



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

People's Democratic republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

مستغانم – جامعة عبد الحميد بن باديس

Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم هندسة الطرائق

Department of Process Engineering



N°d'ordre: M2/GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie Matériaux

Thème

**Etude de la capacité d'adsorption d'un nouveau bio adsorbant
pour la récupération du colorant acide vert 25 (AG25)**

Présenté par: **BATATA Adjel**

Soutenu le 14 / 07 /2022 devant le jury composé de :

Président	GHELAMALLAH Madani	Professeur	Université de Mostaganem
Examinatrice	BELHAOUARI Houria	Maître de conférences B	Université de Mostaganem
Rapporteur	MAROUF Réda	Professeur	Université de Mostaganem

Résumé :

Dans cette étude nous avons utilisé le Lichen de Ain-naaja comme adsorbant pour la récupération d'un colorant nommé le acide vert 25 (AG25) en phase aqueuse.

L'objectif de cette étude est caractérisé le Biosorbant et son application dans l'élimination par adsorption de colorant cationique et anionique connu pour leur toxicité qui est le acide vert 25 (AG25) contenus dans l'eau Les essais exercées dans cette expérience ont montré que le Biosorbant peut éliminer le colorant. Alors on peut dire que le Biosorbant est efficace pour éliminer les colorants avec une microporosité et méso porosité importante. L'adsorbant utilisé dans cette étude c'est le Biosorbant. L'effet de plusieurs paramètres tel que le temps de contact, la concentration initiale de colorant utilisé, et le pH de la solution a été étudié. Pour décrire l'équilibre d'adsorption, les données expérimentales ont été analysées par l'isotherme de Langmuir, de et de Freundlich. L'équilibre est parfaitement décrit par le modèle de Langmuir dont le coefficient de corrélation est supérieur.

Mots clés : Adsorption, Lichen, acide vert 25 (AG25), Colorant.

Summary:

In this study we used the Lichen of Ain-naaja as an adsorbent for the recovery of a dye called acid green 25 (AG25) in the aqueous phase.

The objective of this study is to characterize the Biosorbent and its application in the elimination by adsorption of cationic and anionic dye known for their toxicity which is the green acid 25 (AG25) contained in the water. The tests carried out in this experiment have shown that the Biosorbent can remove the dye. So we can say that the Biosorbent is effective in removing dyes with significant microporosity and mesoporosity. The adsorbent used in this study is Biosorbent. The effect of several parameters such as the contact time, the initial concentration of dye used, and the pH of the solution was studied. To describe the adsorption equilibrium, the experimental data were analyzed by the Langmuir, de and Freundlich isotherm. The equilibrium is perfectly described by the Langmuir model whose correlation coefficient is higher.

Keywords: Adsorption, Lichen, acid green 25 (AG25), Dye.

ملخص :

في هذه الدراسة استخدمنا حزاز عين النجا كمتماز لاستخلاص الصبغة الخضراء الحمضية 25 (AG25) في الطور المائي.

الهدف من هذه الدراسة هو توصيف مادة الامتصاص الحيوي وتطبيقاتها في التخلص من خلال امتصاص الصبغة الكاثيونية والانيونية المعروفة بسميتها وهي الحامض الأخضر 25 (AG25) الموجود في الماء ، وقد أظهرت الاختبارات التي أجريت في هذه التجربة أن مادة الامتصاص الحيوي يمكنها إزالة الصبغة. لذلك يمكننا القول أن مادة الامتصاص الحيوي فعالة في إزالة الأصباغ ذات المسامية الدقيقة وسوء الثبات. المادة الماصة المستخدمة في هذه الدراسة هي مادة ماصة بيولوجية. تمت دراسة تأثير العديد من العوامل مثل وقت التلامس ، والتركيز الأولي للصبغة المستخدمة ، ودرجة الحموضة في المحلول. لوصف توازن الامتزاز ، تم تحليل البيانات التجريبية بواسطة متساوي الحرارة Langmuir و de Freundlich. تم وصف التوازن تمامًا بواسطة نموذج Langmuir الذي يكون معامل الارتباط فيه أعلى.

الكلمات المفتاحية: امتزاز ، حزاز ، حمض أخضر 25 (AG25) ، صبغ.

REMERCIEMENTS

Avant tout je tiens à remercier ‘’Allah‘’, le tout puissant qui ma a incité à acquérir le savoir et qui m’a aidé à réaliser ce mémoire.

Je tiens vivement à remercier mon encadreur Monsieur le Professeur MAROUF Réda pour sa disponibilité, son soutien, ses nombreux conseils, ainsi que pour le temps qu’il m’a consacré et guidé durant mon mémoire de fin d’étude.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui m’ont fait l’honneur d’accepter de juger mon travail, à leur tête le Président du jury Professeur GHELAMALLAH Madani et l’Examinatrice Madame Dr. BELLAOUARI Houria de l’université de Mostaganem.

Une mention spéciale à tous mes amis de ma promotion et membres du laboratoire, je leur dis merci pour tous ces très bons moments passés ensemble. Mes remerciements vont également aux enseignants du département de Génie des Procédés de la faculté des Sciences et de la Technologie de l’université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem.

Dédicace

Je dédie ce travail

Ames chères parents **Brahim** et **Zahra** qui m'ont
toujours soutenu et encouragé tout aux long dèmes
études.

A Mon frères Mohamed et mes sœurs Amel et Hafsa, et
mes meilleurs amies Bilal, Mourad, Mohamed, Brahim,
Fatah, idir, Yazid et Abir.

AFatima, Noor, Fatima et Imene qui a grandement
contribué à ce travail.

Et enfin à tous mes camarades.

Sommaire :	page
INTRODUCTION	01
PARTIE I BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1 LICHENS	02
I.1.1 La morphologie des lichens	02
a. Thalles crustacés	02
b. Thalles foliacés	02
c. Thalles fruticuleux	02
I.1.2 Les organes de la multiplication végétative et de la reproduction	03
I.1.3 L'intérêt des lichens	03
Usage en bio-indication	03
Usages médicaux	03
Usages industriels	03
Usages alimentaires	04
I.2 LA POLLUTION	04
I.2.1 Définition	04
I.2.2 Les origines de la pollution d'eau	04
La pollution industrielle	04
La pollution agricole	04
La pollution domestique	04
La pollution accidentelle	05
a. Pollution par colorants	05
I.3 Généralités sur les colorants	05
I.3.1 Définition	06
I.3.2. Classification	06
I.3.2.1 Classification chimique	06
I.3.2.2 Classification tinctoriale	06
I.3.3 Toxicité des colorants	07
I.4 METHODES DE DE POLLUTION	07
I.5 L'ADSORPTION	08
I.5.1 Type d'adsorption	08
I.5.1.1 L'adsorption physique ou physisorption	08
I.5.1.2 L'adsorption chimique ou chimisorption	09
I.5.2 Cinétique d'adsorption	10
I.5.3 Les modèles d'adsorption	12
a. Modèle de Langmuir	13
b. Modèle de Freundlich	14
PARTIE II EXPERIMENTALE	
II.1 INTRODUCTION	15
II.2 L'ADSORBANT	15
II.3 L'ADSORBAT	15
II.4 COURBE D'ETALONNAGE	16
II.5 L'EXPERIENCE D'ADSORPTION	17
II.5.1 L'effet de pH	18
Mode opératoire	18
II.5.2 Cinétique d'adsorption	19
II.5.2.1 Ordre de réaction	20
Modèle du pseudo premier ordre	20
Modèle du pseudo second ordre	20
II.5.3 Les isothermes d'adsorption	21
Mode opératoire	21
II.5.4 Modélisation de l'isotherme d'adsorption	22
Modèle de Langmuir	22
Modèle de Freundlich.	
II.5.5 Discussion	
CONCLUSION GENERALE	
Référence bibliographique	

Liste des Figures

Partie I : Bibliographie

Figure I.1.a : le lichen dans la nature

Figure I.2.b : Coupe verticale à travers le corps d'un lichen (illustration de V. Ahmadjian et J.B. Jacobs, in Anonyme, 1998)

Figure I.1.1 : Les trois grands types de Thalles

Figure I.5: schéma du phénomène d'adsorption

Figure I.5.3: Les différents types d'isothermes selon IUPAC [8].

Partie II : Expérimentale

Figure II.3 : Structure chimique de l'AG 25

Figure II.4.1 : Photographie Spectrophotomètre UV-visible (OPTIZEN 2120 UV)

Figure II.4.2 : Courbed'étalonnagedul'AG25.

Figure II.5.1:L'effet de pH sur l'adsorption du l'AG25 par Lichen.

Figure II.5.2:La cinétique d'adsorption de l'AG25 par Lichen ($C_0 = 30 \text{ mg/l}$; $\text{pH}=2$; $T=24^\circ\text{C}$).

Figure II.5.2.1 : Courbe de linéarisation du modèle second ordre

Figure II.5.3: Isotherme d'adsorption de l'AG25 par le lichen.

Figure II.5.4.1:La linéarisation du modèle de Langmuir d'isotherme d'adsorption AG25 par lichen.

Figure II.5.4.2: La linéarisation d'isotherme d'adsorption del'AG25 par lichen selon le modèle de Freundlich.

Liste des Tableaux

Partie I : Bibliographie

Tableau I.5.1.2: Quelques critères de distinction entre l'adsorption physique et chimique.

Partie II : Expérimentale

Tableau II.3 : Les propriétés physico-chimiques de l'AG25.

Tableau II.5.2.1: Les constantes de linéarisation de la cinétique d'adsorption.

Tableau II.5.4: les constantes de linéarisation d'isotherme d'adsorption selon le modèle de freundlich.

INTRODUCTION

Un adulte peut en théorie se passer de nourriture pendant quelques jours. Il est en revanche impossible de survivre plus de 2 à 3 jours sans apport d'eau. L'eau est vitale pour diverses fonctions du corps : circulation sanguine, respiration, nutrition des cellules, élimination des déchets de notre corps, etc. Il est aussi vitale pour tout être vivant entre autres les animaux et les plantes. Cependant il est impératif de préserver cette source en la protégeant de toute sorte de pollution.

Les origines de la pollution de l'eau sont nombreuses, elles sont généralement issues des rejets industriels telles que le domaine du textile, du papier, de l'alimentation et de la métallurgie. Les conséquences de la pollution des milieux aquatiques sont multiples. Elles conduisent à des mortalités massives d'espèces, mais elles ont aussi des effets moins visibles : une eutrophisation des milieux, des effets toxiques à plus ou moins long terme, des maladies ou des perturbations endocriniennes.

Afin de préserver cette richesse naturelle, plusieurs méthodes de traitement des eaux usées sont appliquées, des méthodes physiques et chimiques, ils ont prouvé leurs efficacités mais malheureusement beaucoup d'entre elles sont coûteuses. A cet effet les scientifiques ont eu tendance à chercher des méthodes à bas prix de revient et économiques. Parmi ces méthodes l'adsorption est la plus prometteuse car c'est un moyen pas cher et facile à mettre en œuvre. Si l'adsorption est une simple et efficace méthode, elle nécessite un bon choix de l'adsorbant. C'est pourquoi dans cette étude on a travaillé avec un bio adsorbant naturel (eco-friendly) qui se nomme le Lichen et se définit comme étant un mélange de champignon et d'algue. Le lichen se trouve dans les forêts déposé sur les branches des arbres.

Notre mémoire est subdivisée en deux grandes parties. La première est une étude bibliographique sur les lichens, la pollution, les colorants et l'adsorption. La seconde partie discute plusieurs étapes : premièrement l'origine et la préparation de ce bio-adsorbant, ensuite les propriétés du colorant utilisé acide vert 25 et l'obtention de la courbe d'étalonnage. La troisième étape consiste à décrire les différentes expériences réalisées concernant l'adsorption de l'AG 25. Dans cette sous-partie du travail nous présentons la cinétique de l'adsorption, l'effet de pH et l'effet de la concentration de l'adsorbat (isotherme d'adsorption) pour évaluer les capacités maximales de fixation du colorant sur le lichen. Par la suite nous appliquons les deux modèles à savoir le modèle de Freundlich et le modèle de Langmuir sur les résultats de l'adsorption.

Partie I

Bibliographie

I.1 LICHENS

Les lichens sont des organismes symbiotiques constitués d'un conjugué d'algues vertes microscopiques, ou cyanobactéries, et de champignons filamenteux. La relation entre eux est en symbiose, où les algues effectuent le processus de photosynthèse et les champignons absorbent l'eau et les sels, réalisant ainsi un équilibre dans l'acquisition de nourriture entre les deux parties.



Figure I.1.a : le lichen dans la nature

Le champignon est responsable de la morphologie des lichens, c'est-à-dire de la forme du corps du lichen. Le corps d'un lichen est appelé thalle. Le thalle est formé par un réseau de filaments nommés hyphes (ils sont comparables au mycélium des champignons). C'est au milieu d'un enchevêtrement de ces filaments que se trouvent les algues. Au niveau de la partie inférieure du thalle, on observe un nouvel entrelacement de filaments servant à fixer le lichen à un support, ce sont les rhizines.

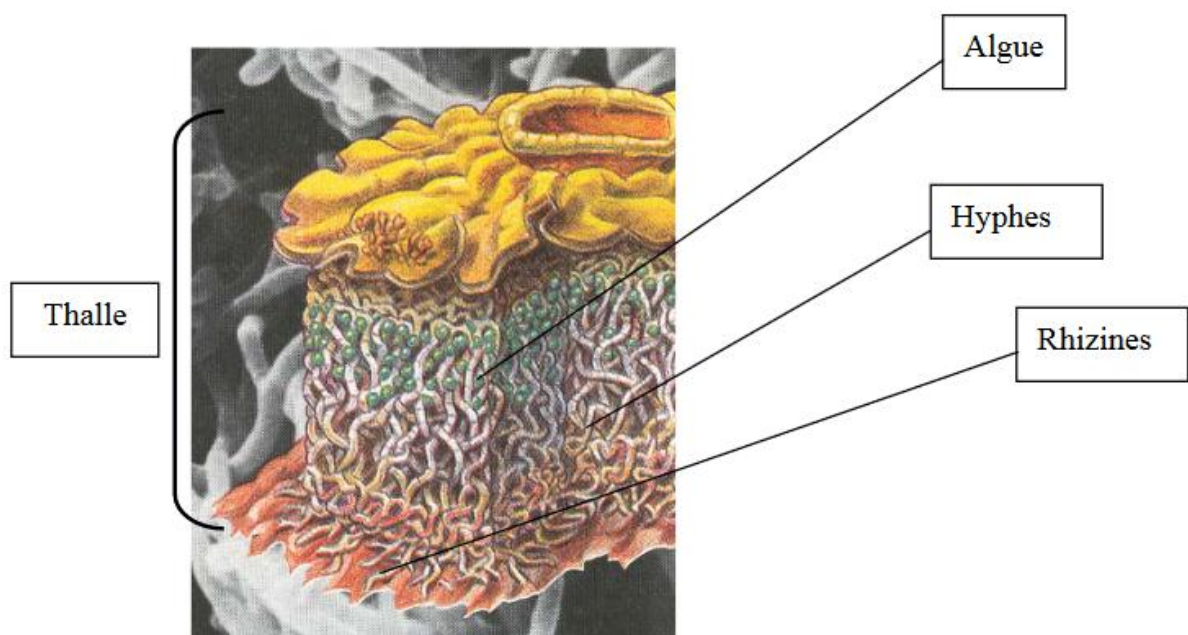


Figure I.2.b : Coupe verticale à travers le corps d'un lichen (illustration de V. Ahmadijian et J.B. Jacobs, in Anonyme, 1998)

I.1.1 La morphologie des lichens

Le thalle est l'appareil végétatif du lichen qui assure sa nutrition, sa survie et sa croissance. Il va présenter une morphologie spécifique, différente de celle des algues et des champignons libres. Selon leur morphologie, on peut distinguer plusieurs grands types de thalles, les 3 principaux étant: les thalles crustacés, foliacés et fruticuleux (figure I.3). La distinction de ces principales morphologies permet, par l'observation à l'œil nu ou à la loupe, de suivre les premiers critères des clés de détermination.

- a. **Thalles crustacés** forment des thalles ressemblant à des croûtes, ils adhèrent au support sur toute leur surface; ils ne peuvent en être détachés.
- b. **Thalles foliacés** forment des thalles en forme de lames ou de feuilles, ils sont faiblement appliqués au substrat et sont facilement détachables par endroits.
- c. **Thalles fruticuleux** présentent des formes barbuées ou en lanières et sont fixés en un seul point ou support.

a. Thalle crustacé



A. Bauwens

b. Thalle foliacé



A. Bauwens

c. Thalle fruticuleux



A. Bauwens

Figure I.1.1 : Les trois grands types de Thalles

I.1.2 Les organes de la multiplication végétative et de la reproduction

- Les lichens sont des organismes reviviscents. Ils sont capables de subsister longtemps à l'état sec, c'est-à-dire qu'ils sont capables de passer de l'état de vie active à une vie ralentie quand ils ne sont plus hydratés. Ils deviennent cassants. Piétinés, les débris du lichen se fixent à la plume, au poil ou à la semelle. Les fragments dispersés par le vent ou les animaux et réhydratés, peuvent engendrer de nouveaux individus. Des organes plus spécialisés vont également participer à ce mode de dispersion

nommé multiplication végétative. Les isidies et les soralies sont de petites excroissances détachables formées d'algues et d'hyphes. Ce sont des clones du lichen « parent » qui ont tout ce qu'il faut pour former un nouveau lichen (le champignon et l'algue ou cyanobactérie associée). Ces excroissances sont légères et sont facilement transportées par le vent, la pluie, les insectes et permettent la dissémination de l'espèce.

- Certains hyphes, sexuellement différenciés, fusionnent et donnent, à la surface du thalle, des apothécies ou des périthèces. Ce sont des boutons ou coupes arrondies sur le thalle, qui contiennent les spores nécessaires à la reproduction sexuée du champignon constituant le lichen. Elles peuvent être enfouies dans le thalle ou portées par un petit pied. Les périthèces se différencient des apothécies par leur structure, ce sont des coupes plus ou moins fermées. Les apothécies et les périthèces contiennent des spores (8 en général) agglomérées les unes aux autres au fond des coupes. Après leur libération, les spores germent et donnent des hyphes qui devront capturer des algues (ou cyanobactéries) pour pouvoir redonner un nouveau thalle lichénique. Toutefois, le champignon a généralement besoin d'une espèce d'algue (ou cyanobactérie) bien précise pour sceller son union et former à nouveau un thalle lichénique. Les différentes espèces de lichens vont donc développer différentes astuces pour pallier à ce problème. Certaines espèces auront leurs spores agglutinées avec quelques cellules de l'algue ou de la cyanobactérie de manière à avoir plus de chances de se développer qu'une spore isolée. D'autres peuvent survivre dans un premier temps grâce à d'autres algues ou encore, peuvent insinuer leurs hyphes dans un lichen voisin pour lui dérober quelques algues.

I.1.3 L'intérêt des lichens

Les lichens ont été utilisés depuis l'Antiquité comme plantes médicinales et pour de multiples autres usages alimentaires ou artisanaux. Voici quelques usages :

- Usages alimentaires : certains lichens constituent un fourrage pour des animaux comme par exemple, les rennes de Laponie. D'autres peuvent également être source de glucose et dans certaines régions ils sont consommés comme aliment pour l'homme (Japon, Canada).
- Usages médicaux : aujourd'hui, le principal intérêt des lichens en médecine est leur potentiel antibiotique. Ils sont également utilisés en homéopathie pour la fabrication de sirops et de pastilles.
- Usages industriels : les huiles essentielles de certaines espèces de lichens sont utilisées pour la fabrication de parfums et de savons. Les lichens sont également connus pour la fabrication artisanale de teintures. Enfin, d'autres utilisations telles que la décoration des tables, la

confection des maquettes (où ils représentent des arbres) et celle de couronnes funéraires sont courantes dans certains pays.

- Usage en bio-indication : de nombreuses espèces de lichens ont une écologie très précise (cf. p. 8), de sorte que leur présence est susceptible de donner des indications sur les caractères physiques ou chimiques du milieu considéré. L'utilisation des lichens permet donc d'étudier, par exemple, la chimie et la stabilité des sols, la hauteur moyenne de l'enneigement (certaines espèces ne supportent pas l'humidité permanente due à la couverture nivale), le degré de pureté de l'atmosphère, etc.

I.2 LA POLLUTION

I.2.1 Définition

La pollution c'est tout ce qui altère notre environnement ou notre santé, de nature habituellement sous forme de substances, mais aussi sous forme d'ondes. La pollution s'attaque à l'air, à l'eau, au sol, et aux être vivants.

I.2.2 Les origines de la pollution d'eau

La pollution des ressources en eau se caractérise par la présence de micro-organismes, de substances chimiques ou encore de déchets industriels. Elle peut concerner les cours d'eau, les nappes d'eau, les eaux saumâtres mais également l'eau de pluie, la rosée, la neige et la glace polaire.[1]

Cette pollution peut avoir des origines diverses :

- La pollution industrielle : avec les rejets de produits chimiques comme les hydrocarbures ou le PCB (Les polychlorobiphényles aussi appelés biphényles polychlorés (BPC), ou encore parfois improprement dits « pyralènes » (du nom commercial d'un produit de Monsanto à base de PCB autrefois très utilisé en Europe dans les transformateurs) forment une famille de 209 composés aromatiques organochlorés dérivés du biphényle.) rejetés par les industries ainsi que les eaux évacuées par les usines.
- La pollution agricole : avec les déjections animales mais aussi les produits phytosanitaires/pesticides (herbicides, insecticides, fongicides) contenus dans les engrais et utilisés dans l'agriculture. Ils pénètrent alors dans les sols jusqu'à atteindre les eaux souterraines.
- La pollution domestique : avec les eaux usées provenant des toilettes, les produits d'entretien ou cosmétiques (savons de lessives, détergents), les peintures, solvants, huiles de vidanges, hydrocarbures...

- La pollution accidentelle : avec le déversement accidentel de produits toxiques dans le milieu naturel et qui viennent perturber l'écosystème.

a. Pollution par colorants

Les colorants occupent une place importante dans les composés organiques synthétiques. Ils sont utilisés en grande quantité dans les industries : textile, encre, plastique, papier, cosmétique, tannerie, et sont de ce fait des polluants industriels communs. Leurs rejets dans les systèmes aquatiques causent des dommages à l'environnement en raison de leur toxicité, ce qui impose leur traitement. Mais la complexité de ces polluants est que leur couleur affecte énormément l'efficacité des traitements classiquement appliqués.

L'industrie du textile est grande consommatrice d'eau pour les phases de teinture des tissus. Les eaux de rinçage sont chargées en colorants. Ces effluents de colorant sont fortement stables et récalcitrant à la biodégradation [7]. Un certain nombre de colorants est reconnu dangereux pour la santé publique tel que le Rouge de Nylosane et le Jaune de Supranol. L'élimination de la couleur est un problème crucial pour l'environnement. Ces colorants sont difficiles à dégrader à cause de leurs structures complexes et de leurs propriétés xénobiotiques. La présence de colorants dans l'eau, même à basse concentration, est très visible et indésirable. Elle réduit la pénétration de la lumière, ce qui donne des effets dérogatoires sur la photosynthèse.

I.3 Généralités sur les colorants

I.3.1 Définition

Les colorants sont des composés organiques, naturels ou synthétiques, qui ont la propriété de colorer durablement le support sur le quel ils sont appliqués dans certaines conditions.

Les colorants de synthèse ont progressivement supplanté les colorants naturels. Les recherches, menées depuis le milieu du XIXe siècle, ont débouché sur la fabrication de très nombreuses familles de colorants, où l'on trouve souvent des imitations de la structure chimique des colorants naturels.

Tous les composés aromatiques absorbent l'énergie électromagnétique, mais seuls les composés capables d'absorber le rayonnement lumineux dans le spectre visible (380 à 750 nm) auront une couleur. [3] Les colorants consistent un assemblage de groupes chromophores, auxochromes et de structures aromatiques conjuguées (cycles benzénique, anthracène, pérylène,...)

I.3.2. Classification

Les principaux modes de classification des colorants reposent soit sur leur constitution chimique (classification chimique), soit sur leurs méthodes d'application aux différents substrats (classification tinctoriale).

I.3.2.1 Classification chimique

Le classement des colorants selon leur structure chimique repose sur la nature du groupement chromophore, qui consiste le squelette nécessaire à coloration de la molécule.

I.3.2.2 Classification tinctoriale

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

I.3.3 Toxicité des colorants

La toxicité des azoïques par exposition aux colorants et à leurs métabolites n'est pas un fait nouveau. Dès 1895, l'augmentation du nombre de cancers de la vessie observés chez des ouvriers de l'industrie textile, est reliée à leur exposition prolongée aux colorants azoïques [4]. Depuis, les travaux effectués sur ces colorants ont démontré que ces composés chimiques présentaient des effets cancérigènes pour l'homme et l'animal.

L'azobenzène par exemple, est reconnu pour être un composé génotoxique au même titre que l'amarante, la tartrazine et la rouge cochenille qui figurent parmi les colorants azoïques les plus dangereux pour l'homme. Et ils ont été retirés des listes de colorants alimentaires dans la plupart des pays. Les effets cancérigènes des composés azoïques s'expriment par leurs dérivés amines. La toxicité des azoïques est accrue par la présence de substituant sur le noyau aromatique notamment des groupes nitro (-NO₂) et halogènes (particulièrement Cl). Selon l'EPA l'estimation des risques de cancer impose de fixer une concentration limite de 3,1 µg/L en colorant azoïque dans l'eau potable.

I.4 METHODES DE DEPOLLUTION

Les techniques de dépollution varient selon les substances cibles (molécules organiques, cations métalliques, particules de taille nanométrique ou micrométrique), le traitement continu ou en batch des polluants et la nature finale des déchets.

Les différentes techniques d'épuration actuellement en place peuvent être classées en trois grandes familles :

- Les techniques visant à former une phase concentrée en polluants. Parmi les techniques reposant sur ce principe, on trouve par exemple l'évaporation (élimination sélective d'un solvant à travers d'une membrane présentant une affinité, hydrophile ou hydrophobe, pour ce solvant), l'osmose inverse, ou la filtration.
- Les techniques reposant sur l'extraction du polluant de la phase liquide : électrodéposition, électrolyse, adsorption, extraction liquide-liquide, échange ionique sur résines ou précipitation.
- Les techniques entraînant la minéralisation des composés organiques par incinération, pyrolyse, biodégradation ou dégradation catalytique. Souvent, plusieurs techniques sont utilisées en série de manière à traiter plusieurs types de polluants sur une même chaîne ou rendre le contaminant compatible avec la méthode de traitement choisie.

Parmi ces techniques, l'adsorption sur laquelle repose cette étude, a montré de grandes capacités de dépollution des eaux usées, surtout industrielles, elle est aussi très simple et performante pour l'élimination des matériaux organiques et inorganiques. Cependant son efficacité dépend beaucoup de la nature du support utilisé comme adsorbant, particulièrement en ce qui concerne son coût, sa disponibilité, sa régénération,...etc. Elle reste donc toujours une procédure fiable pour l'enlèvement des substances toxiques des eaux usées.

I.5 L'ADSORPTION

Elle est définie comme une fixation à la surface d'un solide, des atomes, d'un gaz ou d'une substance liquide. Les matières fixées à la surface sont appelées des adsorbats et le solide adsorbant. Le terme surface doit s'étendre non seulement à la surface géométrique du solide mais aussi à la surface interne développée dans sa porosité.

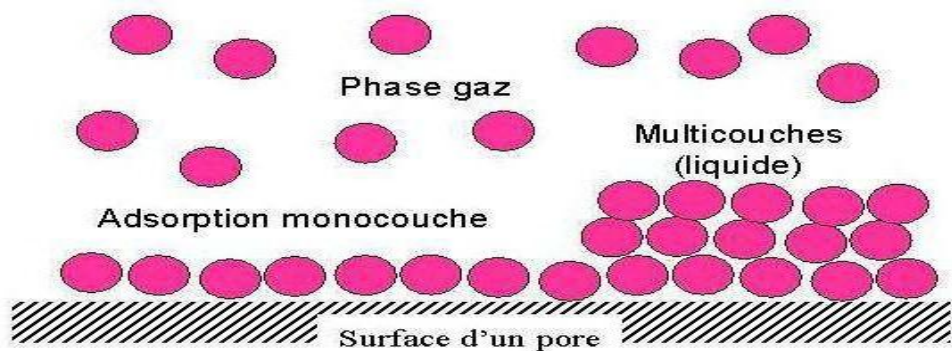


Figure I.5: schéma du phénomène d'adsorption

Cette description de l'adsorption est simplifiée car il s'agit en fait d'un phénomène plus complexe qui peut se dérouler en plusieurs étapes consécutives avec la formation de complexes adsorbés intermédiaires. Le phénomène d'adsorption est lié à la surface des solides sur lesquelles existent des forces de nature physique et/ou chimique, impliquant diverses formes d'interactions entre l'adsorbant et l'adsorbé. Ceci explique la différence entre la physisorption, la chimisorption et la complication de surface.

I.5.1 Type d'adsorption

On distingue généralement l'adsorption physique et l'adsorption chimique. La première met en jeu des forces de Van der Waals, du même type que celles qui assurent la cohésion des liquides. Cette adsorption physique se caractérise par une chaleur d'adsorption faible, une réversibilité parfaite, une cinétique très rapide [5]. L'adsorption chimique a les mêmes caractéristiques qu'une réaction chimique. Elle conduit à la formation de liaison covalente entre la surface du solide et l'adsorbé. Comme les réactions chimiques, elle est soumise aux lois de la cinétique et de la thermodynamique. L'adsorption chimique est un processus exothermique.

I.5.1.1 L'adsorption physique ou physisorption

L'adsorption physique consiste à fixer l'adsorbé par des forces intermoléculaires, telles les forces de Van der Waals et les interactions électrostatiques, pour les adsorbants ayant une structure ionique. Elle se produit sans modification significative de la structure moléculaire de l'adsorbé et est réversible. C'est pourquoi les procédés d'adsorption industriels utilisent des matériaux faisant intervenir généralement des phénomènes d'adsorption physique.

I.5.1.2 L'adsorption chimique ou chimisorption

L'adsorption chimique résulte d'une réaction chimique avec formation de liaisons covalentes entre les molécules d'adsorbat et la surface de l'adsorbant. Par la surface de l'adsorbant, il faut entendre les surfaces externe et interne engendrées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur de l'adsorbant. L'énergie de liaison est beaucoup plus forte que dans le cas de l'adsorption physique et le processus est beaucoup moins réversible et même parfois irréversible.

Tableau I.5.1.2: Quelques critères de distinction entre l'adsorption physique et chimique.

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Température de processus	Relativement basse	Plus élevée
Chaleur d'adsorption	05 Kcal/mol	10 Kcal/mol
Liaison	Physique: Van der Waals	Chimique
Cinétique	Rapide, réversible.	Lente, irréversible
Spécifié	Processus non spécifique	Processus très spécifique
Désorption	Facile	Difficile
Couches formées	Multicouche	Monocouche

I.5.2 Cinétique d'adsorption

La Cinétique d'adsorption est définie par l'évolution de la quantité adsorbée en fonction du temps de contact adsorbant/adsorbat. La cinétique d'adsorption est contrôlée par plusieurs étapes impliquant des phénomènes de diffusion. Quatre étapes peuvent être énumérées et appliquées à l'adsorption [6]:

- 1 transfert de l'adsorbat de la phase liquide vers le film liquide entourant la surface de la particule adsorbant.
- 2 Transport de l'adsorbat au travers de la couche limite à la surface de l'adsorbant.
- 3 Transfert de l'adsorbat de la surface aux sites actifs (diffusion intra particulaire)
- 4 Fixation de l'adsorbat aux sites actifs de l'adsorbant suivant un mécanisme donné.

Pour l'étude de la cinétique d'adsorption, on détermine la capacité de fixation en fonction du temps. L'équilibre de fixation est pratiquement atteint après un certain temps de contact adsorbant-adsorbat. La constante de vitesse d'adsorption est déduite à partir du modèle établi

par La gergreen [7]. Ce modèle a été choisi d'une part pour sa simplicité et d'autre part leur application dans le domaine d'adsorption des composés organiques sur les différents adsorbants.

- Pour le pseudo premier ordre, la constante de vitesse d'adsorption k_1 est donnée par la relation suivante:

$$\ln \left[\frac{q_e - q}{q_e} \right] = -k_1 \times t$$

- Pour le pseudo second ordre, la constante de vitesse k_2 est donnée par la relation suivante:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2} \times q_e^2 + \frac{t}{q_e}$$

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

q_t : Quantité d'adsorbat par gramme d'adsorbant au temps (mg/g)

t : temps de contact (min)

K_1 : Constante de vitesse d'adsorption pour le premier ordre (1/min)

K_2 : Constante de vitesse d'adsorption pour le pseudo second ordre ($\text{min}^{-1} \cdot \text{g/mg}$)

I.5.3 Les modèles d'adsorption

De nombreux auteurs ont proposé des modèles théoriques ou empiriques, pour décrire la relation entre la masse d'adsorbat fixée à l'équilibre et la concentration finale. Il s'agit de relations, que l'on nomme isothermes. 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 seront utilisés pour leur simplicité de mise en œuvre. Ils ne permettront pas d'expliquer comment se produisent les phénomènes d'adsorption. En revanche, ils permettront de synthétiser en une seule expression et deux paramètres l'ensemble des résultats obtenus.

Selon le couple adsorbat-adsorbant étudié, l'allure de la courbe isotherme peut être différente. La grande majorité des isothermes peut être classés en six types selon leur allure. Le type d'isotherme obtenu permet déjà de tirer des conclusions qualitatives sur les interactions entre les adsorbats et l'adsorbant

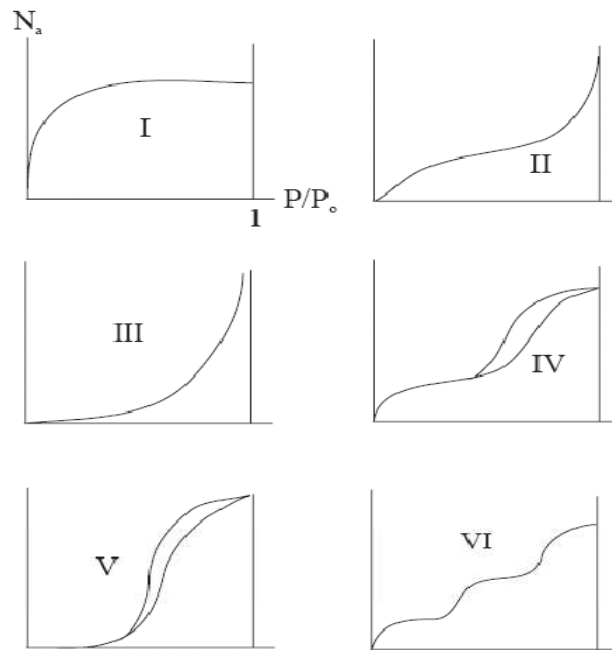


Figure I.5.3: Les différents types d'isothermes selon IUPAC [8].

Les isothermes de type I sont typiques d'une adsorption en monocouche, ou correspondant au remplissage de micropores avec saturation lorsque le volume à disposition est totalement rempli. Ce type d'isotherme est caractéristique pour l'adsorption sur les charbons microporeux et les zéolithes.

Les isothermes de type II, au contraire, correspondent en général à l'adsorption multicouche sur des surfaces ouvertes. Cependant, une isotherme de type II peut aussi résulter d'une somme d'isothermes I+II (remplissage de micro pores suivi d'une adsorption multicouches sur une surface externe).

Les isothermes de type III reflètent un manque d'affinité entre l'adsorbant et l'adsorbant, et des interactions adsorbant-adsorbant relativement fortes. C'est le cas de l'adsorption de l'eau sur des surfaces hydrophobes (par exemple graphite ou charbons actifs contenant peu d'oxygène).

Les isothermes de type IV peuvent résulter de la combinaison d'une isotherme de type I (adsorption forte, mais limitée) et de type V. C'est le cas de l'eau sur les carbones riches en oxygène [9,10].

Les isothermes de type V reflètent aussi une forte interaction entre les adsorbats. De

plus, l'existence d'une hystérésis au cours de la désorption reflète la présence de méso pores dans lesquels la vapeur se condense en formant un ménisque de forte courbure.

Les isothermes de type VI présentent des marches caractéristiques d'une adsorption multicouche sur une surface non-poreuse très homogène.

a. Modèle de Langmuir:

Modèle de Langmuir[11] est basé sur les hypothèses suivants:

- La formation d'une seule couche d'adsorbat sur la surface de l'adsorbant,
- L'existence de sites définit d'adsorption,
- La surface est uniforme: toutes les sites de fixation sont énergiquement équivalents (un seul type de site d'adsorption),
- Absence d'interaction entre les molécules adsorbées.

L'équation de Langmuir s'écrit de la façon suivante:

$$q_e = \frac{q_m K C_e}{1 + K C_e}$$

Avec:

q_e : Quantité adsorbée par l'adsorbat à l'équilibre(mg/g)

C_e : Concentration dans la solution à l'équilibre (mg/l)

q_m : Capacité maximale d'adsorption

K :Constante d'équilibre caractéristique d'adsorbant, dépendant de la température des conditions expérimentales (L/mg)

Cette équation peut être linéariser sous la forme suivante:

$$\frac{c_e}{q_e} = \left[\frac{1}{k \times q_m} \right] + \left[\frac{c_e}{q_m} \right]$$

Si l'équation de Langmuir est valable pour décrire nos résultats expérimentaux, elle doit vérifier la forme linéaire de l'équation de base en système coordonnées : $C_e/q_e=f(C_e)$, ce qui nous permettra d'accéder aux constantes q_m et K .

b. Modèle de Freundlich

Le modèle de Freundlich est basé sur une équation empirique correspondant à une adsorption en monocouche à la surface suivant une loi parabolique. Elle est de forme suivante:

$$q_e = k \times c_e^{\frac{1}{n}}$$

Avec:

q_e : Quantité d'acide adsorbée par l'adsorbant à l'équilibre

C_e : Concentration d'acide dans la solution à l'équilibre

K_F et n : Paramètres de Freundlich, constantes positives dépendant de la nature de système adsorbant-adsorbat et de la température.

Cette équation peut être linéaire de la façon suivante:

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

Si cette équation est vérifiée avec les données d'équilibre d'adsorption, nous devons obtenir une droite dans le système de coordonnées $\ln q_e = f(\ln C_e)$, la pente et l'ordonnée à l'origine donnent respectivement K et n .

Partie II
Expérimentale

II.1 Introduction

Cette partie expérimentale de notre travail est consacrée à l'étude de l'adsorption du colorant Acide Vert 25 par le lichen brut. Nous présenterons entre autres l'effet du pH, et le temps de contact sur l'adsorption. Les isothermes, les modèles d'adsorption et la cinétique seront également examinés.

II.2 L'adsorbant

Le Lichen *Pseudevernia furfuracea* L'utilisé dans ce travail a été récolté du parc national de Theniet El Had wilaya de Tissimssilt. Il a été lavé jusqu'à l'élimination de toutes impuretés, ensuite séché dans une étuve à 80 °C pendant 24h. Le matériau obtenu a été finement broyé est de couleur marron crémeuse.

II.3 L'adsorbat

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'acide vert 25 comme colorant. Comme son nom l'indique est de couleur vert intense, ce colorant est un produit de Sigma-Aldrich avec une pureté supérieur à 60 %. Le tableau résume les principales caractéristiques physico-chimiques de ce colorant.

Tableau II.3 : Les propriétés physico-chimiques de l'AG25

Nom	Acide vert 25
La famille	Colorants anthraquinoniques
Couleur	Vert
Formule brute	$C_{28}H_{20}N_2O_8S_2Na_2$
Masse molaire (g/mol)	622,6
Solubilité dans l'eau (g/L)	28
Longueur d'onde maximale (nm)	643

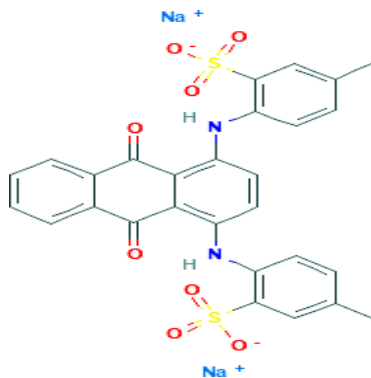


Figure II.3 : Structure chimique de l'AG 25

II.4 Courbe d'étalonnage

A partir de la solution mère (500 mg/L), nous avons préparé des solutions diluées, afin d'établir la courbe d'étalonnage : 5, 10, 15, 20, 25, 30 mg/l. Chaque solution fille a été analysée dans le domaine du visible par spectrophotométrie en utilisant un appareil type OPTIZEN 2120UV (Figure II.4.1) à la longueur d'onde maximale de 640 nm⁻¹.



Figure II.4.1 : Photographie Spectrophotomètre UV-visible (OPTIZEN 2120 UV)

Les résultats des absorbances en fonction des concentrations sont représentés graphiquement sur la figure II.4.2.

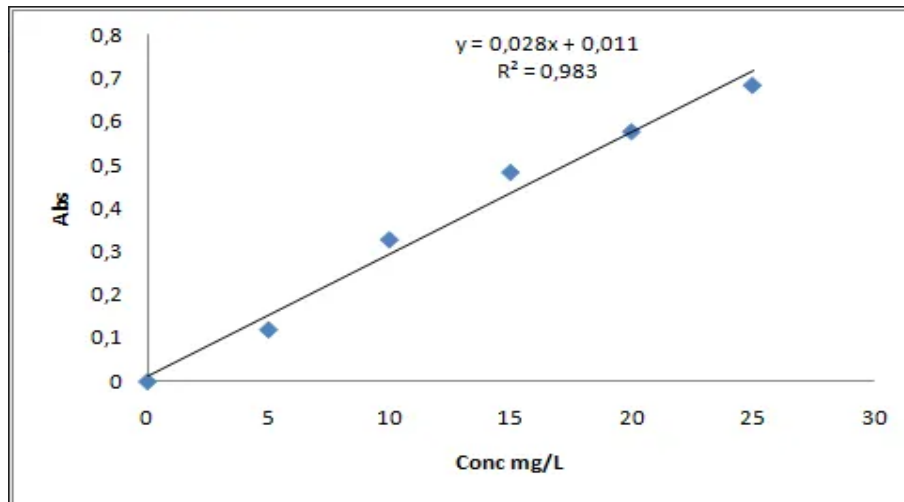


Figure II.4.2 : Courbe d'étalonnage de l'AG25.

- On constate que la courbe obtenue est une droite croissante avec un coefficient de corrélation égale à $R^2 = 0,983$, représentant un bon ajustement linéaire. $Abs = 0,028C + 0,011$.

II.5 L'expérience d'adsorption

Avant d'entamer les différentes étapes d'adsorption : une solution mère du colorant a été préparée en pesant 0,41 g, de AG25, qu'on dissout dans une fiole de 500 ml, complétée avec de l'eau distillée, la concentration correspondante est 500 mg/L.

Pour chaque expérience d'adsorption, 0,1 g de Lichen naturel est mélangé avec 20 ml de solution d'AG 25, à la concentration désirée pendant une durée de 2 heures. Par la suite, le mélange est séparé par centrifugation. Quelques millilitres de la solution surnageant est prélevé pour analyse par spectrophotométrie UV-Vis. La quantité du colorant adsorbée est déterminée par différence entre les concentrations initiale et finale.

$$Q_e = \frac{C_0 - C_e}{m} \cdot V \quad (1)$$

C_0 : Concentration initiale (mg/L)

C_e : Concentration à l'équilibre (mg/L)

V : Volume de la solution (L)

m : Masse de l'échantillon (g)

Q_e : Quantité de l'adsorbat (mg/g)

II.5.1 L'effet de pH

C'est la mesure qui nous permis de déterminer à quel domaine de pH notre adsorption est favorable. Le pH influe sur l'adsorption du fait de la nature de l'adsorbant dont les sites comportent des charges électriques intervenant dans la réaction avec l'adsorbat.

➤ Mode opératoire

Dans une série de béchers, on introduit successivement une masse de 0,1g Lichen avec 20ml de la solution d'AG25, à la concentration de 60 ppm. Le mélange est agité magnétiquement à la température ambiante 25°C. Puis la suspension est séparée du solide par centrifugation. Le pH de la solution initiale a été fixé à 2, 3, 4, 5, 6 et 7, est ajusté par l'ajout d'acide chlorhydrique (1N) ou d'hydroxyde de sodium (1N). Les résultats de ces mesures sont représentés sur la figure II.5.1.

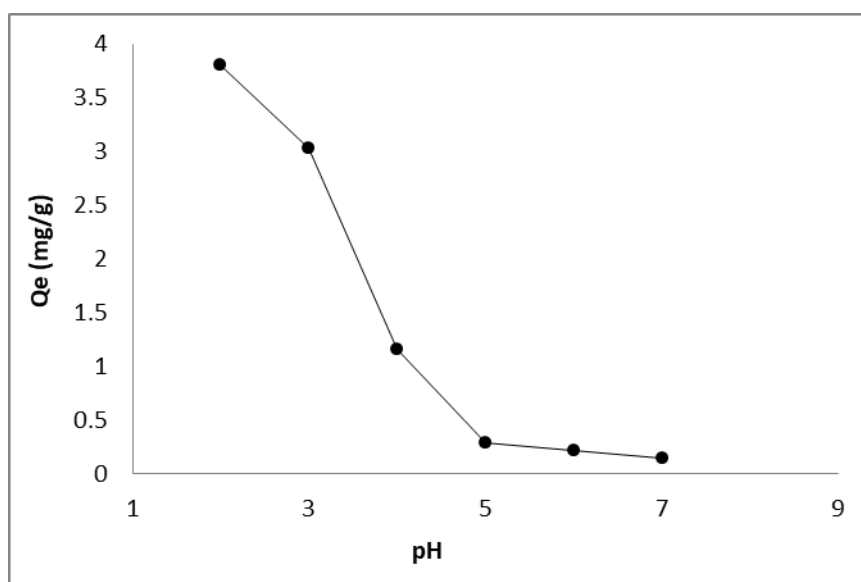


Figure II.5.1: L'effet de pH sur l'adsorption du l'AG25 par Lichen.

Nous remarquons que la capacité d'adsorption de AG25 est importante à pH égale 2, puis elle commence à diminuer fortement jusqu'à pH = 5. Enfin une légère diminution entre pH 5 et 7. Donc le choix de pH pour notre expérience sera aux alentours de 2.

Sachant que le colorant étudié est de nature anionique en solution, s'il est bien adsorbé en milieu acide c'est sûr que la charge électrique à la surface du lichen est positive. La nature des liaisons dans ce cas est généralement de nature physique type Van Der Waals générant des forces attractives entre l'adsorbat et l'adsorbant.

II.5.2 Cinétique d'adsorption

Pour étudier la cinétique d'adsorption de l'AG25 à température ambiante, nous avons préparé des solutions à 30 ppm de l'AG25. Cette dernière est mise en contact avec une quantité de 0,1g de lichen, pendant des durées différentes allant de 5 à 120 min. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure II.5.2.

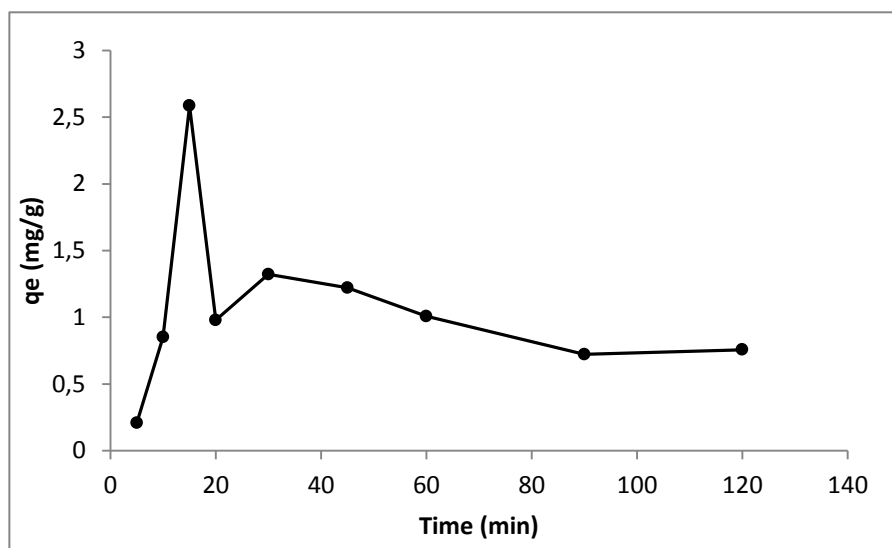


Figure II.5.2: La cinétique d'adsorption de l'AG25 par Lichen
($C_0 = 30 \text{ mg/l}$; $\text{pH}=2$; $T=24^\circ\text{C}$).

L'évolution de la quantité adsorbée du colorant en fonction du temps de contact se présente en trois étapes. La première partie est caractérisée par une vitesse lente d'adsorption du colorant atteignant 0,85 mg/g, puis intervient la deuxième étape où une augmentation considérable jusqu'à 2,6 mg/g à un temps de 15 min. Après cela on remarque une baisse de capacité d'adsorption suivi d'une fluctuation qui se stabilise en fonction de temps. Le temps d'équilibre est noté à 90 min.

Ce qui peut être expliqué, est que dès les premières minutes la vitesse d'adsorption est rapide, indiquant la disponibilité des sites d'adsorption dans le solide, puis d'autres sites sont acquies justifiant l'augmentation de la quantité adsorbée, mais le fait que cette dernière diminue, peut être expliqué que ces nouveaux sites occupés ne sont pas énergétiquement favorables et actifs car c'est le phénomène de désorption qui a eu lieu avant d'atteindre l'équilibre.

II.5.2.1 Ordre de réaction

✓ Model du pseudo premier ordre

L'équation linéaire du modèle de premier ordre est la suivante :

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 \times t \quad (2)$$

Le tracé de $\ln(q_e - q_t)$ en fonction du temps nous permet de calculer la constante de vitesse k_1 à partir de l'ordonnée à l'origine et q_e à travers la pente.

✓ Modèle du pseudo second ordre

L'équation linéaire du modèle du pseudo second ordre est la suivante :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \times q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (3)$$

Le tracé de t/q_t en fonction du temps nous permet de calculer la constante de vitesse k_2 à partir de l'ordonnée à l'origine et q_e à travers la pente.

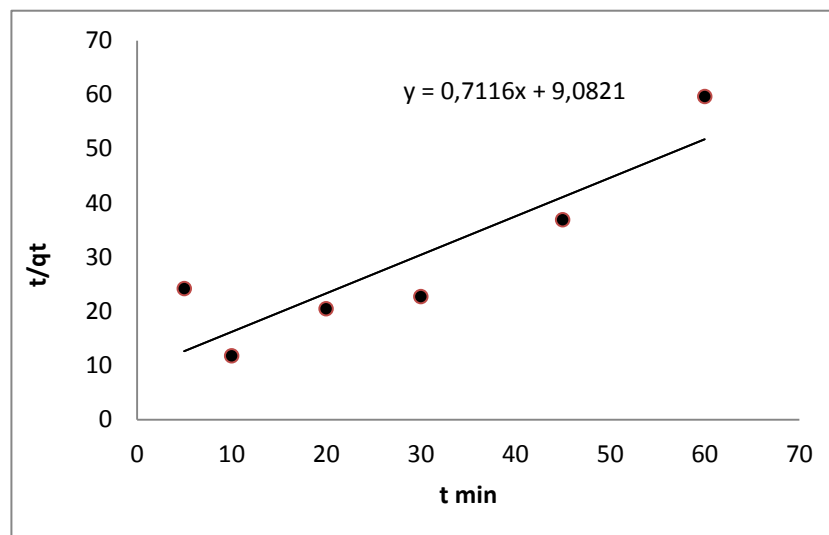


Figure II.5.2.1 : Courbe de linéarisation du modèle second ordre

Plusieurs formules sont données dans la littérature pour décrire la cinétique d'adsorption, comme ceux de pseudo-premier ordre, pseudo-second ordre, ou de diffusion. L'application du modèle de premier ordre sur nos données expérimentales était sans succès, mais celui de pseudo second ordre qui définit d'ailleurs la majorité des réactions d'adsorption, nous permet de définir plus au moins la réaction d'adsorption de l'AG25 par Lichen.

Tableau II.5.2.1: Les constantes de linéarisation de la cinétique d'adsorption.

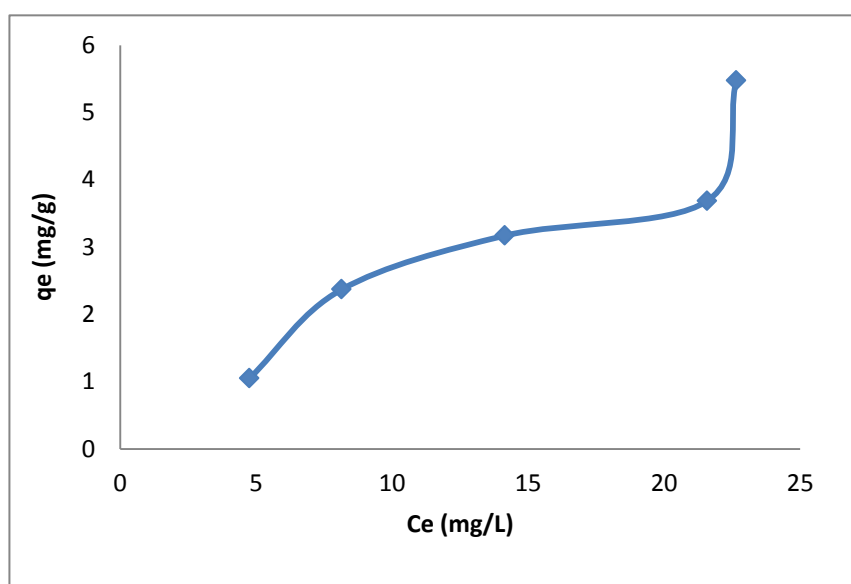
	modèle de premier ordre			modèle de second ordre		
colorant	$k_1(\text{min}^{-1})$	$Q_e(\text{mg/g})$	R^2	$k_2(\text{g/mg.min})$	$Q_e(\text{mg/g})$	R^2
AG25	0.0036	3.995	0.0474	0,056	1,406	0,800

II.5.3 Les isothermes d'adsorption

Les phénomènes d'adsorption se décrivent au moyen des isothermes d'échange relient la concentration de la substance en solution (mg/l) et la quantité adsorbée sur la phase solide (mg/g). Pour un couple adsorbant-adsorbat, la quantité adsorbée dépend de la température et de la concentration.

- **Mode opératoire**

Pour l'expérience d'adsorption, 0,1g de lichen avec 20ml de la solution d'AG25 à différentes concentrations initiales variant de 5 à 30 mg/l. Le temps de contact était de 1h30, le pH a été fixé à 2, à la température ambiante 20 °C. Par la suite quelques ml de la solution surnageant sont prélevés pour être analysés par UV-Vis. Les isothermes d'adsorption du l'AG25 par le lichen est représentée sur le figure II.5.3.

**Figure II.5.3:** Isotherme d'adsorption du AG25 par le lichen.

L'isotherme d'adsorption du l'AG25 par le lichen est l'allure de l'isotherme de type II, qui indique une adsorption intense mais limitée. Selon la classification de l'IUPAC, ce genre

d'isotherme représente une adsorption verticale des molécules monofonctionnelles polaires, avec une adsorption en multicouche.

II.5.4 Modélisation de l'isotherme d'adsorption

Pour la modélisation de l'isotherme d'adsorption obtenue, nous avons choisi les deux modèles classiques, celui de Langmuir et de Freundlich, caractérisant l'état de la surface et la formation des couches.

➤ Modèle de Langmuir

Le modèle de Langmuir [12] repose sur l'hypothèse que l'adsorption a lieu aux emplacements homogènes spécifiques dans l'adsorbant et une monocouche se formera à la surface du solide. L'équation linéaire de Langmuir est la suivante:

En traçant la droite $C_e/Q_e = f(C_e)$ et à l'aide de la pente, on détermine les valeurs de la capacité de la monocouche Q_m et de la constante K_L . La courbe de linéarisation du modèle de Langmuir est montrée dans la figure II.5.4.1.

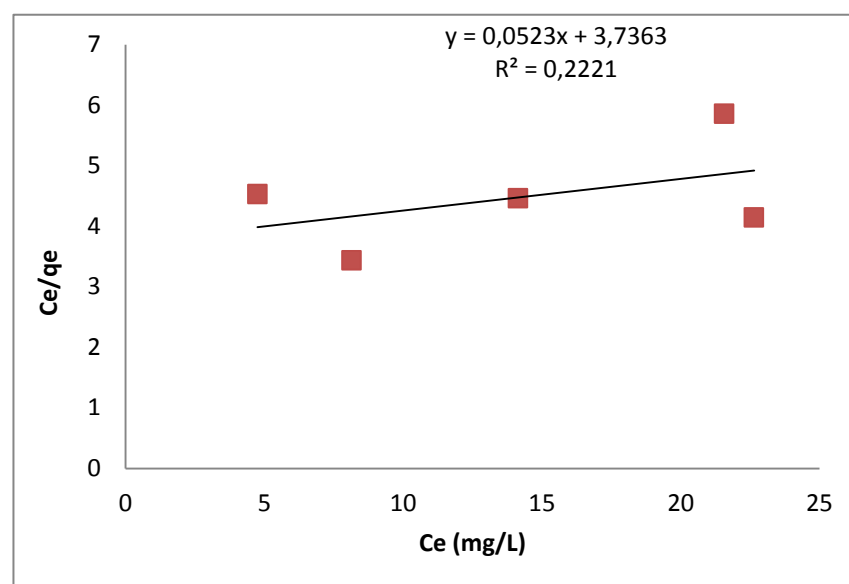


Figure II.5.4.1: La linéarisation du modèle de Langmuir d'isotherme d'adsorption AG25 par lichen.

On constate d'après cette figure que le coefficient de corrélation R^2 , qui est le paramètre de fiabilité des modèles est très loin de l'unité, ce qui signifie qu'on n'a pas de bons droites représentatives, donc on peut dire que le modèle de Langmuir ne décrit absolument pas nos données expérimentales.

➤ Modèle de Freundlich

Modèle de Freundlich [5] est une équation qui a tendance à décrire les systèmes hétérogènes où les sites d'adsorption sont énergétiquement hétérogènes avec la possibilité de formation de multicouches. La forme linéaire de l'équation est :

$$\ln q_e = \ln k_F + \frac{1}{n} \times \ln c_e$$

Où :

K_F : constante tenant compte de la capacité d'adsorption ; $1/n$: constante tenant compte de l'intensité d'adsorption. Le traçage de la courbe $\ln Q_e = f(\ln C_e)$ (figure II.5.4.2) nous conduit aux valeurs de K_F et de $1/n$ présentées ci-dessous.

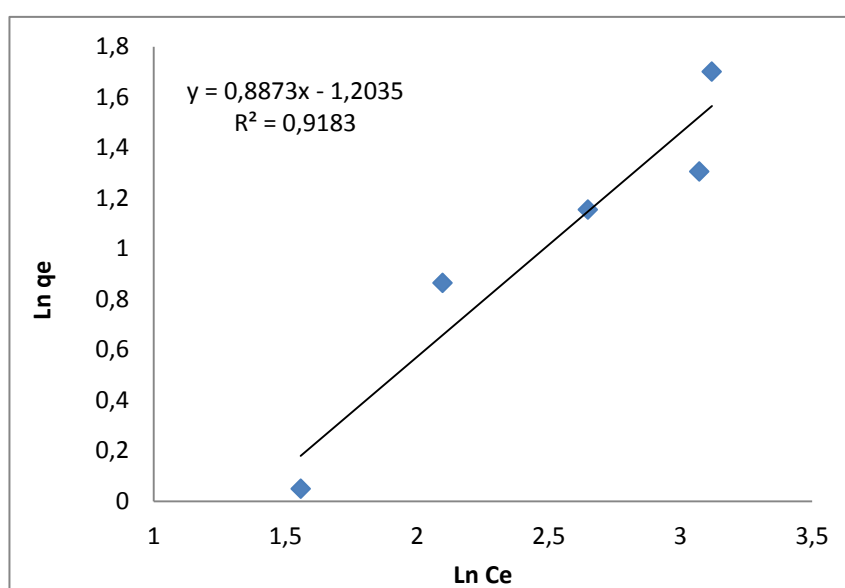


Figure II.5.4.2: La linéarisation d'isotherme d'adsorption de l'AG25 par le lichen selon le modèle de Freundlich.

Les résultats de modélisation des isothermes d'adsorption par le lichen selon le modèle de Freundlich sont regroupés dans le tableau II.5.4.

Tableau II.5.4: les constantes de linéarisation d'isotherme d'adsorption selon le modèle de Freundlich :

Colorant	Lichen		
	1/n	K_F	R^2
Acide vert 25	0,887	0,300	0,918

La linéarisation d'isotherme d'adsorption du colorant par le lichen selon le modèle de Freundlich est satisfaisante avec un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0,918$). Le rapport $1/n$ est inférieur à l'unité dans ce cas, ceci signifie que l'adsorption de l'acide vert 25 est favorable.

II.5.5 Discussion

En résumé de nos résultats expérimentaux obtenus lors de l'adsorption de l'acide vert 25 par le lichen, on peut dire que ces résultats sont concluants du fait qu'effectivement ce colorant acide vert 25 considéré comme polluant dans notre étude a été adsorbé avec succès par notre bio-adsorbant.

L'influence de pH réalisée situe que le domaine de pH fiable est aux alentours de 2, donc le rattachement du colorant se fait en milieu acide. La cinétique d'adsorption est plus au moins perturbée au début mais elle se stabilise à fur et à mesure que le temps augmente où on note un temps d'équilibre atteint au bout de 90 min. La modélisation de l'isotherme d'adsorption confirme que l'adsorption du colorant AG 25 est en multicouche sur une surface hétérogène.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail avait pour objectif, l'étude de la capacité d'adsorption d'un nouveau bio adsorbant pour la récupération du colorant acide vert 25.

La première partie a été consacrée à l'obtention du lichen de la réserve de Te niet El ha d en suite un lavage suivi d'un séchage.

La seconde partie examine l'étude de l'adsorption de l'Acide vert 25 par le Lichen, réalisée sous différentes conditions opératoires. L'influence de quelques paramètres, a permis de montrer que la quantité adsorbée du colorant adsorbée varie selon les facteurs examinés.

L'effet de pH du milieu a montré que l'AG 25 s'adsorbe mieux en milieu acide et précisément aux alentours du $\text{pH} = 2$.

La cinétique d'adsorption de l'acide vert 25 par le lichen suit le modèle de pseudo-second ordre, qui définit une réaction rapide et intense surtout dans les premières minutes. Le temps d'équilibre a été atteint au bout de 90 min.

L'isotherme d'adsorption d'AG25 par Lichen est de type II, signifie que le polluant a été adsorbé en multicouche sur une surface probablement hétérogène. L'isotherme de Langmuir est défavorable pour décrire nos données expérimentales, par contre le modèle de Freundlich décrit convenablement nos isothermes.

On peut conclure que le lichen peut être comme considéré un adsorbant naturel non polluant, moins coûteux et qui sert au traitement des eaux usées. C'est vrai que la quantité adsorbée de ce type de colorant n'était pas importante, on peut dans des travaux ultérieurs, essayer avec d'autres types de colorants ou même choisir d'autres genres de polluants à fin de se situer sur la capacité d'adsorption du Lichen.

Référence bibliographique :

- [1] <https://www.cieau.com/connaitre-leau/la-pollution-de-leau/pollution-ressource-eau-comment-reduire/>.
- [3] Hammami S Étude de dégradation des colorants de textile par les procédés d'oxydation avancée. Application à la dépollution des rejets industriels. Sciences de l'environnement. Université de Marnela Vallée, 2008.
- [4] Tsuda S. Masusaka N Madaram H. The comet assay in eight mouse organs result with 24 azo compounds. Mutations research 465 11-26. (p 15).(2000).
- [5] Ede lin F, L'épuration physico-chimique des eaux. Editions Cabeco, Liège. (p16).1998.
- [6] Ouali M.S. Cours de procédés unitaire biologiques et traitement des eaux. Editions OPU. (p 18).2001.
- [7] Raji C. And Anirudhan T. Batch S. (VI) removal by polyacrylamide-grafted sawdust: Kinetics and thermodynamics. Water Research, 32, 3772-3780.(p 18).1998.
- [8] International union of pure and applied chemistry. Pure and appl.Chem. 57. 605 619. (p 20).1985.
- [9] Gregg S.j. Sing K.S.W., Adsorption surface, area and porosity, 2nd Edition, academic press London. (p 21).1992.
- [10] Llewellyn P.L.L et al. Langmuir. 9.1852 -1856. (p 21).1993.
- [11] Langmuir L. The adsorption of gases, mica and platinum J. Am. Chem. Soc, 40, 1361.(p 21).1918.
- [12] Kadirvelu K., Kavipriya M, Karthika C, Radhika M, Vennilamani N, Attabhi S, Bioresource Technol.129-132. (p1).(2003).
- [13] Azizian S, Haerifar M, Bashiri H, Chem. Eng. J. 36-41. (p1).(2009).