

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement

20/20/39/08/20/



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم التعليم المشترك في علوم والتكنولوجيا

Département de l'éducation conjointe en sciences et technologies

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master/ Chimie analytique

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie analytique

Thème

Évaluation de l'efficacité d'un charbon actif pour l'adsorption d'un polluant, Optimisation par plan d'expérience de Box-Behnken.

Présenté par :

Nesrine CHELLOU et Fatima Zahra LAHRACHE

Soutenu publiquement le 14/06/2025

Devant le jury composé de :

Zohra BABAAMER	Pr.	Université de Ghardaïa	Présidente
Mounir DAOUD	MCA	Université de Ghardaïa	Encadreur
Yasmina KHANE	MCA	Université de Ghardaïa	Examinatrice
Wassila BENCHADI	MCB	Université de Ghardaïa	Examinatrice

Année universitaire 2024/2025

Résumé

Cette étude visait à évaluer l'efficacité du charbon actif (CAP), préparé à partir de tiges de palmier dattier, pour éliminer le colorant rouge Congo (CR) d'une solution aqueuse. Pour ce faire, un plan d'expérience de Box-Bennken (BBD) a été utilisé afin d'optimiser les conditions opératoires et d'étudier les effets de trois variables indépendantes : la masse d'adsorbant (X1), la concentration initiale en contaminant (X2) et le pH de la solution (X3).

L'analyse des propriétés du charbon actif a révélé que le point de charge zéro (pHpzc) était égal à 10, et l'analyse de Boehm a indiqué que la surface du charbon actif contenait un groupe basique. Les données cinétiques ont été traitées à l'aide des modèles de quasi-premier ordre (PFO) et de quasi-second ordre (PSO), ce dernier offrant le meilleur ajustement ($R^2 = 0,99$).

Une étude d'équilibre d'adsorption a montré que le modèle de Langmuir convenait le mieux aux résultats expérimentaux ($R^2 > 0,98$), indiquant une adsorption monocouche sur une surface homogène. La capacité d'adsorption maximale a été estimée à 142,85 mg/g. De plus, les paramètres thermodynamiques indiquent un processus d'adsorption endothermique.

Mots-clés : Charbon actif, Adsorption, Rouge Congo, Box-Behnken, isothermes d'adsorption.

Abstract

This study aimed to evaluate the efficiency of activated carbon (CAP), prepared from date palm stem, in removing Congo red (CR) dye from aqueous solutions. To achieve this, a Box-Behnken design (BBD) was applied to optimize operating conditions and study the effects of three key factors: sorbent dosage (X1), initial dye concentration (X2), and solution pH (X3).

The physicochemical properties of the activated carbon showed a zero-charge (pHpzc) value of 10, and Bohm analysis indicated that the activated carbon surface contained a basic group. Kinetic analysis showed that the pseudo-second-order (PSO) model was the most appropriate for describing the adsorption process, with a high correlation coefficient ($R^2 = 0.99$).

The equilibrium data were applied to the Langmuir and Freundlich models, with the Langmuir model showing the best fit ($R^2 > 0.98$), indicating monolayer adsorption on a homogeneous

surface. The maximum adsorption capacity was found to be 142.85 mg/g. Thermodynamic parameters indicated that the adsorption process was endothermic.

Key words : Activated carbon, Adsorption, Red Congo, Box-Behnken design, isotherm.

المخلص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم فعالية الفحم النشط (CAP) ، المُحضّر من جذوع نخيل التمر، في إزالة صبغة الكونغو الأحمر (RC) من المحاليل المائية. لتحقيق هذا الهدف، تم استخدام تصميم تجريبي من نوع (BBD) Box-Behnken من أجل تحسين ظروف التشغيل ودراسة تأثير ثلاثة عوامل رئيسية: كتلة المادة الماصة (X1) ، التركيز الابتدائي للملوّث (X2) ، ودرجة حموضة الوسط (X3).

أظهرت نتائج تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للفحم النشط أن نقطة الشحنة الصفرية (pHPZC) تبلغ 10 وأشار تحليل بوم إلى احتواء سطح الكربون المنشط على مجموعة قاعدية. وقد بينت الدراسة الحركية أن نموذج شبه المرتبة الثانية هو الأنسب لوصف سلوك الامتزاز، حيث سجل معامل تطابق مرتفع ($R^2 = 0.99$).

أما فيما يخص التوازن، فقد أظهرت البيانات توافقاً كبيراً مع نموذج لانغموير ($R^2 > 0.98$) ، مما يشير إلى حدوث امتزاز في طبقة واحدة على سطح متجانس. تم تحديد السعة القصوى للامتزاز بـ 142.85 ملغم/غم. كما بيّنت النتائج أن العملية ذات طبيعة ماصة للحرارة (endothermique) .

الكلمات المفتاحية: الفحم النشط، الامتزاز، أحمر الكونغو، تصميم Box-Behnken،

Remerciements



Louange à Dieu qui, par Sa grâce, permet l'accomplissement des bonnes actions.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur **Monir Daoud**, pour son accompagnement tout au long de ce travail. Sa disponibilité, la pertinence de ses conseils et la rigueur de son encadrement ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail. Leurs remarques pertinentes et suggestions constructives ont permis d'enrichir et d'améliorer le contenu de ce mémoire.

Notre reconnaissance va aussi à l'ensemble du personnel du laboratoire de chimie, pour les moyens mis à notre disposition ainsi que pour l'environnement de travail favorable et motivant.

Nous n'oublions pas d'exprimer notre gratitude à nos camarades et amis pour leur soutien moral et leur esprit de collaboration tout au long de cette période.

Enfin, nous remercions du fond du cœur nos familles pour leur appui constant, leurs encouragements sincères et leurs prières, qui ont été pour nous une source inestimable de force et de motivation.

Que Dieu récompense chacun d'eux pour leur bienveillance.





Dédicace

À l'âme de mon cher père, **Moulay El Hassan Chellou,**

Mon pilier, mon refuge et mon modèle...

Tu m'as appris la force, l'honnêteté et la dignité.

Ton absence est une douleur constante, mais ton souvenir est une lumière éternelle dans mon cœur.

Qu'Allah t'accorde Sa miséricorde et t'ouvre les portes de Son vaste paradis.

À ma mère bien-aimée, **Khaira Daher,**

Source inépuisable d'amour, de sagesse et de prières.

Que Dieu te garde et te protège pour tout ce que tu es.

À mes sœurs chéries, **Fatna et Souad,**

Merci pour votre tendresse, votre présence et votre soutien fidèle.

À mes frères, **Lakhdar, Mohamed et Hamza,**

Vous êtes les piliers de ma vie. Que Dieu vous bénisse.

À ma partenaire dans ce voyage, Zahra

À mes amies les plus proches, **Fatima Zahra, Imane et Chaïma, Mansoura**

Merci pour votre écoute, votre joie de vivre et votre amitié sincère.

À mes camarades d'université : **Zahra, Roumaïssa, Amani, Ibtissem et Meriem,**

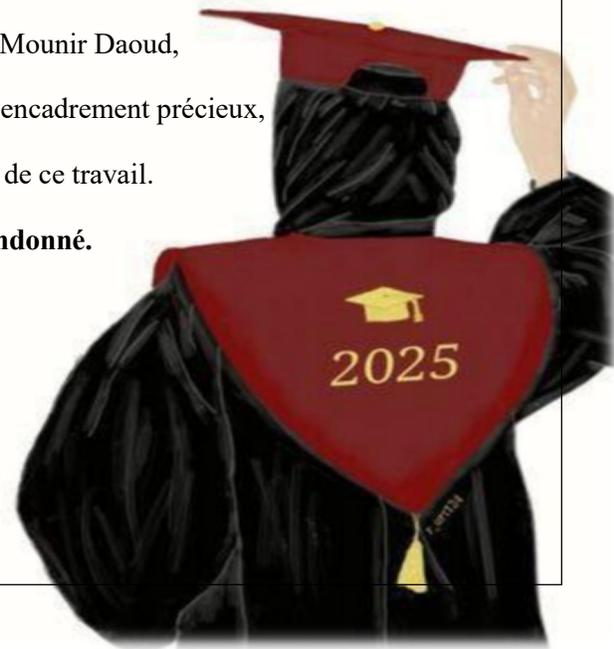
Merci pour votre compagnie, votre entraide et les souvenirs inoubliables.

Et à mon professeur et directeur de mémoire, Dr. Mounir Daoud,

Je vous exprime ma profonde reconnaissance pour votre encadrement précieux,

Votre disponibilité et votre soutien tout au long de ce travail.

À moi-même, pour ne jamais avoir abandonné.





Dédicace

Grâce à Dieu Tout-Puissant, le voyage de la poursuite s'est terminé, et je consacre cette humble réalisation :

À mon père à **Lahreche ABD ElKader**, Sindi à toutes les étapes de ma vie, et à ceux qui croient en mes capacités, et m'apprennent le sens de la responsabilité et du travail acharné.

À ma mère bien-aimée **Houria**, mon premier exemple, et la source de tendresse à ceux dont les supplications ont été le secret de mon succès.

Que Dieu la protège et lui accorde le pardon et le bien-être.

Merci pour votre soutien constant.

À mes chères sœurs : **Kaoutar, Maria, Imane** merci, mais pour vos encouragements constants.

À mon partenaire dans ce voyage : **Nesrine** et mes copines à l'université : **Amani, Roumaissa, Ibtissem, Meriem**.

À mon professeur et superviseurs du **Dr. DAOUD Mounir** pour son soutien et ses directives.

Pour moi-même, je consacre cette réalisation, parce que vous êtes patient, persévéré et ne vous êtes pas remis malgré tous les défis.

Merci pour votre existence et l'amour et le soutien qui ont eu un grand impact sur cette réalisation.

Fatima Zahra



Liste des tableaux

Table I 1: Le charbon actif se divise en trois types principaux	1
Table II 1: présente une comparaison des différentes étapes de purification de l'eau	1
Table III 1: Comparaison des technologies de décoloration des déchets en fonction de leurs avantages et inconvénients.....	1
Table III 2: Propriétés physico-chimiques du Rouge Congo	1
Table IV 1: Facteurs et domaine d'étude du plan expérience BBD	1
Table IV 2: Plan d'expérience BBD	1
Table V 1: Le tableau montre l'identification des groupes fonctionnels acides et basiques présents à la surface du charbon actif (CA).....	1
Table V 2: Matrice d'expériences et réponse	1
Table V 3: Analyse de Variance	1
Table V 4: Optimisation des conditions d'adsorption du RC par le CAP	73
Table V 5: Paramètres des modèles de la cinétique d'adsorption du RC par CAP	1
Table V 6: Paramètres des modèles d'adsorption de la Langmuir et de Freundlich pour le colorant RC	1
Table V 7: Paramètres thermodynamiques de l'adsorption du RC par le CAP.....	1

Liste des figures

Figure I 1: charbon actif granulé (CAG)	18
Figure I 2: charbon actif en poudre (CAP)	18
Figure I 3: charbon actif extrudé (CAE)	20
Figure I 4: Modèle schématique de la structure d'un charbon act	1
Figure I 5: Représentation schématique d'une unité structurale de Bas	1
Figure I 6: a) Structure tridimensionnelle du graphite b) Structure turbostratique d'un matériau Carboné.....	23
Figure I 7: Schémas de la texture des carbones turbostratiques suivant leur aptitude à la graphitisation	1
Figure I 8: Fonctionnalités de surface d'un carbone activé	1

Figure II 1: Représentation schématique des mécanismes de la sorption	1
Figure II 2: Les quatre types d'isothermes (d'après Giles 1974)	1
Figure II 3: Représentation linéaire du modèle cinétique du pseudo premier ordre	1
Figure II 4: Représentation graphique de l'équation de langmuir	1
Figure III 1: Indigo Figure III 2: Racine de garance Figure III 3: Plante de Safran	1
Figure IV 1: Le rachis de palmier dattier	1
Figure IV 2: Colorant Rouge Congo	1
Figure IV 3: Spectrophotomètre-UV visible modèle (Uvline 9400)	1
Figure IV 4: pH mètre	1
Figure IV 5: Etuve de séchage	1
Figure IV 6: Balance électronique sensible.....	56
Figure IV 7: Mécanisme d'agitation	1
Figure IV 8: Agitateur magnétique doté d'un Thermostat	1
Figure V 1: Détermination du pH _{PZC} du CAP	1
Figure V 2: Spectre d'absorption du Rouge Congo (RC)	1
Figure V 3: Courbe d'étalonnage relative à la solution aqueuse du Rouge Congo (RC)	1
Figure V 4: Surface des réponses des facteurs examinés (a) A vs B (b) A vs C (c) B vs C (2D, 3D)	72
Figure V 5: La cinétique d'adsorption de RC	1
Figure V 6: Modélisation de la cinétique d'adsorption du RC par pseudo premier ordre	1
Figure V 7: Modélisation de la cinétique d'adsorption du RC par pseudo second ordre	1
Figure V 8: Isotherme d'adsorption du Rouge Congo sur le CAP	1
Figure V 9: Linéarisation du modèle d'isotherme d'adsorption de langmuir	1
Figure V 10: Linéarisation du modèle d'isotherme d'adsorption de Freundlich	1
Figure V 11: Effet du pH sur la capacité d'adsorption du RC par le CAP	1
Figure V 12: Effet de la température sur l'adsorption du colorant RC par le CA.	1
Figure V 13: Variation des paramètres thermodynamiques de l'adsorption en fonction de la température.	1

Liste des abréviations

ANOVA : Analyse de la variance

CA : Charbon Actif.

CAG : Charbon Actif en Grain.

CAE : Charbon actif extrudé ou granulés.

CAP : Charbon actif issu des rachis de palmier dattier.

RC : Rouge Congo.

pH : potentiel d'hydrogène.

pH_{pzc} : potentiel d'hydrogène au point de charge zéro.

UV : Ultra-violet

Table des matières

Résumé	I
Remerciements	II
Dédicace	II
Liste de tableaux	III
Liste de figures	III
Liste des abréviations	IV
Table des matières	V
Introduction générale	14
Partie Théorique	16
Chapitre I: Charbon Actif.....	17
I 1) Définition du Charbon Actif.....	18
I 2) Types de charbons actifs	18
I 3) Production du charbon actif.....	20
I 3.1) Pyrolyse	20
I 3.2) Activation	20
I 4) Propriétés du charbon actif.....	21
I 4.1) Structure et Texture du charbons actif.....	21
I 5) Nature chimique de la surface d'un charbon actif.....	24
I 6) Applications du charbon actif.....	25

Chapitre II: Phénomène d'adsorption	27
II. 1 Définition	28
II. 2 Différents types d'adsorption	28
II 2.1 Adsorption physique	29
II 2.2 Adsorption chimique	29
II .3 Description du mécanisme d'adsorption	29
➤.. Diffusion externe	29
➤.. Diffusion interne	30
➤.. Diffusion intra-particulaire	30
II .4 Facteurs influençant l'adsorption	30
II 4.1 Conditions expérimentales	30
II 4.2 Nature du charbon actif	31
II 4.3 Propriétés de l'adsorbat	31
II .5 Modélisation de l'adsorption	33
II .6 Isothermes d'adsorption	33
a) Isotherme de type S	33
b) Isotherme de type L	33
c) Isotherme de type H	33
d) Isotherme de type C	33

II .7 Modélisation de l'adsorption	33
II 7.1 Modèle de Freundlich	34
II 7.2 Modèle de Langmuir	35
II. 8 Modèles cinétiques	35
II 8.1 Modèle cinétique du pseudo premier ordre (PPO).....	35
II 8.2 Modèle cinétique du pseudo second ordre (PSO).....	37
II .9 Thermodynamique d'adsorption	38
II .10 Applications et limitations de l'adsorption	38
Chapitre III: Colorants	41
III. 1 Classification des colorants	42
III .2 Impact des colorants sur l'environnement	46
III 2.1) Toxicité des colorants	46
III 2.2) Toxicité sur la santé humaine	46
III. 3) Techniques de traitement des colorants	47
III 3.1) Adsorption comme méthode efficace	47
III 3.2) Comparaisons de processus	47
Partie Expérimentale	52
Chapitre IV: Méthodes et Techniques	50
IV. 1 Introduction	51
IV .2 Objectif du travail	51
IV. 3 Produit et Matériels	51
IV 3.1 Carbon activé CAP (adsorbant).....	51
IV 3.2 Rouge Congo RC (adsorbat).....	52
IV .4 Détermination de la charge point zéro pH pZC.....	55
IV. 5 Dosage de Boehm	56
IV .6 Etude de l'adsorption du Rouge Congo par le charbon actif CAP	56
IV. 7 Élaboration du modèle	58
IV .8 Préparation des solutions Rouge Congo.....	58
IV. 9 Courbe d'étalonnage	59
IV. 10 Cinétique d'adsorption	59
IV. 11 Isotherme d'adsorption	60

IV .12 Effet du pH.....	61
IV .13 Effet de la température	61
Chapitre V: Résultats et discussion	62
V. 1 Introduction	63
V. 2 Caractérisation du charbon actif (pH_{PZC})	63
V .3 Dosage de Boehm	64
V. 4Analyse d'absorbance du Rouge Congo	66
V 4.1 le principe de la methodes Spectro	67
V .5 Dosage de la solution du Rouge Congo (RC)	67
V. 6 Plan d'expérience	66
V 6.1 Matrice d'expérience	66
V 6.2 Analyse de la variance (ANOVA)	67
V 6.3 Modèle mathématique	68
V 6.4 Surface de réponse et optimisation	72
V .7 Etude de l'adsorption du Rouge Congo par le charbon actif CAP	73
V 7.1cinétique d'adsorption du RC	73
V 7.2 Modélisation de la cinétique d'adsorption	74
V 7.2.1 Application du modèle cinétique du pseudo premier -ordre (PPO)	75
V 7.2.2Application du modèle cinétique du pseudo second -ordre (PSO)	75
V. 8 Etude de l'isotherme d'adsorption du Rouge Congo	77
V 8.1 Modélisation des isothermes d'adsorption	77
V 8.1.1 Modèle de Langmuir	78
V 8.1.2Modèle de Freundlich	78
V 8.1.3Analyse des paramètres de l'isotherme d'adsorption	79
V. 9 Etude de l'effet du pH.....	80
V .10 Etude de l'effet de la température	81
V. 11 Etude thermodynamique	81
VI Conclusion	84
VII Références	85

Introduction générale

Introduction

Ces dernières années, l'expansion industrielle et l'intensité des activités humaines ont entraîné une pollution généralisée des ressources en eau, menaçant directement les écosystèmes aquatiques et la santé humaine. Parmi les polluants de plus en plus préoccupants figurent les colorants synthétiques, largement utilisés dans diverses industries telles que le textile, l'agroalimentaire et l'industrie pharmaceutique. Ces composés sont stables, non biodégradables et détectables même à l'état de traces, ce qui rend leur élimination urgente sur le plan environnemental.

Parmi les nombreuses techniques de traitement, l'adsorption s'est imposée comme l'une des méthodes les plus efficaces, simples et économiques pour éliminer ces colorants. Le charbon actif est l'un des adsorbants les plus utilisés en raison de sa grande surface spécifique, de sa structure poreuse et de sa grande capacité d'adsorption, comme le confirment de nombreuses études sur l'adsorption de colorants sur des matériaux à base de carbone [1].

Dans ce contexte, ce travail vise à évaluer l'efficacité du charbon actif préparé à partir de déchets de palmier dattier pour l'adsorption du colorant Rouge Congo (RC) en milieu aqueux. Les conditions du procédé ont été optimisées grâce à un modèle Box-Behnken, qui permet d'étudier l'influence des variables opérationnelles clés et de déterminer les conditions d'adsorption optimales.

Le cadre théorique de cet ouvrage aborde également les thèmes clés suivants :

- * Présentation du charbon actif, de ses types, de ses méthodes de préparation et de ses propriétés.
- * Explication du mécanisme d'adsorption, de ses types et des facteurs qui l'influencent.
- *Présentation complète du Rouge Congo, notamment de sa structure, de ses propriétés et de ses impacts environnementaux.

Partie Théorique

Chapitre I:

Charbon Actif

I.1) Définition du Charbon Actif

Le charbon actif (CA), est un matériau à base de carbone, à faible coût fabriqué à partir d'une variété de matières premières telles que (charbon, tourbe, coque de noix de coco, bois dur et résine phénolique) peut être utilisé comme catalyseur électrochimique pour la réduction de l'oxygène [2] .

Les matériaux en carbone ont une grande capacité à absorber les micro-ondes, ce qui les rend faciles à chauffer et à traiter avec cette méthode pour améliorer leur porosité et leur capacité d'absorption, les rendant efficaces pour purifier l'eau et l'air des polluants [3].

I.2) Types de charbons actifs

Le charbon actif se divise en trois principaux types, chacun possédant une forme et des propriétés spécifiques, qui déterminent son application dans diverses applications. Le tableau suivant illustre ces types :

Table I 1: Le charbon actif se divise en trois types principaux :

<p>Charbon actif en grains (CAG) :</p>	<ul style="list-style-type: none"> _ Il est constitué de particules irrégulières dont la taille varie de 0,2 à 5 mm. _ Il est utilisé dans des applications telles que le traitement des eaux usées, la purification de l'air gazeux et l'élimination des polluants [4]. _ Il présente une faible densité apparente et est utilisé pour une utilisation à long terme en raison de sa grande capacité d'absorption [5] . <div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"><u>Figure I 1:</u> charbon actif granulé (CAG) [4].</p>
---	--

Charbon actif en poudre (CAP) :

- _ Particules fines d'un diamètre inférieur à 0,177 mm
- _ Principalement utilisé dans les applications en phase liquide et le traitement des flux de gaz.
- _ Moins cher (2 à 3 fois) que (CAG) [6].



Figure I 2: charbon actif en poudre (CAP) [6]

charbon actif extrudé (CAE):

- _ il s'agit un charbon cylindrique dont le diamètre varie de 0,8 à 5 mm, principalement utilisé dans les applications gazières en raison de sa résistance élevée, de sa faible perte de pression et de sa résistance à la poussière [7].



Figure I 3: charbon actif extrudé (CAE) [8]

I. 3) Production du charbon actif

Le charbon actif peut être fabriqué à partir de diverses sources, telles que la carbonisation et l'activation :

I 3.1) Pyrolyse

Il s'agit de la décomposition thermique de la matière organique sous vide ou sous atmosphère inerte à des températures comprises entre 400 et 1000°C, où l'hydrogène et l'oxygène sont éliminés sous l'influence de la chaleur, ce qui augmente la concentration de carbone qui se forme dans les feuillets aromatiques plats.

La qualité et les caractéristiques du produit dépendent :

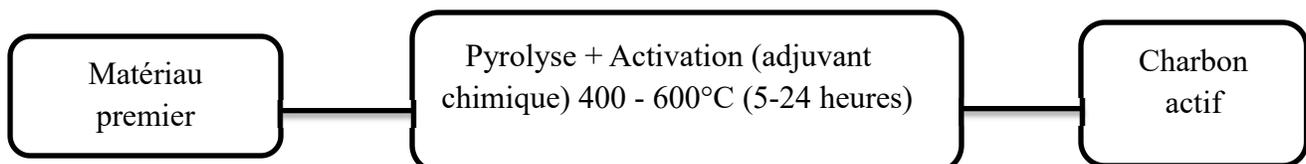
- Vitesse de chauffe du four
- Température finale de pyrolyse
- Durée de cuisson dans le four [9]

I 3.2) Activation

Cette étape vise à éliminer les composés organiques restants dans les pores du carbone, ce qui augmente sa surface et améliore sa capacité d'absorption. L'activation est réalisée à l'aide de deux méthodes principales :

I 3.2.1) L'activation chimique

L'activation chimique de la matière première se déroule entre 400 et 600 °C à l'aide d'agents tels que l'acide phosphorique ou le chlorure de zinc, qui agissent comme agents dessiccants et oxydants pour favoriser le développement de la structure poreuse du carbone et augmenter sa surface [10].



Le processus de fabrication utilisant ces deux procédés se termine par la granulation, le tamisage et le conditionnement [4].

I 3.2.2) Activation physique

L'activation physique de la vapeur affecte le développement de la structure des pores et de la chimie de surface du charbon actif extrait, et les résultats ont montré que l'augmentation de la température ou du temps d'activation favorise la formation de micropores et dilate les pores existants, réduisant ainsi la surface et le volume total des pores [11].

Cela se fait en deux étapes : comme le montre la figure suivante :



Le carbone est consommé par la réaction :



Le procédé physique se caractérise par un faible rendement global [4] .

I. 4) Propriétés du charbon actif

I 4.1) Structure et Texture du charbons actif

Au cours des processus de carbonisation et d'activation, la structure du charbon actif subit une série de transformations. Dès 400°C, les réactions de polymérisation et de polycondensation s'amorcent, entraînant une augmentation de la teneur en carbone sous forme de cycles aromatiques condensés.

L'élévation de la température favorise une réorganisation de la matière organique, conduisant à la formation d'une structure solide. Celle-ci résulte d'un agencement désordonné des feuillets de carbone, générant une structure poreuse qui peut encore contenir certains hétéroatomes tels que l'hydrogène, l'oxygène ou le soufre.

(Figure I 4) présente le modèle proposé par Stoeckli [12] avec des plans de carbone formant les structures microporeuses.

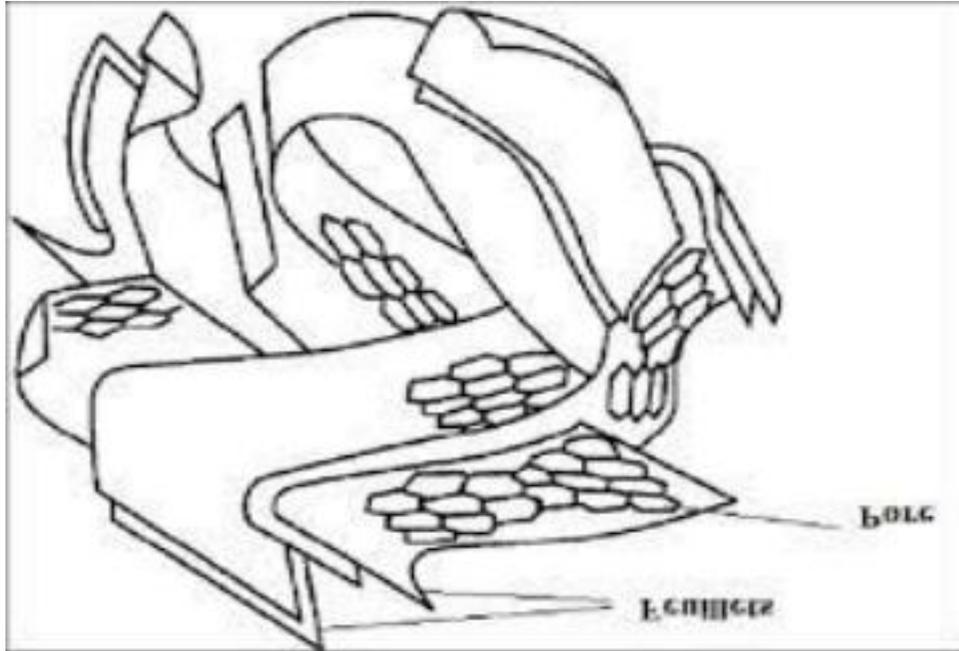


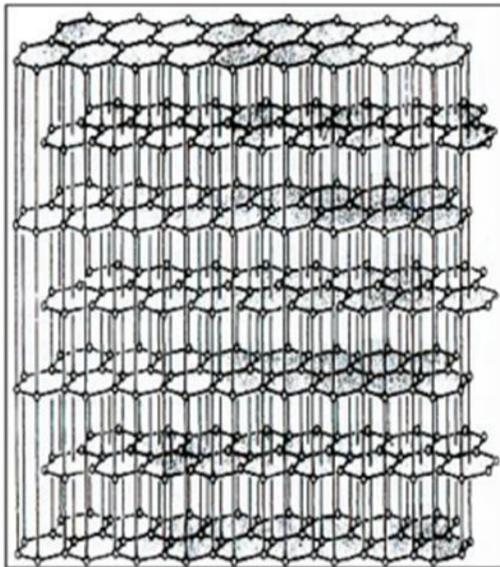
Figure I 4: Modéle schématique de la structure d'un charbon actif

À mesure que la température continue d'augmenter, la structure du charbon actif devient de plus en plus poreuse, entraînant une compression des parois des pores et, par conséquent, une réduction de leur volume.

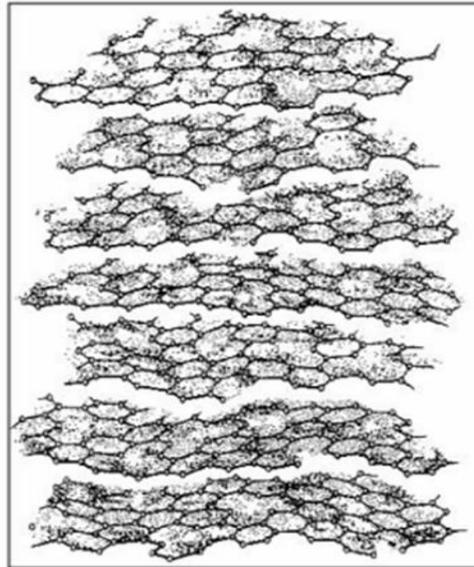
Au-delà de 1000°C, la structure évolue vers une forme cristalline de type turbostratique, un concept introduit par Briscoe et Warren [13]. Cependant, l'organisation des cristallites, également appelées Unités Structurales de Base (USB) (Figure I 5), reste moins ordonnée que celle du graphite (Figure I 6). Cette imperfection structurale confère au charbon actif une porosité élevée, avec des pores de tailles variées, lui permettant d'avoir une grande capacité d'adsorption.



Figure I 5: Représentation schématique d'une unité structurale de Bas



a)



b)

Figure I 6: a) Structure tridimensionnelle du graphite b) Structure turbostratiue d'un matériau Charbon

Sous l'effet d'un traitement thermique à très haute température ($1000^{\circ}\text{C} < \text{THT} < 3000^{\circ}\text{C}$), un carbone turbostratique peut progressivement évoluer vers une structure plus ou moins proche de celle du graphite.

La capacité d'un solide à se transformer en graphite dépend directement de la distance entre les plans graphitiques et du degré d'orientation des cristallites les uns par rapport aux autres. Franklin [14] distingue trois catégories de carbone selon cette aptitude :

- Les carbones graphitisables.
- Les carbones partiellement graphitisables.
- Les carbones non graphitisables.

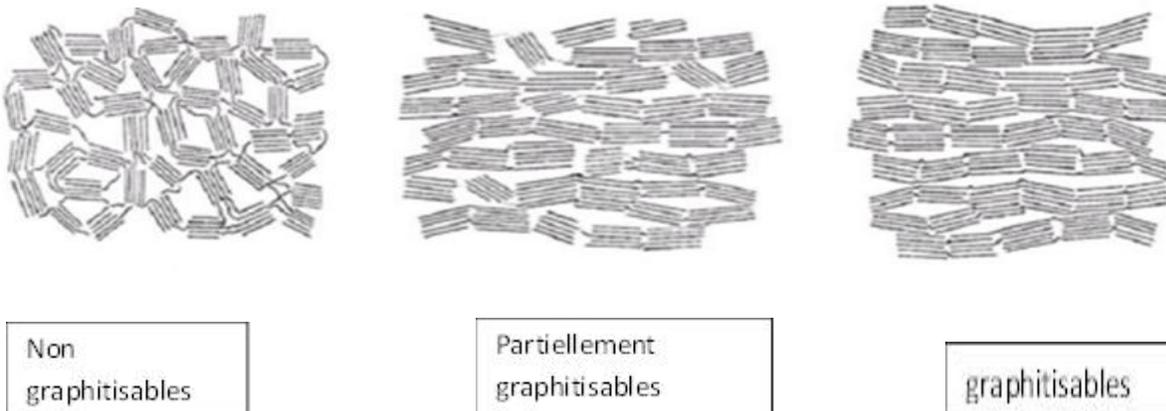


Figure I 7: Schémas de la texture des carbones turbostratiques suivant leur aptitude à la graphitisation

I.5) Nature chimique de la surface d'un charbon actif

La surface du charbon actif présente une composition chimique diversifiée contenant des groupes fonctionnels comme le montre (la figure I 8), ce influence sa réactivité et ses propriétés d'adsorption. Sa surface peut présenter un caractère acide ou basique, ainsi que des zones hydrophiles et hydrophobes, ce qui améliore son absorption de diverses substances. Sa composition chimique peut également être modifiée pour améliorer ses performances en matière

d'élimination des polluants, de purification et de catalyse, ce qui le rend polyvalent sur le plan environnemental et industriel

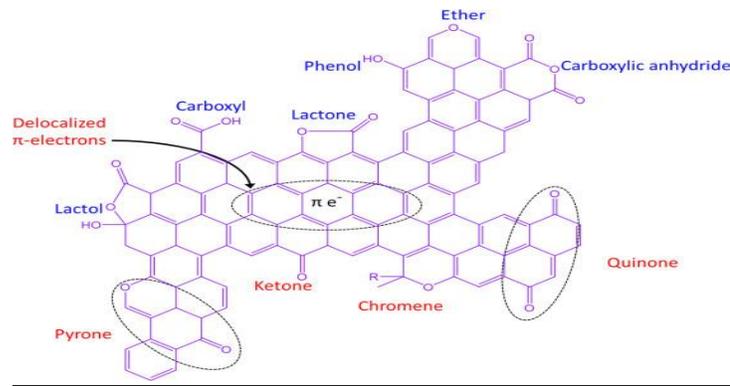


Figure I 8: Fonctionnalités de surface d'un carbone activé [15]

I. 6) Applications du charbon actif

Le charbon actif est un adsorbant efficace utilisé dans plusieurs domaines, notamment [16]:

a) Traitement des eaux usées

- Il est couramment utilisé en complément au traitement biologique, notamment pour éliminer les colorants et les matières organiques résiduelles.

-L'utilisation de charbon actif dans le traitement des eaux industrielles permet de purifier les eaux utilisées dans les secteurs pharmaceutique, chimique et alimentaire.

-Lorsque les techniques biologiques sont inefficaces, nous avons recours au traitement des eaux usées industrielles, qui élimine les composés toxiques non biodégradables [17].

b) Purification de l'air et des gaz

-Il est utilisé pour absorber les composés organiques volatils (COV), les odeurs et les gaz toxiques, améliorant ainsi la qualité de l'air.

-Il est utilisé dans diverses industries, notamment l'automobile, les systèmes de chauffage et de climatisation (CVC), ainsi que les industries pharmaceutique et chimique

- Efficace pour absorber les métaux toxiques tels que le plomb et le mercure, ainsi que les colorants et autres contaminants provenant des industries de l'eau et des produits chimiques.
- C'est l'une des meilleures technologies disponibles pour réduire les émissions industrielles et respecter les normes environnementales modernes **[18]** .

Chapitre II:

Phénomène d'adsorption

II.1 Définition

L'adsorption est un phénomène de surface où des molécules d'un fluide se fixent ou s'accumulent à la surface d'un solide.

Ce procédé représente une méthode efficace pour séparer les mélanges gazeux ou liquides dont les composants diffèrent par leur structure chimique. Elle est largement utilisée dans divers domaines, notamment la dépollution et la purification, les industries pétrolières, pétrochimiques et chimiques, ainsi que dans des applications environnementales et pharmaceutiques.

Le solide sur lequel se produit l'adsorption est appelé adsorbant, tandis que la substance adsorbée est nommée adsorbat. Pour d'éviter toute confusion, nous utiliserons plus couramment soluté.

II.2 Différents types d'adsorption

Deux types d'adsorption peuvent se produire selon la manière dont les molécules de fluide à la surface du support : Adsorption physique, Adsorption chimique.

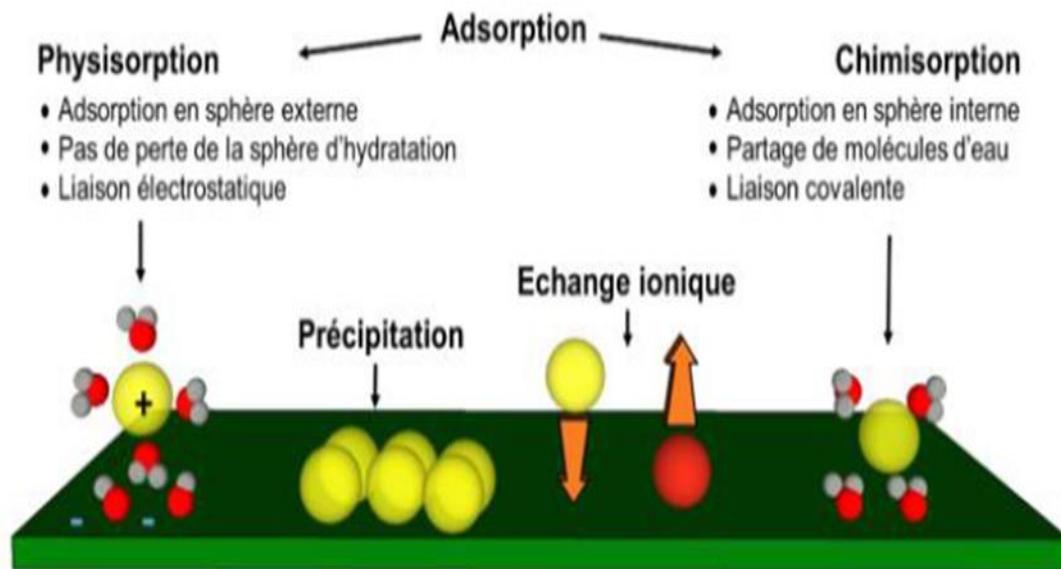


Figure II 1: Représentation schématique des mécanismes de la sorption.

II 2.1 Adsorption physique

Également appelée physisorption, cette forme d'adsorption se caractérise par une faible énergie de liaison, généralement inférieure à 40 kJ/mol. Elle repose sur l'établissement de liaisons de type Van der Waals.

Dans ce processus, le temps de rétention de la substance adsorbée est relativement court, et la surface de l'adsorbant peut être recouverte de plusieurs couches moléculaires du produit adsorbé.

II 2.2 Adsorption chimique

Également appelée chimisorption, cette forme d'adsorption implique une énergie de liaison élevée, généralement supérieure à 40 kJ/mol. Elle repose sur la formation de liaisons covalentes plus stables et permanentes entre l'adsorbant et la molécule adsorbée.

Les mécanismes les plus courants de la chimisorption comprennent la protonation et l'échange d'ions. Contrairement à la physisorption, ce type d'adsorption se caractérise par un temps de rétention plus long. De plus, seule la première couche de molécules adsorbées est liée chimiquement à la surface, tandis que les éventuelles couches supplémentaires sont retenues par physisorption [19].

II. 3 Description du mécanisme d'adsorption

Lors de l'adsorption d'une espèce sur un solide, le transfert de molécules organiques ou inorganiques de la phase liquide vers les sites actifs de l'adsorbant se produit. [20] Ce processus se déroule en **quatre étapes principales** :

➤ Diffusion externe

Les molécules de l'adsorbat migrent de la phase liquide externe vers la phase liquide située à proximité de la surface de l'adsorbant, par **diffusion** et **convection**.

➤ **Diffusion interne**

Le soluté diffuse à travers le film liquide jusqu'à atteindre la surface externe de l'adsorbant. Ce transfert est caractérisé par un **coefficient de transfert K_f**

➤ **Diffusion intra-particulaire**

L'adsorbat se déplace à l'intérieur des particules de l'adsorbant, selon deux mécanismes :

- **À l'état libre** après désorption, il migre dans la phase liquide intra particulaire (**coefficient de diffusion D_f**).
- **À l'état adsorbé** il se déplace d'un site d'adsorption à un autre sur la surface (**coefficient de diffusion D_s**).

✓ **Adsorption finale**

Une fois fixée sur la surface des pores, la molécule adsorbée est considérée comme **immobile**, marquant l'aboutissement du processus d'adsorption.

II.4 Facteurs influençant l'adsorption

II 4.1 Conditions expérimentales

✓ **La surface spécifique**

La surface spécifique est un paramètre fondamental dans la caractérisation des solides et des matériaux poreux. Elle représente la surface accessible par unité de masse de l'adsorbant [21] .

Dans le domaine de l'adsorption, une surface spécifique élevée est généralement recherchée afin d'optimiser la capacité d'adsorption du matériau. Plus la surface spécifique est grande, plus le nombre de sites actifs disponibles pour l'adsorption est important, ce qui améliore l'efficacité du processus

✓ **Influence de la température**

L'adsorption est généralement un processus exothermique, ce qui signifie qu'elle s'accompagne d'un dégagement de chaleur. En l'absence de réactions chimiques complexes, une

augmentation de la température tend à favoriser la désorption, réduisant ainsi l'efficacité de l'adsorption. En revanche, dans le cas d'une adsorption activée (chimisorption), l'équilibre d'adsorption n'est pas atteint immédiatement. Dans ce cas, une élévation de la température peut accélérer le processus et favoriser l'adsorption.

✓ pH

Le pH détermine le degré d'ionisation des métaux dans l'eau et par conséquent leur mobilité qui influe sur leur adsorption [21].

✓ Concentration

À faibles concentrations dissoutes, on observe en général que le taux d'adsorption obéit à la loi de Freundlich.

II 4.2 Nature du charbon actif

❖ Adsorbants Charbon actif

Disponible sous forme de **poudre** ou de **grains**, le charbon actif est obtenu par un traitement spécifique, notamment par **pyrolyse**, à partir de charbons naturels (anthracite, tourbe) ou artificiels (coques de noix de coco carbonisées).

présente deux propriétés essentielles :

1. **Un fort pouvoir adsorbant**, lui permettant de retenir diverses substances.
2. **Une capacité catalytique**, qui favorise certaines réactions chimiques [22].

II 4.3 Propriétés de l'adsorbat

• Taille des molécules adsorbées

La disposition des molécules à la surface du matériau joue un rôle déterminant dans le processus d'adsorption. Par exemple, dans des conditions de fort recouvrement (c'est-à-dire à haute concentration du substrat), les acides et alcools à longue chaîne carbonée peuvent se fixer à la verticale sur un support grâce à leurs groupements fonctionnels :

- **Groupement carboxylique (-COOH) pour les acides**
- **Groupement hydroxyle (-OH) pour les alcools**

Cette orientation spécifique favorise une fixation plus forte du substrat [23].

D'un point de vue mécanique, la taille de la molécule adsorbée est également un facteur clé : afin de permettre à la molécule d'accéder efficacement aux pores de l'adsorbant, son diamètre doit être inférieur à celui du pore. Cela garantit une diffusion rapide du soluté à l'intérieur du matériau poreux et facilite son accès aux sites actifs d'adsorption.

✓ **Solubilité**

Des recherches ont démontré que la constante d'adsorption tend à être plus élevée lorsque la solubilité du composé diminue. En d'autres termes, les substances moins solubles dans le solvant s'adsorbent plus facilement sur la surface de l'adsorbant.

Par ailleurs, plusieurs études ont mis en évidence différentes corrélations entre la constante d'adsorption et certaines caractéristiques des molécules organiques, telles que leur polarité, leur masse moléculaire ou encore leur affinité avec la surface de l'adsorbant.

✓ **Polarité et polarisabilité de la molécule adsorbée**

L'adsorption est fortement influencée non seulement par les dimensions du composé à capturer (surface, volume), mais aussi par la nature des groupements fonctionnels qu'il porte (alcools, aldéhydes, cétones, acides carboxyliques, amines, soufre, halogènes...). Ces groupements induisent des effets de polarisabilité plus ou moins prononcés, influençant directement l'interaction avec l'adsorbant

De nombreuses études ont été menées afin d'établir des relations quantitatives entre la structure moléculaire et les paramètres d'adsorption, tels que la capacité d'adsorption et l'énergie d'interaction.[24,25] Par ailleurs, certaines molécules hautement réactives peuvent subir des réactions d'oxydation à la surface de l'adsorbant, qui agit alors comme catalyseur.

Enfin, lorsqu'un mélange de composés est présent, une compétition d'adsorption s'établit entre les différentes espèces, ce qui peut entraîner une diminution des capacités d'adsorption unitaires.

II. 5 Modélisation de l'adsorption

II 6 Isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption sont des représentations graphiques montrant la relation entre la quantité adsorbée (**q_e en mg/g**) et la concentration résiduelle de l'adsorbat à l'équilibre [26].

Elles sont généralement classées en quatre catégories principales, connues sous les appellations **L, H, S** et **C**.

a) Isotherme de type S

À faible concentration, ces isothermes montrent une courbe une concavité orientée vers le haut, indiquant une adsorption favorisée à des concentrations plus élevées.

b) Isotherme de type L

Ce type d'isotherme est le plus courant lorsqu'il y a une adsorption modérée. Il se caractérise par une diminution progressive du coefficient d'adsorption, souvent observée lorsque les molécules d'adsorbat s'alignent parallèlement à la surface de l'adsorbant.

c) Isotherme de type H

Dans sa phase initiale, cette isotherme montre une trajectoire presque verticale, suggérant une adsorption très élevée même à des concentrations extrêmement faibles du soluté en solution. Ce phénomène traduit une forte interaction entre les molécules adsorbées et la surface de l'adsorbant.

d) Isotherme de type C

Ce type d'isotherme se caractérise par une forme linéaire, indiquant que la quantité adsorbée est directement proportionnelle à la concentration du soluté en solution. Ce comportement est

observé lorsque le solvant et le soluté entrent en compétition pour occuper les sites d'adsorption sur la surface de l'adsorbant.

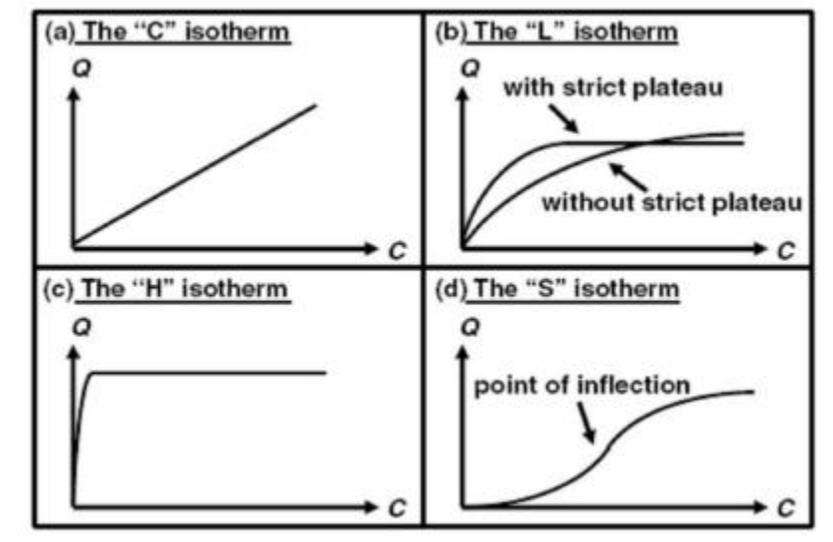


Figure II 2: Les quatre types d'isothermes (d'après Giles 1974) [27.28]

II .7 Modélisation de l'adsorption

Modélisation de l'adsorption : Les modèles théoriques et empiriques les plus courants pour décrire les caractéristiques d'un système adsorbant/adsorbé sont les suivants :

II 7.1 Modèle de Freundlich

L'isotherme d'adsorption de Freundlich, développée en 1962, est couramment utilisée pour modéliser l'adsorption sur des surfaces hétérogènes, favorisant ainsi une adsorption en plusieurs couches

Ce modèle est largement applicable, car il permet de décrire l'adsorption des solutés dans différentes conditions expérimentales [29].

La formule Freundlich est la suivante :

$$Q_e = k_f C_e^{1/n} \quad (1)$$

K_f et n : Les constantes de Freundlich sont indicatives de l'intensité et de la capacité d'adsorption

II 7.2 Modèle de Langmuir

Ce modèle est l'un des plus couramment utilisés pour décrire les isothermes d'adsorption. Il repose sur plusieurs hypothèses de base :

- L'adsorbant possède une capacité maximale d'adsorption (Q_m) limitée.
- Tous les sites actifs sont identiques et peuvent fixer une seule molécule de soluté, impliquant une adsorption en monocouche.
- Aucune interaction n'existe entre les molécules adsorbées [30].

$$\frac{q_e}{Q_m} = \frac{k_L \times C_e}{1 + k_L \times C_e} \quad (2)$$

K_L : la constante d'équilibre de Langmuir (l/mg. Min)

Q_m : la capacité maximum d'adsorption (mg/g).

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

II.8 Modèles cinétiques

Divers modèles de la cinétique d'adsorption sont utilisés afin d'étudier les mécanismes du processus d'adsorption tel que la réaction chimique, la diffusion et le transfert de masse. [31,32] Deux modèles cinétiques sont souvent utilisés pour l'analyse des résultats expérimentaux.

II 8.1 Modèle cinétique du pseudo premier ordre (PPO)

Le modèle cinétique du pseudo premier ordre peut être exprimé par l'équation suivante

[33]

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

Après intégration de l'équation entre les instants 0 et t on obtient :

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (4)$$

Avec

K_1 : Constante de vitesse du pseudo premier ordre (heure⁻¹)

t : Temps de contact (heure)

q_e : capacité d'adsorption (mg/ g) du matériau en mono couche (équilibre expérimental)

q_t : Quantité adsorbée (mg / g) par unité de masse du sorbant à l'instant t.

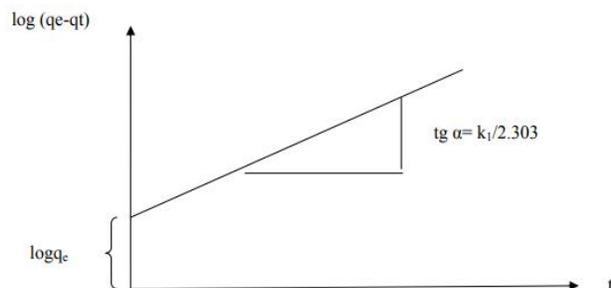


Figure II 3: Représentation linéaire du modèle cinétique du pseudo premier ordre

II 8.2 Modèle cinétique du pseudo second ordre (PSO)

Le modèle cinétique du pseudo second ordre de HO et Mc Kay [34, 35] est le suivant :

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{qt} \quad (5)$$

L'intégration de cette équation suivie de sa linéarisation nous donne :

Avec

k_2 : Constante de vitesse apparente du pseudo second ordre

q_e : Capacité d'adsorption du matériau à la saturation (mg / g)

q_t : Quantité de colorant adsorbée (mg / g) par le matériau à l'instant t.

h : qui correspond à $k_2 q_e^2$, est la vitesse initiale d'adsorption (mg/g h)

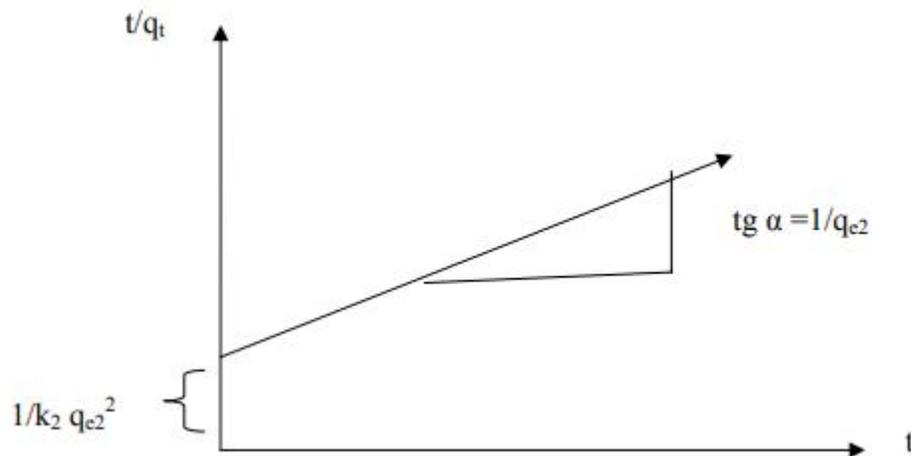


Figure II 4: Représentation graphique de l'équation de langmuir

I. 9 Thermodynamique d'adsorption

Un processus thermique est toujours associé à l'adsorption, qu'il soit exothermique ou endothermique. Le critère essentiel pour distinguer la chimisorption de la physisorption est la mesure de la chaleur d'adsorption. On peut calculer la chaleur d'adsorption (ΔH°) en utilisant l'équation de Van' Thoff

$$\text{Log } K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (6)$$

$$K_c = \frac{Q_e}{C_e} \quad (7)$$

Avec :

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (8)$$

K_c : constante d'équilibre.

ΔH° : variation de l'enthalpie (KJ/mole).

ΔS° : variation de l'entropie (J/mol. K).

ΔG° : La variation de l'énergie libre (KJ/mol).

C_0 : concentration initiale de l'adsorbat (mg/L).

C_e : concentration à l'équilibre de l'adsorbat (mg/L).

T : température absolue (K).

R : constante des gaz parfaits.

II 10 Applications et limitations de l'adsorption

L'adsorption est une technique efficace pour éliminer les polluants de l'eau, notamment les matières organiques, les métaux lourds et les composés chimiques. Il existe d'autres techniques de traitement de l'eau :

Table II 1: présente une comparaison des différentes étapes de purification de l'eau [36]

Technologie	Exemples	Avantages	Inconvénients
Coagulation/ Floculation	Alun, FeCl ₃ , Chaux	<ul style="list-style-type: none"> • Équipement simple et facile à utiliser. • Réduction rapide des couleurs. 	<ul style="list-style-type: none"> • La présence de boues. • La nécessité d'ajouter des produits chimiques. • Produits non recyclables. • Décoloration des particules.
Filtration sur Membranes	Osmose inverse, Nanofiltration, Microfiltration, Ultrafiltration.	<ul style="list-style-type: none"> • Application rapide qui ne nécessite pas beaucoup de temps. • Aucun produit chimique n'est utilisé. • Gros investissement. • Réduire la couleur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Contamination rapide des membranes. • La nécessité d'opérations de traitement préalables.
Adsorption	Carbone activé, Silice	<ul style="list-style-type: none"> • Élimination efficace des couleurs. • Technique simple et facile à appliquer. • Utilisez des matériaux absorbants peu coûteux. • Capacité à traiter de grandes quantités. 	<ul style="list-style-type: none"> • Le renouvellement des adsorbants est coûteux, voire impossible. • Processus sélectif. • Les investissements requis sont élevés. • Faible efficacité avec certains types de colorants.

a) Problèmes liés à la saturation du charbon actif et méthodes de régénération

Lorsque le charbon actif atteint le point de saturation en contaminants, il devient nécessaire de le remplacer ou de le régénérer, car l'élimination par incinération ou par enfouissement n'est pas une solution économiquement et écologiquement appropriée. La production de nouveau carbone consomme des ressources importantes et entraîne des émissions de dioxyde de carbone, ce qui la rend non durable à long terme. Par conséquent, la régénération du charbon actif est une alternative efficace qui contribue à réduire la consommation d'énergie et l'impact environnemental, ce qui en fait une option plus durable par rapport à la production répétée de nouveaux adsorbants.

Les procédés de régénération sont basés sur l'élimination des contaminants et la restauration de la capacité d'adsorption initiale du charbon actif, en utilisant différentes techniques (augmentation de la température ou extraction par solvant) et/ou décomposition du contaminant (processus chimique, électrochimique ou microbiologique). Des gaz tels que la vapeur ou le dioxyde de carbone, des courants électriques ou encore des micro-organismes peuvent également être utilisés pour contribuer à décomposer les contaminants. Certaines technologies sont matures et largement utilisées, d'autres en sont au stade de la recherche et du développement[37].

Chapitre III:

Colorants

III .1 Classification des colorants

Les colorants sont des substances chimiques utilisées pour teindre divers matériaux tels que les textiles, le papier et les plastiques. Ils peuvent être classés en deux grandes catégories :

a) Colorants naturels

La plupart des colorants utilisés proviennent de sources naturelles, par exemple issus de plantes, d'arbres ou de lichens. Les produits naturels d'origine animale comprennent un colorant provenant d'un insecte appelé cochenille. De plus, les mollusques de certains animaux présentent une teinture violette. Certains pigments peuvent également être produits des micro-organismes [38]

Indigo ou pastel : donne la couleur bleue.

Racine de garance : donne une couleur rouge.

Safran : donne une couleur jaune [39].



Figure III 1:Indigo



Figure III 2: Racine de garance



Figure III 3: Plante de Safran

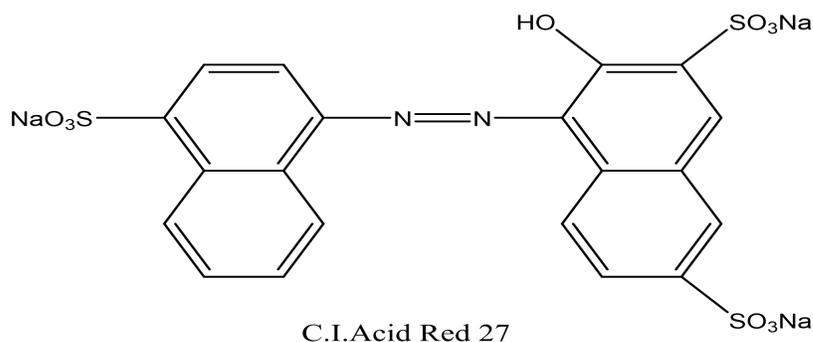
b) Colorants synthétiques

Avec le développement de la chimie, des colorants synthétiques ont commencé à apparaître, dont la forte demande dans de nombreux secteurs industriels a contribué à leur étude. L'apparition des colorants synthétiques remonte au colorant Mauvéine, découvert en 1856 par le chimiste britannique W.H. Perkin, de couleur violette [40]. Ce colorant est synthétisé à partir d'aniline présente dans le goudron de houille, qui produit ledit colorant en présence d'acide sulfurique et de bichromate de potassium [41].

Les colorants d'origine synthétique sont des molécules complexes qui peuvent être anioniques ou cationiques. Ils appartiennent à des dizaines de familles chimiques différentes, dont certaines [42].

➤ Les colorants acides ou anioniques

Ces colorants sont solubles dans l'eau grâce aux chaînes sulfonates ou carboxyles qu'ils contiennent, ce qui les rend capables de teindre des fibres animales comme la laine et la soie, ainsi que certaines fibres acryliques modifiées comme l'acétate et le nylon dans un bain faiblement acide. Les colorants adhèrent aux fibres grâce à une liaison ionique entre le groupe acide sulfonique du colorant et les groupes amino du tissu. Il convient de noter que ces colorants appartiennent à une ou deux des classes les plus importantes : les colorants azoïques et les anthraquinones.

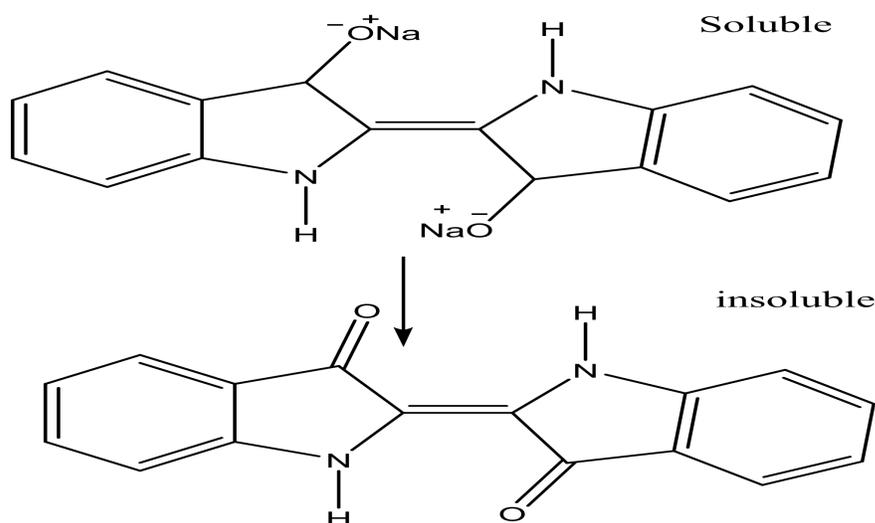


➤ **Les colorants basiques (cationiques)**

Ce sont des sels d'amines organiques qui se dissolvent bien dans l'eau. Ces colorants se lient aux fibres grâce à une interaction entre les sites cationiques du colorant et les sites anioniques des fibres. Bien que leur utilisation dans la teinture de la laine et de la soie ait diminué, elle est redevenue populaire grâce à son efficacité dans la teinture des fibres acryliques, donnant des couleurs vives et une grande durabilité.

➤ **Les colorants de cuve**

Ils sont insolubles dans l'eau et sont transformés en dérivés incolores par un procédé de réduction basique afin de pénétrer dans les fibres. Après le processus de teinture, le colorant est réoxydé pour restaurer sa forme insoluble au sein du tissu. Ces colorants sont très résistants aux agents affectant leur dégradation, ce qui les rend idéaux pour teindre les jeans et le denim.

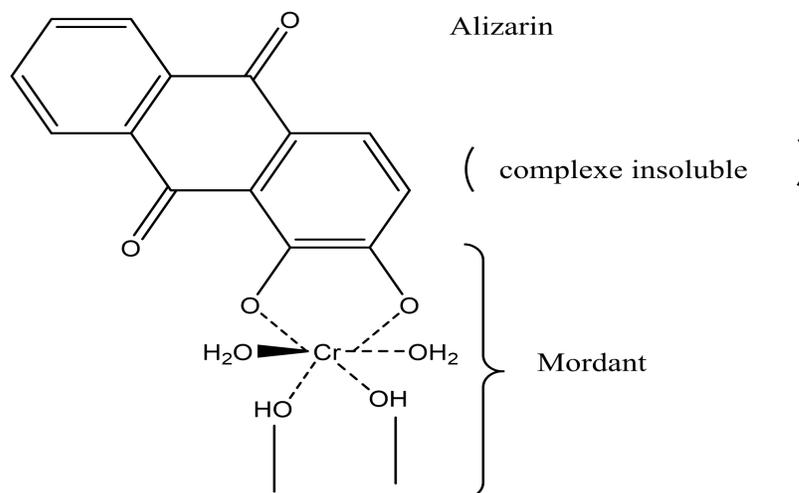


➤ **Les colorants directs**

Ces colorants peuvent porter des charges positives ou négatives, leur permettant de se lier électrostatiquement aux charges présentes à la surface de la fibre. Il convient de noter que les colorants directs ont une grande capacité à se lier aux fibres de cellulose sans avoir recours à des agents stabilisants, grâce à leur composition chimique. Cette forte interaction est due à sa structure moléculaire plate, qui améliore efficacement son adhésion aux fibres

➤ **Les colorants à mordants**

Les colorants mordants contiennent des liaisons fonctionnelles qui réagissent fortement avec les sels métalliques tels que l'aluminium, le chrome, le cobalt, le cuivre, le nickel ou le fer. Lorsqu'ils sont liés au tissu, ils forment des composés de couleurs différentes, donnant aux tissus des couleurs stables et durables.



➤ **Les colorants réactifs**

Les colorants réactifs contiennent des groupes chromophores dérivés de composés azoïques, d'anthraquinones et de phtalocyanines, et se caractérisent par la présence de fonctionnalités chimiques réactives telles que la triazine ou la phénylsulfone, leur permettant de former de fortes liaisons covalentes avec les fibres. Grâce à sa solubilité dans l'eau, il est principalement utilisé pour teindre le coton, mais il est également utilisé pour teindre la laine et les polyamides.

➤ **Colorants dispersés**

Les colorants dispersés sont peu solubles dans l'eau, ils sont donc utilisés sous forme d'une fine poudre qui est distribuée dans le bain de teinture. Lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées pendant le processus de teinture, ces colorants sont capables de pénétrer dans les fibres synthétiques et de s'y lier de manière permanente [43].

III. 2) Impact des colorants sur l'environnement

Même à de très faibles concentrations (**moins de 1 mg/L**), les colorants peuvent rester dans l'eau, contribuant ainsi à la pollution de l'eau résultant du rejet de grandes quantités d'eaux usées saturées de ces substances. Cette pollution entraîne des problèmes environnementaux tels que l'eutrophisation et affecte négativement l'apparence de l'eau et de la vie aquatique.

Ces substances peuvent également provoquer une bioaccumulation, augmentant ainsi la possibilité de leur transmission à travers la chaîne alimentaire et affectant ainsi la santé humaine.

III 2.1) Toxicité des colorants

La recherche indique que tous les types de colorants, en particulier les colorants basiques et azoïques, peuvent présenter un risque important pour les organismes tels que les algues, les poissons, les bactéries et même les mammifères. Certaines de ces substances sont classées comme hautement toxiques selon les normes en vigueur, notamment certains colorants de la famille des triphénylméthane, tandis qu'il existe d'autres colorants azoïques qui sont généralement considérés comme non toxiques, mais peuvent devenir cancérigènes lorsqu'ils se décomposent dans l'organisme. Bien que l'effet toxique direct de ces substances sur l'homme soit considéré comme faible, ils peuvent affecter la santé au fil du temps. En particulier en raison de modifications tissulaires et d'un risque accru de maladies telles que le cancer de la vésicule biliaire, l'effet toxique de ces colorants est principalement dû à certains des composés secondaires qu'ils produisent, tels que les amines libres, les composés nitreux et halogénés, qui sont considérés comme hautement toxiques, tandis que d'autres composés tels que les carboxylates et les sulfonates sont considérés comme inoffensifs [44].

III 2.2) Toxicité sur la santé humaine

De nombreuses études ont montré les effets des colorants toxiques sur la santé humaine, les colorants aminés provoquant souvent des irritations et des inflammations cutanées. Des cas d'eczéma et d'ulcères ont également été enregistrés parmi les ouvriers d'usine qui manipulent des colorants de la série triphénylméthane. De plus, des réactions allergiques telles que l'asthme et la

dermatite eczémateuse ont été observées à la suite d'une exposition à des colorants azoïques et anthraquinoniques, ainsi qu'à certains colorants naphthaléniques tels que la griffe rouge [45].

III .3) Techniques de traitement des colorants

III 3.1) Adsorption comme méthode efficace

Le charbon actif est couramment utilisé pour éliminer les colorants des eaux usées, grâce à sa grande capacité d'absorption. Les couleurs vives et les matières organiques étant difficiles à éliminer à l'aide de méthodes chimiques ou biologiques conventionnelles, le traitement des eaux usées représente un défi environnemental complexe. Pour cette raison, des techniques de traitement intégrées sont adoptées, la méthode la plus efficace étant l'adsorption avec du charbon actif, pour garantir une purification efficace et obtenir des résultats plus efficaces dans l'élimination des polluants [46] .

III 3.2) Comparaisons de processus

Several methods are available for removing color from wastewater, each with its own advantages and disadvantages. The following table compares the most important of these techniques.

Table III 1: Comparaison des technologies de décoloration des déchets en fonction de leurs avantages et inconvénients.

Technologie	Mécanisme de suppression	Avantages	Inconvénients
Adsorption [47]	Utilisez d'un matériau présentant une grande surface et des propriétés de porosité élevées pour piéger les contaminants.	<ul style="list-style-type: none"> _Haute efficacité. _Facile à travailler. _Ne nécessite pas de produits chimiques dangereux. 	<ul style="list-style-type: none"> _La nécessité de remplacer ou de reconstituer régulièrement le charbon actif. _Certaines alternatives peu coûteuses (telles que la tourbe, la sciure de

			bois, l'argile) sont moins efficaces.
Coagulation flocculation [48]	<ul style="list-style-type: none"> _Ajout de coagulants (tels que l'alun, le chlorure de fer et le sulfate de fer) pour collecter les particules en suspension. 	<ul style="list-style-type: none"> _Méthode à faible coût. _Convient comme traitement primaire. 	<ul style="list-style-type: none"> _Production de grandes quantités de boues. _Inefficace seul pour éliminer les contaminants.
Oxydation avancée [49]	<ul style="list-style-type: none"> _Méthode de réactif Fenton, produisant des oxydants puissants pour décomposer les composés organiques complexes. _Utilisez l'ozone ou la lumière ultraviolette pour décomposer les polluants. 	<ul style="list-style-type: none"> _Efficace pour éliminer les polluants organiques complexes. _Fonctionne à de faibles concentrations de polluants. 	<ul style="list-style-type: none"> _Coût élevé. _Contrôle minutieux des conditions de travail pour éviter les influences négatives.
Filtration sur membrane [50]	<ul style="list-style-type: none"> _Passage de l'eau contaminée à travers des membranes semi-perméables à l'aide d'une pression hydraulique. 	<ul style="list-style-type: none"> _Grande capacité à éliminer les polluants organiques. _Cela ne nécessite pas l'utilisation de produits chimiques. 	<ul style="list-style-type: none"> _Coût cher. _Obstruction membranaire. _La durée de vie des membranes est limitée.

Partie Expérimentale

Chapitre IV:

Méthodes et Techniques

IV. 1 Introduction

Ce chapitre vise à présenter la méthodologie scientifique adoptée au cours de cette étude, en exposant les méthodes de préparation et d'application des matériaux utilisés, ainsi que les techniques analytiques et les appareils de mesure employés pour le suivi et l'analyse du processus d'adsorption.

Les travaux expérimentaux ont été réalisés au laboratoire de chimie de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Ghardaïa, en veillant à maintenir des conditions expérimentales optimales pour garantir de résultats précis et fiables.

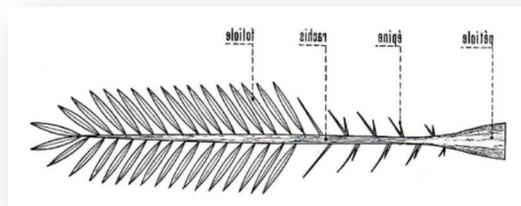
IV. 2 Objectif du travail

Cette étude vise à évaluer l'efficacité du Carbone actif dans l'élimination du colorant rouge Congo d'une solution aqueuse, Pour optimiser l'expérience le modèle, Box-Behnken a été utilisé.

IV .3 Produit et Matériels

IV 3.1 Charbon activé CAP (adsorbant)

Un carbone activé a été préparé au (LERMAB) c.à.d. Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériau Bois à Epinal, en France. Les rachis de palmiers ont été pyrolysés à 800 °C ; le charbon obtenu a été par la suite activé par la vapeur d'eau jusqu'à atteindre un burn-off de



70. _____

Figure IV 1: Rachis de palmier dattier

IV 3.2 Rouge Congo RC (adsorbat)

Le Rouge Congo est une teinture sensible aux variations de pH, qui en fait un bon indicateur de couleur, et est également utilisé dans des domaines tels que les tissus et les champignons, bien qu'il soit comme un colorant toxique.



Figure IV 2: Colorant Rouge Congo

Le choix du colorant étudié ;

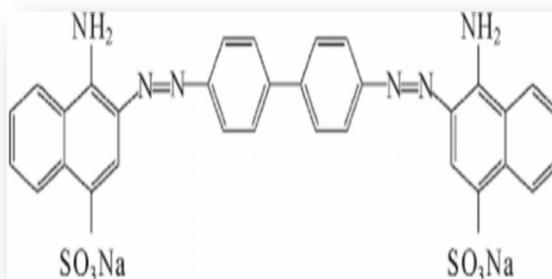
- ✓ Soluble dans l'eau pour faciliter la préparation et l'utilisation
- ✓ Stable chimiquement (à la lumière, à la chaleur et aux variations de pH)
- ✓ Disponible et peu coûteux.

Le tableau suivant présente les principales propriétés physiques et chimiques du Rouge Congo, qui nous aident à comprendre son comportement pendant le traitement.

Table III 2: Propriétés physico-chimiques du Rouge Congo [50]

Colorant:	Rouge Congo
Famille :	Colorant acide
Formule chimique :	$C_{32}H_{22}N_6Na_2O_6S_2$
Masse molaire:	696.66(g/mol)
Solubilité dans l'eau (g/l) à 20°C :	25

Structure :



- **Toxicité du Rouge Congo :**

_ Substance toxique au contact de la peau, pouvant provoquer des brûlures cutanées.

_ En cas de contact, la peau doit être lavée immédiatement et abondamment avec une solution de bicarbonate de sodium à 1% (NaHCO₃).

_ Il est très toxique en cas d'ingestion et peut être mortel en cas d'ingestion en grande quantité, environ 1,43 gramme/kg de poids corporel [51].

- ❖ **Matériels :**

- Papier absorbant.
- Papier filtre.
- Seringues médicales
- Fioles 100ml et 250 ml et 500 ml
- Pipettes : 1 ml, 5 ml, 10 ml.
- Entonnoirs
- Papier aluminium
- Tubes à essais de capacité de 25 ml.
- Pissettes

❖ Appareillages utilisés



Figure IV 3: Spectrophotomètre-UV visible modèle (Uvline 9400)



Figure IV 4: pH mètre



Figure IV 5: Etuve de séchage



Figure IV 6: Balance électronique sensible



Figure IV 7: Mécanisme d'agitation

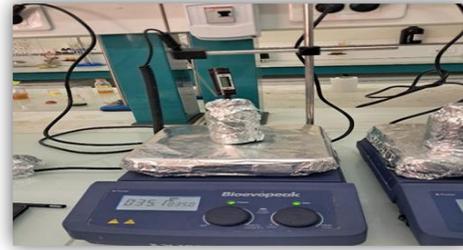


Figure IV 8: Agitateur magnétique doté d'un Thermostat

IV. 4 Détermination de la charge point zéro pH_{pzc}

La détermination du point de charge zéro (pH_{pzc}) a été réalisée pour déterminer la charge zéro de la surface du matériau synthétisé. Ce paramètre est très important dans les phénomènes d'adsorption, notamment lorsque les forces électrostatiques sont impliquées dans les mécanismes. Cette caractérisation permet de déterminer le caractère acide ou basique d'un matériau et de connaître, selon le pH de la solution, sa charge de surface nette. Ainsi, lorsque le pH_{pzc} > pH, la surface du matériau est chargée positivement, et lorsque pH_{pzc} < pH la surface du matériau est chargée négativement [52].

Le pH_{pzc} du biosorbant a été déterminé en utilisant le procédé suivant :

- Une solution 0,01 M de NaCl a été préparée et le pH initial a été ajusté entre 2 et 12 en utilisant une solution de HCl (0,1 M) ou de NaOH (0,1 M).
- Des solutions de 50 ml de NaCl ajustées, ont été placés dans des Erlenmeyers avec 0,1 g d'adsorbant.
- Les flacons ont été maintenus sous agitation (200tr / min . 24 h), et le pH final de la solution a été mesuré.

Le point d'intersection des courbes pH final vs. pH initial et la bissectrice a été pris comme pH_{pzc} .

IV .5 Dosage de Boehm

Nous avons préparé des solutions des substances suivantes : bicarbonate de sodium ($NaHCO_3$), carbonate de sodium (Na_2CO_3), hydroxyde de sodium ($NaOH$) et acide chlorhydrique (HCl). Un volume de 25 ml de chaque solution a été prélevé et placé dans des flacons séparés, dans chacun desquels 0,1 g de charbon actif a été ajouté. Le mélange est laissé au repos pendant 24 heures. Après la période de contact, les solutions ont été filtrées pour séparer le charbon actif de la phase liquide. Immédiatement après la filtration, le titrage a été initié en utilisant d'abord de l'acide chlorhydrique (HCl) pour titrer les bases, suivi d'un titrage avec $NaOH$ si nécessaire, pour déterminer la concentration des résidus après réaction avec du charbon actif.

IV .6 Etude de l'adsorption du Rouge Congo par le charbon actif CAP

La conception Box-Behnken (BBD) a été adoptée comme méthode expérimentale pour déterminer les meilleures conditions pour le processus d'adsorption RC sur la surface du charbon actif (CAP). L'étude a porté sur trois facteurs principaux susceptibles d'influencer le phénomène d'adsorption, à savoir : la masse de l'adsorbant (X1), la concentration initiale du RC dans la solution (X2) et le pH du milieu (X3).

Le temps de contact entre le RC et le CAP a été fixé à 180 min, ce qui représente l'état d'équilibre d'adsorption.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de Design Expert 13, un puissant outil de conception expérimentale qui permet de tester les facteurs sans avoir recours à des expériences complexes et de contrôler simultanément toutes les variables à leurs niveaux les plus élevés ou les plus bas.

Les variables indépendantes ont été étudiées à trois niveaux différents : faible (-1), moyen (0) et élevé (+1), comme indiqué dans le tableau.

Table IV 1: Facteurs et domaine d'étude du plan expérience BBD

	A	B	C
	Masse du CAP (mg)	C ₀ (mg/L)	pH
-1	10	20	6
0	20	50	9
1	30	80	12

Table IV 2: Plan d'expérience BBD

	A	B	C
1	-1	-1	0
2	1	-1	0
3	-1	1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	0	1
8	0	0	1
9	0	-1	-1
10	0	1	-1
11	0	-1	1
12	0	1	1
13	0	0	0

IV.7 Élaboration du modèle

La réponse examinée durant cette étude est la quantité adsorbée à l'équilibre Q_e (mg/g). La réponse prédite Q_e peut être obtenue à partir de l'équation du modèle quadratique non linéaire comme suit :

$$Y = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{22}X_2^2 + a_{32}X_3^2 + a_{1a2}X_1X_2 + a_{1a3}X_1X_3 + a_{2a3}X_2X_3$$

Où :

Y est la réponse calculée,

a_0 est l'ordonnée à l'origine,

a_1 , a_2 et a_3 sont des coefficients linéaires,

a_{1a1} , a_{2a2} , a_{3a3} sont des coefficients quadratiques

a_{1a2} , a_{1a3} , a_{2a3} sont des coefficients interactifs.

IV.8 Préparation des solutions Rouge Congo

L'élimination du colorant Rouge Congo (RC) à l'aide de charbon actif (CAP) comme milieu de prétraitement a été étudiée. Ce colorant est un composé azoïque connu pour sa toxicité et ses risques potentiels pour la santé, car il a été classé par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA) comme substance extrêmement préoccupante (SVHC). Il a été choisi dans cette recherche en raison de ces caractéristiques. En revanche, les réactions entre les matériaux basiques tels que le charbon actif et les composés acides sont généralement favorables, et vice versa [53].

➤ **solution mère :**

Une solution avec une concentration massique de 600 mg/L a été préparée. Pour ce faire, une balance électronique est utilisée pour mesurer 0,06 gramme de Rouge Congo, et cette quantité est ensuite dissoute dans un flacon de 100 ml en utilisant de l'eau distillée comme solvant.

➤ **Solutions filles :**

La solution filles ont été préparée en diluant la solution initiale. Les normes ont été préparées sur la base de la loi de dilution suivante :

$$C_0V_0=C_eV_e \quad (10)$$

C_0 : la concentration de la solution mère (mg/l).

V_0 : le volume de la solution mère (ml).

C_e : la concentration de la solution fille (mg/l).

V_e : le volume de la solution fille (ml).

IV. 9 Courbe d'étalonnage

À partir de la solution mère de concentration 400 mg/L, plusieurs solutions diluées ont été préparées afin d'établir une courbe d'étalonnage. Ces solutions ont été analysées par spectrophotométrie UV-Visible, après détermination de la longueur d'onde d'absorption maximale à l'aide d'un balayage spectral compris entre 400 et 800 nm. La longueur d'onde optimale identifiée a ensuite été utilisée pour mesurer l'absorbance des solutions étalons. La courbe d'étalonnage obtenue, représentant l'absorbance (A) en fonction de la concentration (C en mg/L), a permis d'établir une équation de régression linéaire. Cette équation a ensuite été utilisée pour déterminer les concentrations inconnues en RC à l'équilibre d'adsorption, en se basant sur les absorbances mesurées après filtration [54].

$$A = \varepsilon \cdot I \cdot C \quad (11)$$

A : l'absorbance de la solution.

ε : Coefficient de l'extinction spécifique du soluté ($l \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$).

I : Epaisseur de la cellule optique (cm).

C : concentration de la solution (mol/l).

IV. 10 Cinétique d'adsorption

L'adsorption du colorant Rouge Congo (RC) sur du charbon actif a été étudiée dans des conditions d'agitation, en utilisant trois séries de solutions avec différentes concentrations initiales (20, 40, 60 mg/L). 10 ml de chaque solution avec 10 mg de charbon actif ont été placés dans des flacons séparés et agités pendant différentes périodes de temps (de 30 à 360 min). Après chaque période, le carbone a été séparé et la concentration de colorant restante a été mesurée à l'aide d'un spectromètre UV-Vis à 498 nm. L'étude vise à évaluer l'effet du temps de contact et de la concentration initiale sur l'efficacité d'adsorption, à déterminer le modèle cinétique le plus approprié pour le processus et à calculer la concentration à l'équilibre (C_e) et la quantité adsorbée (Q_e) pour analyser le mécanisme d'adsorption [55].

La formule employée pour la détermination de la quantité adsorbée est la suivante :

$$Q_t = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \times V \quad (12)$$

Q_t : la quantité de RC adsorbée à l'instant t (mg/g).

C_0 : la concentration initiale (mg/l).

C_e : la concentration résiduelle à l'instant t (mg/l).

V : le volume de la solution de RC (l).

m : la masse de l'échantillon exprimé en gramme (g).

IV .11 Isotherme d'adsorption

Une fois le temps d'équilibre déterminé lors de l'étude cinétique, 10 mg de charbon actif ont été ajoutés dans chaque flacon, et ajoutons également 10 ml d'une des sous-solutions de différentes concentrations (10, 20, 40, 60, 80, 100, 150, 200, 300 et 420 mg/L)

Ces tubes sont soumis à une agitation pendant une période d'équilibre de 180 minutes. Après agitation, le liquide supérieur a été filtré et analysé par spectroscopie UV-Vis à une longueur d'onde maximale de 498 nm [56].

IV .12 Effet du pH

Une solution avec une concentration totale de 60 mg/L a été préparée. 10 ml de RC sont ajoutés à chaque flacon. Le pH de la solution a été mesuré à l'aide d'un pH -mètre, et le pH a été ajusté par NaOH (0,1 M) et HCl (0,1 M), pour obtenir les valeurs de pH suivantes : (2, 4, 6, 8, 10 et 12), puis 10 mg de CAP ont été mis en contact avec le colorant pendant 180 min. La solution est filtrée puis analysée par spectroscopie UV-Vis [57].

IV .13 Effet de la température

Une solution avec une concentration de RC 60 mg/L a été préparée. 10 ml de solution RC sont ajoutés à chaque flacon. Nous avons ensuite ajouté un bloc de 10 mg de CAP. Pendant 180 minutes. La température a été contrôlée à l'aide d'un agitateur magnétique avec thermostat aux températures suivantes : 25, 35 et 45°C. Après contact, la solution a été filtrée puis analysée par spectroscopie UV-Vis [58].

Chapitre V:

Résultats et discussion

V.1 Introduction

Cette section vise à évaluer l'efficacité d'un adsorbant dans le traitement de solutions aqueuses contenant du colorant Rouge Congo (RC).

Dans la première étape, un plan expérimental a été conçu en utilisant la méthode Box-Behnken (BBD), dans lequel trois facteurs principaux ont été choisis : le pH, la concentration initiale en colorant et masse de charbon actif, afin de déterminer les conditions optimales pour le processus d'adsorption.

Dans la deuxième partie, la longueur d'onde maximale (λ_{\max}) du colorant RC a été déterminée en analysant le spectre d'absorption, puis en traçant la courbe d'étalonnage

($A = f(C)$) pour déterminer la relation entre l'absorbance et la concentration.

une étude cinétique a ensuite été réalisée afin de déterminer le temps d'équilibre en utilisant le charbon actif sélectionné. Les propriétés de ce carbone ont également été analysées par étude isotherme.

Enfin, les résultats de l'élimination du colorant anionique (Rouge Congo) d'une solution aqueuse à l'aide de charbon actif (CAP) sont discutés, fournissant une explication complète du comportement du système étudié.

V.2 Caractérisation du charbon actif (pH_{PZC})

La caractérisation du charbon actif (**figure V 1**) illustre les propriétés du charbon actif en déterminant la valeur du pH au point de charge zéro (pH_{PZC}). La valeur obtenue ($pH_{PZC} = 10$) indique la nature basique du matériau. Cela confirme que préparé à partir de tronc de palmier (CAP) possède une propriété basique.

le pH_{pzc} est inférieur au pH, la surface du matériau est chargée négativement.

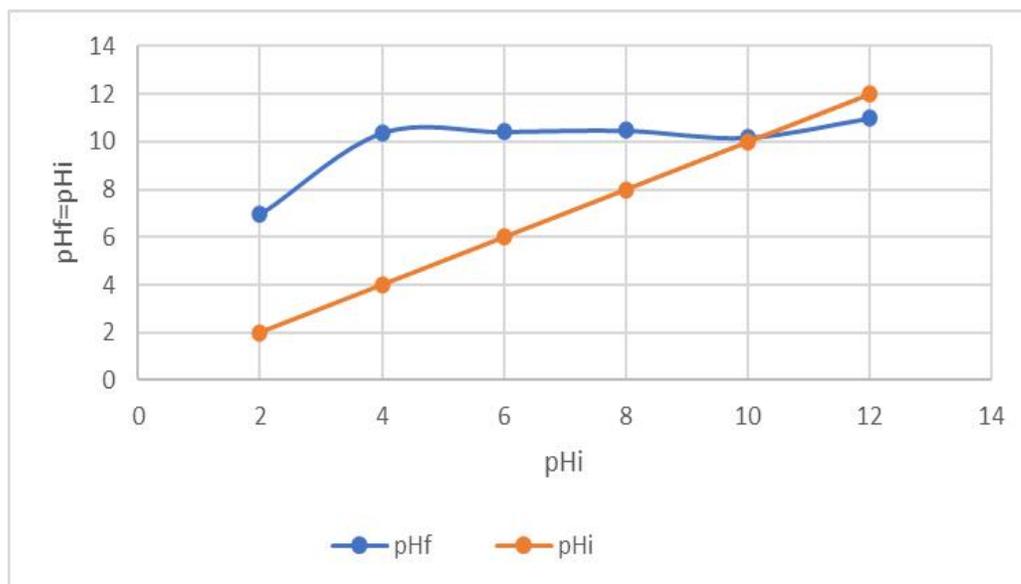


Figure V 1: Détermination du pHpzc du CAP

V. 3 Dosage de Boehm

Le tableau V 1 présente les résultats du test de Boehm pour déterminer les groupes fonctionnels acides et basiques présents à la surface du charbon actif (CA). Il semble que le charbon actif contienne des groupes fonctionnels acides (acide carboxylique, lactones, acide phénolique) avec une concentration totale de 2,10 milliéquivalents par gramme (meq/g), tandis que la concentration totale de groupes basiques était de 3,70 milliéquivalents par gramme.

Les résultats indiquent que la surface du charbon actif est de nature basique car elle contient plus de groupes basiques que de groupes fonctionnels acides, ce qui la rend efficace pour adsorber les polluants acides.

Table V 1: Groupes fonctionnels acides et basiques présents à la surface du (CA).

CA	Groupements (meq/g)	
	Acides	Basiques
CAP	2.10	3.70

V. 4 Analyse d'absorbance du Rouge Congo

V 4.1 Le principe de la méthodes Spectro

Le spectre d'absorption UV-visible du colorant Rouge Congo (RC) a été enregistré à l'aide d'un spectromètre Uvline 9400. Le balayage spectral a été réalisé dans la plage comprise entre 400 et 800 nm (**Figure V 2**). Les résultats ont montré que la longueur d'onde d'absorption maximale du colorant Rouge Congo se situe à 498 nm.

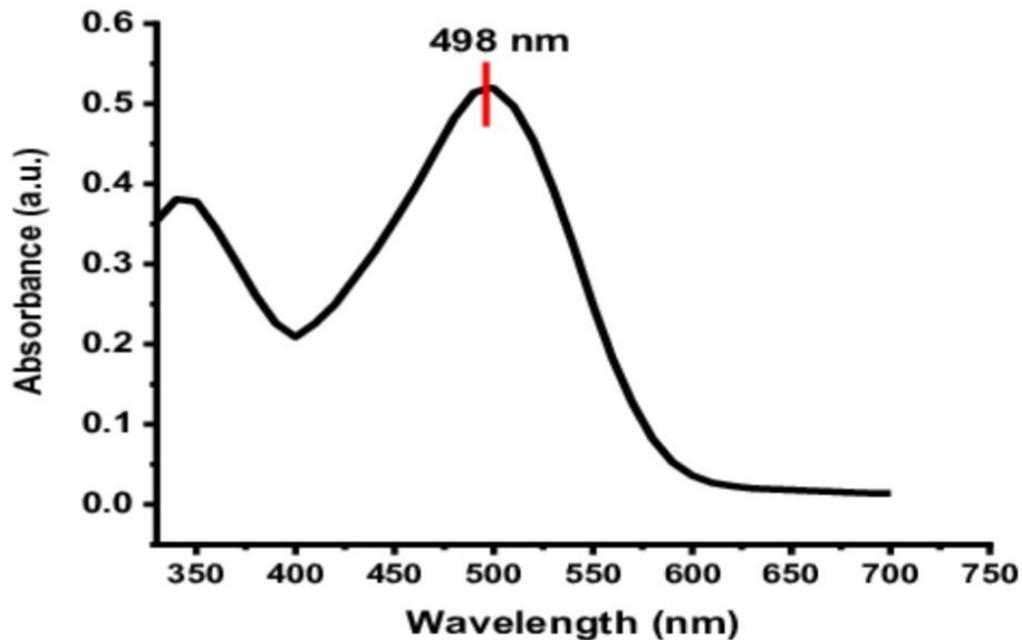


Figure V 2: Spectre d'absorption du Rouge Congo (RC)

V 5 Dosage de la solution du Rouge Congo (RC)

La courbe d'étalonnage entre l'absorbance A et la concentration C (mg/L) du colorant Rouge Congo (RC) a été obtenue à l'aide de solutions de différentes concentrations allant de 10 à 60 mg/L (Figure V 3). À partir de ces résultats, la concentration restante du colorant (RC)

peut être déterminée et la quantité d'adsorption sur la surface du charbon actif peut être calculée. Le coefficient de détermination R^2 a montré une valeur proche de un ($R^2=0,993$), indiquant une relation linéaire entre l'absorbance A et la concentration en colorant C du RC.

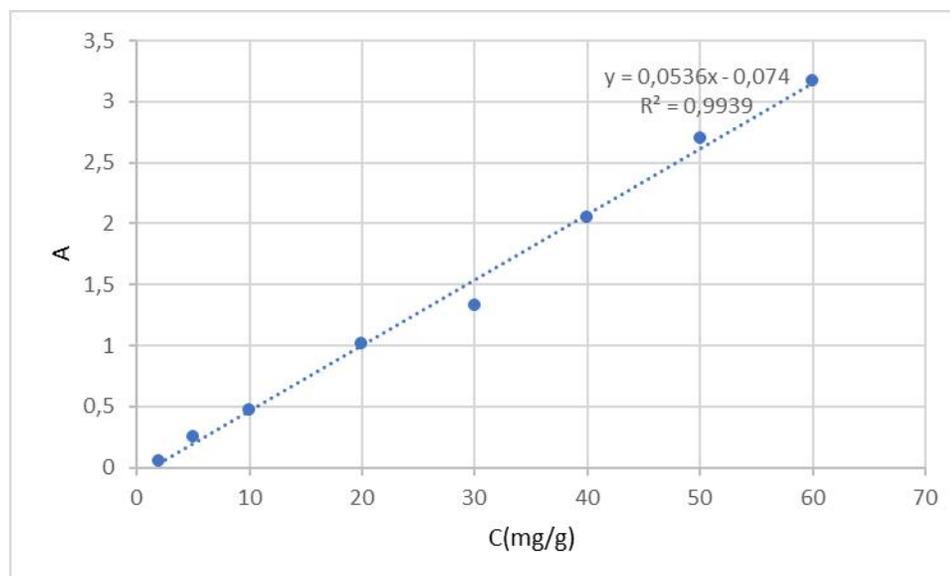


Figure V 3: Courbe d'étalonnage relative à la solution aqueuse du Rouge Congo (RC)

V.6 Plan d'expérience

V 6.1 Matrice d'expérience

Les données de la matrice utilisée dans cette étude est illustrées dans le Tableau V2.

Table V 2: Matrice d'expériences et réponse

	Masse adsorbant (mg)	C ₀ (mg/L)	pH	Réponse Q _e (mg/g)
1	10	20	9	14.85
2	30	20	9	6.27
3	10	80	9	38.66
4	30	80	9	15.77
5	10	50	6	29.94
6	30	50	6	12.55
7	10	50	12	29.07

8	30	50	12	12.55
9	20	20	6	9.32
10	20	80	6	22.66
11	20	20	12	8.15
12	20	80	12	22.38
13	20	50	9	16.58

V 6.2 Analyse de la variance (ANOVA)

Le modèle mathématique du plan Box-Behnken a été évalué à l'aide de tests statistiques ANOVA, et les résultats obtenus à l'aide du logiciel Design-Expert 13 sont présentés dans le tableau V3.

La valeur F élevée du modèle (126,33) indique sa signification statistique élevée, avec une très faible probabilité (0,01 %) que cette valeur soit due au bruit, ce qui améliore la fiabilité du modèle.

Les valeurs de p montrent que les termes **A** (masse d'absorbant), **B** (concentration de colorant), **AB** (interaction de A et B), **A²** et **B²** sont statistiquement significatifs (**P < 0,05**).

Cependant, la valeur F pour le manque d'ajustement de 389,88 indique que le manque d'ajustement est hautement significatif, avec seulement une faible probabilité (0,26 %) d'être dû au bruit, ce qui est un indicateur négatif que le modèle peut ne pas décrire adéquatement les données, nécessitant une révision et une amélioration.

Table V 3: Analyse de Variance

Source	Somme des carrés	Df	Moyenne quadratique	F-valeur	p-valuer	
Model	1117,28	9	124,14	126,33	<0.0001	Significatif
A-Adsorbent mass	534,21	1	534,21	543,62	<0.0001	
B-[RC]	463,11	1	463,11	471,27	<0.0001	
C-PH	0,6744	1	0,6744	0,6863	0.4452	
AB	51,19	1	51,19	52,09	0.0008	
AC	0,1922	1	0,1922	0,1956	0.6768	
BC	0,1963	1	0,1963	0,1998	0.6736	
A ²	54,19	1	54,19	55,14	0.0007	
B ²	9,10	1	9,10	9,26	0.0287	
C ²	1,20	1	1,20	1,22	0.3197	
Résiduel	4,91	5	0,9827			
Manque d'ajustement	4,90	3	1,63	389,88	0.0026	Significatif
Erreur pure	0,0084	2	0,0042			
Total des erreurs	1122,20	14				

En se basant sur l'analyse des résultats statistiques, il est possible de conclure que le modèle quadratique est approprié et adéquat pour décrire la corrélation entre les paramètres expérimentaux étudiés et la quantité adsorbée Q_e .

V 6.3 Modèle mathématique

La réponse (quantité adsorbée Q_e) représentée sous forme d'une équation quadratique en fonction des trois facteurs : la masse de l'adsorbant (A) et le pH de la solution (C), ainsi que la concentration du colorant RC (B).

$$Q_e = +27,75104 - 1,81904 A + 0,644342 B - 0,011925 AB + 0,038309 A^2 - 0,001744 B^2$$

L'équation exprimée en termes de facteurs réels peut être utilisée pour prédire la réponse en fonction des niveaux spécifiques de chaque facteur, ces niveaux étant exprimés dans leurs unités d'origine. Toutefois, cette équation ne permet pas d'évaluer l'influence relative de chaque facteur, dans la mesure où les coefficients sont ajustés en fonction des unités propres à chaque

variable. De plus, l'ordonnée à l'origine ne correspond pas nécessairement au centre de l'espace expérimental, ce qui limite l'interprétation directe des effets relatifs des facteurs.

V 6.4 Surface de réponse et optimisation

Une représentation graphique de la surface de réponse a été développée à partir de l'équation du modèle pour étudier l'efficacité d'adsorption du Rouge Congo (RC) par le charbon actif en poudre (PAC), en tenant compte des principaux effets ainsi que des interactions entre deux facteurs.

Ces résultats ont été obtenus en modifiant deux paramètres dans le champ expérimental, tout en gardant le troisième paramètre au niveau central (niveau 0).

D'après la figure V 4, qui montre l'interaction entre la masse de l'absorbant (A) et la concentration de RC (B), on voit que la quantité absorbée (Q_e) augmente à mesure que la concentration de RC augmente.

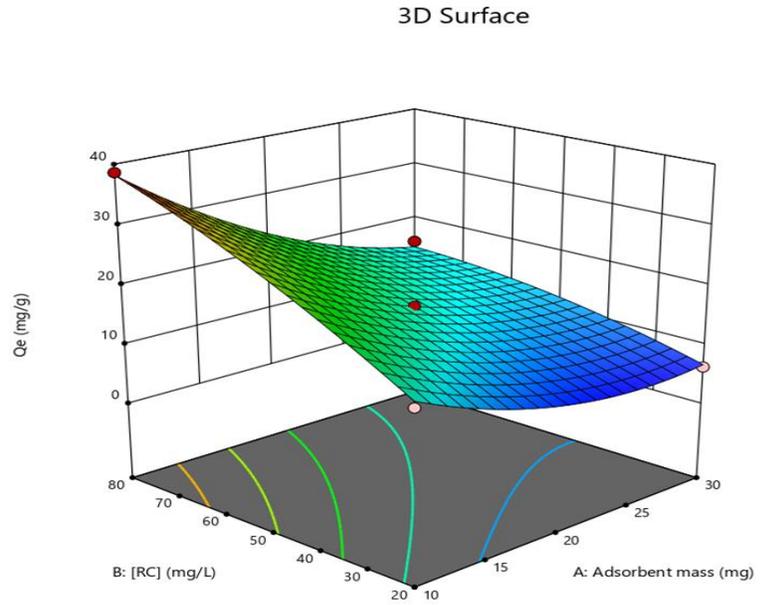
En revanche, aucun effet significatif sur Q_e n'a été observé lors de l'examen de l'interaction entre la masse du sorbant (A) et le pH de la solution (C), ni entre la concentration en RC (B) et le pH (C), comme le montrent les figures correspondantes (Figure V 4).

Factor Coding: Actual

Qe (mg/g)
 Design Points:
 ● Above Surface
 ○ Below Surface
 6,27488  38,6567

X1 = A
 X2 = B

Actual Factor
 C = 9

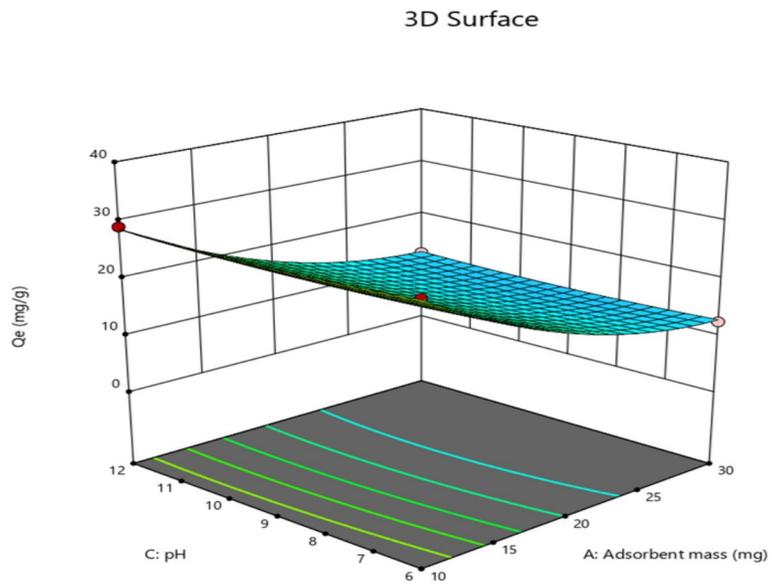


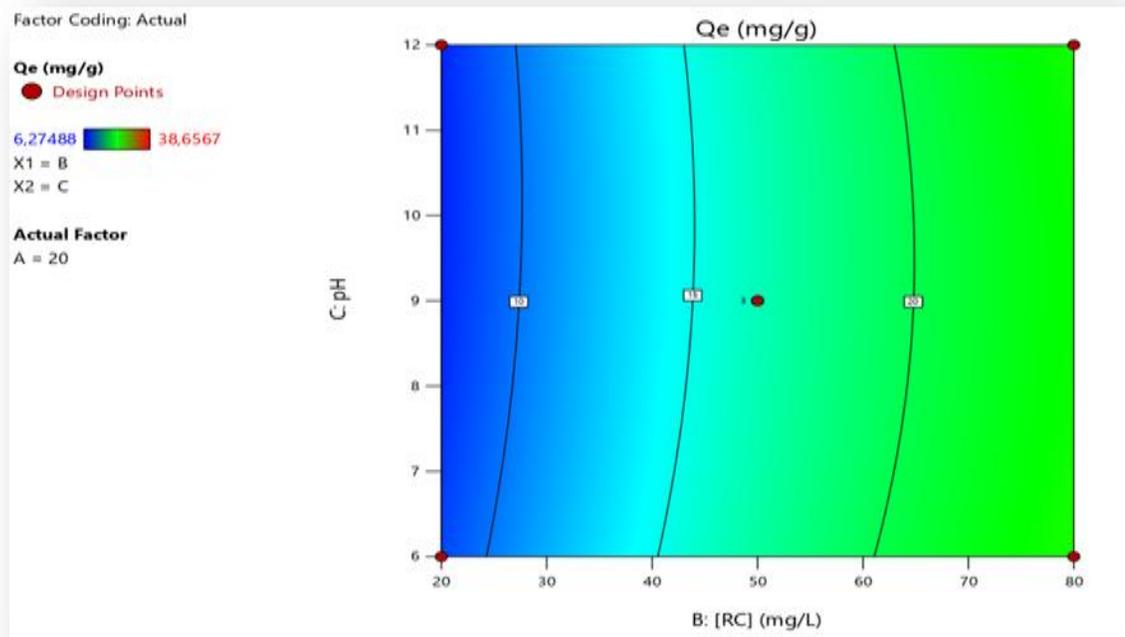
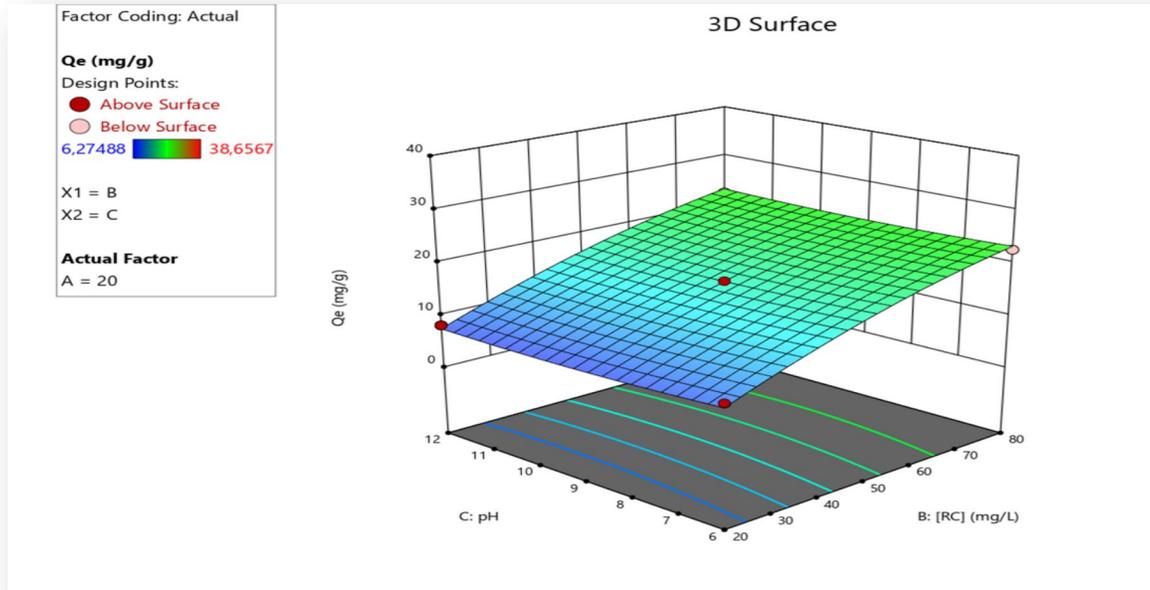
Factor Coding: Actual

Qe (mg/g)
 Design Points:
 ● Above Surface
 ○ Below Surface
 6,27488  38,6567

X1 = A
 X2 = C

Actual Factor
 B = 50





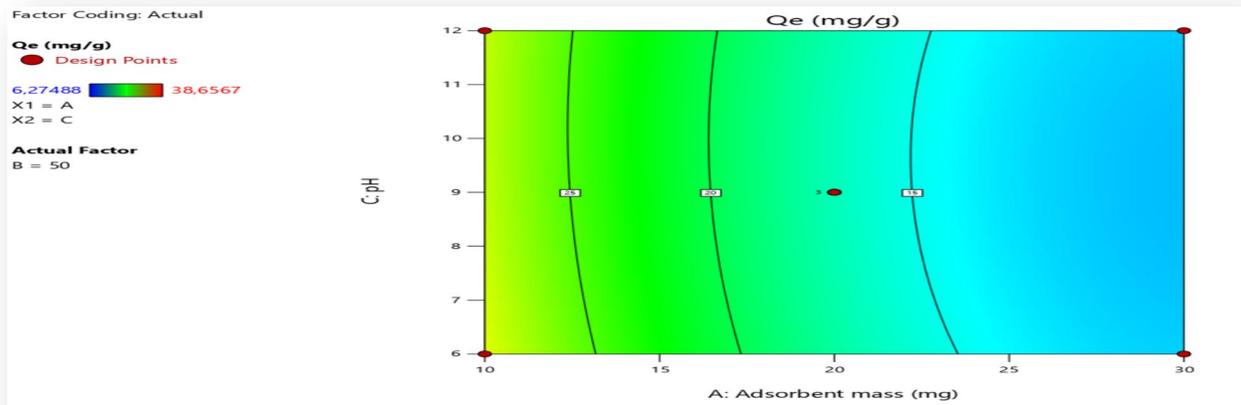
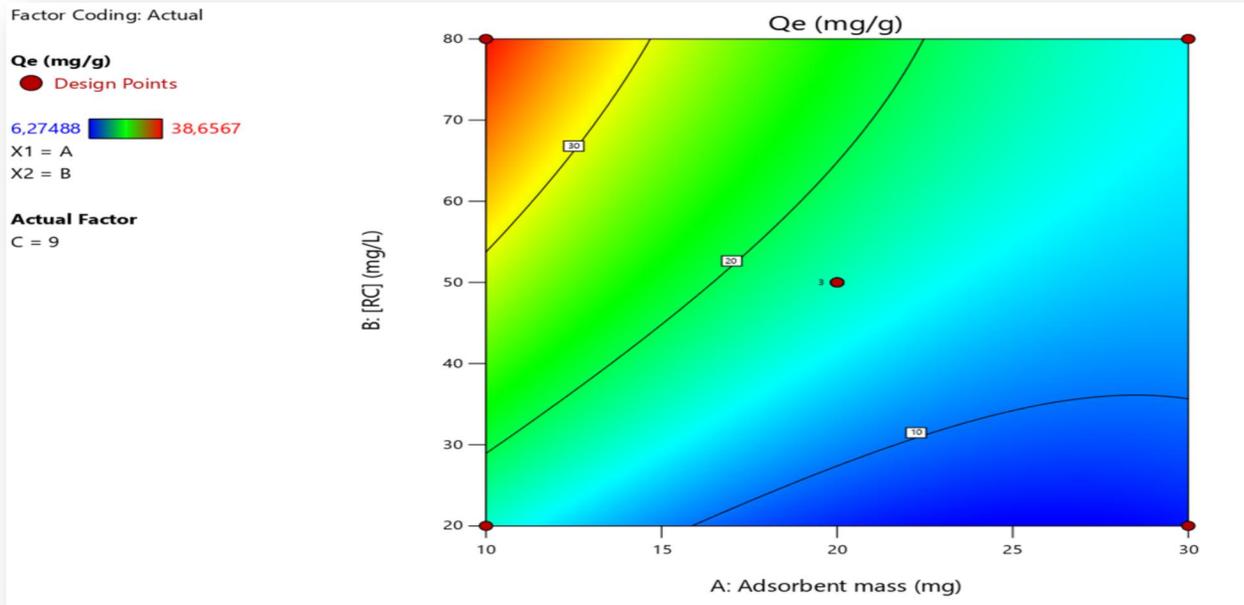


Figure V 4: Surface des réponses des facteurs examinés (a) A vs B (b) A vs C (c) B vs C (2D, 3D)

Ce programme a permis de déterminer les valeurs optimales des paramètres opérationnels pour obtenir des performances optimales du processus d'absorption, comme indiqué dans le tableau V 4.

Tableau V 4: Optimisation des conditions d'adsorption du RC par le CAP

m(mg)	26.43
pH	7.97
V(mL)	10
C(mg/L)	74
t(eq)	3h

Un temps d'équilibre de 3 heures a été établi. Trois expériences en laboratoire ont été réalisées afin de valider le modèle d'absorption proposé. Les résultats obtenus révèlent une différence d'environ 3 % entre la capacité d'adsorption prédite (16,25 mg/g) et la capacité mesurée expérimentalement (15,70 mg/g). Cette faible divergence confirme la bonne adéquation entre le modèle théorique et les données expérimentales pour l'adsorption du Rouge Congo (RC) par le charbon actif en poudre (CAP), dans les conditions opératoires étudiées.

V .7 Etude de l'adsorption du Rouge Congo par le charbon actif CAP

V 7.1 Cinétique d'adsorption du RC

La cinétique d'adsorption du colorant Rouge Congo (RC) à des concentrations de 20 mg/L, 40 mg/L et 60 mg/L en fonction du temps de contact avec le matériau étudié est présentée dans la Figure V5

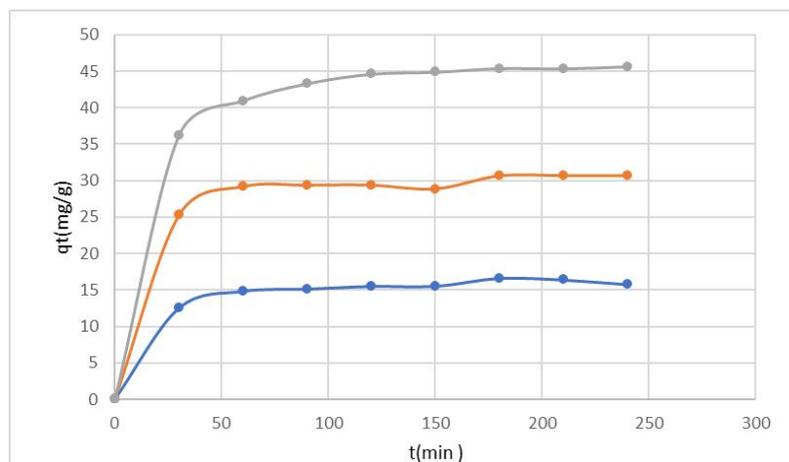


Figure V 5: La cinétique d'adsorption de RC

Les graphiques montrent que :

-La courbe d'évolution de la quantité absorbée de colorant Rouge Congo (RC) montre une augmentation progressive avec le temps jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

-Le temps d'équilibre pour toutes les concentrations (20, 40 et 60 mg/L) a été déterminé à 3 h (180 min), indiquant la saturation des pores du charbon actif après contact.

-L'étude d'adsorption a montré trois phases distinctes : une première phase rapide pendant la première heure, suivie d'une deuxième phase plus lente entre 60 et 150 minutes, puis d'une phase d'équilibre après 3 heures.

-Après avoir analysé la cinétique d'adsorption, les résultats ont été modélisés et une échelle expérimentale pour la température d'adsorption a été développée avec l'adoption d'un temps d'équilibre spécifique.

V 7.2 Modélisation de la cinétique d'adsorption

La cinétique d'adsorption peut être modélisée sur la base de différents modèles mathématiques. Afin de déterminer le modèle le plus approprié pour expliquer l'interaction entre l'adsorbant et l'adsorbat, le modèle pseudo-premier ordre et le modèle pseudo-second ordre ont été adoptés

Les données expérimentales de l'étude de cinétique d'adsorption ont été utilisées pour évaluer l'ordre des réactions de stabilisation sur la base de ces modèles.

V 7.2.1 Application du modèle cinétique du pseudo premier -ordre (PPO)

La figure V6 montre les représentations linéaires du modèle PPO ($\ln(qe-qt)$) par rapport à t pour l'élimination du RC par CAP. Le tableau V5 compile les résultats obtenus à partir de ce modèle, tels que la quantité absorbée à l'équilibre $q_e(\text{cal})$, K_1 et le coefficient de détermination R^2 .

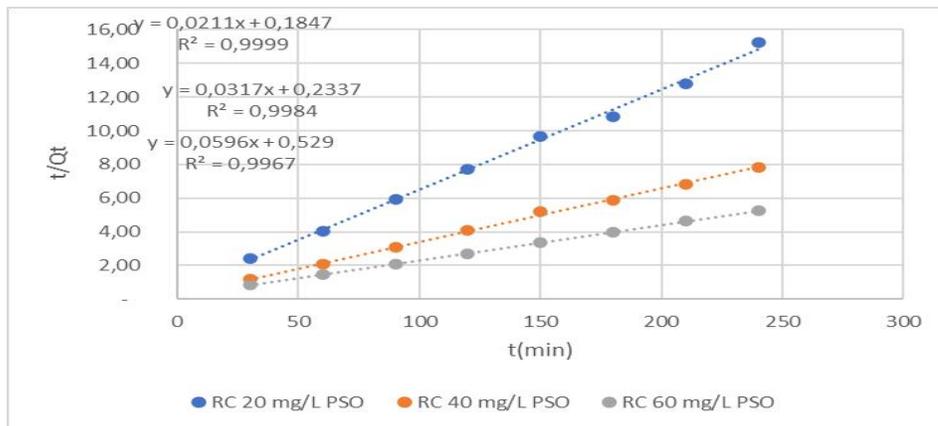


Figure V 6: Modélisation de la cinétique d'adsorption du RC par pseudo premier ordre

La capacité d'absorption q_e (cal) calculée théoriquement diffère de celle déterminée expérimentalement, comme le montre le tableau V5 pour les concentrations de Rouge Congo (RC) étudiées. Les valeurs des coefficients de détermination (R^2) pour chacune des concentrations étaient de 20 mg/L ($R^2 = 0,9211$), 40 mg/L ($R^2 = 0,6235$) et 60 mg/L ($R^2 = 0,9561$), indiquant une faible corrélation. Par conséquent, on peut conclure que l'adsorption du Rouge Congo sur le charbon actif préparé à partir de tronc de palmier (CAP) ne suit pas un modèle cinétique de pseudo premier ordre.

V 7.2.2 Application du modèle cinétique du pseudo second -ordre (PSO)

La figure V7 montre les représentations linéaires du modèle PSO (t/qt vs t) pour l'élimination du RC par CA. Le tableau V5 compile les résultats obtenus à partir de ce modèle, tels que la quantité absorbée à l'équilibre $q_e(\text{cal})$, K_2 et le coefficient de détermination R^2 .

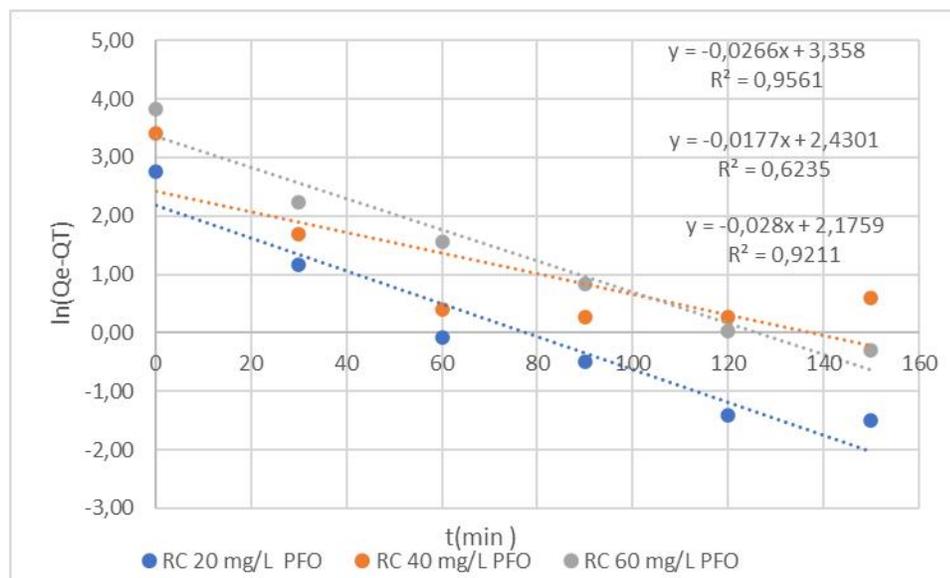


Figure V 7: Modélisation de la cinétique d'adsorption du RC par pseudo second ordre

Les résultats ont montré que les valeurs de capacité d'adsorption à l'équilibre (q_e) (cal), calculées à l'aide du modèle pseudo-second ordre (PSO), correspondaient étroitement aux valeurs expérimentales obtenues pour les solutions contenant du RC à des concentrations de 20 mg/L, 40 mg/L et 60 mg/L. Comme le montre le tableau V5, le modèle PSO représente plus précisément le processus d'adsorption du RC sur le charbon actif de tronc de palmier (CAP), car les valeurs des coefficients de détermination (R^2) étaient proches de l'unité ($R^2 > 0,999$), indiquant une bonne concordance entre les valeurs calculées et expérimentales. Il convient de noter que ce modèle décrit généralement le phénomène d'adsorption chimique.

Table V 5 : Paramètres des modèles de la cinétique d'adsorption du RC par CAP

		C=20mg/l	C=40mg/l	C=60mg/l
pseudo premier ordre PPO	Qe cal (mg/g)	8,81	11,36	28,73
	Qe exp	15,76	30,67	45,63
	K1 (L/min)	0,0646	0,0407	0,0612
	R ²	0,92106	0,62351	0,9560

pseudo second ordre PSO	Qe cal (mg/g)	16,776	31,516	47,416
	Qe exp	15,76	30,67	45,63
	K2 (g/mg min)	0,0067	0,0043	0,0024
	R ²	0,99672	0,99844	0,9999

V.8 Etude de l'isotherme d'adsorption du Rouge Congo

L'équation d'adsorption du charbon actif (CAP) a été analysée pour évaluer sa capacité à adsorber le colorant Rouge Congo (RC). La figure V8 montre la courbe d'adsorption du RC pendant la période d'équilibre (3 heures)

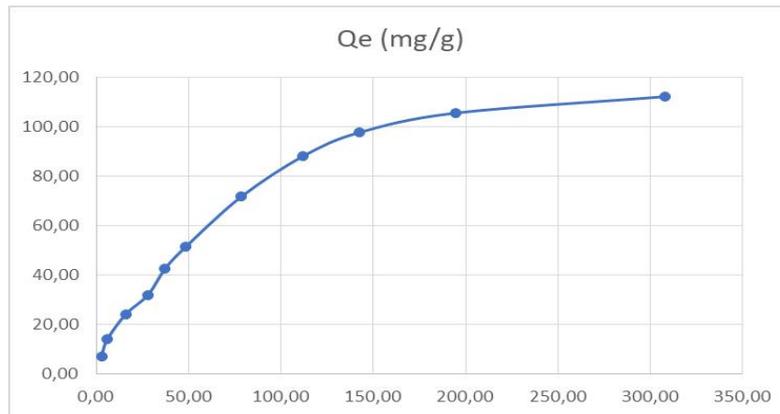


Figure V 8: Isotherme d'adsorption du Rouge Congo sur le CAP

Selon la formation de l'isotherme d'adsorption, une isotherme de type L est observée selon la classification de Gilles, indiquant une très bonne affinité du système sorbant (CAP) et adsorbant (RC).

V 8.1 Modélisation des isothermes d'adsorption

Le processus d'adsorption en phase gazeuse et en phase liquide est représenté à l'aide de plusieurs modèles mathématiques. Dans cette recherche, l'accent sera mis sur les modèles de Langmuir et de Freundlich, car ce sont les modèles les plus utilisés pour étudier l'adsorption de colorants à partir de solutions liquides à l'aide de charbon actif.

V 8.1.1 Modèle de Langmuir

Selon le modèle de Langmuir, l'adsorption de l'adsorbant se produit à la surface de l'adsorbant sous la forme d'une monocouche. La figure V9 montre la forme linéaire de l'équation de Langmuir pour l'adsorption du colorant RC sur le charbon actif CAP. La capacité d'absorption maximale de Q_m et K_L a été déterminée en traçant la relation entre $1/Q_e$ vs $1/C_e$.

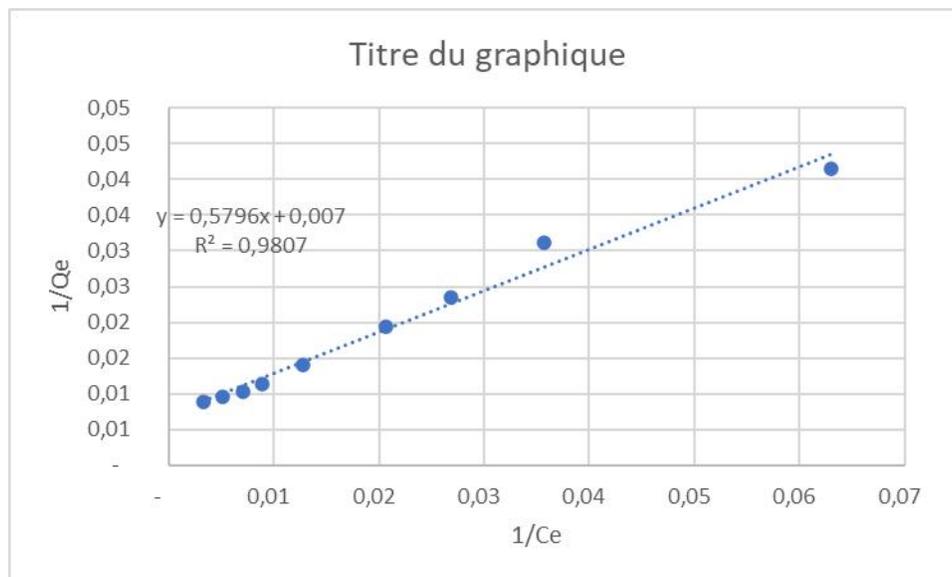


Figure V 9: Linéarisation du modèle d'isotherme d'adsorption de langmuir

Les valeurs des paramètres du Langmuir sont résumées dans le Tableau V6.

V 8.1.2Modèle de Freundlich

Selon le modèle de Freundlich, les molécules adsorbantes sont adsorbées sur la surface de l'adsorbant sous forme de couches multiples. La représentation graphique de la relation entre $\ln q_e$ VS $\ln C_e$ permet la détermination des constantes du modèle telles que K_F et n . Les résultats de cette étude sont résumés dans le Tableau V6, tandis que la figure V10 montre la linéarité de l'équation de Freundlich pour l'adsorption du colorant RC sur le charbon actif CAP.

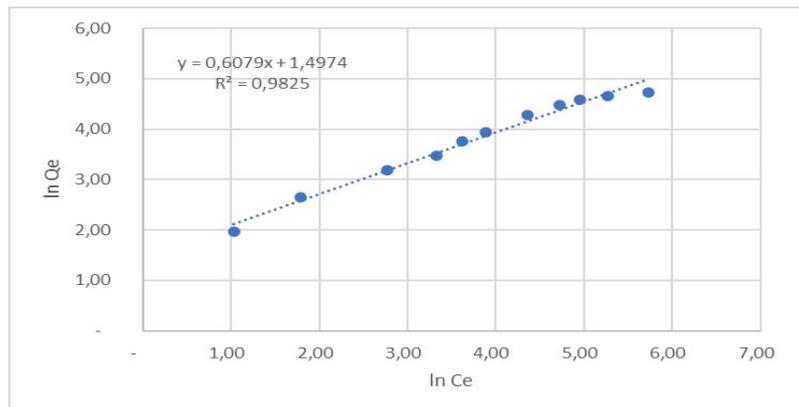


Figure V 10: Linéarisation du modèle d'isotherme d'adsorption de Freundlich

V 8.1.3 Analyse des paramètres de l'isotherme d'adsorption

le Tableau V6 montre toutes les valeurs dérivées de l'application des modèles d'adsorption isotherme de Langmuir et de Freundlich à l'adsorption du colorant RC.

Table V 6: Paramètres des modèles d'adsorption de la Langmuir et de Freundlich pour le colorant RC

Modèle	Paramètres	
Langmuir	Qm (mg/g)	142,85
	KL (L/mg)	0,012
	R ²	0,9807
Freundlich	KF (mg/g (L/mg) ^{1/n})	4,47
	n	1,65
	R ²	0,9825

En analysant les données du Le TableauV6, on observe que le comportement d'adsorption du charbon actif suit le modèle de Langmuir avec un degré élevé de concordance ($R^2 = 0.9807$), par rapport au modèle de Freundlich ($R^2 = 0.9825$). Le modèle de Langmuir suppose que l'absorption se produit dans une monocouche sur la surface de l'absorbant.

La capacité d'adsorption maximale obtenue par le modèle de Langmuir était $Q_m = 142.85 \text{ mg/g}$, de plus, la valeur de $n = 1,65$ (dans la plage $0 < n < 10$) indique que l'adsorption du colorant RC sur le charbon actif CAP est une adsorption favorable

V.9 Etude de l'effet du pH

L'effet du pH sur l'adsorption du colorant RC à une concentration de 60 mg/L a été évalué en utilisant du charbon actif CAP à 10 mg/L, comme indiqué dans la figure 10. Les résultats ont montré que le taux d'élimination le plus élevé était atteint à $\text{pH} = 2$, suivi d'une diminution de la capacité d'adsorption avec une stabilité relative à partir de $\text{pH} = 4$.

Ce comportement s'explique par la surface du CAP acquiert une charge positive en milieu acide, ce qui renforce l'attraction électrostatique avec les molécules RC anioniques chargées négativement. Il est à noter que la valeur pH_{PZC} du charbon actif CAP est de 10, indiquant que l'adsorption des molécules anioniques est favorisée à des valeurs de $\text{pH} > \text{pH}_{\text{PZC}}$, conformément à ce qui est rapporté dans la littérature.

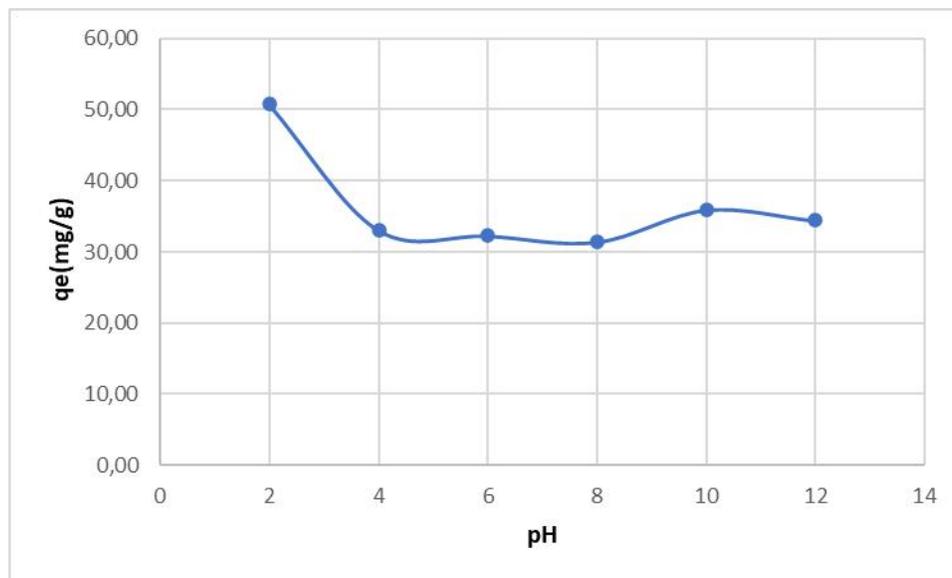


Figure V 11: Effet du pH sur la capacité d'adsorption du RC par le CAP.

V.10 Etude de l'effet de la température

La Figure V12 présente l'effet de température d'adsorption du Rouge Congo (RC) pendant le temps d'équilibre (3 h) à trois températures : 25°C , 35 °C , 45 °C

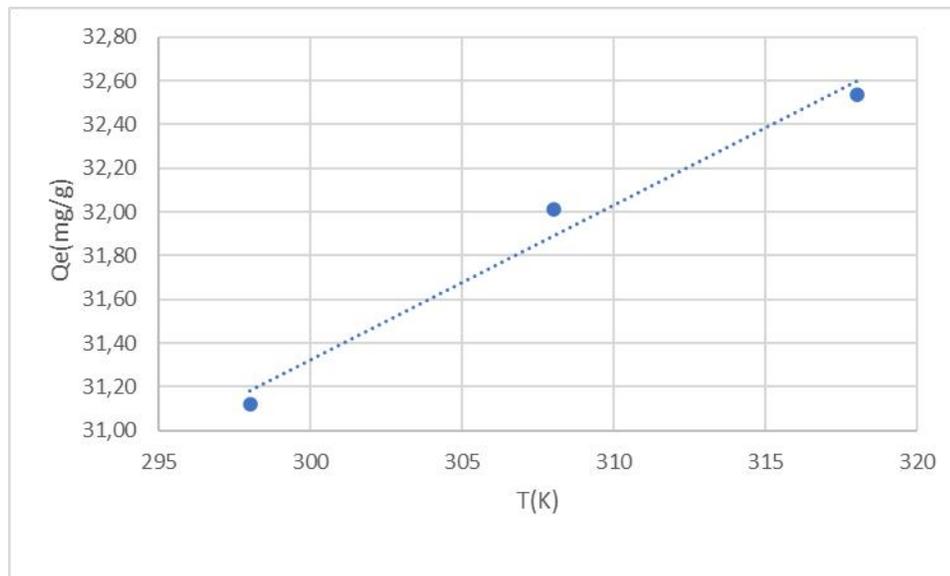


Figure: V 12: Effet de la température sur l'adsorption du colorant RC par le CA

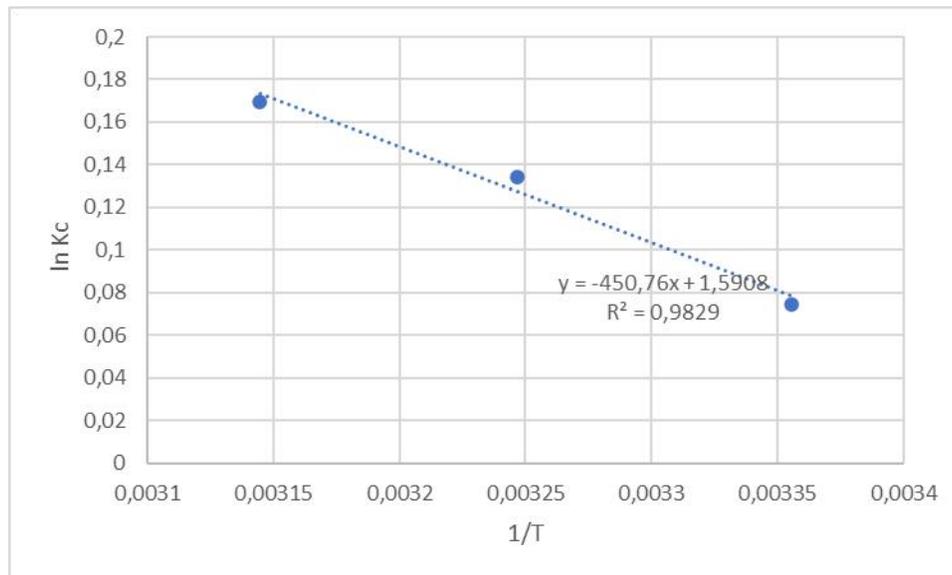
D'après l'analyse des résultats de la figure V12, on constate qu'à mesure que la température augmente de 25 à 45°C, la quantité absorbée augmente de 31,12 à 32,54 mg/g, ce qui signifie que le processus d'adsorption est endothermique.

V.11 Etude thermodynamique

Le **tableau V7** résume l'ensemble des résultats de l'étude thermodynamique. Sur la base de ces résultats, nous constatons que la valeur de (ΔH°) obtenu est positif, ce qui signifie que le processus d'adsorption est endothermique. Une augmentation de ΔS° indique une augmentation du caractère aléatoire sur la surface de l'adsorbant. Les valeurs d'enthalpie libre négatives (ΔG°) indiquent que le processus d'adsorption est spontané.

Table V 7: Paramètres thermodynamiques de l'adsorption du RC par le CAP.

	ΔH° (J/mol)	ΔS° (J/mol)	ΔG° (J/mol)			R^2
			298 K	308 K	318 K	
CAP	3747	13,2	-193,7	-326,0	-458,0	0,9829

**Figure: V13: Variation des paramètres thermodynamiques de l'adsorption en fonction de la température.**

Conclusion

Conclusion

Cette étude vise à évaluer l'efficacité du charbon actif préparé à partir de troncs de palmier (CAP) pour éliminer le colorant Rouge Congo (RC) de l'eau distillée. Un plan expérimental précis a été adopté en utilisant la conception Box-Behnken (BBD). En sélectionnant trois variables principales : la masse de l'adsorbant (mg), la concentration en C (mg/L) et le PH, afin de déterminer les conditions optimales pour le processus d'adsorption.

Grâce à l'étude pilote, nous avons pu obtenir quelques éléments fondamentaux et importants basés sur les principaux résultats suivants :

- ✓ Le point de charge zéro (pHPZC) du charbon actif a été déterminé à 10, et l'analyse de Boehm a montré que la surface avait une propriété basique.
- ✓ Les conditions optimales pour le processus d'adsorption ont été déterminées à : 26,43 mg d'adsorbant, 74 mg/L de RC et pH 7,97.
- ✓ L'étude cinétique a montré que l'adsorption du RC sur le CAP suit un modèle pseudo-second ordre, indiquant que la réaction se déroule via un mécanisme chimique.
- ✓ Les courbes d'adsorption ont révélé un comportement Giles de type L, reflétant une forte préférence pour l'adsorption à de faibles concentrations.
- ✓ Le modèle de Langmuir a montré une excellente concordance avec les données expérimentales ($R^2 = 0,9807$), indiquant une adsorption monocouche sur une surface homogène.
- ✓ La capacité d'adsorption maximale était d'environ 142,85 mg/g de charbon actif.
- ✓ D'un point de vue thermodynamique, le processus d'adsorption s'est avéré endothermique.

Références



- [1] Bhatnagar, A., & Silvana, A. (2010). Utilisation de déchets agro-industriels et municipaux comme adsorbants potentiels pour le traitement de l'eau — Une revue. *Chemical Engineering Journal*, 157, 277–296.
- [2] Watson, V., Nieto Delgado, C., & Logan, B. E. (2013). Influence des propriétés chimiques et physiques des poudres de charbon actif sur la réduction de l'oxygène et les performances des piles à combustible microbiennes. *Environmental Science & Technology*, 47(12), 6704–6710.
- [3] Menendez, J. A., Phillips, J., Shea, K., & Radovic, L. R. (1996). Sur la modification et la caractérisation des propriétés chimiques de surface du charbon actif. *Langmuir*, 12(18), 4404–4410.
- [4] Lou, Jinyan. (2005, 1 février). Étude comparative sur les charbons actifs. ENGREF – Centre de Montpellier; Office International de l'Eau (OIEau), Limoges, France.
- [5] Chemviron. (2004). *Charbons actifs*. Manuel technique, publication industrielle.
- [6] Jedil, T. (2011). *Étude de la préparation du charbon actif à partir d'olives et son application aux déchets industriels* [Mémoire de master].
- [7] Ravarini. (2004). Traitement des eaux de consommation – Adsorption (charbon actif). Cours d'appui, ENGREF, Montpellier, France.
- [8] Ben Amour, R., & Ndja, N. (2021). Étude de l'effet de la réactivation chimique d'un charbon actif commercial – Application environnementale [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ouargla]
- [9] Bisma Berrima. (2015). Étude structurale et chimique de la lignine d'Alfa et sa valorisation comme macromonomère et/ou précurseur du charbon actif [Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, en cotutelle avec Université de Sfax].
- [10] Blanco Castro, G., Bonelli, P. R., Serria, M., & Cukierman, A. L. (2000). Activation des résidus agricoles par l'acide phosphorique. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 39, 4166–4172.
- [11] Zhang, Y., et al. 2016. *Effets de la vapeur*. Détails de publication manquants.

[12] Chobanoglos, G. (1991). *Ingénierie des eaux usées : traitement, élimination et réutilisation*. McGraw-Hill, Singapour.

[13] Moreno-Castilla, C. (2004). Adsorption de molécules organiques à partir de solutions aqueuses sur des matériaux carbonés. *Carbon*, 42(1), 83–94.

[14] Derbyshire, F., Jagtwein, J., et al. (2001). Matériaux carbonés dans les applications environnementales. In *Chemistry and Physics of Carbon* (Vol. 27, pp. 1–xxx). Marcel Dekker Publishing.

[15] Villo-Gala, C., López-Peñalver, J., Sánchez-Polo, M., & Rivera-Atrija, R. (2014). Modifications de surface du charbon actif par irradiation gamma. *Carbon*, 67, 236–249.

[16] Salah, S. (2011). *Préparation et caractérisation d'un charbon actif à partir d'un bitume d'origine pétrolière* [Mémoire de master].

[17] Morand-Crini, N., & Crini, G. (2017). *Eaux industrielles contaminées: Réglementation, paramètres chimiques et biologiques & procédés d'épuration innovants*. Presses Universitaires de Franche-Comté, Besançon, France.

[18] Puragen (Activated-Carbon.fr). (2024, 16 juillet). Quelles sont les utilisations du charbon actif? Consulté via Puragen – CPL/Puragen Activated Carbons, Besançon, France .

<https://activated-carbon.fr/quelles-sont-les-utilisations-du-charbon-actif/>

[19] Taldi, F. (2006). *Étude de l'élimination du Chrome et du bleu de méthylène par adsorption sur la pyrophyllite* [Thèse de doctorat].

[20] Weber, W. J., & Van Vliet, P. (1992). Adsorption de composés organiques en phase aqueuse sur charbon actif. In B. H. Suffet & M. J. McGuire (Eds.), *Water treatment technology*.

[21] Obeid, M., & Ghrida, K. (2011). *Étude de l'efficacité d'un charbon actif à base de noix de dattes sur l'adsorption des métaux* [Mémoire de master, Université de Ouargla].

[22] Koller, M. (2009). *Aide-mémoire génie chimique* (3e éd.). Duno.

- [23] Bakouj, A. (2003). *Étude de l'adsorption du phénol sur TiO₂* [Mémoire de master, Université de Constantine].
- [24] El Marbat, S. (2002). *Contribution à l'étude de l'adsorption du carbofuran et du phénamiphos par les complexes argilo-humiques* [Thèse d'État, Agadir].
- [25] Sieber, R., Ragsdale, R., & Kuhr, R. (1987). In *ACS Symposium Series*, 336, 80–105.
- [26] Inayat-Zamir, K., et al. (2010). Decolouration of azo dyes by *Phanerochaete chrysosporium* immobilised into alginate beads. *Environmental Science and Pollution Research*, 17, 145–153.
- [27] Giles, C. H., Smith, D., & Hewitson, R. (1974). A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. *Journal of Colloid & Interface Science*, 47, 755–765.
- [28] Hintz, C. (2001). Description of sorption data with isotherm equations. *Geoderma*, 99, 225–243.
- [29] Enayatzamir, K., et al. (2010). *Environmental Science and Pollution Research*, 17, 145–153.
- [30] Son, Y., & Kim, J. (2005). Modification of Langmuir isotherm in solution systems. *Chemosphere*, 58(1), 115–123.
- [31] Acemoglu, B. (2004). Adsorption of Congo red. *Journal of Colloid and Interface Science*, 274, 371–379.
- [32] Malik, P. K. (2003). Use of activated carbon derived from... *Dyes and Pigments*, 56, 239–249.
- [33] Barrett, E. P., Joyner, L. G., & Halenda, P. P. (1951). The BJH method. *Journal of the American Chemical Society*, 73, 373–380.
- [34] Hu, Z., & Mackay, D. M. (1998). Kinetic modeling for sorption. *Chemical Engineering Journal*, 70, 115–124.
- [35] Hu, Z., & Mackay, D. M. (1999). Étude de biochimie des procédés sur l'adsorption. *Process Biochemistry*, 34, 451–465.

- [36] Benkartoussa, Miada, Arris, Sihem. (2021). *Utilisation de bio-sorbants pour l'adsorption de plusieurs polluants*, [Thèse de doctorat non publiée], Université de Constantine 3, Salah Boubnider, Faculté de génie des procédés pharmaceutiques.
- [37] Migui, B. (2015). *Adsorption de COV issues d'eaux souterraines*, Thèse de doctorat, Université de Perpignan.
- [38] Souhila, M., & Talbi, A. (2019). *Étude d'adsorption du Rouge Congo* [Mémoire de maitr, Université de Ouargla].
- [39] Ben Issa, M. (2010). *Étude de la dégradation photocatalytique d'un colorant synthétique et d'un tensioactif* [Thèse de doctorat, Université de Constantine].
- [40] Benaïssa, A. (2010). *Étude de la dégradation photocatalytique d'un colorant synthétique et d'un tensioactif* [Thèse de doctorat, Université de Constantine].
- [41] Rodier, J. (1996). *Analyse des eaux: eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer* (7e éd.). Éditions Dunod.
- [42] Benkarrou, N., & Chaïbanou, Z. (2015). *Électroflottation-électrocoagulation assistée par photocatalyse pour éliminer un colorant textile* [Mémoire de Master, Université de Béjaïa].
- [43] Halimachnini, N. (s.d.). *Dégradation photochimique du colorant ORANGE G* [Thèse de doctorat, Université de Constantine].
- [44] Hammami, M. (2008). *Dégradation des colorants textiles par oxydation avancée* [Mémoire de master].
- [45] Benghenna, M., & Bouadaa, L. (2014). *Photocatalyse combinée avec électroflottation pour traiter les effluents textiles* [Mémoire de Master, Université de Béjaïa].
- [46] Lin, S. H. (1993). Adsorption de colorant dispersé par du charbon actif. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 57, 387–391.
- [47] Anselm, A., & Jacobs, P. (1996). *Water treatment membrane processes*. New York, NY: McGraw-Hill

- [48] Nayens, P., Biens, R., Weemas, J., & De Heider, F. (2003). Sludge conditioning with Fenton's reagent. *Journal of Hazardous Materials*, 98(1–3), 91–106.
- [49] Salmi, N., & Slimani, R. (2014). Électroflottation-électrocoagulation pour éliminer le Bleu d'indanthrène RS [Mémoire de master, Université de Béjaïa].
- [50] Giza, H., & Beggana, M. (2013). Modélisation de l'adsorption. *Journal of Water Science*, 26, 39–50.
- [51] Warri, A. (2017). Oxydation des colorants par POAs sur catalyseurs argile K10 modifiée [Mémoire de maîtrise, Université de Tlemcen].
- [52] Wang, S. B., Zhu, Z. H., Coomes, A., Haghseresht, F., & Lu, G. Q. (2005). The physical and surface chemical characteristics of activated carbons and the adsorption of methylene blue from wastewater. *Journal of Colloid and Interface Science*, 284(2), 440–446.
- [53] Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2013). *Fundamentals of Analytical Chemistry* (9th ed., pp. 40–60). Belmont, CA: Cengage Learning.
- [54] Christian, G. D. (2004). *Analytical Chemistry* (6th ed., pp. 45–50). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [55] Crini, G., & Badot, P. M. (2008). Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes. *Progress in Polymer Science*, 33(4), 399–447.
- [56] Ruthven, D. M. (1984). *Principles of Adsorption and Adsorption Processes*. New York, NY: Wiley-Interscience.
- [57] Rouquerol, F., Rouquerol, J., & Sing, K. (2014). *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*. London, UK: Academic Press.
- [58] Malik, R., Ramteke, D. S., & Wate, S. R. (2007). Adsorption of Malachite Green on activated carbon derived from fertilizer waste. *Journal of Hazardous Materials*, 27(9), 1129–1138.

Annexe



Autorisation d'impression finale d'un mémoire de master

	Nom et prénom	Signature
Présidente de jury	Babaamer Zohra	
Examinatrice	Khane Yasmina	
Examinatrice	Benchadi Wassila	
Encadrant	Daoud Mounir	

Je soussigné : Babaamer Zohra

Président de jury des étudiantes : Nesrine Chellou et Fatima Zahra Lahrache

Filière : Chimie; Spécialité : Chimie analytique

Thème : Évaluation de l'efficacité d'un charbon actif pour l'adsorption d'un polluant,
Optimisation par plan d'expérience de Box Behnken.

J'autorise les étudiantes mentionnées ci-dessus à imprimer et déposer leur manuscrit final au niveau du département.

Ghardaïa le : 28/06/2025

La présidente de jury

Le chef de département

جامعة غرداية رئيس قسم التعليم المشترك في العلوم والتكنولوجيا
قسم التعليم المشترك في العلوم والتكنولوجيا
شعبة التعليم المشترك في العلوم والتكنولوجيا
بأبوابه فيحصل
قسم العلوم و التكنولوجيا