

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Génie de L'environnement

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie des procédés

Spécialité : Génie des procédés de l'environnement

Par

- **Maouloud Echrif Ali**
- **Alloul Youcef**
- **Agdouche Said**

Intitulé

Fabrication d'un adsorbant à base naturelle

Soutenu le : 29/06/2025

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. A.M. Rokbane</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. H. Karce</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. A. Benmakhlouf</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. A. Zorai</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-Tizi ouezou</i>
<i>M. H. Bennacer</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2024/2025

Rermerciement

Tout d'abord on remercie Dieu le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la force pour réaliser ce travail.

On remercie notre encadreur Mr. Housseem Eddine Karce et Mr. Benmakhlouf A.F pour leurs Disponibilités, encadrement ainsi que leurs conseils et Orientations.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents pour leurs Encouragements, leurs soutiens tout au long de nos études.

Nos remerciements vont également à tous nos Enseignants qui ont Contribués énormément à notre formation. Ainsi qu'à nos amis et camarades.

Nos gratitudes vont également aux membres du jury qui ont acceptés d'évaluer ce travail.

Un grand merci pour tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail

DÉDICACES

En premier lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents et
Mon frère et toute la famille
et mes amies proche
(yassine, hassane, redouane
oussama, hachem, hadjer)

Pour leurs soutient, et leurs encouragement.

À mes chères amis (es) et particulièrement,

À mes collègues **Maouloud Cherif Ali et Alloul youcef** qui ont partagés avec moi
les moments

difficiles de ce travail.

A tous les enseignants qui ont contribués et qui m'ont aidé à accomplir

Mon cursus universitaire

Et à ceux qui ont contribués à la réalisation de ce travail.

A vous tous merci.

DÉDICACES

En premier lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents et
Mon frère et toute la famille

Pour leurs soutient, et leurs encouragement.

À mes chères amis (es) et particulièrement,

À mes collègues **Maouloud Cherif Ali et agdouche said** qui ont partagés avec moi
les moments

difficiles de ce travail.

A tous les enseignants qui ont contribués et qui m'ont aidé à accomplir

Mon cursus universitaire

Et à ceux qui ont contribués à la réalisation de ce travail.

A vous tous merci.

DÉDICACES

En premier lieu je remercie Allah le tout puissant de m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Je dédie ce travail :

À mes très chers parents et
Mon frère et toute la famille
et mes sœurs

(ma mère , grand frère ,
mon père les amies)

À mes chères amis (es) et particulièrement,

À mes collègues **Alloul Youcef et Agdouch said** qui ont partagés avec moi les moments

difficiles de ce travail.

A tous les enseignants qui ont contribués et qui m'ont aidé à accomplir

Mon cursus universitaire

Et à ceux qui ont contribués à la réalisation de ce travail.

A vous tous merci.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : pollution des eaux	
I.1 Pollution des eaux.....	3
I.1.1 Définition de la pollution de l'eau	3
I.1.2 Origines de la pollution de l'eau	3
I.1.3 Pollution pluviale	4
I.1.4 Différents types de pollution des eaux.....	4
I.2 colorants.....	5
I.2.1 Définition d'un colorant.....	5
I.2.2 Classification des colorants.....	6
I.2.3 Impacts de la pollution des eaux.....	8
I.2.4 L'orange de méthyle (OM)	9
I.3 Traitement des eaux colorées par adsorption.....	10
I.3.1 Définition de l'adsorption	10
I.3.2 Types d'adsorption.....	10
Chapitre II : Etude expérimentale	
II.1 Matériel, Produits et Méthodes.....	19
II.1.1 Matériel	19
II.2 Principe de la mesure et caractéristiques principales	19
II.2.1 Produits	22
II.2.2 Application d'adsorption	22
II.3 Cinétique d'adsorption (temps de contact) :	23
II.3.1 Modèle pseudo- premier ordre	23
II.3.2 Modèle pseudo-seconde ordre	24
II.4 Isotherme d'adsorption	25
II.4.1 Modèle de Langmuir	25
II.4.2 Modèle de Freundlich.....	26
II.5 Plan d'expérience.....	27
II.5.1 Facteurs qui influent sur l'adsorption.....	28
Chapitre III : Résultats et discussions	

III.1	Application du plan d'expériences	30
III.1.1	Choix des facteurs.....	30
III.1.2	Modélisation.....	30
III.1.3	Evaluation de l'adéquation du modèle statistique	32
III.1.4	Justification du modèle est signification des facteurs	34
III.1.5	Diagrammes des effets principaux	35
III.1.6	Diagrammes des effets d'interactions des facteurs sur l'adsorption.....	36
III.1.7	Graphiques de surfaces et des contours	37
III.1.8	Optimisation des paramètres qui maximise la réponse	39
III.2	Cinétique d'adsorption.....	40
III.2.1	Cinetique et la modelisatioon	40
III.3	Isotherme d'adsorption	42
	Conclusion générale.....	46
	Référence	48
	Résumé	50

Liste des figures

Figure I. 1: Exemple des colorants synthétiques.....	7
Figure I. 2. Structure de colorant azoïque.	7
Figure I. 3: Le phénomène d'adsorption.....	13
Figure I. 4: Structure du charbon actif [012]	14
Figure II. 1: Photo de spectroscopie UV.....	19
Figure II. 2 : Photo de Bain marie	20
Figure II. 3: Photo d'agitateur.....	21
Figure II. 4: Photo d'une balance électrique.....	21
Figure II. 5: Courbe d'étalonnage	23
Figure II. 6: Schéma plusieurs entrées et une seule sortie	27
Figure III. 1: Effet des facteurs principaux et leurs interactions	32
Figure III. 2: Dépendance de la réponse réelle en fonction de la réponse prédite.....	33
Figure III. 3: Diagramme de dispersion des résidus	33
Figure III. 4: Diagramme de dispersion des résidus	35
Figure III. 5: Diagramme des effets principaux pour la quantité de matière adsorbée.....	35
Figure III. 6: Diagramme des effets principaux pour l'adsorption	36
Figure III. 7: Diagrammes de surfaces pour l'adsorption.....	38
Figure III. 8: Optimisation de Q_e	39
Figure III. 9 : Modélisation de la cinétique d'adsorption	40
Figure III. 10: Modélisation de l'isotherme d'adsorption	44

Liste des tableaux

Tableau I. 1 . Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante .[13].....	6
Tableau I. 2 . Propriétés de quelques colorants basiques ou cationiques	8
Tableau I. 3 : Propriétés de quelques colorants acides ou anioniques	8
Tableau I. 4 : Propriétés de l'orange méthyle (OM)	9
Tableau I. 5 : Différentes formes du charbon actif	15
Tableau I. 6 comparatif des capacités d'adsorption de l'orange de méthyle sur différents types d'adsorbants	16
Tableau II. 1 : Comparaison entre les deux modèles cinétiques	25
Tableau II. 2 : Quelques modèles d'isotherme	27
Tableau III. 1 : Facteurs choisis pour l'expérience.....	30
Tableau III. 2 : Essais et réponses du plan box-Behnken	31
Tableau III. 3 : ANOVA pour validation du modèle.....	34
Tableau III. 4 : paramètre d'optimisation	40
Tableau III. 5 : Etude de l'isotherme	41
Tableau III. 6 Paramètres des modèles d'isothermes de Langmuir et Freundlich à différentes températures pour l'adsorption du colorant Orange de Méthyl	44

Introduction Générale

Les rejets colorés issus de diverses industries représentent non seulement une nuisance esthétique, mais également un danger sanitaire, en raison de la toxicité de nombreux colorants synthétiques. Comme pour la majorité des composés organiques dangereux pour la santé humaine, ces colorants nécessitent un traitement spécifique. Or, les procédés classiques utilisés dans les stations d'épuration s'avèrent souvent inefficaces, voire inadaptés, pour éliminer ces polluants biocides.[1]

Face à cette problématique, la dépollution des eaux contaminées par ces composés chimiques devient une nécessité, tant pour la protection de l'environnement que pour une potentielle réutilisation de ces eaux dites non conventionnelles, tout en limitant les pertes hydriques grâce au recyclage.[2]

Dans ce cadre, l'adsorption s'impose comme une alternative prometteuse aux méthodes physico-chimiques traditionnelles. Elle se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, son efficacité, et son coût relativement faible. Ce travail vise à étudier une méthode économique et pratique pour l'élimination du colorant méthyl orange présent dans l'eau, par adsorption sur charbon actif.

L'étude porte notamment sur l'influence de plusieurs paramètres expérimentaux : la concentration initiale du colorant, la masse d'adsorbant utilisée, le pH du milieu, ainsi que la température. La méthode des plans d'expérience de type Box-Behnken, fondée sur trois facteurs, a été employée afin d'optimiser ces paramètres. Cette approche est largement utilisée dans la modélisation expérimentale et l'optimisation des procédés.

Afin de mieux comprendre le mécanisme de fixation du colorant sur le charbon actif, une attention particulière a été portée à l'étude de la cinétique et des isothermes d'adsorption.

Ce manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique portant sur la pollution des eaux par les colorants, les caractéristiques de ces derniers, ainsi que les techniques de dépollution disponibles, avec un accent particulier sur l'adsorption.
- Le second chapitre décrit le protocole expérimental mis en œuvre, ainsi qu'un rappel des principes de la méthode des plans d'expérience.
- Enfin, le troisième chapitre expose les résultats obtenus, sous forme de tableaux et de figures, accompagnés d'une interprétation des données et des modèles développés.

Une conclusion générale vient clore l'étude, en résumant les résultats principaux et les perspectives offertes par cette méthode.

Chapitre I

Pollution des eaux

I.1 Pollution des eaux

I.1.1 Définition de la pollution de l'eau

La pollution de l'eau correspond à la dégradation de sa qualité, causée par une altération défavorable et nuisible de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques .

« la pollution des eaux » est définie comme l'introduction dans le milieu aquatique de toute substance pouvant modifier les caractéristiques physiques, chimiques et/ou biologiques de l'eau. Une eau est dite polluée lorsqu'elle est détériorée par des activités humaines, qu'elles soient domestiques, industrielles ou agricoles.[3][4]

I.1.2 Origines de la pollution de l'eau

La pollution durable de l'eau est principalement causée par les rejets industriels, les eaux usées urbaines, ainsi que l'utilisation de pesticides et d'engrais en agriculture. 'D'après W. Wesley Eckenfelder (1982), on distingue quatre grandes sources de pollution de l'eau'' [5] :

- Les eaux usées domestiques ;
- Les eaux usées industrielles ;
- Le ruissellement provenant des zones agricoles ;
- Le ruissellement et les eaux de pluie en milieu urbain

I.1.2.1 Pollution domestique

La pollution domestique provient des habitations et est acheminée par le réseau d'assainissement vers la station d'épuration. Les effluents domestiques sont un mélange d'eaux contenant des déjections humaines. Celles-ci comprennent des matières organiques biodégradables ainsi que des matières minérales, sous forme dissoute ou en suspension. Les eaux usées domestiques comprennent principalement les eaux ménagères (cuisine, lessive) et les eaux-vannes (sanitaires).[6]

I.1.2.2 Pollution agricole

La pollution agricole provient des activités d'élevage et des pratiques culturales. Les eaux usées d'origine agricole sont une source majeure de *pollution diffuse*. Elles se caractérisent principalement par :

Des concentrations élevées en sels minéraux (azote, phosphore, etc.), issus des engrais et des effluents d'élevage (lisiers, purins) ;

La présence de produits chimiques tels que les pesticides et herbicides utilisés pour les traitements des cultures.

I.1.3 Pollution pluviale

Elle résulte du ruissellement des eaux de pluie. Les eaux pluviales représentent une source majeure de pollution des cours d'eau, particulièrement lors des épisodes orageux [6]. En étant en contact direct avec l'atmosphère et le sol, elles se chargent d'impuretés qu'elles entraînent ensuite vers les cours d'eau, provoquant ainsi leur contamination [7].

I.1.4 Différents types de pollution des eaux

I.1.4.1 Pollution organique

Elle concerne la présence de micro-organismes pathogènes dans l'eau, tels que les bactéries et les virus.

La pollution par les matières organiques est l'une des formes les plus importantes et les plus répandues. Elle est caractérisée par le rejet de substances plus ou moins biodégradables provenant de certaines industries agroalimentaires et de conditionnement. Elle inclut également des substances toxiques parfois persistantes, telles que les phénols, hydrocarbures, tensioactifs, pesticides, entre autres .

I.1.4.2 Pollution biologique

La contamination microbiologique correspond à la présence de bactéries, de parasites ou de virus pathogènes dans l'eau, Ces micro-organismes, majoritairement d'origine fécale, proviennent principalement du rejet d'eaux usées insuffisamment traitées dans le milieu naturel [8]

I.1.4.3 Pollution thermique

La pollution thermique résulte d'une modification de la température de l'eau due aux rejets industriels ou urbains, affectant les écosystèmes aquatiques, Il s'agit d'une pollution diffuse, souvent invisible, et qui, pour cette raison, n'est pas toujours reconnue comme une véritable forme de pollution .

I.1.4.4 Pollution inorganique

désigne la contamination de l'environnement par des substances non organiques – c'est-à-dire qui ne contiennent pas de carbone-hydrogène comme les molécules organiques. Elle est souvent d'origine industrielle ou humaine.

Exemples de polluants inorganiques :

- **Métaux lourds** : plomb (Pb), mercure (Hg), cadmium (Cd), arsenic (As)
- **Composés minéraux** : nitrates, phosphates, sulfates
- **Gaz** : dioxyde de soufre (SO₄), dioxyde d'azote (NO₂), monoxyde de carbone (CO)[9]

I.1.4.5 Pollution industrielle

La pollution industrielle provient des activités industrielles et se caractérise par sa grande diversité, en fonction des utilisations de l'eau. Les eaux usées industrielles varient selon les secteurs d'activité. Elles peuvent contenir :

- des matières organiques,
 - des composés phosphorés et azotés,
 - des solvants,
 - des métaux lourds,
 - des hydrocarbures,
- entre autres [10]

I.1.4.6 Pollution chimique

Elle concerne la présence de nitrates et de phosphates issus des pesticides, des médicaments à usage humain et vétérinaire, des produits ménagers, des peintures, des métaux lourds, des acides, ainsi que des hydrocarbures employés dans les activités industrielles.[11]

I.2 Colorants

I.2.1 Définition d'un colorant

Un colorant est une substance, qu'elle soit colorée ou non, qui, lorsqu'elle entre en contact de manière appropriée avec un support, s'y fixe ou s'y dissout de façon durable, en lui apportant une nouvelle propriété : la couleur.

Les substances colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber la lumière dans le spectre visible, compris entre 380 et 750 nm. La transformation de la lumière blanche en lumière colorée, qu'elle soit réfléchie, transmise ou diffusée par un corps, est due à une absorption sélective de l'énergie lumineuse par des groupes d'atomes spécifiques appelés chromophores [12]

Tableau I. 1 . Principaux groupes chromophores et auxochromes, classés par intensité croissante .[13]

Groupements chromophores	Groupements auxochromes
Azo (-N=N-)	Amine primaire (-NH ₂)
Nitroso (-NO)	Amine secondaire (-NHR)
Carbonyl (=C=O)	Amine tertiaire (-NR ₂)
Vinyl (-CH=CH-)	Hydroxyl (-OH)
Nitro (-NO ₂)	Alkoxy (-OR)
Sulphure (>C=S)	Donneurs d'électrons (-CL)

I.2.2 Classification des colorants

Il existe deux grandes classes de colorants, en l'occurrence les colorants naturels et les colorants synthétiques

I.2.2.1 Colorants naturels

La majorité des colorants utilisés sont d'origine naturelle, principalement **végétale**, extraits de plantes, d'arbres ou de lichens. Certains proviennent également de sources **animales**, comme les insectes (kermès, cochenille) ou les mollusques (pourpre), voire de **micro-organismes** .

- Le **bleu** est obtenu à partir de l'**indigo**, une plante de la famille des légumineuses.
- Le **rouge** provient de la **racine de garance**.
- Le **jaune** est extrait du **safran** .[14]

I.2.2.2 Colorants synthétiques

Les colorants synthétiques sont classés selon leur structure chimique et leur méthode d'application aux différents substrats (textiles, papier, cuir, matières plastiques, etc).

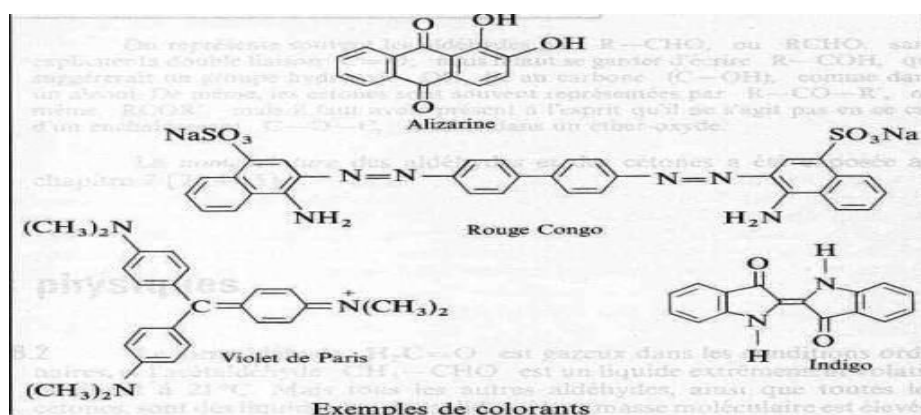


Figure I. 1: Exemple des colorants synthétiques

I.2.2.3 Colorants azoïques

Les colorants azoïques se distinguent par la présence d'un groupe azoïque (-N=N-) reliant deux noyaux benzéniques dans leur structure moléculaire. Actuellement, ils constituent la catégorie de colorants la plus largement utilisée, représentant plus de 50 % de la production mondiale de matières colorantes.[15]

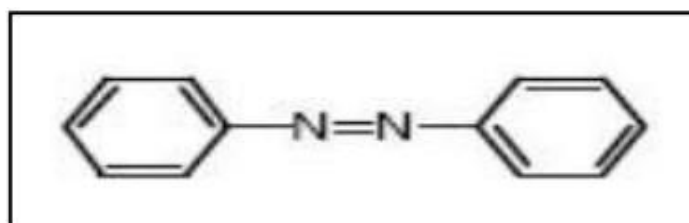


Figure I. 2. Structure de colorant azoïque.

I.2.2.4 Colorants triphénylméthanés

Les colorants triphénylméthanés sont issus du triphénylméthane, un hydrocarbure comportant trois noyaux phényle attachés à un atome de carbone central. Cette structure de base se retrouve dans de nombreux composés organiques colorés. Les colorants triphénylméthanés, ainsi que leurs dérivés hétérocycliques, forment la plus ancienne catégorie de colorants synthétiques. Bien qu'ils soient aujourd'hui moins utilisés que les colorants azoïques et anthraquinoniques, ils conservent une valeur commerciale, car ils permettent de produire une large gamme de couleurs. Ces colorants sont largement employés dans les industries papetières et textiles pour teindre des fibres telles que le

nylon, la laine, la soie et le coton. Leur utilisation ne se limite cependant pas à ces secteurs industriels, puisqu'on les retrouve également dans le domaine médical, où ils servent de marqueurs biologiques et d'agents antifongiques pour les poissons et la volaille. [16]

I.2.2.5 Colorant basiques ou cationiques

Il se distinguent par l'éclat intense de leurs teintes. Toutefois, leur faible résistance à la lumière limite leur utilisation dans la teinture des fibres.[17]

Tableau I. 2 . Propriétés de quelques colorants basiques ou cationiques [17]

Nom du colorant	Famille	couleur	Applications principales
Bleu de méthylène	Thiazine	Blue	Biologie ; médecine ; traitement des eaux
Vert malachite	Triarylmethane	Vert	Coloration biologique ; industrie textile
Rouge basique 9	Azoïque	Rouge	Textile ; papier ; encres

I.2.2.6 Colorants acides ou anioniques

Les colorants acides, également appelés colorants anioniques, possèdent un groupe chromophore, qui confère la couleur, ainsi qu'un ou plusieurs groupes sulfonates facilitant leur solubilité dans l'eau.[18]

Tableau I. 3 : Propriétés de quelques colorants acides ou anioniques [18]

Nom du colorant	Famille	couleur	Applications principales
Orange de méthyle	Azoïque	Orange	Indicateur de ph ; labo
Rouge Congo	Azoïque	Rouge	Biologie ; textile
Blue patente V	Triarylmethane	Blue	Alimentation ; cosmétique

I.2.3 Impacts de la pollution des eaux

I.2.3.1 Sur environnements

- ✓ Diminution de la teneur en oxygène dissout.
- ✓ Prolifération d'algues.
- ✓ Modification physique du milieu récepteur.[19]

I.2.3.2 Sur la santé humaine

Les maladies liées à la présence d'éléments pathogènes ou de molécules toxiques sont très répandues. Les parasitoses d'origine hydrique dominent très largement la pathologie des habitants du tiers monde :(cholera, Paludisme...).[20]

I.2.3.3 Sur l'économie

La pollution dans tous ses aspects, atmosphérique, hydrique et édaphique est accompagnée d'impacts négatifs sur l'économie.

I.2.4 L'orange de méthyle (OM)

C'est un colorant azoïque anionique utilisé principalement comme indicateur de pH dans les titrages acide-base. C'est un composé chimique qui change de couleur en fonction de l'acidité du milieu, ce qui permet de détecter la fin d'une réaction chimique.[21]

I.2.4.1 Les Propriétés physiques et chimiques de l'orange méthyle

Les propriétés du Orange méthyle sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau I. 4 : Propriétés de l'orange méthyle (OM) [21]

Propriété	Valeur / information
Nom courant	Orange de méthyle
Synonymes	Méthyl orange ; orange III
Numéro CAS	547=58=0
Numéro EINECOS	208=925=3
Index de couleur	C.I. 13025
Formule chimique	C₁₄H₁₄N₃NaO₃S
Poids moléculaire	327.33 g /mol
Max(absorption)	588 nm
Température de décomposition	vers 300 °C
Pression de vapeur	Négligeable à température ambiante
Solubilité	Soluble dans l'eau ; légèrement soluble dans l'éthanol

I.3 Traitement des eaux colorées par adsorption

I.3.1 Définition de l'adsorption

L'adsorption désigne le phénomène par lequel des molécules présentes dans une phase fluide (liquide ou gaz), appelées adsorbats, se fixent à la surface d'un solide, appelé l'adsorbant.

Ce processus de dépôt ne se fait pas de manière uniforme, car tous les composants d'un mélange ne s'adsorbent pas avec la même rapidité ni dans les mêmes proportions, ce qui entraîne un phénomène de séparation.

Le terme "adsorption" a été introduit pour la première fois par Kayser en 1881 afin de distinguer ce phénomène de la condensation gazeuse à la surface d'un solide, et de l'absorption, où les molécules de gaz pénètrent dans le matériau.

L'adsorption à l'interface entre un soluté et un solide peut être soit physique, soit chimique. Elle se produit lorsque des molécules contenues dans un effluent liquide ou gazeux se fixent à la surface d'un solide, et dépend à la fois des propriétés de cette interface et des caractéristiques physico-chimiques de l'adsorbat. Ce phénomène résulte des forces, physiques ou chimiques, qui agissent à la surface du solide.[22]

I.3.2 Types d'adsorption

On distingue deux types d'adsorption selon la nature des liaisons établies entre les molécules et la surface du solide, ainsi que l'énergie libérée lors de leur fixation : l'adsorption physique et l'adsorption chimique [17].

I.3.2.1 L'adsorption physique (physisorption)

L'adsorption physique est un phénomène d'adsorption où les interactions entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant sont de faible intensité, de l'ordre des forces de Van der Waals. Elle se distingue par les caractéristiques suivantes :

- L'établissement rapide de l'équilibre entre la phase adsorbée et la phase fluide ;
- Une chaleur d'adsorption comparable à celle de la liquéfaction du gaz adsorbé ;
- Un processus réversible, sans sélectivité particulière.

Ce type d'adsorption correspond essentiellement à une condensation des molécules sur la surface du solide. Il est favorisé par une baisse de la température.[23]

I.3.2.2 Adsorption chimique (chimisorption)

L'adsorption chimique fait intervenir des liaisons chimiques entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant, impliquant un transfert ou un partage d'électrons. Elle entraîne donc la formation et la rupture de liaisons chimiques avec les sites actifs de l'adsorbant. Elle présente les caractéristiques suivantes :

- L'équilibre entre les phases s'établit lentement ;
- La quantité adsorbée tend à croître avec la température ;
- La chaleur dégagée est importante, de l'ordre de 40 à 100 kJ/mol, soit environ dix fois plus élevée que celle observée pour la physisorption ;
- Le phénomène est irréversible ;
- L'adsorption est spécifique : seuls certains adsorbats peuvent se fixer sur un type donné d'adsorbant.

L'enthalpie d'adsorption chimique est bien supérieure à celle de l'adsorption physique, atteignant généralement des valeurs varie généralement entre 40 et 200 kJ/mol .[24]

Tableau I. les principales différences entre les deux types d'adsorption [24]

	Adsorption physique	Adsorption chimique
	1 à 10	10 à 25
En générale rapide		Appréciable
Evolution de la capacité d'adsorption		Complexe
Caractéristique	Adsorption physique	Adsorption chimique
Chaleur d'adsorption (Kcal.mol-1)	1 à 10	10 à 25
Vitesse de processus	En générale rapide	Appréciable
L'effet de la température sur la capacité de fixation	Diminution de la capacité d'adsorption	Complexe
Réversibilité	Réversible	Réversible et irréversible
Spécificité	Relativement non spécifique	Spécifique

Libération de la chaleur d'adsorption	Exothermique	Exothermique et endothermique
Présence d'énergie d'activation	Rarement	Oui
Ordre de grandeur de l'énergie d'activation	généralement supérieur à quelques calories par mole	Supérieur à 20Kcal.mol ⁻¹
Nature de la couche	Mono et multicouches	Mono couche seulement
Présence de transfert d'électron	Pas de transfert d'électron bien qu'une polarisation de l'adsorbat puisse se produire	Transfert d'électron, formation de liaisons entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant.

I.3.2.3 Le mécanisme d'adsorption d'un colorant

L'adsorption est un procédé largement utilisé pour l'élimination des colorants, avec une grande efficacité dans le traitement des eaux usées. Ce processus repose sur la capacité d'un adsorbant à retenir sélectivement des polluants (appelés adsorbats), en raison d'interactions spécifiques entre la surface du matériau et les molécules adsorbées. L'adsorption implique un transfert de masse de la phase liquide vers la surface d'un solide, et se déroule en plusieurs étapes :

- **Diffusion externe** : il s'agit du transport du colorant depuis la solution jusqu'à la surface externe des particules adsorbantes. Ce transfert dépend principalement des conditions d'écoulement du fluide au sein du lit d'adsorption.
- **Diffusion interne** : une fois à la surface, les molécules pénètrent à l'intérieur des pores de l'adsorbant. Ce processus est influencé par le gradient de concentration du colorant.
- **Diffusion de surface vers les sites actifs** : c'est la dernière étape, au cours de laquelle les molécules de colorant se fixent sur les sites actifs situés à l'intérieur des pores de l'adsorbant

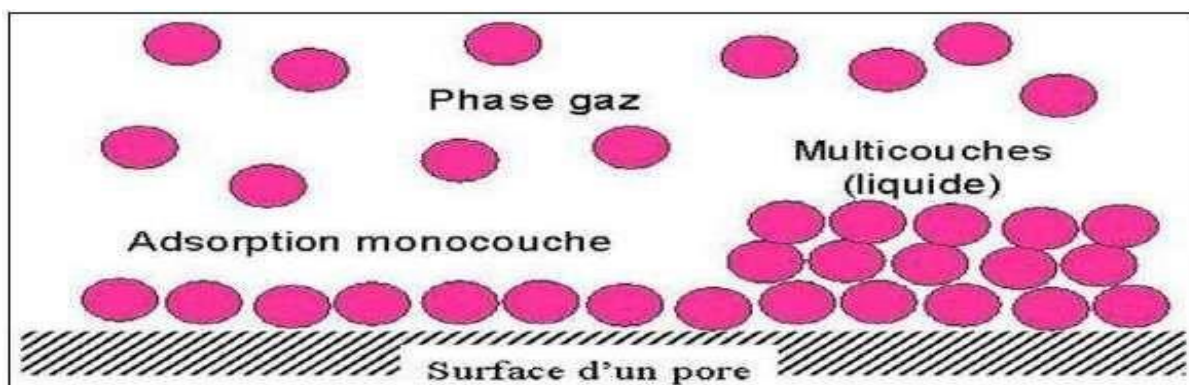


Figure I. 3: Le phénomène d'adsorption

I.3.2.4 Les principaux adsorbants :

a. Gels de silice :

Les gels de silice ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) sont préparés par précipitation de la silice : on fait réagir une solution de silicate de sodium avec un acide minéral (sulfurique ou chlorhydrique). Le gel formé est ensuite rincé, séché puis activé. Sa structure poreuse résulte de l'agglomération de microparticules à peu près sphériques et d'un diamètre uniforme compris entre 2 et 20 nm. La surface des gels est polaire grâce aux groupements hydroxyles présents, ce qui les rend particulièrement efficaces pour adsorber des molécules polaires telles que l'eau et les alcools.

Parmi leurs applications principales figurent le séchage des gaz et des liquides, la séparation des composés aromatiques, le traitement du gaz naturel, etc. »

b. Zéolithes :

Les zéolithes sont des aluminosilicates cristallisés possédant une structure microporeuse, de formule brute $(\text{AlO}_2 \cdot \text{M}, n\text{SiO}_2)$, où M désigne généralement un ion alcalin ou alcalino-terreux et $n \geq 1$. On dénombre plus d'une centaine de variétés de zéolithes, qui se distinguent principalement par leur rapport Si/Al (valeur de n) et par leur architecture cristalline. »

c. Les argiles activées :

Les argiles activées sont des aluminosilicates dont la formule brute est proche de celle des zéolithes, mais avec une structure cristalline différente. Ces produits naturels sont principalement employés pour le séchage]

d. Les tamis moléculaires :

Ce sont des solides carbonés dotés d'une répartition extrêmement homogène de la taille de leurs pores

e. Les charbons actifs :

Le charbon actif, qu'il soit sous forme de grains ou de poudre, est un matériau carboné dont la structure poreuse offre une surface interne de contact très étendue. Obtenus par un procédé industriel, ces matériaux peuvent adsorber une grande variété de substances, c'est-à-dire fixer des molécules sur leur surface interne. Pour cette raison, on les désigne couramment sous le terme « adsorbant

➤ **Structure et forme du charbon actif**

La structure cristalline du charbon actif consiste en un ensemble de couches planes d'atomes de carbone, ordonnés en hexagone réguliers (Figure I- 6). L'analyse de diffraction aux rayons X, révèle que sa structure est graphitique, mais avec quelques différences, notamment par la disposition des couches planes d'atomes de carbone en un agencement désordonné et par la formation de groupements fonctionnels, dus à la présence d'hétéroatomes (oxygène, métaux, hydrogène...) dans le réseau cristallin.[25]

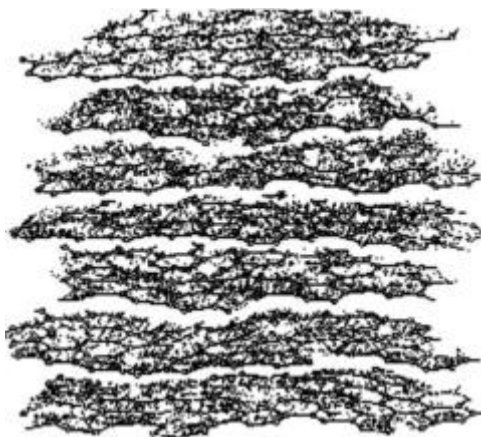


Figure I. 4: Structure du charbon actif [012]

Le charbon actif peut être façonné sous différentes formes , Les formes du charbon actif les plus utilisés sont montrées dans le tableau suivant :

Tableau I. 5 : Différentes formes du charbon actif

<p>Forme cylindrique avec des diamètres allant de 0.8 mm à 5 mm , utilisé pour des applications en phase gazeuse</p>		
<p>Charbon actif extrudé</p>		
<p>Une granulométrie inférieure à 100µm avec un diamètre moyen situé entre 15 et 25 µm. une vitesse d'adsorption très rapide</p>		
<p>Charbon actif en poudre</p>		
<p>Taille des particules supérieure à 1mm, les phénomènes de diffusion à l'intérieur des pores prennent une grande importance dans le processus d'adsorption</p>		
<p>Charbon actif grain</p>		

Le Tableau ci-dessous comparatif des capacités d'adsorption de l'orange de méthyle sur différents types d'adsorbants :

Tableau I. 6 comparatif des capacités d'adsorption de l'orange de méthyle sur différents types d'adsorbants [25]

Adsorbant	Q_{max}(mg /g)	Rendement	commentaires
Charbon actif commercial	130	97=98%	Très haute capacité ; performance optimale avec adsorbant standard
Biochar brut(paille prosopis)	8.08	64%	Biochar non modifié, issus d'éco-déchets
Biochar brut(fumier de volaille)	20.8	88.8%	Pyrolyse à 550 °C

Chapitre II

Étude expérimentale

II.1 Matériel, Produits et Méthodes

II.1.1 Matériel

Spectroscopie UV



Figure II. 1: Photo de spectroscopie UV

II.2 Principe de la mesure et caractéristiques principales

La spectrophotométrie UV-Visible repose sur une propriété fondamentale de certaines molécules : leur capacité à absorber la lumière à des longueurs d'onde spécifiques dans le domaine ultraviolet et visible du spectre électromagnétique. Cette méthode analytique, la spectrophotométrie UV-Visible, permet d'étudier quantitativement la concentration d'une espèce chimique en solution, grâce à la loi de Beer-Lambert, exprimée par la relation :

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot C \quad (\text{II.1})$$

où A est l'absorbance, ε le coefficient d'absorption molaire (ou d'extinction molaire), l la longueur du trajet optique (généralement en cm), et C la concentration de la solution (en $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). Cette loi établit une relation de proportionnalité directe entre l'absorbance et la concentration d'un soluté, dans certaines conditions expérimentales.

Outre les dosages quantitatifs, la spectrophotométrie UV-Visible permet également l'analyse structurale de molécules ou de complexes, en observant la position, l'intensité et la forme des bandes d'absorption dans le spectre. Ces informations sont révélatrices de la nature des transitions électroniques mises en jeu.

L'instrument utilisé pour cette technique est le spectrophotomètre, qui mesure l'absorbance d'une solution à une ou plusieurs longueurs d'onde choisies en fonction des caractéristiques spectrales de la substance analysée]

- **Bain mari**



Figure II. 2 : Photo de Bain marie



Figure II. 3: Photo d'agitateur

- **Bécher**
- **Balance électrique**



Figure II. 4: Photo d'une balance électrique

II.2.1 Produits

- Charbon actif
- Acide chlorhydrique HCl
- méthyle orange
- Hydroxyde de sodium NaOH

II.2.2 Application d'adsorption

II.2.2.1 Préparation des solutions mère du orange methylne

Une solution mère de méthylorange a été préparée en dissolvant précisément 200 mg de méthylorange ($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$) dans 1 litre d'eau distillée, obtenant ainsi une concentration de 200 mg/L. Cette solution a été utilisée comme solution de référence pour l'ensemble des expériences.

Le méthylorange est un indicateur coloré couramment utilisé pour le suivi de réactions acido-basiques et les études de décoloration dans les procédés de traitement de l'eau.

II.2.2.2 Méthodes de dosage par spectroscopie UV-Visible

Les mesures d'absorbance ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible de type Helios Gamma (modèle UV-120-02), piloté par un ordinateur. Cet appareil permet l'acquisition directe des absorbances, avec un balayage automatique des longueurs d'onde dans la plage de 200 à 800 nm pour déterminer les longueurs d'onde maximales d'absorption.

II.2.2.3 Etalonnage de solution

L'étalonnage a été réalisé selon une méthode classique consistant à préparer une série de solutions étalons de concentrations connues. Pour ce faire, huit béchers de 10 mL ont été utilisés, chacun contenant un mélange de volumes variables de la solution mère de RC et d'eau distillée, afin d'obtenir différentes concentrations. Les solutions préparées ont ensuite été analysées par spectrophotométrie. La droite d'étalonnage, représentant la densité optique (DO) en fonction de la concentration initiale (C), a été tracée. Cette courbe a permis de déterminer les concentrations résiduelles des échantillons inconnus à l'aide de l'équation de la droite obtenue.[26]

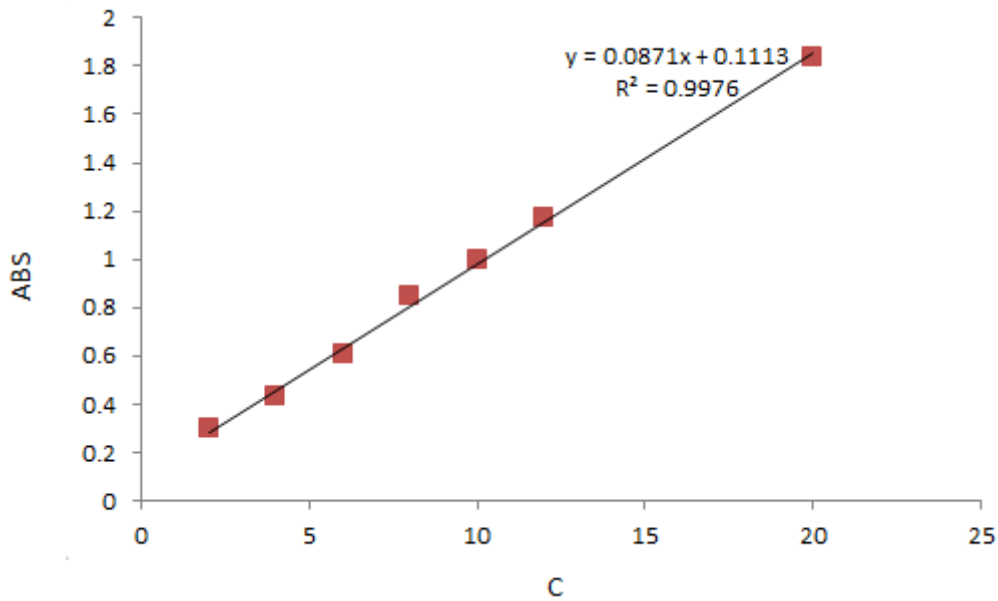


Figure II. 5: Courbe d'étalonnage

II.3 Cinétique d'adsorption (temps de contact) :

Cette étape est essentielle pour déterminer le temps nécessaire à l'équilibre de la réaction d'adsorption . Pour cela, une série d'échantillons a été préparée, chacun contenant 100 mL de solution de méthylorange à une concentration initiale de 150 mg/L. À chaque échantillon, on ajoute 1,2 g de charbon actif. Les conditions expérimentales sont maintenues constantes : température à 50 °C, pH stable, et vitesse d'agitation fixée à 200 tr/min. Le temps de contact varie de 5 à 120 minutes.

Les résultats obtenus sont représentés sous forme de courbe : $Q_{ads} = f(t)$, où Q_{ads} correspond à la quantité de méthylorange adsorbée en fonction du temps.

II.3.1 Modèle pseudo- premier ordre

L'équation de Lagergren (1889) est une expression de pseudo-premier ordre pour l'adsorption dans un système liquide-solide. Elle est représentée de la manière suivante :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (II.2)$$

k_1 : constante de vitesse pour une cinétique de pseudo premier ordre (min^{-1}).

q_e : quantité d'adsorption à l'équilibre (mg/g).

q_t : quantité d'adsorption au temps t (mg/g).

L'intégration de l'équation précédente pour les conditions aux limites : $q = 0$ à $t = 0$ et $q = q_t$ à $t = t$ donne :

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (\text{II.3})$$

II.3.2 Modèle pseudo-seconde ordre

Le modèle de pseudo-second ordre est fréquemment utilisé en adsorption d'une gamme large de polluants et pour divers matériaux adsorbants. Contrairement au modèle du premier ordre, il est valable sur toute la durée du phénomène d'adsorption et suppose un mécanisme de chimisorption. Elle est représentée par :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_2 (q_e - q_t)^2 \quad (\text{II.4})$$

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e K_2 t \quad (\text{II.5})$$

K_2 : est la constant de vitesse du modèle cinétique de pseudo-seconde ordre ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

Après intégration de l'équation on obtient :

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} + K_2 t \quad (\text{II.6})$$

Tableau II. 1 : Comparaison entre les deux modèles cinétiques

Critère	Pseudo-1er ordre	Pseudo-2e ordre
Type de processus supposé	Physique (physisorption)	Chimique (chimisorption)
Paramètres ajustés	K_1, q_e	$K_2 ; q_e$
Qualité d'ajustement (R^2)	Parfois faible	En général meilleure pour colorants
Application à l'Orange Méthyle	Peut convenir	Souvent le plus adapté

II.4 Isotherme d'adsorption

Une série d'expériences a été réalisée afin d'étudier l'influence de la concentration initiale en méthylorange sur l'adsorption. Pour cela, 0,12 g de charbon actif ont été introduits dans 100 mL de solution de méthylorange de concentrations variables, comprises entre 20 et 200 mg/L.

Les essais ont été effectués à température ambiante, sous une agitation constante, et pour un temps de contact de 24 heures, afin de garantir l'atteinte de l'équilibre d'adsorption.

Après agitation, les mélanges ont été filtrés, puis les solutions ont été analysées par spectrophotométrie UV-Visible pour déterminer les concentrations résiduelles.

Les résultats ont été représentés graphiquement sous la forme d'une courbe $Q_{ads} = f(C_e)$, où Q_{ads} est la quantité adsorbée à l'équilibre et C_e la concentration résiduelle en solution.

Les données expérimentales ont ensuite été modélisées à l'aide des isothermes d'adsorption de Freundlich et de Langmuir, les modèles les plus couramment utilisés pour décrire les processus d'adsorption.

II.4.1 Modèle de Langmuir

La théorie de Langmuir en 1918 a permis l'étude de l'adsorption de molécules de gaz sur des surfaces métalliques. Elle repose sur les hypothèses suivantes :

- L'adsorption se produit sur des sites localisés d'égale énergie.
- L'adsorption se produit en monocouche.
- Il n'y a pas d'interaction latérale entre les molécules adsorbées à la surface.

- La réaction est réversible (c'est-à-dire qu'il y a équilibre entre l'adsorption et la désorption).
- Le nombre de sites d'adsorption sur la surface est limité. L'isotherme de Langmuir est difficilement utilisable pour des systèmes naturels où l'adsorption en couche simple sur un seul type de site est rarement rencontrée.

L'isotherme est représentée par l'équation suivante :

$$q_e = \frac{q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e} \quad (\text{II.7})$$

q_e : quantité de soluté adsorbée par unité de masse d'adsorbant à l'équilibre (mg/g),

q_{\max} : quantité maximale d'adsorption (mg/l), et correspond donc à une occupation totale des sites d'adsorption. La linéarisation de l'équation donne :

K_L : constante d'équilibre d'adsorption (L/mg) ; dépendant de la température qui décrit l'énergie d'adsorption. Cette constante de Langmuir donne une indication sur l'affinité de l'adsorbant pour l'adsorbant : plus K_L est élevée plus l'affinité est forte.

C_e : Concentration de l'adsorbant à l'équilibre (mg. L⁻¹).

II.4.2 Modèle de Freundlich

L'isotherme de Freundlich a été présentée en 1926. Elle repose sur l'équation empirique, utilisée pour la représentation pratique de l'équilibre d'adsorption entre un micropolluant et la surface de l'adsorbant. Elle se présente sous la forme :

$$q_e = K C_e^{\frac{1}{n}} \quad (\text{II. 8})$$

K et n : constantes caractéristiques respectivement cinétiques et de l'efficacité d'adsorption d'un adsorbant donné vis-à-vis d'un soluté donné.

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

Si $n = 1$ adsorption linéaire, si $n < 1$ adsorption chimique et si $n > 1$ adsorption physique est favorable.

Tableau II. 2: Quelques modèles d'isotherme

Isotherme	Expression non linéaire	Linéaire Expression	Tracé
Langmuir	$q_e = \frac{q_m \cdot K_L \cdot C_e}{1 + K_L \cdot C_e}$	$\frac{C_e}{q_e} = C_e \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m \cdot K_L}$	$\frac{C_e}{q_e}$ vs C_e
Freundlich	$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}}$	$\ln q_e = \ln K_f + 1/n \ln C_e$	$\ln q_e$ vs $\ln C_e$

II.5 Plan d'expérience

La méthode des plans d'expériences (PE) est une approche systématique, rigoureuse et structurée, reposant sur des bases statistiques, qui permet d'analyser les relations entre les variables d'entrée (facteurs) et les réponses observées (variables de sortie) d'un système.

Cette méthode est largement appliquée dans de nombreux domaines de la recherche scientifique, notamment lorsqu'il s'agit d'étudier l'influence de plusieurs paramètres sur une grandeur d'intérêt. Elle permet ainsi d'optimiser les conditions expérimentales tout en réduisant le nombre d'essais nécessaires.

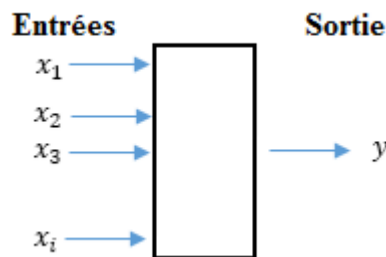


Figure II. 6: Schéma plusieurs entrées et une seule sortie

Avec les plans d'expériences on obtient le maximum de renseignements avec le minimum d'expériences. Les effets des différents facteurs intervenant dans le processus étudié, sont alors quantifiés et les conditions optimales définies. La compréhension de la méthode des plans d'expériences s'appuie sur deux notions essentielles, celle d'espace expérimental et celle de modélisation mathématique des grandeurs étudiées.[27]

II.5.1 Facteurs qui influent sur l'adsorption

L'étude de l'adsorption du méthylorange sur charbon actif a été réalisée en faisant varier plusieurs paramètres opératoires clés : le temps de contact, la concentration en charbon actif (0,1 à 1,5 g/L), la concentration initiale en méthylorange (10 à 30 mg/L) et le pH du milieu réactionnel (4 à 10).

À l'issue de chaque expérience, un échantillon de la solution a été prélevé à l'aide d'une seringue puis filtré avant analyse. La concentration résiduelle en méthylorange a été déterminée par spectrophotométrie UV-Visible à la longueur d'onde d'absorption maximale du colorant.

L'optimisation des conditions opératoires a été effectuée selon un plan d'expériences de Box-Behnken à trois facteurs [28]. Cette approche méthodologique permet d'évaluer simultanément l'influence des variables étudiées et leurs interactions sur l'efficacité d'adsorption, tout en réduisant le nombre d'expériences nécessaires par rapport à un plan factoriel complet.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Application du plan d'expériences

III.1.1 Choix des facteurs

L'objectif de cette étude est d'examiner et de paramétrer l'adsorption du méthylorange sur le charbon actif. Afin d'optimiser les paramètres de notre étude, nous avons utilisé le modèle d'expérience Box –Behnken à trois facteurs. Nous avons pris comme facteurs d'entrée les facteurs suivants qui sont groupés dans le tableau suivant :

Tableau III. 1: Facteurs choisis pour l'expérience

	Facteurs	Min (-1)	Max (+1)
F_1	La concentration du charbon (C_c) [g/L]	0.5	1.5
F_2	La concentration du polluant (C_p) [mg/L]	10	30
F_3	Le pH	4	10

Ces facteurs sont choisis en se basant sur différentes recherches bibliographiques et par des expériences préliminaires. Tous les autres paramètres sont maintenus constants lors des expériences.

La réponse choisie dans cette étude est l'adsorption

III.1.2 Modélisation

Nous avons choisi le plan d'expériences de Box-Behnken à trois facteurs, ce modèle comporte 15 résultats expérimentaux (réponses), obtenus lors de la réalisation des 15 essais. Les niveaux des facteurs pour les expériences sont soigneusement déterminés et selon un ordre pris au début. Le tableau suivant regroupe la variété des facteurs et réponse correspondante pour chaque expérience.

Tableau III. 2: Essais et réponses du plan box-Behnken

Essai N°	F1 (C _c)	F2 (C _p)	F3 (pH)	Q _e
1	-1	-1	0	17,35
2	1	-1	0	6,55
3	-1	1	0	58,75
4	1	1	0	13,75
5	-1	0	-1	39,90
6	1	0	-1	13,22
7	-1	0	1	38,25
8	1	0	1	13,11
9	0	-1	-1	0,99
10	0	1	-1	29,83
11	0	-1	1	9,35
12	0	1	1	29,45
13	0	0	0	19,96
14	0	0	0	19,50
15	0	0	0	19,99

Nous avons utilisé deux logiciels de calcul, Excel et Minitab pour déterminer les coefficients du modèle ainsi que les autres paramètres statistiques, pour trouver le modèle de l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** on a recours à la résolution du système matriciel sous la forme :

$$X A = Y \tag{III. 1}$$

En remplaçant les différents coefficients dans l'équation du modèle appliqué, nous avons obtenu l'équation mathématique (III- 2) suivante :

$$Q_e = 19,817 - 13,453 C_c + 12,192 C_p + 0,778 pH + 6,499 C_c^2 - 2,216 C_p^2 - 0,196 pH^2 - 8,550 C_c * C_p + 0,385 C_c * pH - 2,185 C_p * pH \tag{III. 2}$$

La représentation des coefficients et leurs interactions obtenus, sont rapportés sur la Erreur ! Source du renvoi introuvable..

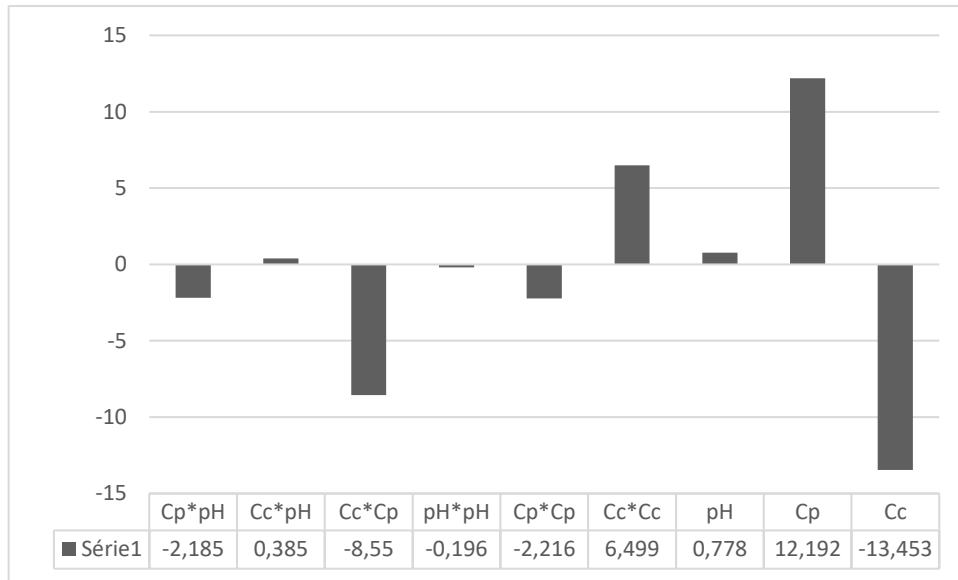


Figure III. 1: Effet des facteurs principaux et leurs interactions

La Erreur ! Source du renvoi introuvable. nous permet d’observer l’effet des facteurs étudiés sur la réponse. Les résultats obtenus montrent que les facteurs qui influent d’une manière positive sur la réponse sont, la concentration du polluant, l’effet quadratique de la concentration du charbon et le pH. L’effet de C_p influe d’une manière très importante sur la quantité de matière absorbée avec un facteur d’environ 12, suivi par l’effet quadratique de la concentration du charbon. D’autre côté, la concentration du charbon influe négativement sur la réponse d’une manière grande suivie par l’interaction C_c/C_p . Les autres facteurs ont une influence faible sur la quantité de la matière absorbée soit positivement ou négativement.

III.1.3 Evaluation de l’adéquation du modèle statistique

Pour faire une comparaison entre le modèle généré et les valeurs de l’expérience, nous avons tracé les résultats obtenus par le modèle en abscisse et les résultats de l’expérimentation sur l’ordonné, le graphique de la Erreur ! Source du renvoi introuvable. montre cette dépendance où on voit une distribution des points très bien allongée sur une droite. Un coefficient de détermination $R^2 = 0.99$ indique une excellente relation linéaire entre les résultats expérimentaux

et les valeurs du modèle, cette tendance donne une bonne interprétation pour une justification du modèle trouvé malgré la présence de quelques points qui sont faiblement éloignés de la droite de régression linéaire.

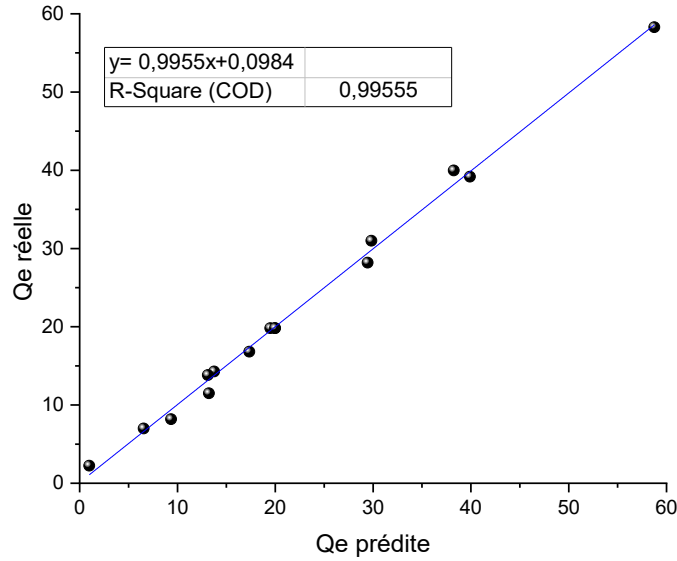


Figure III. 2: Dépendance de la réponse réelle en fonction de la réponse prédite

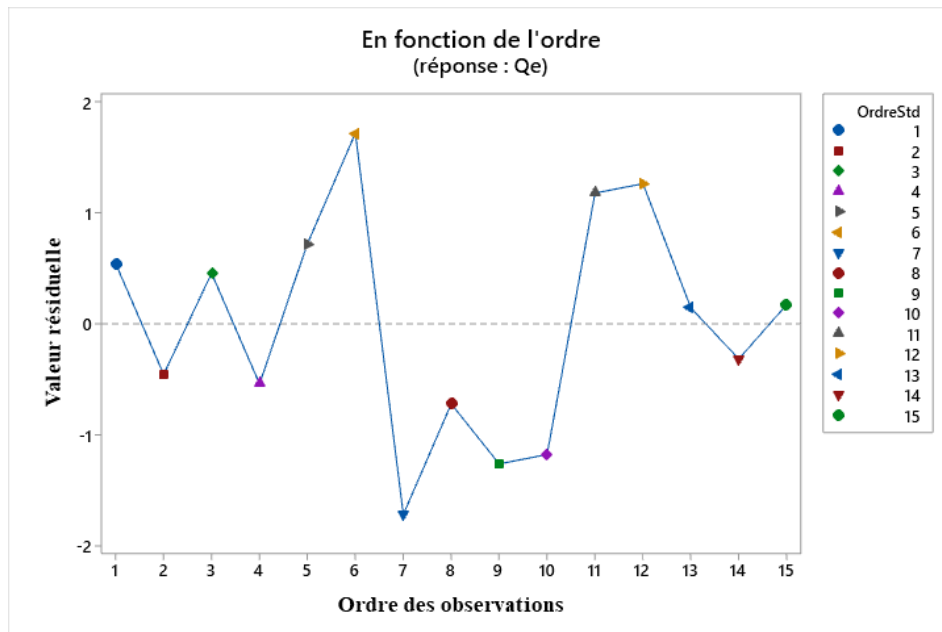


Figure III. 3: Diagramme de dispersion des résidus

Aussi, le diagramme de la dispersion des résidus (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), montre que presque la totalité des points sont proches de la ligne zéro, la majorité des erreurs sont

acceptables sauf les expériences 6 et 7 on données des erreurs remarquables. Ces erreurs sont dues généralement à la procédure expérimentale.

III.1.4 Justification du modèle est signification des facteurs

On première étape, le modèle de régression peut être justifié par le coefficient de détermination R^2 , si sa valeur est proche de l'unité (1) le modèle d'ajustement est justifié, dans notre cas d'étude $R^2 = 0.995$, il est vraiment proche de 1 cela justifie une validation du modèle. Une autre méthode consiste à utiliser l'ANOVA, qui est résumée dans le tableau suivant:

Tableau III. 3: ANOVA pour validation du modèle

Source de variation	SC	DDI	CM	F0	Falpha
Modèle	3138,2	9	348,69	124,5	4,7725
Résiduel	14,004	5	2,8008		
Total	3152,2	14			

Dans notre étude, on a utilisé un niveau de signification $\alpha = 5\%$. Et comme $F_0 = 124.5 > F_\alpha = 4.77$, on accepte alors l'hypothèse qui signifie qu'il y a une dépendance entre la variable d'entrée (les facteurs) et la réponse (Qe) et par conséquence, le modèle est valide.

Tandis que pour la signification des facteurs, on va utiliser le diagramme de Pareto des effets normalisés. Les termes significatifs sont ceux qui ont une valeur supérieure ou égale à 2.57 (figure III-4), il est clair que la majorité des termes sont significatifs, les deux premiers termes sont les concentrations du charbon et du polluant, ils prennent la grande part, suivis par l'effet de l'interaction de ces deux concentrations puis l'effet quadratique de la concentration du charbon .

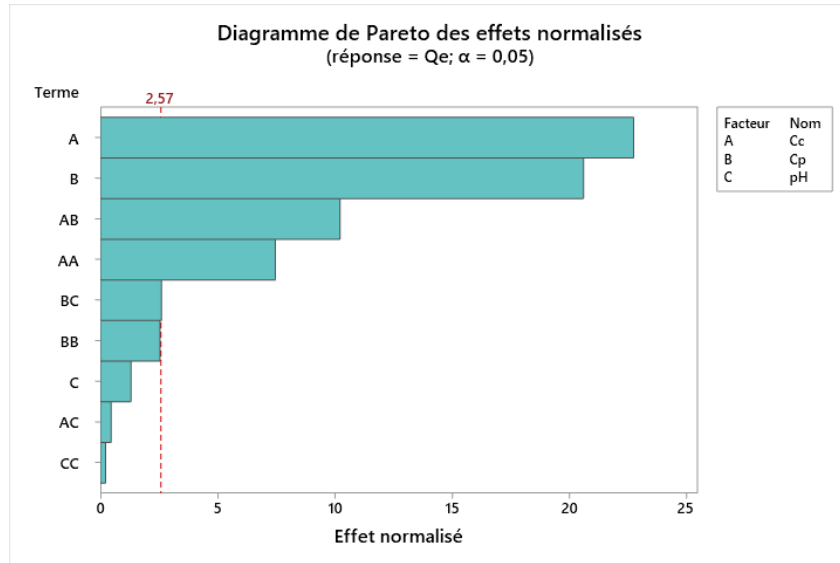


Figure III. 4: Diagramme de dispersion des résidus

III.1.5 Diagrammes des effets principaux

Le diagramme des effets principaux nous renseigne sur l'influence simultanée de tous les facteurs sur l'adsorption.

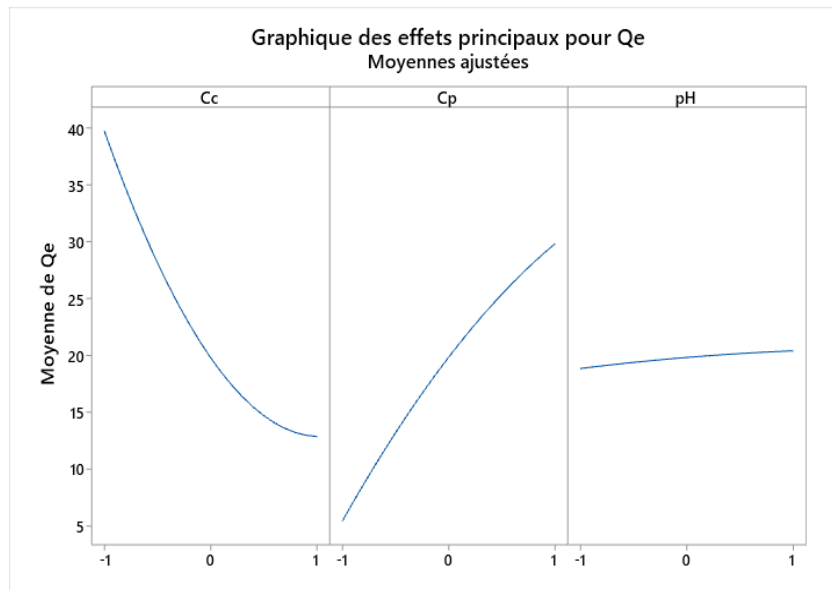


Figure III. 5: Diagramme des effets principaux pour la quantité de matière adsorbée

D'après la figure III.5 on a :

- Le taux d'adsorption diminue avec l'augmentation de la concentration du charbon, cette diminution est très rapide avec l'augmentation de Cc jusqu'à une valeur proche de 0.25 comme indice puis cette diminution devient fable.

- Pour une concentration du polluant faible (-1), la quantité de matière absorbée est très faible, elle est environ 5. L'augmentation de C_p conduit à une augmentation rapide de la quantité de matière absorbée, elle atteint une valeur 30 pour une concentration du polluant maximale 30 mg/L.
- L'influence du pH sur la réponse n'est pas vraiment remarquable. Quand le pH varie de sa plus petite valeur 'indice -1' à sa valeur maximale 'indice +1' on assiste à une très faible augmentation de la quantité de la matière absorbée.

III.1.6 Diagrammes des effets d'interactions des facteurs sur l'adsorption

Les diagrammes des interactions (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) sont généralement utilisés pour visualiser les interactions pendant une opération ANOVA, dans laquelle l'effet d'un facteur dépend du niveau d'un autre facteur.

Remarque Les diagrammes montrent que plus la différence de pente est grande entre les lignes, plus le degré d'interaction est élevé. Si les courbes sont parallèles indiquent l'absence d'interactions.

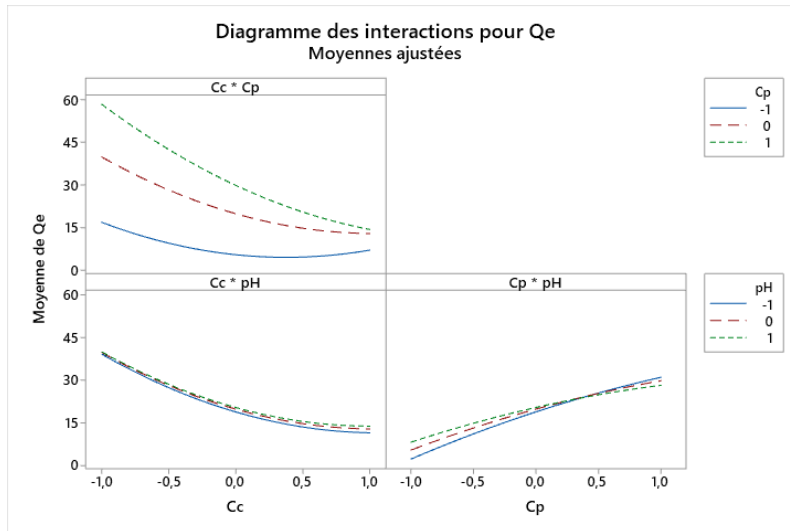


Figure III. 6: Diagramme des effets principaux pour l'adsorption

D'après cette figure, on constate qu'il n'y a aucune interaction entre les deux concentrations : C_c et C_p ainsi entre C_c et pH . Une très faible interaction est marquée pour le couple C_p/pH .

D'une manière générale, les valeurs maximales de Q_e sont notées pour la valeur maximale de C_p cela pour toute la plage de variation de C_c . On marque aussi que la quantité de matière adsorbée est maximale et vaut environ 60mg/g pour une concentration du charbon minimale 'indice -1'.

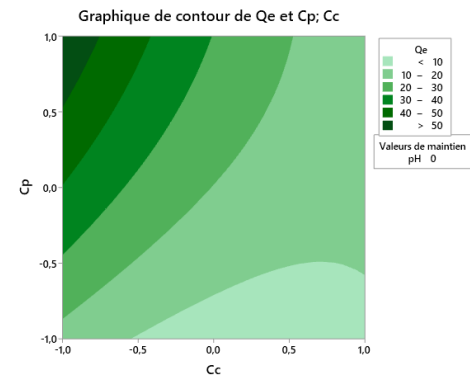
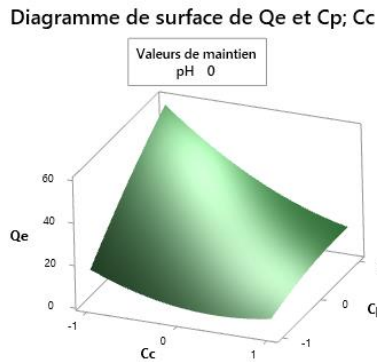
Pour l'interaction Cc/pH, on remarque que les courbes sont presque superposées, ce qui signifie que la variation du pH n'a pas d'influence significative sur Qe, l'augmentation de Cc fait diminuer Qe de sa valeur maximale 42mg/g à 12mg/g.

En ce qui concerne le troisième graphe représentant l'interaction Cp/pH, l'augmentation de Cp avec l'augmentation du pH conduit à l'augmentation de Qe, alors, Qe est maximale pour un pH acide, l'augmentation de Cp favorise l'augmentation de la quantité de matière adsorbée jusqu'à une valeur de Cp proche de 1.25 g/L. Après ce point, on assiste à un changement de niveau du pH vers le niveau +1, où Qe continue à augmenter pour atteindre une valeur d'environ 32 mg/g.

III.1.7 Graphiques de surfaces et des contours

A partir du modèle mathématique validé et à l'aide du logiciel, on réalise les diagrammes de surfaces en 3D et les graphiques des contours 2D. Ces graphiques permettent de rechercher des solutions optimales plus désirables avec une meilleure précision possible. Cela nous permet d'examiner les résultats plus nettement. Les courbes de contour sont générées à l'aide du logiciel MINITAB 19 par la combinaison des trois facteurs induits. Nous avons choisi à chaque fois deux facteurs représentés sur les axes X et Y. La valeur de la réponse est représentée par une région ombragée dans la courbe de contour 2D.

Ces graphiques sont présentés dans la figure III-7.



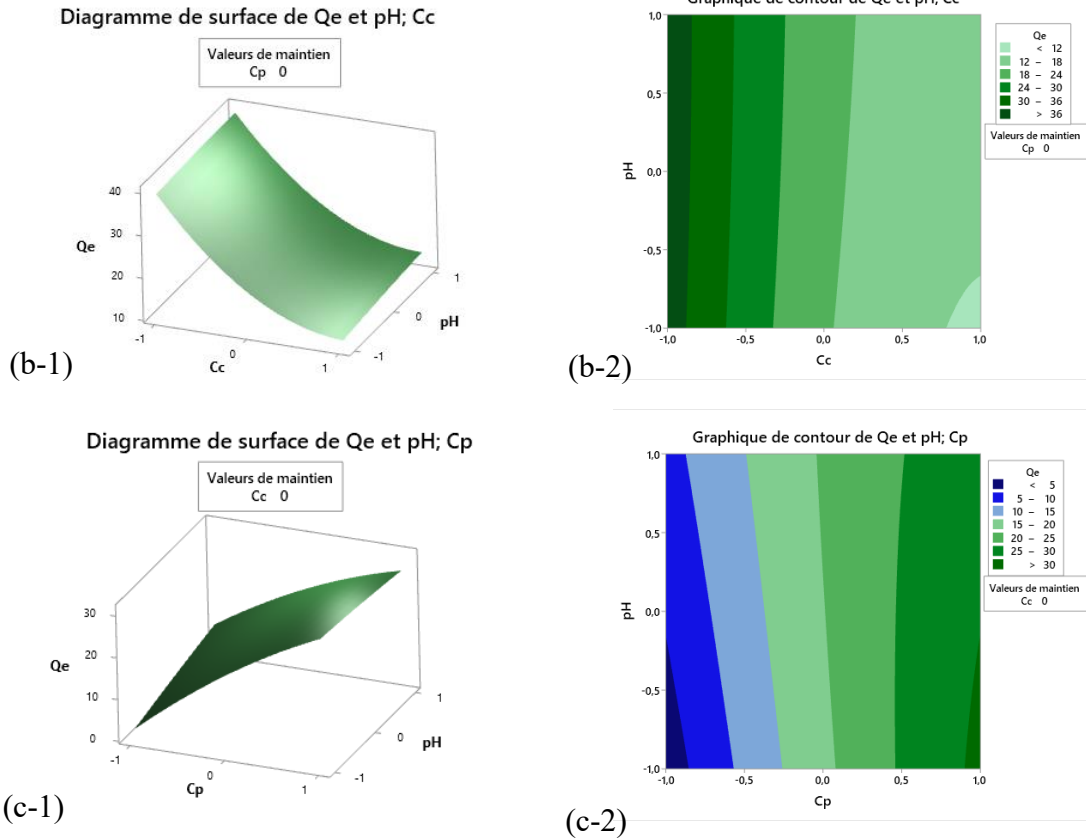


Figure III. 7: Diagrammes de surfaces pour l'adsorption

Les graphiques à droite, représentent les diagrammes de surfaces en trois dimensions pour chaque couple de facteur et les figures à gauche sont les diagrammes de contours ; ils présentent la projection de graphiques de surfaces sur le plan réalisé par les facteurs. A titre d'exemple, La figure (a-2) montre la variation de la quantité de matière adsorbée en fonction des facteurs C_c et C_p , on peut avoir une idée globale sur l'évolution de la réponse Q_e avec la variation des deux facteurs, Q_e est minimale pour une valeur maximale de C_c et une valeur minimale de C_p , si on maintien C_c dans sa valeur max (indice +1) et on augmente C_p cela conduit à une légère augmentation dans la quantité de matière adsorbée, la même chose est marquée pour une valeur minimale de C_p avec la diminution de C_c . La valeur maximale de Q_e se trouve pour le point $(C_c, C_p) = (-1, +1)$, elle vaut une valeur proche de 60mg/g.

Plus de détail est schématisé sur la figure (a-1). Les différentes zones représentent l'évolution de Q_e suivant la variation de C_c et C_p , on voit une variation de la couleur et variation de contours selon les valeurs de Q_e . La zone verte claire, implique une réponse très faible ($Q_e < 10\text{mg/L}$), elle est marquée pour C_c variant de -0.5 à +1 et C_p variant autour du niveau -1, c'est-à-dire pour de

faible valeurs de concentration de Polluant et grandes valeurs de C_c , l'augmentation de la concentration du polluant conduit à une augmentation de la quantité de matière adsorbée, cela est noté par le changement des zones vers la couleur verte sombre. Enfin, Q_e marque sa valeur maximale qui est supérieur à 50mg/g au point $(C_c, C_p) = (-1, +1)$.

Par analyse des autres figures, on peut noter les remarques suivantes :

Il y a une variation monotone de Q_e en fonction de C_c et C_p , cela est marqué par les zones presque parallèles (b et c).

Q_e est minimale pour les points de niveau :

$C_c=+1$, pH variant de -1 à +1

$C_p=-1$, pH variant de -1 à +1

La plus petite valeur de Q_e se trouve pour $(C_p=-1, \text{pH}=-1)$, c'est-à-dire les valeurs minimale des concentrations.

Q_e est maximale pour les points de niveau :

$C_c=-1$, pH variant de -1 à +1

$C_p=+1$, pH variant de -1 à +1

La plus grande valeur de Q_e se trouve pour $(C_c=-1, C_p=+1)$ fig (a-2), elle est supérieur à 50mg/g.

III.1.8 Optimisation des paramètres qui maximise la réponse

Pour avoir les valeurs des trois facteurs utilisés dans le plan d'expérience qui maximisent la réponse, nous avons utilisé le Minitab qui nous a donné le résultat suivant, ces données sont regroupées par la suite dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

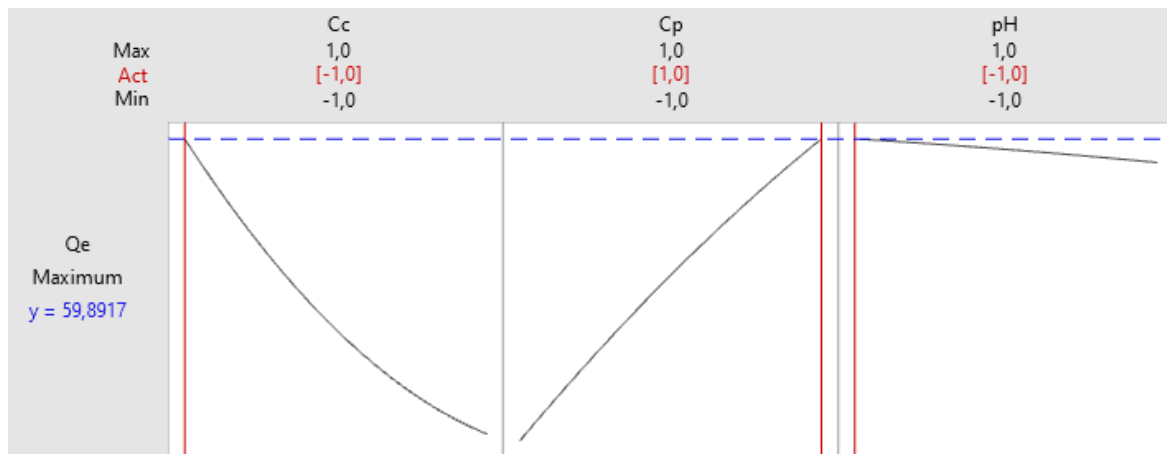


Figure III. 8: Optimisation de Q_e

Tableau III. 4: paramètre d'optimisation

	F1 (Cc)	F2 (Cp)	F3 (pH)
Indice	-1	1	-1
Valeur réelle	0.5	30	4

Afin de valider ces résultats par l'expérience, nous attendons une valeur de l'adsorption après l'expérimentation 59.9. Notre expérience a donné une valeur 59,18 mg/g

III.2 Cinétique d'adsorption

III.2.1 Cinétique et la modelisation

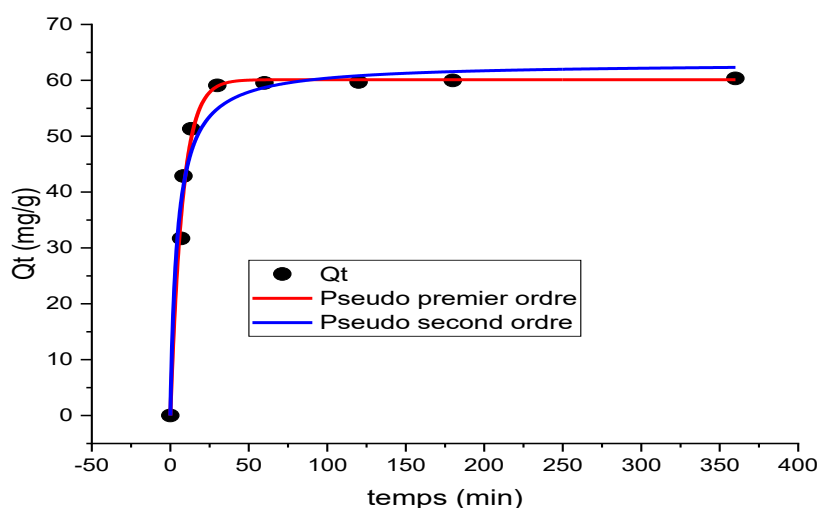


Figure III. 9 : Modélisation de la cinétique d'adsorption

III.2.1.1 Analyse de la courbe expérimentale

- Une adsorption rapide est observée pendant les 30 premières minutes, indiquant une forte affinité entre le colorant et l'adsorbant.
- L'équilibre est atteint après environ 60 minutes, ce qui montre que les sites actifs de surface sont rapidement saturés.

III.2.1.2 Ajustement aux modèles cinétiques

- Le modèle du pseudo-premier ordre (courbe rouge) montre un bon ajustement uniquement à la phase initiale.
- Le modèle du pseudo-second ordre (courbe bleue) épouse fidèlement l'ensemble des points expérimentaux, ce qui suggère que :
- Le processus d'adsorption est contrôlé par des interactions chimiques (chimisorption),
- Le mécanisme implique une interaction électron-donneur/électron-accepteur entre le MO et les sites actifs.

III.2.1.3 Interprétation

L'ajustement supérieur du modèle du pseudo-second ordre indique que le processus d'adsorption suit une cinétique de type chimique. Ce résultat est en accord avec d'autres études similaires sur l'adsorption des colorants azoïques.

III.2.1.4 Conclusion

Cette étude cinétique démontre que l'adsorption du Méthyle Orange est :

- rapide, avec un temps d'équilibre d'environ 60 minutes,
- mieux décrite par le modèle du pseudo-second ordre,
- probablement chimique dans son mécanisme.[29]

Tableau III. 5 : Etude de l'isotherme [29]

	paramètres	unité	Valeur	
			25°C	
	Q _e expérimentale		59.9	Erreur Standard
Model Pseudo premier – ordre $q_t = q_e (1 - e^{(-k_1 t)})$	q _e	mg/g	60.1179	0.90139
	K1	l/min	0.13091	0.00826
	R ² _{adj}		0.99182	
	R ²		0.99182	
Model Pseudo second – ordre	q _e	mg/g	63.09076	1.99976
	K2	g/mg.min	0.00354	7.55483E-4

$q_t = \frac{k_z \cdot q_e^2}{1 + q_e \cdot k_2 \cdot t}$	R_{adj}^2	0.97318	
	R^2	0.96935	

III.3 Isotherme d'adsorption

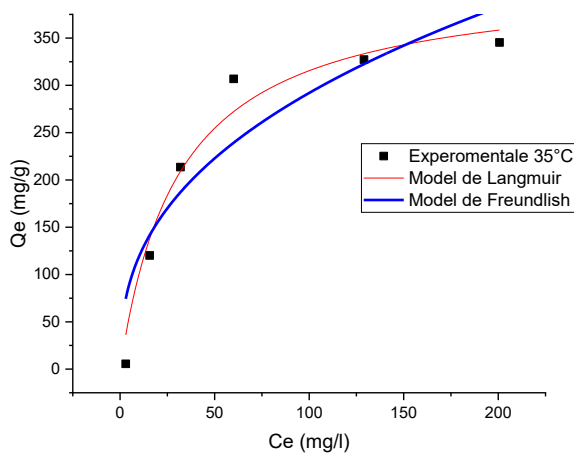
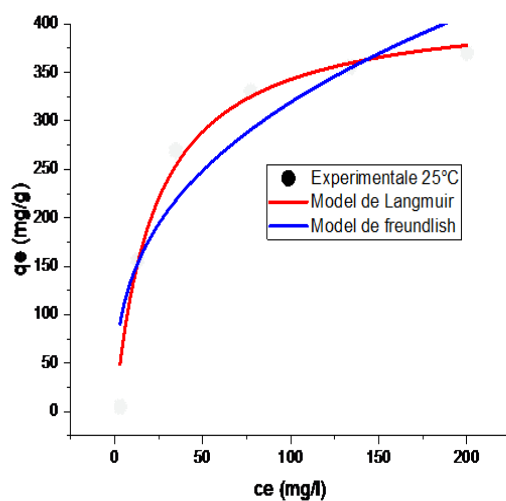
Les résultats expérimentaux de la sorption à l'équilibre ont été obtenus par lots, en modifiant les niveaux initiaux de colorant MO de 10 à 200 mg/L et en maintenant le rapport sorbant/liquide à 0,5 g/L à différentes températures : 25, 35 et 45 °C, Pour identifier la nature du phénomène de sorption, la forme des courbes isothermes est l'un des principaux outils d'évaluation,[30]

Les résultats obtenus par modélisation isotherme sont présentés dans le tableau III.6. Ces résultats montrent que le modèle de Langmuir, présente une bonne adéquation avec les données expérimentales, confirmant le mécanisme de sorption monocouche. De plus, les valeurs des exposants des modèles est proches de l'unité, ce qui constitue une preuve supplémentaire du mécanisme monocouche du processus[31]. Ces études montrent que le modèle isotherme de Langmuir, qui correspond le mieux à nos résultats expérimentaux dans cette étude, est celui qui implique que l'adsorption a lieu sur une surface homogène comportant un nombre fini de sites identiques. Selon cette méthode d'adsorption monocouche, chaque molécule de colorant occupant la surface du charbon occupe un emplacement particulier sans interagir avec les autres molécules adsorbées.

Les valeurs maximales de q_{max} (mg/g) pour le charbon préparé à la température étudiée varient de 406 à 420 mg/g, démontrant le fort potentiel du charbon pour l'élimination du MO des eaux et des eaux usées.

Le modèle de Freundlich, quant à lui, est un modèle empirique qui décrit l'adsorption sur des surfaces hétérogènes. Bien qu'il montre des coefficients de détermination acceptables (R^2 compris entre 0.83 et 0.87), son ajustement reste globalement inférieur à celui du modèle de Langmuir (0,96 à 0,97). Cela suggère que la surface de l'adsorbant est plutôt homogène.

Le paramètre n , compris entre 2.56 et 2.97, est toujours supérieur à 1, ce qui indique une **adsorption favorable**. La constante K_F varie également avec la température, augmentant à 45 °C, ce qui pourrait refléter une certaine hétérogénéité ou une influence de la température sur la distribution énergétique des sites



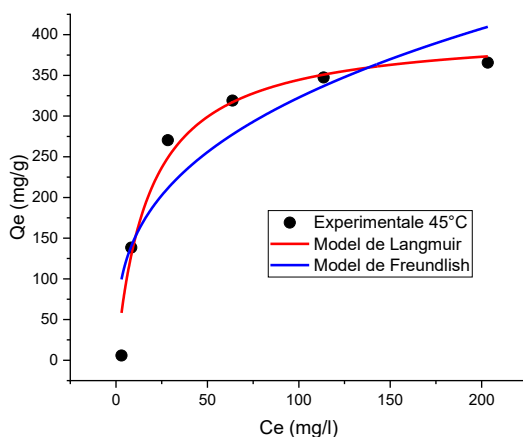


Figure III. 10: Modélisation de l'isotherme d'adsorption

Tableau III. 6 Paramètres des modèles d'isothermes de Langmuir et Freundlich à différentes températures pour l'adsorption du colorant Orange de Méthyl

Equation du model	paramètres	Unité	Valeurs					
			25°C	Erreur standard	35°C	Erreur standard	45°C	Erreur standard
Langmuir $q_e = \frac{Q_{max}K_L C_e}{1 + q_e C_e}$	Q_{max}	mg/g	421.27	0.01052	414.61	34.46	406.35	29.30
	K_L	L/mg	0.043	0.01052	0.0318	0.008	0.055	0.016
	R²		0.97		0.97		0.96	
	R²_{adj}		0.97		0.96		0.95	
Freundlich $q_e = K_F C_e^{(1/n)}$	K_F	mg.g⁻¹. L^{1/n}	60.64	27.61	48.38	23.67	68.64	31.33
	n		2.77	0.7527	2.56	0.69	2.97	0.88
	R²		0.87		0.86		0.83	
	R²_{adj}		0.83		0.83		0.79	

Conclusion générale

Conclusion générale

L'orange de méthyle (OM) est un colorant azoïque synthétique largement utilisé dans l'industrie textile et difficilement biodégradable. Son élimination des eaux usées constitue un enjeu environnemental majeur en raison de sa toxicité et de sa persistance. Dans cette étude, nous avons évalué l'efficacité du charbon actif comme adsorbant pour le retrait de l'OM en solution aqueuse, à travers l'étude de différents paramètres physico-chimiques.

Les résultats ont montré que :

- Le taux d'élimination du méthyl orange augmente avec le temps d'agitation. Un temps de contact de 60 minutes (1 heure) a permis d'atteindre l'équilibre d'adsorption, ce qui indique que le processus se stabilise au-delà de cette durée.
- L'efficacité du procédé s'améliore avec une masse de charbon actif, est égal à 0,5 g, confirmant que la disponibilité des sites actifs joue un rôle essentiel dans la rétention du colorant.
- Le pH a une influence significative : l'adsorption est optimale en milieu acide, avec un maximum observé à pH 4. La même chose pour les autre pH , 7 et 10 ce qui confirme que le charbon est efficace dans toute la gamme des pH.
- La température agit également sur le processus : l'adsorption est favorisée jusqu'à 35 °C, au-delà de laquelle on observe une légère diminution. Ce comportement suggère un phénomène d'adsorption globalement exothermique,
- La capacité d'adsorption augmente avec la concentration initiale du colorant, traduisant un gradient de concentration plus élevé qui favorise le transfert des molécules de l'OM vers les sites d'adsorption disponibles.

L'ensemble de ces observations a été complété par une optimisation du procédé à l'aide du plan expérimental de Box-Behnken, une méthode statistique efficace permettant d'évaluer l'influence croisée des paramètres et de prédire les conditions optimales du processus. Cette approche a permis d'identifier les conditions optimales suivantes pour une élimination maximale du colorant : une concentration initiale du colorant (C_p) de 30 mg/L, une concentration en charbon actif (C_c) de 0,5 g/L, et un pH de 4. Ces paramètres optimisés ont été validés expérimentalement,

confirmant la pertinence du modèle statistique et la fiabilité de la méthode de planification utilisée.

L'adsorption sur charbon actif s'est révélée être une méthode efficace et rapide pour l'élimination de l'orange de méthyle. L'étude a mis en évidence l'importance du contrôle des paramètres opératoires, et l'intégration d'un plan d'expériences comme celui de Box-Behnken s'est avérée cruciale pour optimiser le rendement du procédé tout en minimisant les essais expérimentaux.

Perspectives

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs pistes peuvent être envisagées pour approfondir et élargir cette étude :

1. Étude de l'adsorption sur d'autres matériaux biosourcés .
2. Régénération et réutilisation du charbon actif : Évaluer la possibilité de régénérer le charbon actif après adsorption (par chauffage, lavage alcalin, ou traitement oxydant) afin de tester la faisabilité d'un procédé durable et économiquement viable sur plusieurs cycles d'utilisation.
3. Études multi-polluants et effets synergiques :
4. Approfondissement de la modélisation cinétique et thermodynamique : Des modèles complémentaires (intra-particulaire de Weber–Morris, diffusion filmique, Elovich) pourraient être appliqués pour mieux comprendre les mécanismes d'adsorption et les étapes limitantes du processus.
5. Optimisation avancée par intelligence artificielle :

L'utilisation de techniques de modélisation avancées (réseaux neuronaux, régression non linéaire, etc.) pourrait améliorer la prédiction de la capacité d'adsorption et permettre une optimisation plus fine du procédé.

- [1] T. Robinson, G. McMullan, R. Marchant, et P. Nigam, « Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative », *Bioresour. Technol.*, vol. 77, n° 3, p. 247-255, 2001.
- [2] E. Forgacs, T. Cserhádi, et G. Oros, « Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review », *Environ. Int.*, vol. 30, n° 7, p. 953-971, 2004.
- [3] S. Porcher, *La fin de l'eau*. Fayard, 2024.
- [4] A. Bensehoub et A. I. Kanli, « Environmental Impacts of Air Pollution on Human Health in Annaba Region (Northeast of Algeria) », présenté à Toxic Chemical and Biological Agents: Detection, Diagnosis and Health Concerns, Springer, 2020, p. 209-216.
- [5] D. Gaujous, *La pollution des milieux aquatiques: aide-mémoire*. Technique & Documentation-Lavoisier, 1995.
- [6] A. A. Rabahi, « Contribution à l'étude des caractéristiques physicochimiques de l'eau potable de la ville de Tissemsilt », 2020.
- [7] M. Al-Juhaishi, « Caractérisation et impact de la pollution dans les rejets urbains par temps de pluie (RUTP) sur des bassins versants de l'agglomération Orléanaise. », 2018.
- [8] G. C. Whipple, *The microscopy of drinking water*. J. Wiley & sons, Incorporated; London, Chapman & Hall, limited, 1927.
- [9] B. Alloway, « Soil processes and the behaviour of metals », *Heavy Met. Soils*, vol. 13, p. 3488, 1995.
- [10] J. Rodier, C. Geoffray, et L. Rodi, *L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer: chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie*. Dunod., 1996.
- [11] R. Carson et L. Darling, « Silent Spring. Boston et Cambridge », 1962.
- [12] H. Zollinger, *Color chemistry: syntheses, properties, and applications of organic dyes and pigments*. John Wiley & Sons, 2003.
- [13] C. H. Giles, D. Smith, et A. Huitson, « A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I. Theoretical », *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 47, n° 3, p. 755-765, 1974.
- [14] D. Cardon, *Le monde des teintures naturelles*. Belin, 2014.
- [15] K. Hunger, P. Mischke, W. Rieper, et S. Zhang, « Azo Dyes, 1. General », *Ullmanns Encycl. Ind. Chem.*, p. 1-24, 2000.
- [16] D. Thetford, « Triphenylmethane and related dyes », *Kirk-Othmer Encycl. Chem. Technol.*, 2000.
- [17] H. Zollinger, *Color chemistry: syntheses, properties, and applications of organic dyes and pigments*. John Wiley & Sons, 2003.

- [18]H. Zollinger, *Color chemistry: syntheses, properties, and applications of organic dyes and pigments*. John Wiley & Sons, 2003.
- [19]R. Qadri et M. A. Faiq, « Freshwater pollution: effects on aquatic life and human health », *Fresh Water Pollut. Dyn. Remediat.*, p. 15-26, 2020.
- [20]M. K. Kindhauser et World Health Organization, « Communicable diseases 2002: global defence against the infectious disease threat/edited by Mary Kay Kindhauser », in *Communicable diseases 2002: global defence against the infectious disease threat/edited by Mary Kay Kindhauser*, 2003.
- [21]N. Bouanimba et R. Zouaghi, « Etude comparative de la dégradation photochimique et photocatalytique de quatre colorants: Impact de la structure chimique et corrélation entre l'adsorption et l'activité photocatalytique de TiO₂ », 2014.
- [22]D. M. Ruthven, *Principles of adsorption and adsorption processes*. John Wiley & Sons, 1984.
- [23]S. Brunauer, P. H. Emmett, et E. Teller, « Adsorption of gases in multimolecular layers », *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 60, n° 2, p. 309-319, 1938.
- [24]D. H. Everett, « Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units, appendix II: Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry », *Pure Appl. Chem.*, vol. 31, n° 4, p. 577-638, 1972.
- [25]Y. Liu, « Caractérisations de matériaux pour la réalisation de supercondensateurs pour des applications automobiles », 2018.
- [26]F. Z. Choumane, « Elimination des métaux lourds et pesticides en solution aqueuse par des matrices argileuses », 2015.
- [27]I. Bataïche et N. Kacem Chaouche, « Recherche de nouvelles potentialités de *Yarrowia lipolytica*, isolé de différents milieux naturels pour des applications biologiques. », 2014.
- [28]J. Vaillé et J. Goupy, « Construire et interpréter un Plan d'expériences factoriel complet », *Rev. Modul.*, vol. 1, n° 35, 2006.
- [29]Y.-S. Ho et G. McKay, « Pseudo-second order model for sorption processes », *Process Biochem.*, vol. 34, n° 5, p. 451-465, 1999.
- [30]G. Crini et P.-M. Badot, « Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature », *Prog. Polym. Sci.*, vol. 33, n° 4, p. 399-447, 2008.
- [31]O. Peiravi-Rivash, M. Mashreghi, O. Baïgenzhenov, et A. Hosseini-Bandegharai, « Producing bacterial nano-cellulose and keratin from wastes to synthesize keratin/cellulose nanobiocomposite for removal of dyes and heavy metal ions from waters and wastewaters », *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 656, p. 130355, 2023.

ملخص

في هذا العمل، تم تقييم فعالية الفحم النشط لإزالة صبغة البرتقالي المثيلي من المياه. أظهرت نتائج خطة التجارب (Box-Behnken) أن العوامل الأكثر تأثيرًا هي تركيز الملوث وتركيز الفحم النشط، مع تأثير محدود للـ pH تحقق أفضل امتزاز عند $pH=4$ ، تركيز ملوث 30 mg/L و $0,5 \text{ g/L}$ من الفحم. النمذجة أثبتت صحة النموذج بتوافق $R^2 = 0.99$ كما بيّنت دراسة الحركية أن الامتزاز سريع ويصل التوازن خلال 60 دقيقة، ويتبع نموذج pseudo-second ordre بالنسبة للإيزوثيرم، أظهر نموذج Langmuir تطابقًا ممتازًا ($R^2 \approx 0.97$) مما يدل على امتزاز أحادي الطبقة

Résumé

Cette étude a évalué l'efficacité du charbon actif pour l'élimination du Méthyl Orange. Le plan d'expérience de Box-Behnken a révélé que la concentration du polluant et du charbon actif ont l'effet le plus marqué, avec une influence limitée du pH. Les conditions optimales : $pH = 4$, $C_p = 30 \text{ mg/L}$ et $C_c = 0.5 \text{ g/L}$. Le modèle statistique est validé ($R^2 = 0.99$). L'étude cinétique montre que l'adsorption est rapide (équilibre en 60 min) et suit un modèle du pseudo-second ordre. Les isothermes sont mieux décrits par le modèle de Langmuir ($R^2 \approx 0.97$), indiquant une adsorption en monocouche.

Summary

This work assessed the efficiency of activated carbon in removing Methyl Orange dye. The Box-Behnken design revealed that pollutant and adsorbent concentrations have the strongest influence, while pH has limited impact. Optimal conditions: $pH = 4$, $C_p = 30 \text{ mg/L}$, $C_c=0.5 \text{ g/L}$. The statistical model was validated ($R^2 = 0.99$). Kinetic study indicated rapid adsorption reaching equilibrium in 60 minutes, following a pseudo-second order model. Langmuir isotherm provided the best fit ($R^2 \approx 0.97$), confirming monolayer adsorption.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريبيج

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم هندسة المحيط

تخصص هندسة الطرائق

عنوان المشروع:

fabrication d'un charbon actif à base naturelle

مشروع لنيل شهادة مؤسسة ناشئة في إطار القرار الوزاري 1275

1- فريق الاشراف:

فريق الاشراف	
المشرف الرئيسي (01): الأستاذ: قارس حسام الدين	التخصص: Génie des procédés
المشرف الرئيسي (02): الأستاذ: بن مخلوف عبد الفتاح	التخصص: Génie Mécanique

2- فريق العمل :

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالب: أقدوش السعيد	هندسة الطرائق	العلوم والتكنولوجيا
الطالب: علول يوسف	هندسة الطرائق	العلوم والتكنولوجيا
الطالب: شريف علي مولود	هندسة الطرائق	العلوم والتكنولوجيا



الاسم التجاري

charbonTech DZ
(CTDZ)

بطاقة معلومات:

المحور الأول





المحور الأول: فكرة المشروع (الحل المقترح)

في ظل التحديات البيئية المتزايدة، خاصةً تلك المرتبطة بتراكم النفايات الزراعية والتلوث الناتج عن الأنشطة الصناعية، يهدف هذا المشروع إلى إيجاد حل بيئي واقتصادي مستدام يتمثل في تحويل النفايات الزراعية إلى فحم نشط ذي كفاءة عالية.

الفكرة تقوم على استغلال نفايات زراعية متوفرة محلياً كمادة أولية رخيصة ومتجددة، مثل [الذكري النفايات الزراعية المستعملة، مثلاً: قشور الرمان، نوى الزيتون، بقايا الذرة،...]، من أجل إنتاج فحم نشط باستخدام تقنيات حرارية وكيميائية مناسبة، مع مراعاة الجوانب البيئية وتقليل التكاليف.

يُقترح هذا المشروع كحل فعال مزدوج الأثر:

- الحد من تراكم النفايات الزراعية التي قد تسبب مشاكل بيئية وصحية.
- إنتاج مادة ذات قيمة مضافة (الفحم النشط) تستخدم في تطبيقات مهمة مثل تنقية المياه، معالجة الهواء، والصناعات الدوائية.

يعتمد هذا الحل على مبادئ الاقتصاد الدائري والاستدامة، مما يجعله مناسباً للدول النامية التي تواجه تحديات في إدارة النفايات والموارد.

1- فريق العمل

يتكوّن فريق العمل من مجموعة من الأفراد ذوي كفاءات متنوعة لضمان سير المشروع بفعالية

- المشرف العلمي: أستاذ جامعي مختص في الكيمياء أو علوم البيئة للإشراف على الجانب العلمي والتقني.
- الطالب/الباحث: المسؤول عن تنفيذ التجارب وجمع البيانات وتحليل النتائج.
- خبير تقني: لمتابعة عملية الكربنة والتنشيط ومراقبة شروط التشغيل.
- مستشار بيئي: لضمان توافق المشروع مع القوانين البيئية المحلية.
- مختص تسويق: لوضع خطة تسويقية للفحم النشط المنتج وتحديد الأسواق المحتملة.

2. الإنتاج والتشغيل

تشمل هذه المرحلة الخطوات العملية التالية:

- جمع أوراق الكاليتوس من الغابات أو المناطق الزراعية.
- تجفيفها للتقليل من الرطوبة.
- كربنتها (Carbonization) في فرن بدرجات حرارة مرتفعة بوجود قليل من الأوكسجين.
- تنشيط الفحم إما كيميائيًا (باستعمال مواد مثل حمض الفوسفوريك أو كلوريد الزنك) أو فيزيائيًا (بالبخار أو ثاني أكسيد الكربون).
- طحنه وتعبئته في عبوات محكمة لغرض التسويق.

يُمكن بدء التشغيل على مستوى نصف صناعي داخل ورشة أو مخبر، ثم التوسع لاحقًا لمصنع صغير حسب الجدوى.

3. الجودة والضمان

لضمان جودة الفحم النشط المنتج، يجب:

- قياس مساحة السطح النوعي (باستخدام BET analysis)
- اختبار كفاءة الامتزاز للملوثات في الماء أو الهواء.
- إجراء تحاليل الرماد، الرطوبة، والكثافة.
- الالتزام بمعايير الجودة العالمية (مثل ASTM أو ISO إن أمكن)
- توثيق خطوات الإنتاج بدقة لضمان إمكانية التكرار والجودة المتجانسة.

4. التسويق والمبيعات

يستهدف تسويق الفحم النشط المنتج إلى:

- محطات تنقية المياه (عمومية أو خاصة).
- الصيدليات والمخابر التي تستخدم الفحم النشط في التطبيقات الطبية.
- المؤسسات البيئية التي تحتاج إلى مواد للامتزاز وتنقية الهواء.
- سوق التجزئة: تعبئة المنتج في عبوات صغيرة للاستخدام المنزلي (إزالة الروائح، فلتر المياه).

تشمل وسائل التسويق:

- حملات توعية بيئية.
- منصات رقمية.
- التعاون مع البلديات أو المؤسسات العمومية.

5 • أهداف المشروع

- **بيئية:** التقليل من النفايات الزراعية وتحويلها إلى منتج نافع.
- **اقتصادية:** إنتاج فحم نشط محلي بسعر أقل من المستورد.
- **علمية:** تطوير تقنية محلية مستدامة لتحويل النفايات إلى موارد.
- **اجتماعية:** خلق فرص عمل في مجال إعادة التدوير والصناعات الخضراء.

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية للمشروع

أولاً: الابتكار في المادة الأولية للفحم

الفحم كمادة أولية (سواء كان فحمًا طبيعيًا، نباتيًا، حجريًا، أو صناعيًا) له خصائص ثابتة نسبيًا، لكن يمكن أن يكون هناك ابتكار في:

تحسين تركيبة الفحم (مثل فحم منشط بكفاءة أعلى)

إنتاج فحم منخفض الانبعاثات

(Clean Coal Tech) تكنولوجيا تصنيع فحم نظيف

إذًا، الابتكار هنا يكون في تعديل خصائص الفحم أو طرق استخراج وتصنيعه

ثانيًا: الابتكار في الاستخدامات الجديدة للفحم

هذا هو المجال الذي يشهد أكبر قدر من الابتكار حاليًا، ويتضمن

(لتحسين التربة biochar مثل) استخدام الفحم في الزراعة
في التكنولوجيا: الفحم المنشط في فلاتر المياه أو الهواء
في الطب: الفحم المنشط لامتصاص السموم
في صناعة الطاقة: وقود هجين أو خلايا وقود تعمل بجزيئات الفحم الدقيقة
في البناء: الفحم الحيوي كمادة مضافة للأسمت لتحسين خصائص العزل
الابتكار الحقيقي اليوم يميل أكثر إلى الاستخدامات الجديدة للفحم، وليس في المادة الأصلية ذاتها

1. طبيعة الابتكارات

- الابتكار في المادة الأولية: استخدام أوراق الكاليتوس كمصدر غير تقليدي للفحم النشط.
- الابتكار في طريقة التحضير: تطوير طريقة محلية منخفضة التكلفة للكربنة والتنشيط.
- الابتكار في التوظيف البيئي: الدمج بين إدارة النفايات وحل مشاكل التلوث.

2. التطبيقات الجديدة

نعم، في السنوات الأخيرة ظهرت تطبيقات جديدة للفحم لم يكن يُستخدم فيها تقليدياً، خاصة بفضل التقدم في مجالات التكنولوجيا والمواد المتقدمة. إليك بعض الاستخدامات الحديثة وغير التقليدية للفحم

1. الفحم النشط في التكنولوجيا الحيوية والطب

أفئعة الوجه ومستحضرات التجميل: الفحم النشط يُستخدم كمكوّن أساسي في منتجات العناية بالبشرة لقدرته على امتصاص الشوائب والدهون

أجهزة تنقية الهواء والماء: الفحم النشط بات يُستخدم على نطاق واسع في أنظمة ترشيح الهواء والماء بفضل خصائصه الممتازة في الامتصاص

الأدوية: يُستخدم لعلاج التسمم والجرعات الزائدة من الأدوية من خلال امتصاص السموم في المعدة

2. في مجال الطاقة المتجددة وتخزين الطاقة

يجري استخدام أشكال خاصة من الكربون المستخرج من الفحم في تصنيع المكثفات (Supercapacitors): مكثفات فائقة الفائقة التي تُستخدم لتخزين الطاقة.

بطاريات الليثيوم والكربون: أبحاث حديثة تشير إلى إمكانية استخدام الفحم في تصنيع أقطاب كهربائية منخفضة التكلفة وعالية الأداء.

3. الفحم كمادة خام في الطباعة ثلاثية الأبعاد.

تجارب صناعية بدأت في دمج مسحوق الفحم أو مشتقاته في مواد الطباعة ثلاثية الأبعاد لصناعة قطع خفيفة الوزن وموصلة للكهرباء.

4. (Biochar) الزراعة الذكية.

يُستخدم لتحسين جودة التربة واحتباس الكربون، مما يساهم في الزراعة المستدامة وتقليل (Biochar) الفحم الحيوي الانبعاثات.

5. مجال الإلكترونيات المتقدمة.

استخدام الفحم أو مشتقات الكربون في تصنيع رقائق إلكترونية نانوية بسبب خصائص التوصيل والمرونة.

- استخدام الفحم النشط المنتج في:
- تنقية المياه الملوثة بالمبيدات والمعادن الثقيلة.
- فلتر الهواء في البيئات الصناعية.
- تطبيقات طبية كمضاد للسموم أو لتصفية المواد الضارة.
- الزراعة (كترية مضافة لتحسين امتصاص المغذيات وتقليل التلوث).

3- مجالات الابتكار

- الطاقة والبيئة: في إطار الاقتصاد الأخضر وإدارة النفايات.
- الصناعة: كمادة أولية في الصناعات الكيماوية والدوائية.
- البحث العلمي: تقديم نموذج يمكن تطويره لاحقاً لأبحاث أخرى على أنواع نفايات مختلفة.
- التنمية المحلية: بإمكانية إنشاء مشاريع صغيرة أو تعاونيات شبانية تنتج الفحم النشط.

في مجال العلوم:

1. الكيمياء والتحليل الكيميائي

• الامتزاز (Adsorption): الفحم النشط يستخدم لامتزاز الجزيئات العضوية وغير العضوية من المحاليل، ما يجعله أداة فعالة في تنقية العينات.

• فصل المواد: يُستخدم في الكروماتوغرافيا لفصل المركبات المعقدة.

• إزالة الملوثات: يستخدم في المختبرات لإزالة الشوائب من المحاليل الكيميائية.

2- الطب والصيدلة

• علاج التسمم: الفحم النشط يُستخدم في حالات التسمم الحاد لامتصاص السموم في الجهاز الهضمي.

• تصنيع الأقراص: يدخل أحياناً في تركيب بعض الأدوية التي تعتمد على خاصية الامتصاص.

• مطهرات الجروح: يمكن استخدامه في تصنيع الضمادات الطبية المخصصة لسحب السموم أو الالتهابات.

في مجال التكنولوجيا:

1. تنقية المياه والهواء

• مرشحات المياه: الفحم النشط يُستخدم في أنظمة الفلاتر المنزلية والصناعية لإزالة الكلور، والمعادن الثقيلة، والمركبات العضوية.

• تنقية الهواء: يدخل في تصنيع مرشحات أجهزة تنقية الهواء لإزالة الروائح والملوثات الكيميائية.

2. تقنية النانو:

• دعم للهياكل النانوية: الفحم النشط يُستخدم كأساس في بعض تطبيقات تكنولوجيا النانو بسبب مساميته العالية وسطحه الكبير.

• المواد المركبة: يدخل في صناعة مركبات كربونية مع البوليمرات لاستخدامها في الإلكترونيات والبطاريات.

3. الطاقة:

• بطاريات الليثيوم والكربون: يُستخدم في أقطاب بعض البطاريات الحديثة نظراً لخواصه الكهربائية الممتازة.

• تخزين الطاقة: يدخل في تصنيع المكثفات الفائقة (Supercapacitors) التي تستخدم في تخزين الطاقة بكفاءة عالية.

في التكنولوجيا البيئية:

- معالجة النفايات: الفحم النشط يساعد في إزالة المواد السامة من النفايات الصناعية.
- الزراعة: يُستخدم لتحسين التربة وامتصاص المبيدات والمواد الكيميائية الضارة.

المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

1. السوق المحتمل

يشمل السوق الجزائري شرائح متعددة يمكنها الاستفادة من الفحم النشط، وهي:

- محطات معالجة المياه (حكومية أو خاصة) التي تحتاج للفحم النشط في إزالة الملوثات.
- المخابر والصيدليات، لاستعمالات طبية أو تحليلية.
- الصناعات الغذائية والكيميائية، التي تستخدم الفحم النشط في إزالة الشوائب.
- الأسر والمستهلك العادي، عبر بيع الفحم النشط في عبوات صغيرة لتنقية الماء أو امتصاص الروائح.
- مؤسسات معالجة النفايات أو وحدات الاستصلاح البيئي.
- الأسواق الزراعية، لاستخدام الفحم النشط كمضاف عضوي للتربة.

السوق الجزائري حاليًا لا يُشبع الطلب على الفحم النشط محليًا، ما يُعد فرصة حقيقية للإنتاج الوطني.

المنافسين المباشرين (في الجزائر)

- عدد المنتجين المحليين محدود جدًا، وغالبًا ما تكون المؤسسات الصغيرة أو مراكز بحثية تنتج كميات محدودة لغرض التجريب أو التوزيع المحلي المحدود.
- توجد بعض المحاولات الناشئة في إنتاج الفحم النباتي، لكن إنتاج الفحم النشط المتخصص قليل جدًا.
- يمكن اعتبار المنافسين المحليين ضعفاء من حيث الجودة، التوزيع، أو الاستمرارية، وهو ما يجعل مشروعك يتمتع بميزة تنافسية واضحة.

3. المنافسين غير المباشرين (شركات أجنبية)

- الفحم النشط المستورد يأتي غالبًا من:
- الصين
- الهند
- تركيا
- ألمانيا (في المجال الطبي أو الصناعي المتخصص)

يُباع هذا الفحم بأسعار مرتفعة، ويعتمد على الاستيراد بالدفع بالعملة الصعبة، ما يجعله غير مناسب دائمًا للمستهلك المحلي. كما أن أغلبه يُستخدم في المخابر أو المؤسسات الكبرى، وليس متاحًا للمستهلك العادي بسهولة.

نقاط القوة

السمات الأساسية لسيطرة الموردين القلة

قلة عدد الموردين

السوق يحتوي على عدد محدود من الموردين أو الشركات الكبرى

كل مورد لديه حصة كبيرة تؤهله للتأثير في السوق

عوائق الدخول

وجود حواجز كبيرة أمام دخول منافسين جدد، مثل

رأس المال العالي

التحكم في الموارد الأساسية

التراخيص أو الاحتكارات القانونية

الاعتماد المتبادل

كل مورد يراقب تحركات الآخرين ويخطط بناءً عليها

قرارات التسعير أو الإنتاج تكون استراتيجية وليست فردية

احتمالية التنسيق أو التواطؤ

قد يحدث تنسيق ضمني أو صريح بين الموردين (كالكارتلات)، لتثبيت الأسعار أو تقاسم السوق

قوة تفاوضية عالية

الموردون يستطيعون فرض شروطهم على المشتريين أو الحكومات، لندرة البدائل

نقاط الضعف

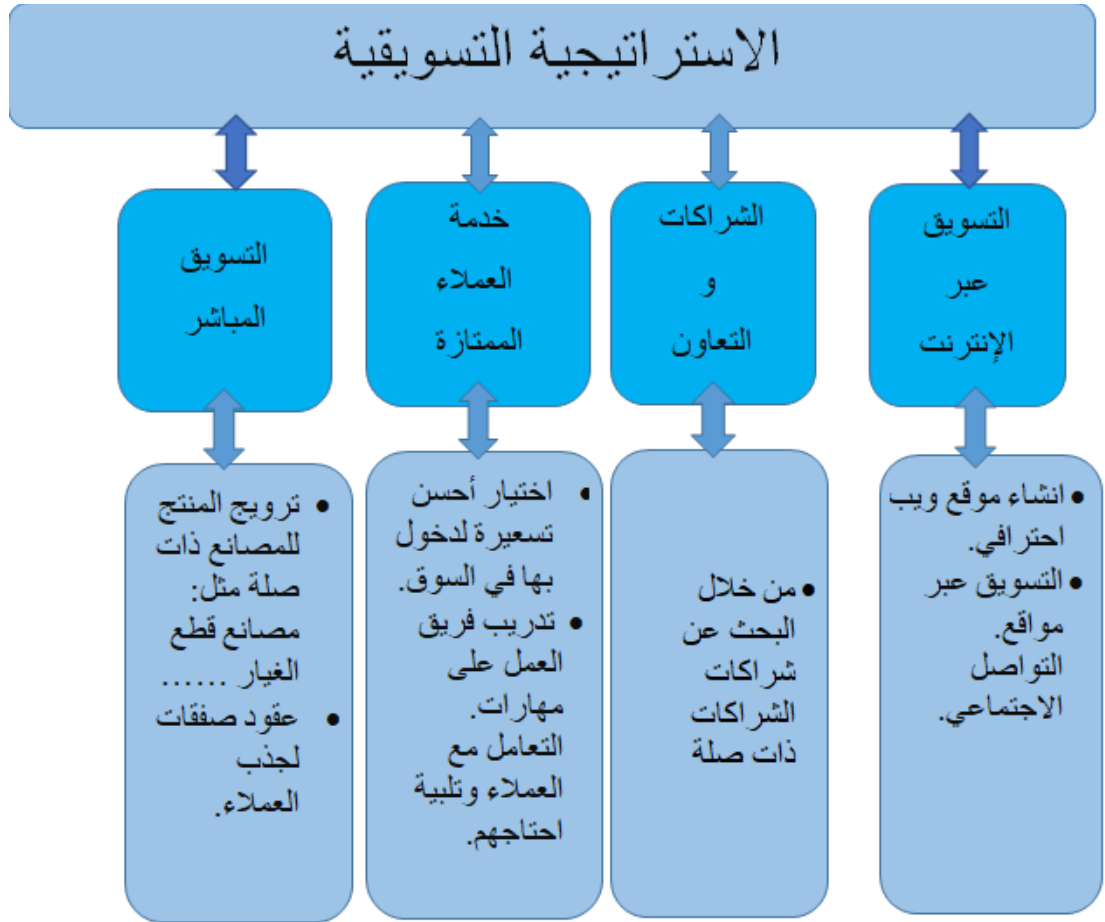
(أكبر شركة خاصة للفحم في الولايات المتحدة) تستفيد من مناجمها Peabody Energy جودة المنتج: شركة مثل شركة المتطورة وتقنيات استخراج فعالة

، أكبر منتج للفحم في الصين، تملك مصادر واسعة وتقنيات متقدمة China Shenhua Energy شركة

تتميز بجودة عالية لمنتجاتها الإلكترونية Apple

موقع جيد: متجر صغير يقع في مركز تجاري مزدحم يزيد من عدد الزبائن المحتملين

خبرة فنية: فريق مطورين في شركة برمجيات يمتلك خبرة واسعة في تكنولوجيا الذكاء الاصطناعي



المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم

1. الخطوات الأساسية في عملية الإنتاج

1. جمع أوراق الكاليتوس من الغابات أو مزارع الكاليتوس.
2. تجفيف الأوراق في الشمس أو في مجففات صناعية.
3. الكربنة (Carbonization) في فرن خاص بدرجة حرارة مرتفعة (300-600 ° C)
4. تنشيط الفحم:
 - كيميائياً (مثلاً باستخدام حمض الفوسفوريك)
 - أو فيزيائياً (بالبخار أو CO₂)
5. غسل وتجفيف الفحم النشط للتخلص من أي بقايا كيميائية.
6. الطحن والتصنيف حسب الحجم المطلوب.
7. التعبئة في أكياس أو عبوات محكمة الإغلاق.

2. التسويق والتوزيع:

-التسويق: يتم تحديد السوق المستهدفة والترويج لمنتجاتنا من خلال حملات تسويقية متخصصة. يشمل ذلك استخدام الإعلانات، والعروض الترويجية، والتسويق الرقمي للوصول إلى العملاء المحتملين.

-التوزيع: يتم توزيع المنتجات عبر قنوات توزيع متعددة، مثل الموزعين المحليين، والوكلاء، والشركاء التجاريين. يتم توفير خدماتنا بشكل منظم للعملاء في الصناعات المختلفة، مع التركيز على تلبية احتياجاتهم بشكل فعال وفي الوقت المناسب.

تحديد سياسة الشراء

ينبغي تحديد المعايير الفنية والجودة التي يجب تلبيةها، بالإضافة إلى الكميات المطلوبة والمواصفات التقنية المحددة وتمثل في:

• **تحديد الموردين:** اختيار الموردين المناسبين الذين يمكن الاعتماد عليهم لتوفير المواد الأولية.

• **إدارة المخزون:** تحديد كيفية إدارة المخزون لضمان توفر المواد الكيميائية بشكل مستمر دون توقف، وفي الكميات المطلوبة.

• **الشروط التجارية:** تحديد الشروط التجارية مثل الأسعار، والشروط الدفع، والشروط القانونية والتعاقدية التي تحكم علاقة الشركة مع الموردين.

تحديد أهم الموردين

يتم اختيار الموردين الذين يقدمون المنتجات ذات الجودة العالية والتكلفة المناسبة، وذلك من خلال تقييم العروض التجارية والمقارنة بين الأسعار وشروط التسليم المختلفة من أهم الموردين (أصحاب المواد الأولية)..

إدارة العلاقات مع الموردين: تعتبر علاقات قوية ومستدامة مع الموردين أمرًا حاسمًا لتحقيق التموين الفعال، حيث يمكن تحقيق تفاهات متبادلة تساهم في تقليل التكاليف وتحسين جودة المواد واللوازم المشتريات.

مراقبة جودة المواد: تتم عمليات فحص واختبار للمواد المستعملة للتأكد من جودتها ورفض أي مواد غير مطابقة للمعايير

تحديد سياسة الدفع ووقت الاستلام: يجب تحديد سياسة الدفع الملائمة وفقًا لظروف المشروع، مع النظر في توافر السيولة المالية وضمن استلام المواد واللوازم في الوقت المناسب لتجنب تأثيرات سلبية على الإنتاجية والجدول الزمني للمشروع.

اليد العاملة:

- في مرحلة البداية (مشروع ناشئ أو نصف صناعي)
- 1مشغل فرن كربنة
- 1تقني كيميائي لتحضير الفحم النشط
- 1عامل تنظيف وتجميع
- 1مسؤول تعبئة وتغليف
- 1مسؤول تسويق ومبيعات
- مشرف/مدير مشروع

يُمكن توظيف الطلبة أو الخريجين الجدد لتقليل التكاليف وتشجيع روح الابتكار

المحور الخامس: الخطة المالية

رقم الأعمال – السنة الأولى:

رقم الأعمال	السعر مع TVA 19%	السعر بدون TVA (7% هامش ربح)	كمية الإنتاج (طن)	الفترة
N1	22,312,500 DZD	18,750,000 DZD	1.25	(أشهر 3)
N1+3	66,937,500 DZD	37,500,000 DZD	2.5	(أشهر 6)
N1+6	133,875,000 DZD	56,250,000 DZD	3.75	(أشهر 9)
N1+9	223,125,000 DZD	75,000,000 DZD	5.0	(شهر 12)

مجموع رقم الأعمال – السنة الأولى: DZD446,250,000

II. رقم الأعمال – السنة الثانية:

رقم الأعمال	السعر مع TVA	السعر بدون TVA	الكمية	الفترة
N2	120,487,500 DZD	101,250,000 DZD	6.75	(أشهر 3)
N2+3	272,212,500 DZD	127,500,000 DZD	8.5	(أشهر 6)
N2+6	455,175,000 DZD	153,750,000 DZD	10.25	(أشهر 9)
N2+9	669,375,000 DZD	180,000,000 DZD	12	(شهر 12)

مجموع رقم الأعمال – السنة الثانية: DZD1,517,250,000

III. رقم الأعمال – السنة الثالثة:

رقم الأعمال	السعر مع TVA	السعر بدون TVA	الكمية	الفترة
N3	254,362,500 DZD	213,750,000 DZD	14.25	(أشهر 3)
N3+3	548,887,500 DZD	247,500,000 DZD	16.5	(أشهر 6)
N3+6	883,575,000 DZD	281,250,000 DZD	18.75	(أشهر 9)
N3+9	1,262,887,500 DZD	318,750,000 DZD	21.25	(شهر 12)

مجموع رقم الأعمال – السنة الثالثة: DZD2,949,712,500

IV. التكاليف اليومية (على أساس 365 يوم:)

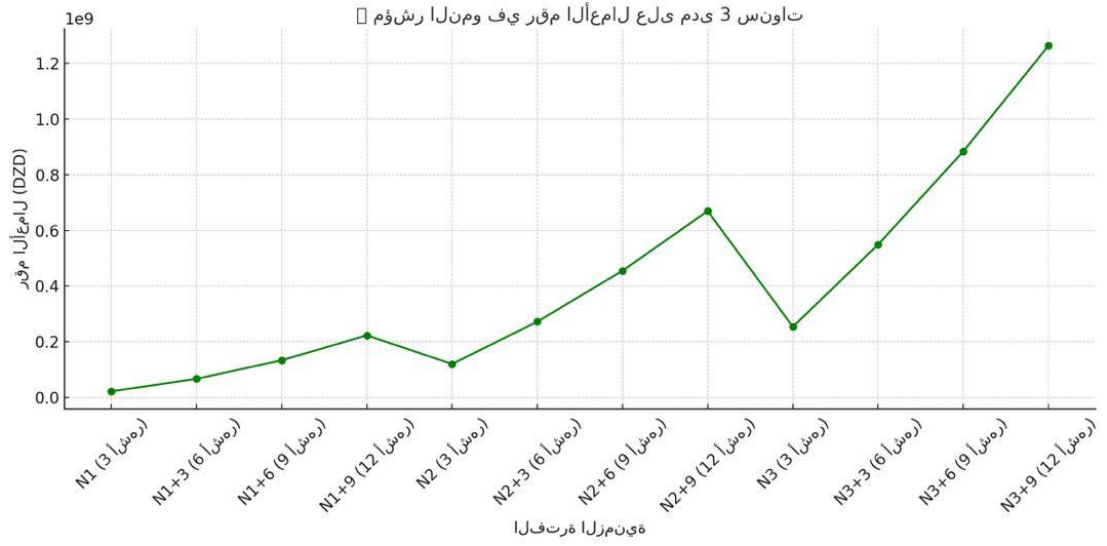
البند	التكلفة بالدينار
كراء المحل	1,440,000
الإنترنت	25,000
الكهرباء	240,000
للعمال (3 عمال) CNAS	79,200
CASNOS	50,000
ضرائب جزافية	15,000
أجور (مهندس + عاملين)	1,872,000
التغذية	109,500
المجموع	3,830,700 DZD سنويًا ≈ 957,675 كل 3 أشهر

٧. التكاليف الثابتة (شراء الأجهزة والتجهيزات مرة واحدة):

البند	السعر (DZD)
فرن كربنة (بسيط)	950,000
وحدة تنشيط كيميائي	1,500,000
طاولة عمل وتجهيزات	250,000
طاحنة (Broyeur)	750,000
أجهزة قياس وتحاليل	300,000
أجهزة تغليف وتعبئة	350,000
حواسيب/أثاث مكثبي	250,000
تجهيزات أمن (إطفاء + إسعاف)	50,000
المجموع الكلي	تقريبًا 4,400,000 DZD

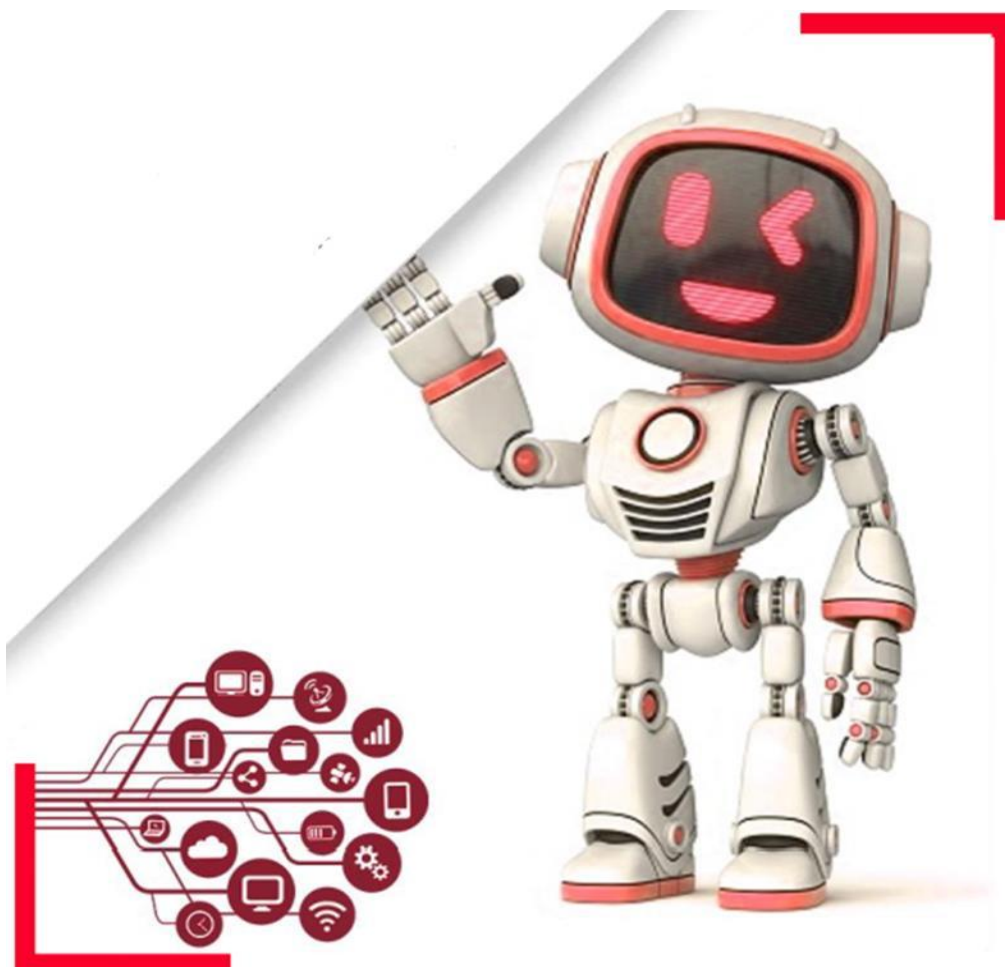
٧.١. مؤشر النمو على مدى 3 سنوات:

الشهر	رقم الإيجالية (طن)	(DZD)
N1 (3 أشهر)	1,25	22312500
N1+3 (6 أشهر)	2,5	66937500
N1+6 (9 أشهر)	3,75	133875000
N1+9 (12 أشهر)	5	223125000
N2 (3 أشهر)	6,75	120487500
N2+3 (6 أشهر)	8,5	272212500
N2+6 (9 أشهر)	10,25	455175000
N2+9 (12 أشهر)	12	669375000
N3 (3 أشهر)	14,25	254362500
N3+3 (6 أشهر)	16,5	548887500
N3+6 (9 أشهر)	18,75	883575000
N3+9 (12 أشهر)	21,25	1262887500



مخطط يمثل مؤشر النمو

المحور السادس:



النموذج الأولي التجريبي

1-bain marie:

أجهزة العمل:



Figure 1: bain marie



Figure 2 :balance électrique

2-
prod
uit
mes
urer:

IV.Prod
uits

-
- harbo
n actif
-

cide chlorhydrique HCl

- Orange méthyle
- Hydroxyde de sodium NaOH
- Eau distillé



Figure 3: Photo d'agitateur

- **Bécher**
- **Balance électrique**

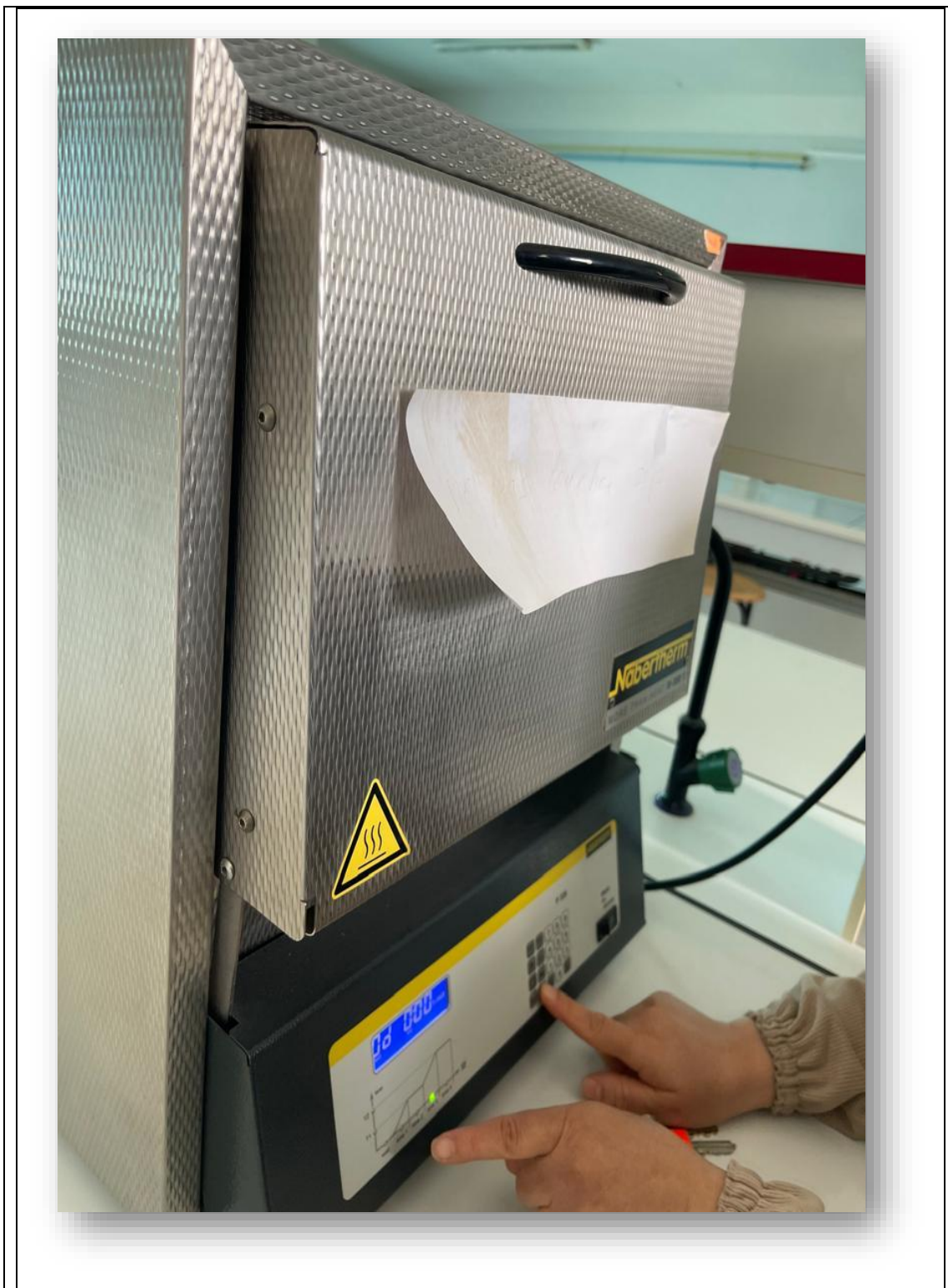


Figure 4: four à moufle de laboratoire



Figure 5: broyeur à billes

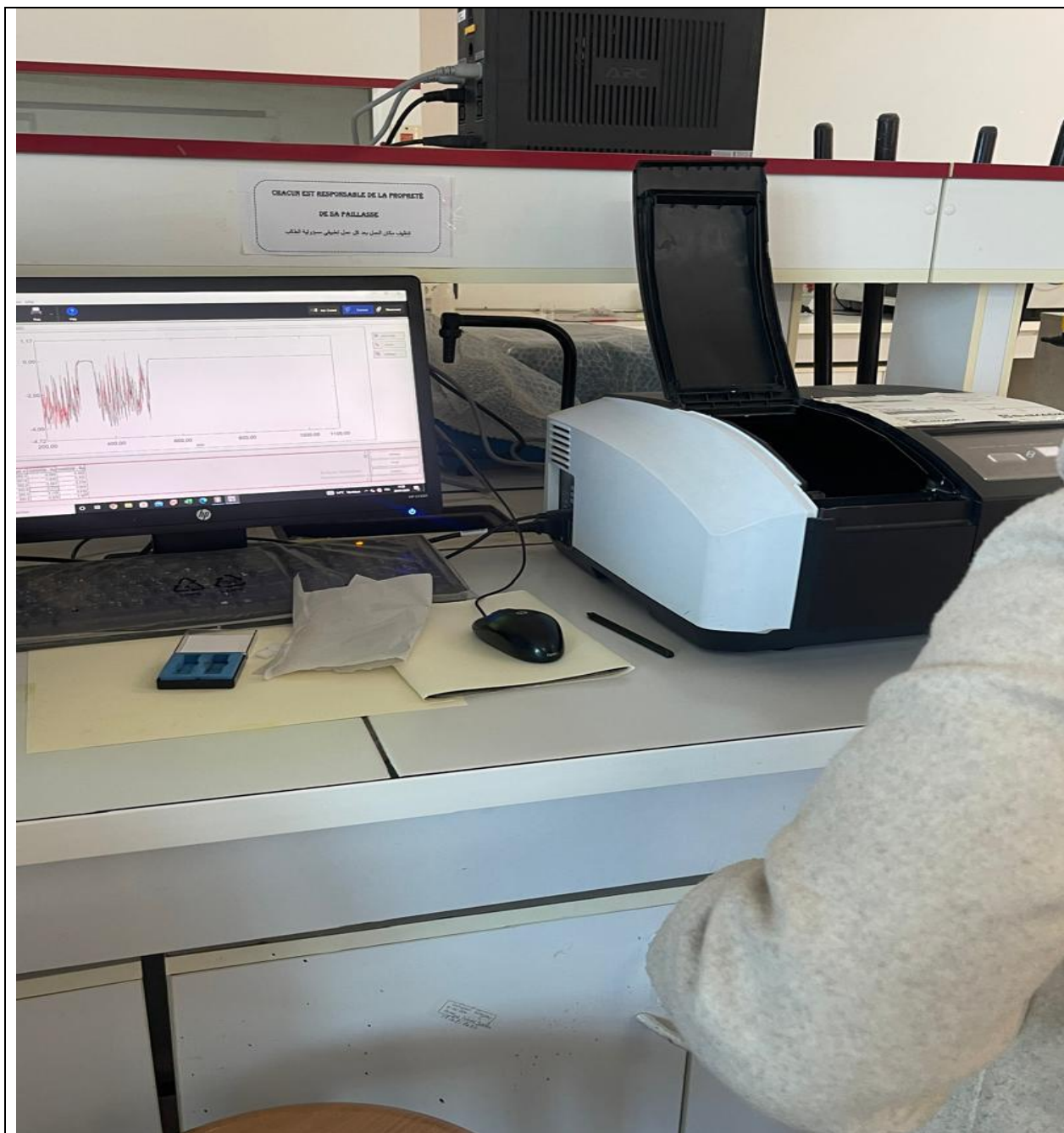


Figure 6 : spectrophotomètre UV-vis (ultra violet – visible)



Figure 7 : La biomasse collecté (la matière première)

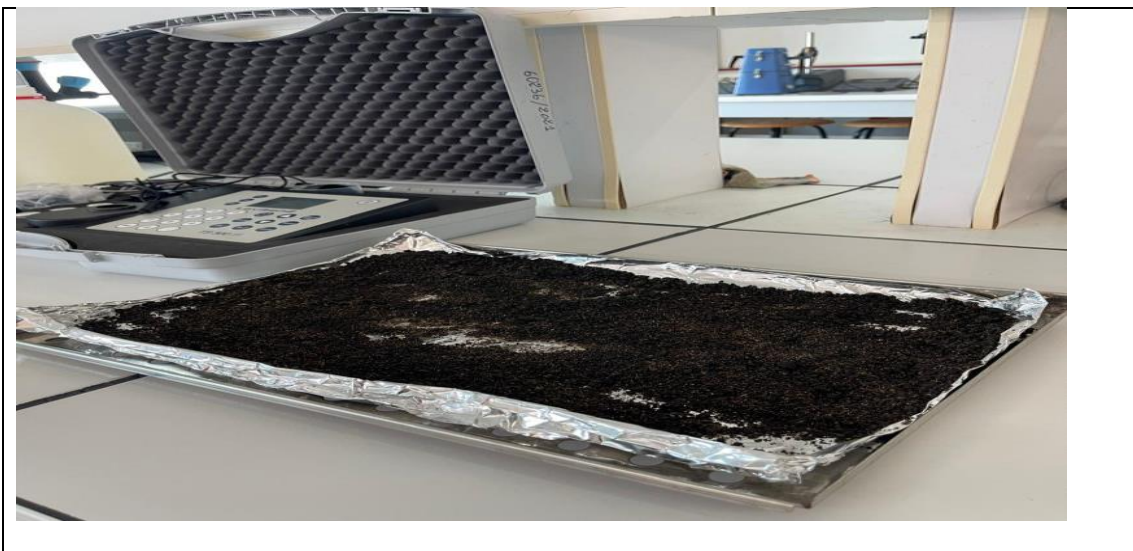


Figure 8 :Le Charbon actif avant la pérolise



Figure 9 : Charbon actif après pérolise

	الشركاء (Key Partners)		الأنشطة الرئيسية (Key Activities)		القيمة المقترحة (Value Proposition)		علاقات العملاء (Customer Relationships)		شرائح العملاء (Customer Segments)
	<ul style="list-style-type: none"> - شركات جمع - وتقطيع الأشجار والكتلة الحيوية - شركات تصنيع الأفران ووحدات التفعيل - هيئات بيئية وبلديات - جامعات ومخابر بحثية 		<ul style="list-style-type: none"> - جمع وتحضير النفايات النباتية - كربنة وتحويل المادة الخام - تفعيل الفحم (فيزيائياً أو كيميائياً) - تعبئة وتسويق المنتج 		<ul style="list-style-type: none"> - منتج بيئي عالي الجودة - - بديل أرخص ومستدام للفحم التجاري - تقليل التلوث وتأمين النفايات - دعم الاقتصاد الأخضر المحلي 		<ul style="list-style-type: none"> - علاقات مباشرة مع العملاء - دعم تقني بعد البيع - توعية بيئية وتسويق اجتماعي 		<ul style="list-style-type: none"> - مصانع معالجة المياه - - شركات الصناعات الغذائية والدوائية - مخابر التحليل- بلديات وجمعيات بيئية - تجار الفحم - أفراد المجتمع
			الموارد الرئيسية (Key Resources)				القنوات (Channels)		
			<ul style="list-style-type: none"> - نفايات الأشجار والكتلة الحيوية - أفران كربنة وأجهزة تفعيل - موارد بشرية مؤهلة - طاقة كهربائية وحرارية - أدوات مراقبة الجودة 				<ul style="list-style-type: none"> - البيع المباشر - المنصات الإلكترونية (موقع، فيسبوك، إنستغرام) - المعارض والملتقيات البيئية - شراكات محلية 		
	هيكل التكاليف (Cost Structure)						مصادر الإيرادات (Revenue Streams)		
	<ul style="list-style-type: none"> - تكاليف جمع وتحويل النفايات - شراء المعدات والآلات - أجور العمال - الطاقة والتشغيل - التسويق والرخص البيئية 						<ul style="list-style-type: none"> - بيع الفحم النشط بالجملة والتجزئة - خدمات استشارية وتحليلية مرافقة - تصدير محتمل مستقبلاً 		

خاتمة عامة 

إن تطوير الفحم الجديد الذي تقدمه شركتنا يمثل خطوة استراتيجية نحو تعزيز الكفاءة وتحقيق الاستدامة في استخدام هذا المورد الحيوي. لقد أظهرت التجارب الأولية أن الفحم المُحسَّن يتميز بقدرة احتراق أعلى، وانبعاثات ملوثة أقل، وكفاءة حرارية محسَّنة مقارنة بالفحم التقليدي. كما أن خصائصه الفيزيائية والكيميائية الجديدة تجعله خيارًا مثاليًا للصناعات التي تبحث عن مصادر طاقة أكثر فعالية وأقل ضررًا على البيئة.

تُظهر هذه التحسينات إمكانات كبيرة في توسيع الحصة السوقية وزيادة رضا العملاء، خاصة عند ربط المنتج بخدمات دعم فني وخدمة ما بعد البيع ذات جودة عالية. ومع مواجهة السوق لتحديات بيئية وتنظيمية متزايدة، فإن الفحم الجديد يُعد فرصة حقيقية لتقديم حل عملي يجمع بين الأداء العالي والمسؤولية البيئية.

وبذلك، فإن الابتكار في منتج الفحم لا يعزز فقط تنافسيتنا، بل يفتح أبوابًا جديدة نحو أسواق أكثر تطورًا واعتمادًا على الطاقة النظيفة، مما يُمكن شركتنا من تحقيق نمو مستدام وطويل الأمد.