation, in vitro, de la toxicité de deux colorants alimentaires par le biais du stress oxydant.
- [28] Merouani, D. R. (2011). Traitement de colorants azoïque et anthraquinonique par procédés d'oxydation avancée (POA) (Doctoral dissertation, Lille 1).
- [29] KIGMOU, N., BEN BEY, A., & KALLOUM, S. (2020). TRAITEMENT D'UN COLORANT PAR FILTRATION SUR SABLE (Doctoral dissertation, universite Ahmed Draia-ADRAR).
- [30] Bouyakoub, A. Z., Kacha, S., Ouhib, R., Bellebia, S., & Lartiges, B. (2010). Traitement combiné d'un effluent textile contenant des colorants réactifs par coagulation-floculation et électroflottation. *Revue des sciences de l'eau*, 23(1), 89-103.
- [31] Bentahar, Y. (2016). Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines: application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse (Doctoral dissertation, COMUE Université Côte d'Azur (2015-2019); Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc)).
- [32] Insaf, O. B. (2012). Etude de l'élimination des colorants en solution sur charbon actif issu du broyage cryogénique des pneus usagés (Doctoral dissertation, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediène (USTHB)).

Références bibliographiques

- [33] Salomon, H., Vignaud, C., d'Errico, F., Coquinot, Y., Beck, L., Stringer, C., & Strivay, D. (2011). Sélection et traitement thermique de matériaux colorants rouges sur le site moustérien es-Skhul (ca. 100 000 BP, Israël). In Colloque Archéométrie 2011, Liège, 11-15 avril 2011.
- [34] Chebli, D. (2018). Traitement des eaux usées industrielles: Dégradation des colorants azoïques par un procédé intégré couplant un procédé d'oxydation avancée et un traitement biologique (Doctoral dissertation).
- [35] Slasli, M. A. (2002). Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux: Approches théorique et expérimentale (Doctoral dissertation, Université de Neuchâtel).
- [36] Berkane, O., & Berchen, S. (2015). Etude Expérimentale De La Décontamination Des Eaux polluées Par Un Polluant Organique Utilisant Un Adsorbant Naturel.
- [37] Bouras, O. (2003). Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles: synthèse et caractérisation (Doctoral dissertation, Limoges).
- [38] Guergazi, S., Amimeur, D., & Achour, S. (2013). Elimination des substances humiques de deux eaux de surface algériennes par adsorption sur charbon actif et sur bentonite. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (13).
- [39] Benkhadra, N., & Benhedjaz, A. (2019). Etude comparative du pouvoir adsorbant des deux argiles: Le DD3 et La Bentonite.
- [40] Durif, S., Maillard, R., & Nattier, P. (1957). Essais de mesure absolue de surfaces spécifiques par la diffusion des rayons X aux petits angles. Journal de Chimie Physique, 54, 633-636.
- [41] Aigrain, P., & Dugas, C. (1952). Adsorption sur les Semi-Conducteurs. Zeitschrift für Elektrochemie, Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, 56(4), 363-366.
- [42] Létouart, C., Rouquerol, F., & Rouquerol, J. (1973). Les chaleurs d'adsorption: expression des chaleurs d'adsorption physique, en termes d'énergie interne, à partir des données expérimentales. Journal de Chimie Physique, 70, 559-573.
- [43] Guillon, D. (2008). Étude des mécanismes d'absorption d'énergie lors de l'écrasement progressif de structures composites à base de fibre de carbone (Doctoral dissertation).

Références bibliographiques

- [44] Aksas, H. (2013). Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des métaux lourds par l'utilisation des adsorbants naturels (Doctoral dissertation, Université de Boumerdès-M'hamed Bougara).
- [45] Maiza, H. (2009). Modélisation des cinétiques d'adsorption dans le cas du phénol et du bleu de méthyle sur le charbon actif en grain (Doctoral dissertation).
- [46] Létouart, C., Rouquerol, F., & Rouquerol, J. (1973). Les chaleurs d'adsorption: expression des chaleurs d'adsorption physique, en termes d'énergie interne, à partir des données expérimentales. *Journal de Chimie Physique*, 70, 559-573.
- [47] AGHFIR, M., KOUHILA, M., JAMALI, A., IDLIMAM, A., LAMHARRAR, A., & RHAZI, M. (2005). Isothermes d'adsorption-desorption des feuilles de romarin (*Rosmarinus officinalis*). 12èmes Journées Internationales de Thermique. Maroc, 215-218.
- [48] Hamidi Chahrazed, N. I. (2019). Préparation et caractérisation des argiles montmorillonites intercalées par un polymère inorganique à base d'aluminium.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de l'adsorption du colorant Cristal Violet et Rouge Congo sur un matériau adsorbant (argileux Bentonite).

Les influences de la concentration initiale, masses et la température de la solution ont été étudiées afin d'optimiser la capacité de rétention pour les deux colorants.

Les résultats obtenus sont soumis à la modélisation l'isotherme c'était le modèle de Freundlich. L'interaction de ces matériaux avec CV montre que la cinétique d'adsorption est plus au moins rapide et suit une expression de vitesse d'adsorption du second ordre et pour RC c'est la modalisation première order.

Mots clés :

Adsorption, Cristal Violet, Rouge Congo, adsorbant, Bentonite, capacité de rétention.

Abstract:

This work concerns the study of the adsorption of Violet Cristal et Congo Red sur dye on an adsorbent (clay Bentonite).

The influences of the initial concentration, mass, and the temperature of the solution of the solution were studied in order to optimize adsorption. The optimal value of the best experimental adsorption for the isotherm it was the Freundlich model.

The interaction of these materials with VC are subjected to kinetic modeling the pseudo-second order model was the best for kinetic modeling and for CR kinetic modeling the pseudo-premier order.

Keywords:

Adsorption, Violet Cristal, Congo Red, adsorbent, Bentonite, adsorption capacity.

الملخص

يتعلق هذا العمل بدراسة امتزاز الاصباغ كريسيتال البنفسجي واحمر كونغو على مادة ماصة (طين بانتونيت). دراسة تأثير التراكيز الابتدائية، الكتل ودرجة الحرارة على المحاليل المدروسة أظهرت ان لهذا الطين قدرة كبيرة على إزالة هذه الاصباغ. النتائج التي تم الحصول عليها كان نموذج الايزوتارم لنموذج فراندليش هو المماثل لنتائج الدراسة

دراسة إزالة هذه الاصباغ باستعمال معدن الطين التي تخضع للنمذجة الحركية، وكان نموذج الحركة من الدرجة الثانية هو الأفضل للنمذجة الحركية بالنسبة لصبغة الكريسيتال البنفسجي ومن الدرجة الأولى بالنسبة لصبغة أحمر كونغو.

الكلمات المفتاحية:

الامتزاز، الكريسيتال البنفسجي، احمر كونغو، الممتص، بانتونيت، قرة التثبيت.