République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Chadli Bendjedid El-Tarf

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie des Procédés

Mémoire de Master Professionnel

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Dessalement et Traitement des Eaux

Thème :

Possibilité d'élimination des colorants des eaux par combinaison électrocoagulation - adsorption

Présentée par : **DJEGHDJEGH Roumaissa**

Soutenue le : …/06/2025 devant le jury composé de :

Dr.KHELLAF Noureddine	**Président**	**M.C.B**	**Univ. El-Tarf**
Dr. AITBARA Adel	**Encadrant**	**M.C.A**	**Univ. El-Tarf**
Dr. HERBADJI Abdelmadjid	**Co- Encadrant**	**M.C.B**	**Univ. El-Tarf**
Dr.OUCHENE Abdelali	**Examinateur**	**M.C.B**	**Univ. El-Tarf**

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Merci à Dieu de m'avoir donné la volonté d'achever cette recherche, ainsi que la santé morale et physique, le courage et la force qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens tout d'abord à remercier ***Dr. AITBARA Adel*** *pour son soutien, sa confiance, sa disponibilité, sa formation, ses précieux conseils, sa patience et sa générosité. Mes remerciements vont également à* ***Dr. HERBADJI Abdelmadjid*** *pour ses conseils, son soutien et sa coopération.*

J'adresse aussi mes vifs remerciements à ***Dr. KHELLAF*** *et* ***Dr.*** **OUCHENE** *pour avoir accepté de faire partie du jury et d'avoir examiné mon travail.*

Un grand merci à tous les enseignants du département de Génie des Procédés et du département de Chimie pour leur encadrement tout au long de mon parcours.

Bien sûr, je n'oublie pas toutes les personnes qui m'ont aidé, de près ou de loin, à réaliser ce travail.

Enfin, un merci tout particulier à tous les membres de ma famille, mon père, ma mère, ainsi qu'à mes collègues pour leur soutien et leurs encouragements.

Dédicace

(وَقُلِ ٱعۡمَلُواْ فَسَيَرَى ٱللَّهُ عَمَلَكُمۡ وَرَسُولُهُۥ وَٱلۡمُؤۡمِنُونَ)
[التوبة: 105]

إلى من زرعوا في قلبي حبّ العلم، وغرسوا في نفسي الثقة والإرادة...

إلى ***والدَيّ العزيزين،***
أنتم بعد الله عزّ وجلّ، سرّ هذا الإنجاز، ودعاؤكما كان سلاحي في كل لحظة تعب

إلى ***أمي الحنونة،***
لكِ كل الفضل، يا من كنتِ الأمان حين خفت، والنور حين أظلم الطريق.

إلى ***أبي الغالي،***
شكراً لثقتك الهادئة، ولكلماتك التي كانت دائماً نبراساً لقلبي.

إلى ***إخوتي*** نضال وآدم،
لكم منّي الحب والدعاء، أنتم القوة الصامتة في حياتي.

وإلى ***صديقتي العزيزة ورفيقة الدرب*** خرابي عبلة
لقد كنتِ النور في اللحظات المعتمة، والسند وقت العجز،
شكراً لكِ على الصبر، والمشاركة، والدعم اللامحدود...
هذا الإنجاز لا يكتمل دون ذكرك.

...إلى ***كلّ من ساهم بكلمة، أو دعم، أو دعاء***
جزاكم الله عني خير الجزاء.

رميسة



Sommaire :

Liste de figures.....III
Liste de tableaux.....V
Liste des abréviations.....VI
Introduction générale.....1
I . ChapitreI: généralité sur les eaux et le colorant :.....2
I .1 Généralité sur les eaux.....2
I .1.1 Introduction.....2
I.1.2 Définition :.....2
I.1.3 Composition de l'eau :.....2
I.1.4.L'importance de l'Eau pour la santé.....3
I.1.5.Les Autres Rôles de l'eau.....4
I.1.6.Le cycle de l'eau :.....4
I.1.7.Répartition de l'eau sur Terre.....5
I.1.8. Ressource en eau.....6
I.2.Généralité sur les colorants.....7
I.2.1Introduction.....7
I.2.2.Définition des colorants.....7
I.2.3.Classification des colorants.....8
I.2.4.Différence entre pigment et colorant.....11
I.2.5.Familles de colorants.....12
I.2.6.Utilisations des colorants :.....12
I.2.7.Toxicité des colorants alimentaires.....13
I.2.8.Couleurs dans les environnements aquatiques.....14
II . Chapitre II : Adsorption et électrocoagulation.....17
II.1.Introduction.....17
II.2.Adsorption.....17
II.2.1.Adsorption Chimique (Chimisorption).....17
II.2.2.Adsorption Physique (Physisorption).....18
II.2.3.Mécanisme de l'Adsorption.....18
II.2.4.Isothermes d'Adsorption.....18
II.2.5. Modèles d'Isothermes.....19
II.3.Généralité sur le charbon actif.....21
II.3.1.Définitions :.....21

II.3.2.Procédé de fabrication du charbon actif : 23
II.4. L'électrocoagulation 24
II.4.1.Historique du procédé 24
II.4.2.Principe de fonctionnement 25
II.4.3.Mécanisme de l'électrocoagulation et réactions aux électrodes 26
II.4.4.Formation des complexes d'aluminium et configuration des électrodes 27
II.4.5.Facteurs influençant l'électrocoagulation : 28
III. Chapitre III :Matériels et Méthodes, Résultats et discussions 31
III.1. Matériels et Méthodes 31
III.1.1. Données sur le colorant utilisé (Tartrazine) 31
III.1.2. Préparation des solutions et analyses du colorant 32
III.1.3. Nature des Adsorbants utilisés. 32
III.1.4. Préparation des charbons actifs 33
III.1.5. Équipement et conditions opératoires du traitement par Adsorption, électrocoagulation et couplage EC-Adsorption. 34
III.2. Résultats et discussion 35
III.2.1. Données analytiques sur le colorant étudié 35
III.2.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage du colorant étudié : 37
III.2.3. Résultats d'élimination du colorant par Adsorption 38
III.2.4. Résultats d'élimination du colorant par électrocoagulation 40
III.2.5. Résultats d'élimination du colorant par couplage électrocoagulation/adsorption 43
III.2.6. Effet de la nature et masse d'adsorbant sur l'élimination du colorant par couplage électrocoagulation/adsorption. 46
III.2.7. Effet de la concentration de l'électrolyte support sur l'élimination du colorant par couplage électrocoagulation/adsorption. 48
III.2.8. Comparaison des efficacités d'élimination du colorant par Electrocoagulation, Adsorption et Electrocoagulation / Adsorption. 49
III.2.9. Effet de la concentration initiale du colorant sur l'efficacité d'élimination par Electrocoagulation/Adsorption 51
III.2.10. Effet de la nature des électrodes sur l'efficacité d'élimination par Electrocoagulation / Adsorption 53
Conclusion générale 55
Références bibliographique 55

Liste de figures

Figure 1 : Illustration de cycle de l'eau 5
Figure 2 : Molécule du colorant Azoïque[13] 8
Figure 3 : Molécule de la colorante anthraquinone[14].....9
Figure 4 : Molécule du colorant indigoïdes[15] 9
Figure 5 : Molécule du Colorant Xanthène[16].....9
Figure 6 : Molécule du colorant triphénylméthanes[17] 10
Figure 7 : Molécule du colorant phtalocyanines[18].....10
Figure 8 : Molécule du colorant nitrosé[19].....11
Figure 9 : Courbes des isothermes d'adsorption.....19
Figure 10 : Représentation schématique de la forme microscopique du charbon actif[40]....22
Figure 11 : Représentation Schématique de l'électrocoagulation[47].....25
Figure 12: Photo de petits pois (gauche) et composition moyenne pour 100g de petits pois (droite)[59].....32
Figure 13 : Photo de fèves (gauche) et composition moyenne pour 100g des fèves (droite) .33
Figure 14 : Montage expérimental d'EC.....35
Figure 15 : Spectre du colorant étudié 36
Figure 16 : Essais de stabilité ou de conservation des colorants dans le temps 37
Figure 17 : Courbe d'étalonnage du colorant étudié.....38
Figure 18 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de l'adsorbant (T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Adsorbant (CAPPP)).....39
Figure 19 : pH initiaux et pH finaux en fonction de la masses de l'adsorbant (T = 24°C ± 1 ; concentration initiale du colorant = 50 mg/l ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Adsorbant (CAPPP)).....40
Figure 20 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes densités de courant (Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 50 rpm pendant 30 min).....41
Figure 21 : pH initiaux et pH finaux en fonction de la densité de courant(T = 24°C ± 1 ; concentration initiale du colorant = 50 mg/l ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; électrodes Al/Al).....43
Figure 22 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps (Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ;

Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant (CAC) A: 200 mg, B:300 mg; C: 350 mg, D: 400 et 450 mg). 44
Figure 23: Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes densités de courant (Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant A: 300 mg CAPPP ; B 400 mg CAPPP). 45
Figure 24 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de l'adsorbant (densité de courant 6 mA/cm², Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Adsorbant utilisé CAPPP).....46
Figure 25 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de l'adsorbant (densité de courant 6 mA/cm², Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Adsorbant utilisé CAPF).....47
Figure 26 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes concentration de l'électrolyte support (densité de courant 6 mA/cm², Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant 350 mg CAPPP). 48
Figure 27 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différents systèmes de traitement (Densité de courant 6 mA/cm² ; Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant CAC, CAPPP et CAPF est 400 mg). 50
Figure 28 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes concentration du colorant étudié (Densité de courant 6 mA/cm² ; Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant CAC 400 mg). 52
Figure 29 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes concentration du colorant étudié (Densité de courant 6 mA/cm² ; Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant CAPPP 400 mg). 52
Figure 30 : Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes natures d'électrodes (Densité de courant : 6 mA/cm², Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant CAPPP 400 mg).....53

Liste de tableaux

Tableau 1 : Relation entre la fréquence absorbée et la couleur transmise[12]. 8

Tableau 2 : Caractéristique du charbon actif[41].....22

Tableau 3 : Quelques données sur le colorant étudié (Tartrazine). 31

Tableau 4 : Quelques caractéristiques du colorant étudié.....36

Liste des abréviations

EC	Électrocoagulation
CAPPP	Charbon Activé à base de Pelures de Petits Pois
CAPF	Charbon Activé à base de Pelures de Fèves
E102	Code du colorant alimentaire Tartrazine
CAC	Charbon Actif Commercial
NaCl	Chlorure de sodium
TDS	Total Dissolved Solids (matières solides dissoutes totales)
Al/Al	Électrodes en aluminium (anode/cathode)
OH^-	Ion hydroxyde
Al^{3+}	Ion aluminium trivalent
Fe^{3+}	Ion fer trivalent
$H_3\ PO_4$	Acide phosphorique
pH	Potentiel hydrogène (acidité ou basicité d'une solution)
THM	Trihalométhanes
GDP	Sous-produits de désinfection (Disinfection By-Products)
rpm	Tour par minute (vitesse d'agitation)

Introduction générale

L'utilisation des colorants alimentaires est repandu dans l'industrie agroalimentaire afin d'améliorer l'apparence et l'attrait des produits consommés. Cependant, certains de ces additifs, notamment le colorant azoïque jaune tartrazine (E 102), présentent des risques environnementaux et sanitaires lorsqu'ils sont rejetés dans les eaux usées. Leur présence dans les milieux aquatiques peut entraîner une pollution importante, affectant la faune et la flore, ainsi que la qualité de l'eau potable.

Dans ce contexte, le traitement des effluents contenant des colorants et conservateurs alimentaires est devenu un enjeu majeur pour les chercheurs et les industries. Parmi les techniques de dépollution, l'électrocoagulation se distingue par son efficacité à précipiter et floculer les contaminants, grâce à l'utilisation d'électrodes métalliques. Par ailleurs, les biosorbants, constitués de matériaux d'origine naturelle dans notre cas, du charbon actif préparé à partir de pelures de petits pois, offrent une alternative écologique et économique pour l'élimination des polluants organiques et inorganiques présents dans l'eau[1].

le présent travail vise à étudier l'élimination d'un colorant alimentaire (Tartrazine) dans les eaux par combinaison de deux tels que l'adsorption et l'électrocoagulation en utilisant des électrodes en alliage d'aluminium, les expériences ont été effectuées sur des échantillons d'eaux synthétisés avec du colorant en poudre. Nous avons opté à étudier l'effet de plusieurs paramètres affectant l'efficacité de traitement envisagé tels que la densité de courant, le temps d'électrolyse, type te quantité d'adsorbant.

Dans ce mémoire, nous présentons tout d'abord une revue bibliographique portant sur les généralités concernant les eaux, notamment leur caractérisation, les types de pollution, les normes et réglementation. La deuxième partie aborde les notions fondamentales relatives aux colorants. La troisième partie traite les deux procédés étudiés tels l'électrocoagulation et l'adsorption, en détaillant leurs principes de fonctionnement, leurs domaines d'application ainsi que leurs avantages et inconvénients respectifs. La quatrième partie est consacrée à l'étude expérimentale. Nous avons d'abord évalué la performance de la technique d'adsorption, puis celle de l'électrocoagulation, avant d'examiner l'efficacité de la combinaison des deux procédés. Le traitement, réalisé en mode statique, a permis d'atteindre un taux de réduction de la coloration supérieur à 99 %, grâce à l'utilisation d'électrodes en alliage d'aluminium avec les matériaux préparés.

I. Chapitre I: généralité sur les eaux et le colorant :

I .1 Généralité sur les eaux

I .1.1 Introduction

L'eau, tout comme l'air, est un élément essentiel à la vie humaine. Elle joue un rôle clé dans l'organisation et le développement des territoires. Toutefois, sa répartition sur la planète est inégale, et ses ressources peuvent être limitées, ce qui en fait un enjeu environnemental majeur. Disposer d'une eau en quantité suffisante et de bonne qualité est indispensable pour préserver la santé. C'est pourquoi elle doit faire l'objet d'analyses rigoureuses afin de garantir sa potabilité et de prévenir les maladies d'origine hydrique[2].

I.1.2 Définition :

Corps chimique très stable composé d'hydrogène et d'oxygène, de formule chimique H_2O. L'eau, solvant de première importance, peut s'exister sous trois états physiques différents : solide, liquide et gazeux. L'eau pure est rare ; l'eau qui nous nous entoure est en fait une solution d'eau, de différents sels minéraux et de divers autres éléments. Elle représente 65% du corps humain adulte. On parle d'eau subcritique pour désigner de l'eau chaude (entre 100 et 350°C), maintenue à l'état liquide par une pression élevée, sans toutefois atteindre l'état supercritique[3].

I.1.3 Composition de l'eau :

L'eau est une substance liquide, naturelle, incolore, inodore et sans saveur, avec un pH neutre. Sa molécule est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène (H□O). C'est un excellent solvant qui retient des traces des éléments avec lesquels elle entre en contact.

L'eau contient plusieurs éléments :

- ***Des gaz :***

L'oxygène dissous et le dioxyde de carbone jouent un rôle important dans les interactions entre l'eau et les matériaux.

- ***Des acides et des bases partiellement ou totalement dissociés en ions :***

Des anions (ions négatifs) : Bicarbonates, sulfates, nitrates, chlorures, hydroxyde.

Des cations (ions positifs) : Calcium, magnésium, sulfates, nitrates, chlorures, hydroxyde.

- ***Des matières en suspensions :***

Il s'agit de particules colloïdales insolubles, d'origine minérale ou organique, présentes naturellement dans l'eau. On y trouve notamment du limon, de l'argile, des matières organiques et inorganiques sous forme de fines particules, ainsi que du plancton et divers micro-organismes. Ces particules influencent la turbidité de l'eau et peuvent servir de support à l'adsorption de bactéries et de virus[4].

- ***Des matières solides dissoutes TDS –Total Dissolved Solides***

Elles comprennent principalement des sels inorganiques (calcium, magnésium, potassium, sodium, bicarbonates, chlorures et sulfates), ainsi que de petites quantités de matières organiques dissoutes. Ces éléments jouent un rôle clé dans le cycle du carbone et participent à diverses réactions physiques, chimiques et biologiques, influençant ainsi le transport et la transformation des contaminants. La concentration en TDS varie selon la région géologique, en raison des différences de solubilité des minéraux**.**

- ***Des microorganismes***

L'eau contient du phytoplancton et du zooplancton, incluant des algues, des bactéries, des protozoaires et des crustacés.

Ainsi, l'eau est un élément essentiel aux processus naturels et aux interactions biologiques, chimiques et physiques [4].

I.1.4.L'importance de l'Eau pour la santé

L'eau est une ressource essentielle à toute forme de vie, qu'elle soit humaine, animale ou végétale. Longtemps perçue comme abondante et renouvelable, elle joue un rôle fondamental dans les équilibres écologiques et constitue un élément clé du développement biologique et économique. Indispensable à la survie, elle doit être préservée et gérée de manière durable.

L'eau remplit de nombreuses fonctions : elle est à la fois une source d'alimentation, un éventuel médicament, une matière première pour l'industrie, un vecteur énergétique et agricole, ainsi qu'un moyen de transport. Toutefois, ses usages principaux en matière de santé humaine concernent l'agriculture, l'aquaculture, l'industrie, l'artisanat, les loisirs aquatiques, et surtout l'approvisionnement en eau potable. Ce dernier est essentiel non seulement pour l'hydratation et l'alimentation (boisson et cuisine), mais aussi pour l'hygiène et divers besoins domestiques[5].

I.1.5.Les Autres Rôles de l'eau

- ***Rôle de construction***

L'eau est un composant fondamental du corps humain, présente dans toutes les cellules, les tissus et les compartiments intra et extracellulaires.

- ***Rôle chimique***

Elle agit comme solvant, support de réactions chimiques, réactif et produit du métabolisme oxydatif.

- ***Rôle de transport***

Élément majeur du sang, elle permet le transport des nutriments aux cellules et facilite l'élimination des déchets.

- ***Rôle de thermorégulation***

Elle aide le corps à maintenir une température stable face aux variations climatiques, qu'il s'agisse de fortes chaleurs ou de grands froids.

I.1.6.Le cycle de l'eau :

Le cycle de l'eau, ou cycle hydrologique, désigne l'ensemble des déplacements qu'une particule d'eau peut effectuer. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, se produisent entre les différents réservoirs de l'hydrosphère : les océans, l'atmosphère, la surface du sol et le sous-sol des terres émergées.

L'eau est présente sur Terre sous ses trois états (liquide, gazeux et solide). Elle circule en permanence, s'évaporant des océans avant d'y retourner sous forme de précipitations. Sous l'effet de la chaleur du soleil, l'eau de surface s'évapore, tandis que l'eau contenue dans les plantes s'échappe par évapotranspiration. Ces phénomènes jouent un rôle essentiel dans le climat en contribuant à la formation des nuages. Lorsque ces derniers rencontrent des masses d'air froid, ils libèrent leur eau sous forme de pluie, de neige ou de grêle [6](figure 1).

Une partie de l'eau de pluie s'infiltre dans le sol, rejoignant ainsi les nappes phréatiques, les sources, les rivières et les fleuves, avant de repartir dans le cycle naturel de l'eau.

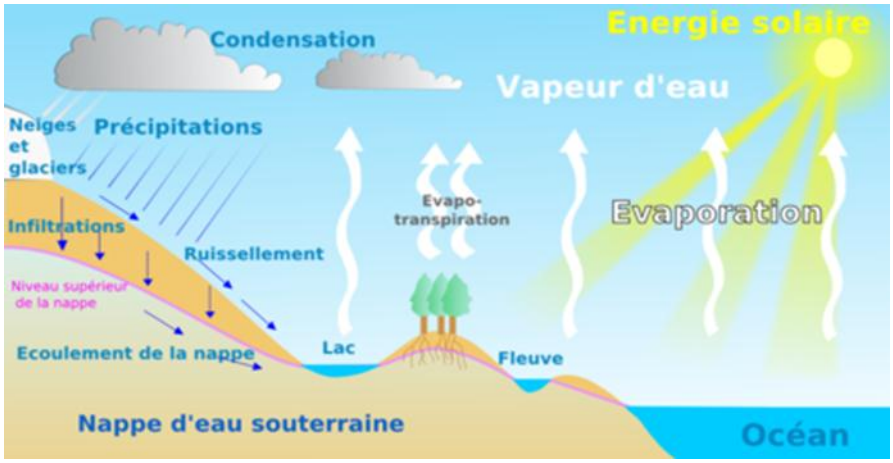


Figure 1 . Illustration de cycle de l'eau

I.1.7.Répartition de l'eau sur Terre

Les océans et les mers couvrent 71 % de la surface du globe, représentant un volume de 1 350 millions de km³ d'eau salée. Environ 29 millions de km³ d'eau sont stockés sous forme de glace dans les glaciers et les calottes glaciaires. L'eau douce présente à la surface de la Terre et dans le sol s'élève à 8,6 millions de km³.L'atmosphère contient également de l'eau sous forme de vapeur, estimée à 13 000 km³ [7].

Les besoins humains en eau sont évalués entre 4 000 et 5 000 km³ par an.

Pour répondre à ces besoins, trois sources principales d'approvisionnement en eau sont possibles :

I.2.7.1.L'eau météorique (pluie) :

Bien qu'abondante, cette eau présente des limites pour la consommation humaine en raison de sa composition et des risques de contamination liés aux méthodes de collecte et de stockage.

I.2.7.2.L'eau de surfaces :

Issue des rivières, lacs et autres sources en surface, elle doit être traitée avant d'être potable.

I.2.7.3.L'eau souterraine :

Filtrée naturellement lors de son infiltration dans le sol, elle est généralement plus pure et de meilleure qualité pour la consommation. Plus elle est puisée en profondeur, plus elle est claire et propre à la consommation.

I.1.8. Ressource en eau

Les ressources en eau, influencées par la situation hydrique, géographique et démographique des pays, constituent un enjeu majeur aux multiples implications. Elles concernent la santé publique, l'autonomie alimentaire, la compétitivité économique, la gestion des usages, ainsi que les aspects géopolitiques, financiers et environnementaux [8].

L'approvisionnement en eau de la population repose sur deux principales sources, aux caractéristiques distinctes :

I.1.8.1 Les eaux superficielles

Les eaux superficielles, comprenant les lacs, rivières et barrages, jouent un rôle essentiel dans l'approvisionnement en eau. Elles sont capables de fournir d'importantes quantités pour divers usages. Cependant, elles sont vulnérables à la contamination par le ruissellement et les rejets résiduaires, qui peuvent transporter des micro-organismes et des polluants chimiques. Un traitement rigoureux est donc nécessaire avant toute utilisation.

I.1.8.2 Les eaux souterraines

Les eaux souterraines incluent les eaux de source, les eaux minérales naturelles et les eaux thermales**.** Elles proviennent exclusivement de gisements souterrains, captées soit naturellement par une source, soit artificiellement par forage dans l'aquifère.

Plus minéralisées que les eaux superficielles, les eaux souterraines voient leur composition dépendre des roches traversées, de la solubilité des sels minéraux et du temps de contact entre l'eau et les minéraux. On distingue les aquifères peu profonds et les aquifères profonds.

Les ressources en eau, qu'elles soient souterraines ou superficielles, font l'objet de contrôles rigoureux portant sur leurs propriétés physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques afin d'assurer leur qualité et leur sécurité [9].

I .1.9.Normes de potabilité de l'eau

L'eau destinée à la consommation doit respecter des normes préétablies définissant des seuils maximaux pour diverses substances potentiellement dangereuses. Le respect de ces normes ne signifie pas que l'eau est totalement exempte de ces substances, mais que leur concentration est suffisamment faible pour ne pas présenter de risque pour la santé des consommateurs.

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) publie régulièrement des directives de qualité pour l'eau de boisson, qui servent de référence à de nombreux pays dans l'élaboration de leurs propres normes nationales. Ces directives reposent sur une évaluation scientifique des risques sanitaires liés aux contaminants biologiques et chimiques présents dans l'eau potable, ainsi que sur l'efficacité des mesures de contrôle mises en place pour les limiter[10].

L'OMS encourage les autorités nationales à tenir compte des aspects sociaux, économiques et environnementaux lorsqu'elles adaptent ces recommandations en normes locales. Une évaluation comparative des risques et des bénéfices est ainsi essentielle pour garantir un accès à une eau potable sûre et adaptée aux réalités de chaque pays.

I.2.Généralité sur les colorants

I.2.1 .Introduction

Depuis les origines de l'humanité, les couleurs ont accompagné l'évolution des sociétés : des peintures rupestres d'Altamira et de Lascaux aux céramiques mésopotamiennes, en passant par les habits funéraires égyptiens et les décorations corporelles des peuples anciens. Les premiers pigments provenaient des terres colorées, puis de sources végétales et animales.

Aujourd'hui, les colorants sont omniprésents dans notre quotidien : textiles, aliments, cosmétiques, produits pharmaceutiques, etc. Ils sont majoritairement d'origine synthétique, en raison de la rapidité de leur production, de leur coût réduit et de leur large gamme chromatique comparée aux colorants naturels [11].

L'industrie des colorants représente un pilier de la chimie moderne. Ils sont utilisés dans la teinture des fibres textiles, papiers, cuirs, fourrures, plastiques, bois, et élastomères. Leur utilisation s'étend aussi aux peintures, encres, vernis, produits alimentaires, pharmaceutiques, cosmétiques, métallurgie, photographie et biologie.

Les colorants se divisent en deux grandes familles : naturels (extraits de sources minérales ou organiques) et synthétiques (issus de procédés chimiques). Ce chapitre présente d'abord les principales familles chimiques de colorants industriels, puis une brève introduction aux méthodes de dépollution des effluents textiles.

I.2.2.Définition des colorants

Un colorant est une substance capable de conférer une couleur durable à un matériau. Il se compose de :

- **Chromophores** : groupes responsables de l'absorption de certaines longueurs d'onde dans le visible (380 à 780 nm),
- **Auxochromes** : groupes modificateurs de la teinte et de l'intensité,
- **Structures aromatiques conjuguées**.
- Les chromophores absorbent l'énergie lumineuse de façon sélective, transformant la lumière blanche en lumière colorée par réflexion, transmission ou diffusion. Plus un chromophore donne facilement un électron, plus la teinte est intense[11].

Tableau 1 .Relation entre la fréquence absorbée et la couleur transmise[12].

Λ Longueur d'onde absorbée (A)	**Couleur observe (transmise)**
4000 (violet)	Jaune verdâtre
4250 (bleu nuit)	Jaune
4500(bleu)	Orange
4900(bleu vert)	Rouge
5100(vert)	Poupre
5300(jaune vert)	Violet
5500 (jaune)	Bleu nuit
5900 (orange)	Bleu

I.2.3.Classification des colorants

I.2.3.1.Classification chimique

La classification chimique repose sur la nature du groupement chromophore. Les principales familles sont :

- ***Colorants azoïques***

Caractérisés par un groupement azo (-N=N-) liant deux cycles aromatiques. Ils peuvent être mono-, di- ou polyazoïques[13].

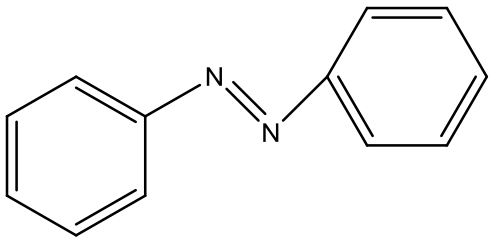
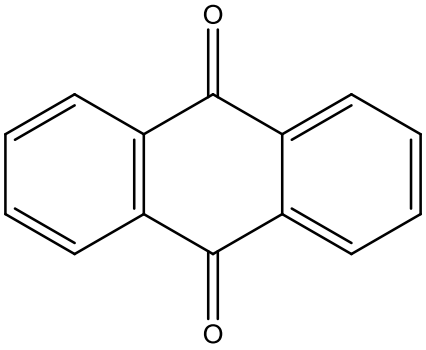


Figure 2 . Molécule du colorant Azoïque[13]

- ***Colorants anthraquinoniques***

Dérivés de l'anthraquinone, comportant des groupes carbonyle (>C=O). Ils se trouvent également à l'état naturel.



anthraquinone

Figure 3 . Molécule de la colorante anthraquinone[14]

- ***Colorants indigoïdes***

Inspirés de l'indigo naturel. Les dérivés soufrés, oxygénés ou séléniés couvrent des teintes variées.

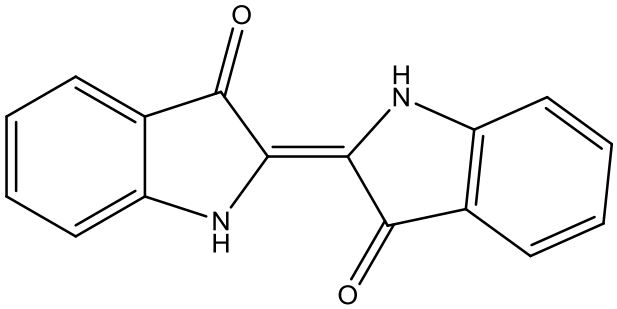


Figure 4 . Molécule du colorant indigoïdes[15]

- ***Colorants xanthènes***

  Composés tricycliques à forte fluorescence, contenant un noyau de pyrane entre deux cycles benzéniques.

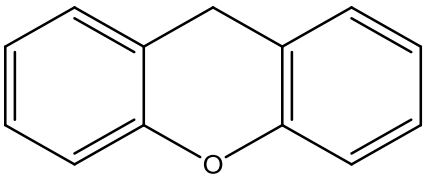


Figure 5 . Molécule du Colorant Xanthène[16]

- ***Colorants triphénylméthanes***

Dérivés du méthane, où trois phényles remplacent les atomes d'hydrogène. Ce sont les précurseurs d'une vaste série de colorants.

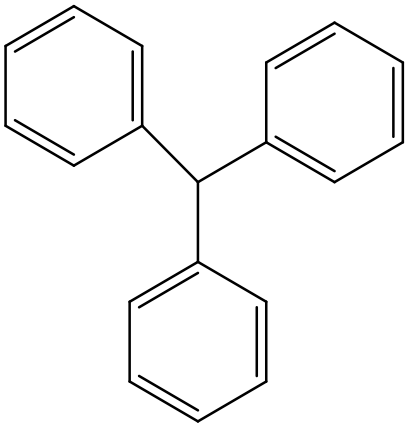


Figure 6 . Molécule du colorant triphénylméthanes[17]

- ***Phtalocyanines***

Structures complexes centrées sur un atome métallique, produites par réaction du dicyanobenzène avec un halogénure métallique.

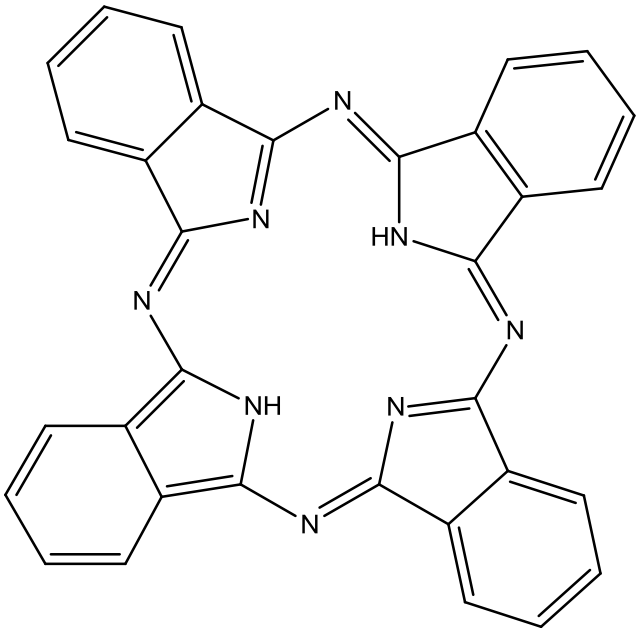


Figure 7 . Molécule du colorant phtalocyanines[18]

- ***Colorants nitrés et nitrosés***

Possèdent un groupement nitro (-NO_2) en position ortho d'un donneur d'électrons.

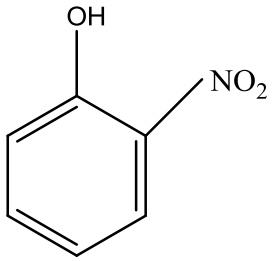


Figure 8 . Molécule du colorant nitrosé[19]

I.2.3.2. Classification tinctoriale

Cette classification s'appuie sur la solubilité des colorants, leur affinité pour les fibres et leur mode de fixation.

- ***Colorants basiques (cationiques)***

Sels d'amines organiques, solubles dans l'eau. Ils interagissent avec les sites acides (anioniques) des fibres, comme les acryliques. Ils appartiennent aux familles triphénylméthane, anthraquinonique ou azoïque.

- ***Colorants acides (anioniques)***

Solubles dans l'eau grâce aux groupes sulfonates ou carboxylates. Ils sont efficaces pour teindre laine, soie et polyamides à haute température. Principalement issus des familles azoïques et anthraquinoniques.

I.2.4.Différence entre pigment et colorant

Les pigments et les colorants sont tous deux des substances colorantes, mais ils diffèrent par leur comportement physico-chimique. Un pigment est une substance colorante insoluble dans le milieu qu'elle colore. Pour qu'il puisse être appliqué de manière efficace, il doit être mélangé à un liant, tel que de l'huile ou une résine, afin d'assurer son adhérence et sa durabilité sur le support. À l'inverse, un colorant est une substance soluble dans son milieu d'application. Par exemple, un colorant hydrosoluble se dissoudra dans l'eau sans nécessiter d'ajout de substance tierce[20].

I.2.5.Familles de colorants

I.2.5.1.Les colorants naturels

Les colorants naturels sont les premiers utilisés par l'humanité, dès l'Antiquité. Ils sont généralement extraits de sources végétales (garance, pastel, noyer, lichens), animales (murex, cochenille), minérales (lapis-lazuli, turquoise) ou encore de fruits (mûres). L'un des plus anciens colorants utilisés est l'indigo, extrait de la plante *Indigofera tinctoria*, également connue sous le nom d'indigo des Indes. Ces substances étaient employées pour la teinture des textiles, la fabrication de manuscrits enluminés ou encore pour des œuvres d'art datant de plus de 4000 ans.

I.2.5.2.Les colorants synthétiques

L'apparition des colorants synthétiques date de quelques siècles, parallèlement à l'essor de la chimie moderne. Ils constituent aujourd'hui un marché très développé, en raison de leur faible coût, de leur grande variété de teintes et de leur stabilité. En France, Michel-Eugène Chevreul (1786–1889) a été l'un des premiers à isoler et identifier les principes actifs colorants dans les plantes tinctoriales, ce qui a permis de poser les bases de la synthèse industrielle.

La première grande avancée est attribuée à William Henry Perkin (1838–1907), chimiste britannique qui découvre en 1856 la mauvéine**,** premier colorant synthétique. Il est suivi en 1858 par le chimiste français François Emmanuel Verguin (1814–1864), inventeur de la fuchsine. Enfin, le bleu de méthylène est synthétisé pour la première fois par Heinrich Caro en 1876. Ces découvertes se sont multipliées rapidement, offrant une palette de nuances inégalée. Grâce à leur adaptabilité aux fibres textiles, leur résistance à la lumière et aux lavages, les colorants synthétiques ont progressivement supplanté les colorants naturels [20].

I.2.6.Utilisations des colorants :

Les colorants présentent de nombreuses applications dans différents domaines, dont voici quelques -unes essentielles :

Pigments (industrie des matières plastiques).

Encre, papier (imprimerie).

Colorants alimentaires (industrie agro-alimentaire).

Pigments des peintures, matériaux de construction, céramiques (industrie du bâtiment).

Colorants capillaires (industrie des cosmétiques).

Colorants et conservateurs (industrie pharmaceutique).

Carburants et huiles (industrie automobile etc....).

Colorants textiles à usage vestimentaire, de décoration, du bâtiment, du transport,

Colorants textiles à usage médical etc[21].

I.2.7.Toxicité des colorants alimentaires

La toxicité des colorants alimentaires est principalement attribuée à la présence de certains composés chimiques tels que les groupements phtalogènes, les cyanures, ainsi que des sels de baryum et de plomb dans leur structure moléculaire. Ces composants, notamment lorsqu'ils prennent la forme de groupements électrophiles ou radicalaires, peuvent s'attaquer aux bases puriques et pyrimidiques de l'ADN, entraînant des altérations du code génétique, des mutations et un risque accru de cancer.

Les risques associés sont souvent chroniques, en particulier pour les substances ayant une tendance à s'accumuler dans l'organisme. Cette toxicité, se manifestant à moyen ou long terme, peut provoquer divers effets physiopathologiques[22].

I.2.7.1.Toxicité aiguë :

La toxicité aiguë se définit comme l'évaluation qualitative et quantitative des dommages irréversibles aux fonctions vitales après l'administration unique d'une substance. Pour estimer la toxicité potentielle des colorants alimentaires chez l'être humain, des études sont réalisées sur des animaux de laboratoire. L'un des indicateurs utilisés est la dose létale 50 (DL50), correspondant à la dose unique entraînant la mort de 50 % des animaux testés dans un délai de 14 jours. Elle s'exprime en milligrammes de substance par kilogramme de masse corporelle. Cette mesure varie selon l'espèce, mais les rats sont couramment utilisés pour ces tests. Plus la DL50 est basse, plus le colorant est considéré comme toxique. À titre d'exemple, la Tartrazine a une DL50 de 12 750 mg/kg chez la souris, tandis que la Riboflavine présente une DL50 supérieure à 10 000 mg/kg chez le rat [22].

I.2.7.2.Toxicité chronique

La toxicité chronique se manifeste à court terme (90 jours) ou à long terme (de 18 mois à 2 ans), révélant des altérations fonctionnelles ou anatomiques résultant de l'administration répétée d'un colorant sur une période prolongée, parfois durant toute la vie

de l'animal. Cette forme de toxicité concerne notamment les effets sur la reproduction, la mutagénèse, la cancérogénèse, la sensibilisation et l'affaiblissement du système immunitaire. Il est essentiel de recueillir toutes les données disponibles concernant les réactions d'allergie ou d'intolérance chez l'homme, notamment dans le cadre professionnel[23].

I.2.8.Couleurs dans les environnements aquatiques

Les effluents colorés, les eaux usées ayant subi une forme de traitement, sont une source majeure de pollution dans les écosystèmes aquatiques. Ils provoquent une augmentation de la demande biologique en oxygène (DBO) et de la demande chimique en oxygène (DCO), entraînant une diminution du contenu en oxygène dissous et affectant les processus photosynthétiques dans un écosystème[24]. Certains colorants présentent également un certain degré de toxicité directe, causant la destruction non seulement de la faune mais aussi de la flore des communautés aquatiques. Par exemple, une concentration de fuchsine supérieure à 1 $\mu g \cdot L^{-1}$ est suffisante pour inhiber l'activité vitale des algues.

I.2.8.1.Impacts immédiats sur l'environnement aquatique

- **Couleur, turbidité et odeur de l'eau :**

L'accumulation de matières organiques dans un écosystème aquatique conduit à la formation de goûts désagréables, de proliférations bactériennes, d'odeurs de putréfaction et de décoloration non naturelle. Les colorants synthétiques sont visibles même à des concentrations inférieures à 1 $mg \cdot L^{-1}$, ce qui, à son tour, détériore l'aspect sensoriel et esthétique de l'environnement[25].

- **Eutrophisation :**

L'ennoblissement textile améliore l'apparence et la durabilité des tissus par des traitements comme la teinture et l'impression. Cependant, une partie des colorants utilisés ne se fixe pas complètement, se retrouvant dans les eaux usées industrielles. Ces colorants, notamment les azoïques, sont souvent résistants à la dégradation naturelle, ce qui les rend persistants dans l'environnement.

Lorsqu'ils sont rejetés dans les milieux aquatiques, ils peuvent réduire la pénétration de la lumière, perturbant ainsi la photosynthèse des plantes aquatiques. Cela entraîne une diminution de l'oxygène dissous, affectant la faune aquatique et perturbant l'équilibre des écosystèmes. De plus, certains colorants et leurs produits de dégradation peuvent être toxiques, mutagènes ou cancérigènes, représentant un risque pour la santé humaine et

animale. Pour remédier à ces problèmes, des méthodes de traitement des eaux usées textiles, telles que la bioremédiation utilisant des micro-organismes comme des bactéries et des algues, ont montré un potentiel prometteur. Ces micro-organismes peuvent dégrader ou décolorer les colorants présents dans les eaux usées, offrant ainsi une alternative plus écologique et économique aux méthodes chimiques traditionnelles [26].

- **Sous-oxygénation :**

L'inhibition provient, par la forte activité anarchique de microorganismes lors d'oxygène dans un milieu, jusqu'à l'hypoxie. Tout de même, une grande portion de dioxygène est consumée, souvent 7 à 8 $mg.L^{-1}$ de dioxygène à la dégradation de l'organisme dans ce milieu. Cela dit, pour ces équations basses dépend d'oxygène, il s'agit d'un relâchement de stagnation de l'hypoxie et résistance de la régulation naturelle systémique.

I.2.8.2.Impacts D'une Pollution À Long Terme

- **Accumulation des Polluants Biologiques**

Les bivalves et les poissons sont de bons bio-indicateurs de pollution en raison de leur capacité à accumuler les polluants présents dans leur milieu. Ainés ont dit que cet emmagasinement est extrêmement inquiétant en ce qui concerne les organismes situés au-dessus de la chaîne alimentaire, de la part l'humain, qui sont capables d'être exposés à des concentrations de substances toxiques jusqu'à mille fois plus dépend à être dans l'eau[27].

- **Persistance des Colorants :**

Les azobases sont un des exemples de colorants synthétiques dont leur biodégradation est dosée. Ce dernier feu a duré sempiternellement, que, il est de savoir que les synthétiques sont très réactifs. Parmi de noter, ces colorants possèdent aussi des facteurs qui acceptent l'ordre de soluble Parmi les facteurs influençant leur stabilité :

- Les composés insaturés sont moins persistants que les composés saturés ;
- Les alcanes sont moins persistants que les composés aromatiques ;
- La persistance augmente proportionnellement au nombre de substituants ;

La présence de groupements halogénés, en particulier alkyles, accroît significativement la persistance des colorants**.**

- **La formation de sous-produits de chlorination**

Les trihalométhanes (THM) et leurs sous-produits de dégradation (GDP), qui se forment lors du traitement de désinfection de l'eau, peuvent atteindre des concentrations de plusieurs centaines de µg/L. Ces composés sont de puissants agents cancérogènes reconnus et sont associés aux carcinomes du foie, des poumons, des reins et de la peau chez les humains [28].

II. Chapitre II : Adsorption et électrocoagulation

II.1.Introduction

La conservation des ressources en eau est un défies de l'environnement face à l'intensification des pollutions d'origine anthropique dont se sont la pollution organique provenant de non professionnelles, agricoles, avec la mise en contenance des biocides. Ces polluants organiques, complexes voire persistants, nécessitent des méthodes à la source, qui passent le plus souvent à des traitements par procédé physiques, chimiques et biologiques habituels [29].

Cependant l'industrialisation moderne se caractérise aussi par la synthèse et utilisation en masse de composés, organiques nouveaux comme les médicaments, résidus pesticides et perturbateurs hormonaux très toxiques lors de doses très faibles [29]. Ces micropolluants constituent un véritable défi pour toutes les filières de traitements conventionnels trop souvent insuffisants pour mettre fin à ces micropolluants.

Ces conducteurs sont très prometteurs dans ce contexte dans des procédés électrochimique tels que l'électrocoagulation, Le but de ces techniques est de produire de nouveaux in situ de réactifs oxydants très puissants tels que les hydroxyles de radicaux sur une gamme large de polluants organiques résistants[30]. Gardez une bonne efficacité, leur modularité et leur capacité d'intégration dans des combinaisons hybrides de système, la plante est de nouvelles solutions pour la dépollution des eaux résiduaires.

II.2.Adsorption

L'adsorption désigne le processus par lequel des molécules en phase liquide ou gazeuse (adsorbât) s'accumulent à la surface d'un matériau solide (adsorbant), formant ainsi une interface. Ce phénomène peut être de nature physique (physisorption) ou chimique (chimisorption), selon les types d'interactions mises en jeu [31].

À l'échelle microscopique, l'adsorption résulte de forces non compensées à la surface du solide, telles que les forces de Van der Waals, les interactions ioniques ou la formation de liaisons chimiques. Ces forces sont responsables de l'adhésion des molécules du soluté à la surface de l'adsorbant.

II.2.1.Adsorption Chimique (Chimisorption)

La chimisorption implique la formation de liaisons chimiques covalentes ou ioniques entre l'adsorbât et l'adsorbant. Ce type d'adsorption est généralement irréversible et se limite

à une monocouche moléculaire. Elle se caractérise par une chaleur d'adsorption élevée, typiquement comprise entre 20 et 200 kcal/mol[32].

II.2.2.Adsorption Physique (Physisorption)

La physisorption, en revanche, repose sur des interactions faibles (forces de Van der Waals, liaisons hydrogène, interactions dipolaires). Elle est réversible, rapide, et permet l'adsorption en multicouches. La chaleur d'adsorption y est inférieure à 20 kcal/mol[33].

II.2.3.Mécanisme de l'Adsorption

Le processus d'adsorption suit généralement quatre étapes :

1. Diffusion du soluté depuis la phase liquide vers la surface externe de l'adsorbant.
2. Diffusion extragranulaire, ou transfert à travers le film liquide entourant les grains.
3. Diffusion intragranulaire, ou migration du soluté à travers les pores du solide.
4. Fixation sur les sites actifs à la surface interne, menant à l'immobilisation des molécules.

II.2.4.Isothermes d'Adsorption

Les isothermes d'adsorption décrivent la relation, à température constante, entre la quantité de soluté adsorbée et sa concentration en solution à l'équilibre.

Il y a quatre types des isothermes : L, S, H, et C[34].

- **Type L (Langmuir-like)**

Caractérisé par une concavité vers le bas à faible concentration. Il reflète une forte affinité initiale entre le soluté et l'adsorbant, avec réduction des sites disponibles au fur et à mesure [34].

- **Type S (Sigmoïde)**

Affiche une concavité vers le haut. Indique une adsorption coopérative : l'adsorption d'une molécule facilite celle des suivantes via des interactions attractives[35]

- **Type H (Haute Affinité)**

Caractérisé par une forte adsorption à très faible concentration. Ce comportement est typique de systèmes avec fortes interactions adsorbât-adsorbant, comme dans les cas de polymères ou micelles.

➢ **Type C (Constante de Partition)**

Représente une isotherme linéaire, indiquant que le nombre de sites actifs reste constant ou que des sites nouveaux sont créés durant l'adsorption[36].

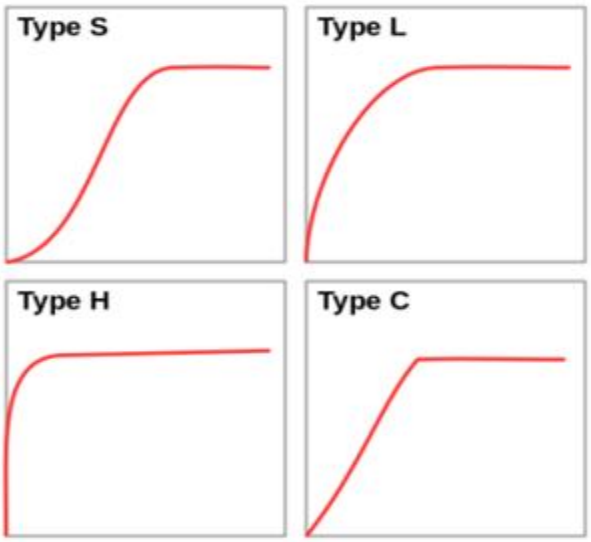


Figure 9 . Courbes des isothermes d'adsorption

II.2.5. Modèles d'Isothermes

II .2.5.1.Modèle de Langmuir

Le modèle d'isotherme de Langmuir repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices :

- Sites d'adsorption homogènes : Tous les sites d'adsorption sont identiques, ce qui signifie qu'ils ont la même capacité à adsorber des molécules.
- Formation d'une couche monomoléculaire: L'adsorption se fait sous la forme d'une couche unique de molécules adsorbées sur la surface.
- Absence d'interactions entre molécules adsorbées: Il n'y a pas d'interactions entre les molécules adsorbées, ce qui simplifie l'analyse du processus [37].

Équation de l'isotherme

L'isotherme de Langmuir peut être exprimée de manière linéaire sous la forme :

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_m} + \frac{1}{K.Q_m} \times \frac{1}{C_e} \qquad \textit{(Eq.II.1)}$$

Où :

Q est la quantité de soluté adsorbée par unité de masse de l'adsorbant.

$\mathbf{C_e}$ est la concentration d'adsorbât à l'équilibre.

$\mathbf{Q_m}$ Représente la capacité maximale d'adsorption, c'est-à-dire la quantité de soluté que l'adsorbant peut fixer lorsque tous les sites sont occupés.

$\boldsymbol{K}$ est la constante de Langmuir, qui mesure l'affinité de l'adsorption entre le soluté et l'adsorbant.

En traçant $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Q}}$ en fonction de $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{C_e}}$, on obtient une droite dont la pente est égale à $\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{K}.\boldsymbol{Q_m}}$ et l'ordonnée à l'origine à $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{Q_m}}$. Ce graphique permet de déterminer les paramètres $\mathbf{Q_m}$ et $\boldsymbol{K}$.

II.2.5.2.Isotherme de Freundlich

L'isotherme de Freundlich est un modèle empirique qui ne repose sur aucune hypothèse théorique spécifique, mais qui a montré une bonne adéquation avec les résultats expérimentaux d'adsorption, notamment pour des substances adsorbées sur des matériaux tels que les charbons actifs, les sols ou les argiles [37].

L'équation de Freundlich s'écrit ainsi :

$$\boldsymbol{Q = K_f . C_e^{1/n_f}} \qquad (\boldsymbol{Eq.II.2})$$

Où :

* $\boldsymbol{Q}$ est la quantité de soluté adsorbée par unité de masse de l'adsorbant.

*$\boldsymbol{C_e}$ est la concentration du soluté à l'équilibre.

* $\boldsymbol{K_f}$ et $\boldsymbol{n_f}$ sont des constantes caractéristiques de l'adsorbat et de l'adsorbant, respectivement. $\boldsymbol{K_f}$est lié à l'efficacité de l'adsorbant, et $\boldsymbol{n_f}$indique l'hétérogénéité de la surface d'adsorption.

Transformée linéaire Pour analyser la validité de l'isotherme de Freundlich, on peut prendre le logarithme des deux côtés de l'équation, ce qui donne :

$$\mathbf{\ln Q = \ln K_f + \frac{1}{n_f} \ln C_e} \qquad (\boldsymbol{Eq.II.3})$$

Un tracé de $\mathbf{\ln Q}$ en fonction de $\boldsymbol{ln\, C_e}$ donne une droite dont la pente est $\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{n_f}}$ et l'ordonnée à l'origine est $\mathbf{\ln} \boldsymbol{K_f}$.

II.2.5.3.Comparaison des modèles :

- **Isotherme de Langmuir:**

Elle est appropriée pour des systèmes où les sites d'adsorption sont homogènes et où l'adsorption forme une couche monomoléculaire. Le modèle est particulièrement utile lorsque l'adsorption atteint un maximum, c'est-à-dire lorsque tous les sites sont saturés.

Idéal pour des systèmes où l'adsorption suit un modèle de saturation, comme dans la purification de l'air ou de l'eau, ou pour l'adsorption sélective de molécules spécifiques.

- **Isotherme de Freundlich :**

Ce modèle est plus flexible et est adapté pour décrire des surfaces d'adsorption hétérogènes. Il est souvent utilisé pour des situations où l'adsorption n'atteint pas un maximum clair et peut être non linéaire.

Utilisé dans des cas où la surface d'adsorption est hétérogène, par exemple pour les charbons actifs, les sols ou les argiles.

Les deux modèles sont largement appliqués dans les domaines de l'environnement, de l'industrie chimique et dans la recherche en matériaux pour concevoir des systèmes efficaces d'adsorption[38].

II.3.Généralité sur le charbon actif

II.3.1.Définitions :

Depuis plusieurs siècles, les argiles et les terres décolorantes ont été les premiers matériaux utilisés comme adsorbants. Cependant, c'est à la fin du XIXe siècle que le charbon actif a commencé à être développé. En 1945, ses propriétés exceptionnelles d'adsorption ont été pleinement reconnues. Le charbon actif est un matériau carboné, extrêmement poreux, avec une surface spécifique très élevée, ce qui lui confère de remarquables capacités d'adsorption. Il se distingue du carbone élémentaire par l'élimination de ses impuretés non carbonées et l'oxydation de sa surface[39]. Ce matériau est un solide noir, sans goût ni odeur.

Les charbons actifs sont des adsorbants polyvalents, utilisés dans de nombreuses applications, notamment dans le traitement des eaux et des eaux usées. Ils permettent de purifier l'eau en éliminant les goûts et les odeurs indésirables. Leur capacité d'adsorption leur permet de supprimer une large gamme de contaminants [40]premières variées et peu coûteuses, ce qui en fait une solution à la fois efficace et économique.

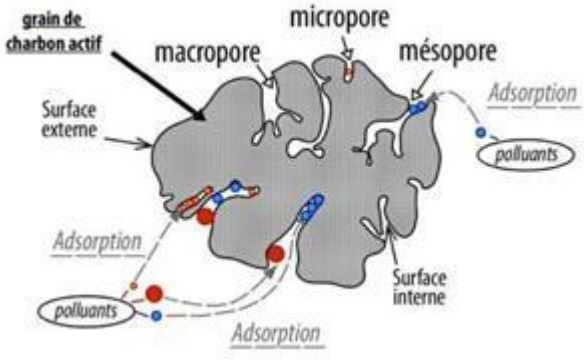


Figure 10 .Représentation schématique de la forme microscopique du charbon actif[40]

Tableau 2 . Caractéristique du charbon actif [41]

Caractéristique	Description
Diamètre Effectif	Poudre : 8-9µm : granules: 0,55-1,05mm. Augmentation du taux d'adsorption et des pertes de charge lorsque la grosseur des grains diminue.
Surface d'adsorption.	De 850 à 1500 m2/g. Plus cette surface est grande plus le charbon activé est efficace
Nombre de mélasse.	Il est associé à la capacité du charbon active d'absorber les impuretés de masses moléculaires élevées
Densité brute.	Evolution du volume de charbon active utilisé

La structure du charbon actif est similaire à celle du graphite. En effet, le graphite possède une structure cristalline formée de couches planes d'atomes de carbone organisés en réseaux hexagonaux réguliers, semblables aux cycles aromatiques[42]. Ces couches confèrent au charbon actif une structure graphitique partiellement désordonnée.

La texture du charbon actif est définie principalement par deux paramètres essentiels :

- L'aire spécifique (exprimée en m²/g), qui représente la surface totale disponible pour l'adsorption.
- La porosité, qui désigne la distribution et le volume des pores présents dans le matériau.

Ces deux caractéristiques influencent directement les capacités d'adsorption ainsi que les cinétiques d'adsorption, c'est-à-dire la vitesse à laquelle les molécules sont captées par le charbon actif.

Selon la taille des pores, on distingue trois catégories :

- **Micropores** : diamètre inférieur à 2 nanomètres (nm)
- **Mésopores** : diamètre compris entre 2 nm et 50 nm
- **Macropores** : diamètre supérieur à 50 nm

II.3.2.Procédé de fabrication du charbon actif :

II.3.2.1.Carbonisation

La carbonisation, ou pyrolyse, correspond à la décomposition thermique d'un matériau organique en l'absence d'oxygène, généralement sous atmosphère inerte (souvent de l'azote), à des températures comprises entre 400 et 1000 °C. Ce traitement thermique entraîne l'élimination des hétéroatomes tels que l'oxygène et l'hydrogène, rendant le matériau plus riche en carbone[42].

Au cours de ce processus, les atomes de carbone s'organisent en feuillets aromatiques à structure planaire. Ces feuillets s'empilent de manière désordonnée, formant des interstices à l'origine d'une première porosité, dite primaire.

Plusieurs paramètres influencent la qualité, les propriétés et le rendement du produit carbonisé :

* la vitesse de montée en température du four,

* la température finale de pyrolyse,

* le temps de séjour dans le four,

* la nature du matériau de départ.

En l'état, le charbon obtenu par simple carbonisation présente une porosité limitée, insuffisante pour des applications d'adsorption. Il nécessite donc une étape complémentaire d'activation pour en améliorer la surface spécifique.

II.3.2.2.Activation

L'activation vise à développer la structure poreuse du matériau carbonisé en éliminant les goudrons résiduels qui obstruent les pores, et en créant des groupes fonctionnels à la surface (généralement oxydés), permettant l'interaction avec les molécules à adsorber.

Il existe deux types d'activation :

- **Activation physique :**

Réalisée entre 800 et 1000 °C, en présence de gaz oxydants légers comme la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2), l'air ou un mélange de ces gaz. Ce procédé permet de développer les pores existants et d'en créer de nouveaux[43].

- **Activation chimique :**

Souvent appliquée à des matières premières comme le bois. Elle consiste à imprégner le matériau avec une solution concentrée d'un agent oxydant ou déshydratant (par exemple : acide phosphorique ou chlorure de zinc), suivie d'une pyrolyse entre 400 et 800 °C, à l'abri de l'air. Après cette étape, le matériau est lavé pour éliminer les résidus chimiques, puis séché. Ce procédé permet d'obtenir du charbon actif en une seule opération[44]**.**

La structure poreuse finale dépend du degré d'imprégnation et des conditions du traitement. L'activation confère au charbon actif une porosité polydisperse, c'est-à-dire composée de pores de formes et tailles variées. La distribution de cette porosité est influencée tant par la nature du matériau d'origine que par les paramètres du procédé d'activation. Ainsi, les propriétés physico-chimiques du charbon actif peuvent fortement varier, même à partir d'un même précurseur[44].

II.4. L'électrocoagulation

II.4.1.Historique du procédé

L'électrocoagulation (EC) est un procédé de traitement des eaux qui combine les mécanismes de coagulation chimique avec les principes de l'électrochimie. Il repose sur une série d'interactions physico-chimiques complexes visant à éliminer les polluants présents dans un effluent liquide. Ce procédé implique l'utilisation d'électrodes (anode et cathode) immergées dans le milieu aqueux, qui, sous l'effet d'un courant électrique, favorisent la formation de coagulants in situ.

L'utilisation de l'électrocoagulation dans le traitement des eaux remonte à la fin du XIXe siècle. Le premier brevet connu a été déposé en Angleterre en 1906 par Elmore, bien que des expérimentations aient déjà été menées dès 1889. En 1909, Harries améliore le procédé en introduisant des électrodes constituées de plaques de fer et d'aluminium. Dès 1912, les premières installations industrielles exploitant cette technologie sont construites aux États-Unis pour le traitement des eaux usées[45].

II.4.2.Principe de fonctionnement

La coagulation est un phénomène physico-chimique impliquant l'agrégation des particules colloïdales présentes en suspension dans l'eau. Elle est généralement déclenchée par la réduction des forces de répulsion électrostatique entre particules ou par la formation de ponts entre celles-ci, ce qui favorise la formation de flocs. Dans le cas de l'électrocoagulation, ces flocs sont générés sans ajout de réactifs chimiques, par dissolution anodique de matériaux métalliques sous l'effet d'un courant électrique.

Ce courant provoque la libération de cations métalliques (Fe^{2+} , Al^{3+} , etc.) issus des électrodes sacrificielles. Ces ions réagissent ensuite avec les espèces polluantes, entraînant leur coagulation et précipitation sous forme de boues, qui peuvent être séparées par des méthodes physiques classiques telles que la décantation ou la flottation[46].

Ce procédé est généralement mis en œuvre dans des réacteurs discontinus (batch mode), permettant un contrôle précis des paramètres opératoires tels que le pH, la densité de courant, et la durée du traitement.

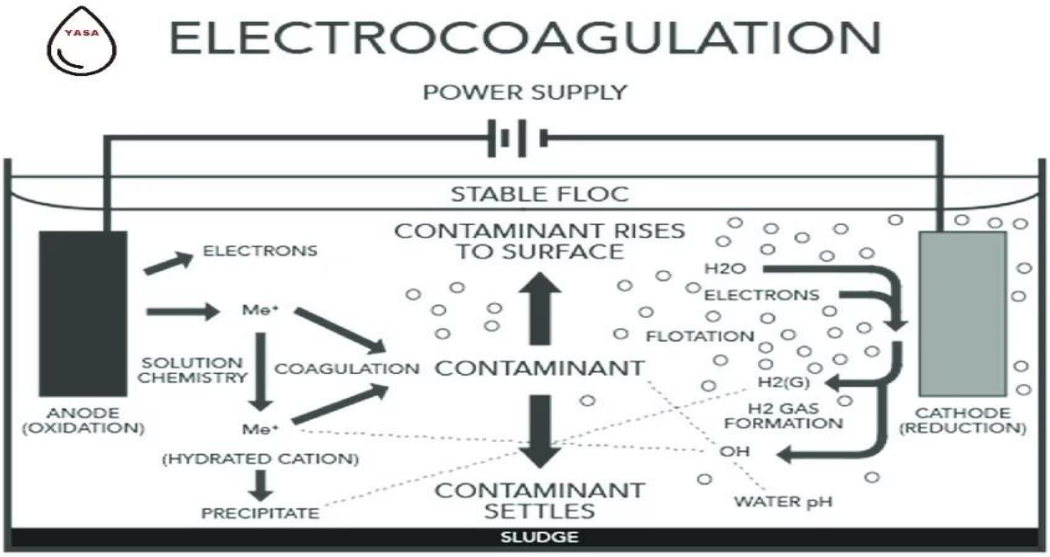


Figure 11 : Représentation Schématique de l'électrocoagulation[47]

II.4.3.Mécanisme de l'électrocoagulation et réactions aux électrodes

L'électrocoagulation repose sur trois étapes principales qui se déroulent successivement dans le réacteur[48] :

1. Production des coagulants : Cette étape correspond à la dissolution électrolytique de l'anode sacrificielle sous l'effet du courant électrique, générant des cations métalliques (Al^{3+} dans notre cas).
2. Déstabilisation des polluants : Les espèces colloïdales, les particules en suspension et les émulsions sont déstabilisées par interaction avec les cations métalliques, rompant ainsi la double couche électrique qui les entoure.
3. Formation et agrégation des flocs : Les phases déstabilisées s'agrègent pour former des flocs, lesquels facilitent la séparation physique des polluants sous forme de boues.

Le mécanisme de déstabilisation peut être synthétisé comme suit :

- Les ions métalliques libérés par l'anode renforcent les interactions électrostatiques et modifient la structure de la double couche entourant les particules chargées, favorisant leur neutralisation.
- Les cations générés (Al^{3+}) neutralisent les charges négatives portées par les contaminants dissous ou colloïdaux, entraînant ainsi une perte de stabilité des particules.
- La coagulation qui en résulte conduit à la formation de flocs volumineux capables d'adsorber et de piéger les particules restantes, formant ainsi des boues décantables[49].

Les électrodes en aluminium ont été sélectionnées en raison de leur efficacité démontrée dans de nombreux systèmes de traitement. Les électrodes sont immergées dans le réacteur, et l'application d'un courant électrique déclenche les réactions électrochimiques suivantes :

À la cathode (réduction) :

Réduction de l'eau : $$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2\,(g) + 2OH^-$$ **(II.1)**

Réduction de l'oxygène : $$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$$ **(II.2)**

Les cations ainsi formés réagissent ensuite avec les anions présents dans le milieu pour générer des hydroxydes d'aluminium, principalement sous forme de polymères amorphes, qui jouent un rôle crucial dans l'agrégation des polluants.

A l'anode :

- Oxydation du métal : $$Al \longrightarrow Al^{3+} + 3e^- \quad \textbf{(II.3)}$$

- Formation d'hydrogène : $$2Al + 3OH^- \longrightarrow Al_2O_3 + \frac{3}{2}H_2 + 3e^- \quad \textbf{(II.4)}$$

$$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2 \quad \textbf{(II.5)}$$

II.4.4.Formation des complexes d'aluminium et configuration des électrodes

Au cours du processus d'électrocoagulation, les cations métalliques libérés par l'anode sacrificielle réagissent avec les ions hydroxydes présents dans le milieu aqueux pour former une variété de complexes. Dans le cas de l'aluminium, la nature des espèces formées dépend fortement du pH du milieu. En milieu aqueux, plusieurs types de complexes peuvent se former :

- Mono-complexes : tels que $Al(OH)^{2+}$, $Al(OH)_2^{+}$ et $Al(OH)_4^{-}$
- Poly-complexes : tels que $Al_2(OH)_2^{4+}$, $Al_2(OH)_5^{+}$, $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, et le complexe très actif $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$
- Espèces amorphes faiblement solubles : notamment $Al(OH)_3$ et Al_2O_3

Ces complexes, une fois formés dans le réacteur, jouent un rôle essentiel en tant que coagulants. Leur structure chimique leur permet de piéger efficacement les particules colloïdales en suspension, formant ainsi des flocs denses et précipitables. Ces flocs peuvent ensuite être éliminés par des procédés physiques classiques (décantation, filtration ou flottation)[50].

Par ailleurs, au voisinage de la cathode, la réduction de l'eau génère du gaz hydrogène selon la réaction suivante :

$$2H_2O + 2e^- \longrightarrow H_2 + 2OH^- \quad \textbf{(II.6)}$$

Les bulles d'hydrogène formées, dont le diamètre est compris entre 10 et 100 µm, assurent un brassage dynamique de la solution. Dans certaines configurations, ces bulles

s'adsorbent aux flocs formés, améliorant leur ascension par flottation – un effet recherché dans les dispositifs combinant électrocoagulation et flottation électrolytique[51].

II.4.4.1.Configuration des électrodes

La géométrie et l'agencement des électrodes dans un système d'électrocoagulation dépendent de plusieurs paramètres, notamment la nature de l'effluent à traiter, les caractéristiques hydrodynamiques du réacteur, et les considérations économiques. Les électrodes peuvent être de formes variées : plates, cylindriques, en lit fluidisé ou en métal déployé, les électrodes plates étant les plus couramment utilisées en raison de leur simplicité de conception et de maintenance.

Le nombre d'électrodes peut également varier considérablement selon les études et les applications : certains dispositifs expérimentaux utilisent une seule paire d'électrodes, tandis que d'autres systèmes industriels peuvent intégrer jusqu'à huit électrodes.

Deux types de configurations électriques principales sont généralement adoptés pour les électrodes plates[52] :

- **Configuration monopolaire** : chaque électrode est reliée individuellement au générateur de courant, en alternant les anodes et les cathodes. Cela permet un contrôle direct du potentiel appliqué sur chaque électrode.
- **Configuration bipolaire** : seules les électrodes situées aux extrémités du réacteur sont connectées au générateur. Les électrodes intermédiaires, non connectées électriquement, jouent un double rôle en fonction du champ électrique induit dans la solution électrolytique. Elles se comportent alors simultanément comme anode et cathode.

Dans les deux cas, un espacement constant entre les électrodes est maintenu pour assurer une répartition homogène du courant et une efficacité de traitement optimale.

II.4.5.Facteurs influençant l'électrocoagulation :

II.4.5.1.La densité du courant

La densité de courant est jugée comme un paramètre essentiel en électrocoagulation , puisqu'elle permet d'une part, de contrôler la cinétique de dissolution des électrodes anodiques et, d'autre part, de contrôler le dégagement des bulles d'hydrogène sur les électrodes cathodiques. Lorsque la densité de courant augmente, le temps de traitement diminue en raison de la forte dissolution des électrodes. Il en résulte donc davantage de déstabilisation des particules du polluant ; par ailleurs le taux de production des bulles

d'hydrogène augmente et leur taille diminue lorsque la densité de courant augmente[53]. Tous ces effets sont bénéfiques pour une élimination efficace du polluant par flottation.

De plus, quand le courant utilisé est trop élevé, il y a des risques de perdre une grande partie de l'énergie en chaleur dans le système. Il est donc primordial de faire un compromis entre la dépense énergétique la plus efficace et les couts d'opération les plus bas. En effet, une trop grande densité de courant provoque habituellement la coalescence des bulles de gaz, ce qui réduit l'efficacité de l'électrocoagulation.

II.4.5.2.La conductivité de l'effluent

Un des principaux facteurs influençant le traitement d'une solution par la technique d'électrocoagulation est la conductivité de la solution elle-même. Cette dernière traduit la qualité du transfert ionique dans l'effluent. Si la conductivité du milieu est faible, l'ajout d'un électrolyte est nécessaire pour réduire la tension entre les électrodes à une densité de courant constante, en raison de la diminution de la résistance dans l'effluent.

Une tension élevée implique une grande consommation énergétique, ce qui n'est pas intéressant sur le plan technico économique[54]. Le chlorure de sodium NaCl, sel, largement utilisé dans l'électrocoagulation, permet d'une part d'augmenter la conductivité du milieu, et empêche suite à la présence des ions chlorures la déposition des ions carbonates et sulfates sur les électrodes. Ces composés entrainent la formation d'un film passif qui diminue d'une manière significative le rendement du courant**]**.

Il est à noter qu'un excès de NaCl peut provoquer une consommation excessive des électrodes anodiques et une dissolution irrégulière de celles-ci.

II .4.5.3.Le pH de l'effluent

Le pH est un paramètre essentiel à prendre en compte puisque il permet de contrôler la performance de l'électrocoagulation[55].

Chen (2004) a rapporté que le pH de l'effluent traité par EC augmenterait si l'effluent est acide, et diminuerait s'il est alcalin. Il attribue ce phénomène à plusieurs réactions ayant lieu dans le milieu. La hausse du pH des solutions initialement acides est due à la formation d'ions hydroxydes (OH-) lors de la réduction de l'eau à la cathode. Cette hausse de pH permet la précipitation des hydroxydes métalliques la diminution de pH de l'effluent est régie par deux processus :

Production de protons H+ lors de la formation des hydroxydes métalliques (Al(OH)3 ou Fe(OH)2) ;

- Oxydation de l'eau

Dans le but d'obtenir un bon rendement épuratoire, il est préconisé de travailler à une marge de pH située entre 5,8 et 7,4. Cet intervalle de pH permet la formation optimale d'hydroxydes métalliques d'aluminium solides. Dans le cas des hydroxydes de fer, il est préférable de travailler à des pH supérieurs à 5,5 [55].

II.4.5.4.Autres facteurs influençant l'électrocoagulation

L'un des facteurs influençant sur la qualité de l'eau à traiter est la distance entre électrodes. Ce paramètre intervient pratiquement dans tous les procédés électrochimiques.

Dans le cas où la distance inter électrode est petite, le traitement par EC serait difficile (probablement par des courts circuits) ainsi que lors de l'entretien du système. Dans le cas où la distance inter électrode est grande, la résistance ohmique serait très grande ; ce qui est par conséquent n'est pas intéressant lors de la mise à l'échelle industrielle. D'une manière générale, la distance inter électrode peut varier selon la conductivité de l'eau à traiter et également la concentration initiale en polluant.

La température élevée ou basse affecte sensiblement la performance du procédé de l'électrocoagulation. Il serait donc, préférable de travailler à une température ambiante[56].

III. Chapitre III : Matériels et Méthodes, Résultats et discussions

III.1. Matériels et Méthodes

III.1.1. Données sur le colorant utilisé (Tartrazine)

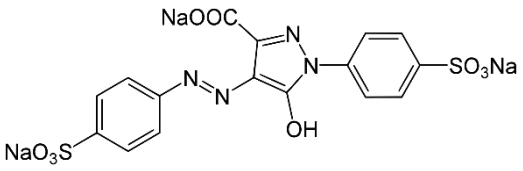
Ce colorant fait partie des colorants synthétiques monoazoïques. C'est le sel trisodique de 4,5-dihydro-5-oxo-1-(4-sulfophenyl)-4-[4-sulfophényl-azo]-1H-pyrazole-3-acide carboxylique. Sa formule chimique est : $C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$ et son poids moléculaire (PM) = 534,37 g/mole. il se présente sous forme de poudre jaune orange inodore.

La tartrazine est connue également sous différents noms suivant son emploi :

- E 102, Food yellow 4 : usage alimentaire
- FD&C N°5 : usage alimentaire, médicamenteux et cosmétique
- C.I. ACID YELLOW 23, CI 19140 : usage cosmétique.

Le pH de la tartrazine est acide. Elle est bien soluble dans l'eau, peu soluble dans l'éthanol, absorbe l'humidité de l'air et est incompatible avec les agents oxydants forts, les agents réducteurs forts ainsi que les acides forts. Elle devient rouge en milieu alcalin[57].

Tableau 3 . Quelques données sur le colorant étudié (Tartrazine).

Tartrazine	
Nom UICPA	(4E)-5-oxo-1-(4-sulfonatophényl)-4-[(4-sulfonatophényl)hydrazono]-3-pyrazolecarboxylate de sodium
Apparence	Poudre orange à jaune de couleur
Formule brute	$C_{16}H_9N_4Na_3O_9S_2$
Masse molaire	534,363 ± 0,027 g/mol
T° fusion	350 °C
T° ébullition	870 °C
Solubilité	38 g/L (eau, 2 °C) ; 200 g/L (eau, 25 °C) ; 200 g/L (eau, 60 °C)

Tous les colorants, particulièrement les colorants monoazoïques, changent de couleur en milieu alcalin ou acide en présence de métaux tels que le zinc, l'étain, le fer et le cuivre à haute température, en raison de l'effet réducteur de l'hydrogène libéré. La photo dégradation de la tartrazine par rayonnement ultraviolet produit des composés aromatiques de faible poids moléculaire, plusieurs acides organiques et des ions inorganiques[58].

III.1.2. Préparation des solutions et analyses du colorant

Un colorant alimentaire commercial, codé "E102", a été utilisé dans cette étude. Il est de couleur jaune ou orange et est destiné à la coloration de produits alimentaires tels que les gâteaux, la moutarde, etc. Dans un objectif d'optimisation, une solution de ce colorant a été préparée à une concentration initiale de 50 mg/L dans de l'eau du robinet. Le spectre correspondant à ce colorant a été réalisé par spectroscopie dans le visible à l'aide d'un spectrophotomètre Jenway 7315. La mesure du pH a été effectuée avec un pH-mètre (Hanna 211 Microprocessor), tandis que la conductivité a été mesurée avec un conductimètre (Hanna EC215). La turbidité du colorant a été déterminée à l'aide d'un turbidimètre (Phywe System GMBH 2100N, Allemagne).

III.1.3. Nature des Adsorbants utilisés.

III.1.3.1.Charbon actif commerciale (CAC)

Le charbon actif utilisé dans nos expériences est sous forme de poudre commercialisé par la société RIEDLEL-DE-HAEN

III.1.3.2. Charbon à base de pelures de petits pois

Les petits pois sont les jeunes graines vertes de variétés cultivées du pois, récoltées après leur développement dans les gousses mais, avant leur maturité **(figure 12)**.

III.1.3.3. Charbon à base de pelures de fève

C'est une plante annuelle légumineuse de la famille des Fabaceae, sous-famille des Faboideae, tribu des Fabeae. Comme les fèveroles, les fèves cultivées proviennent de l'espèce botanique Vicia faba. **(figure 13)**.

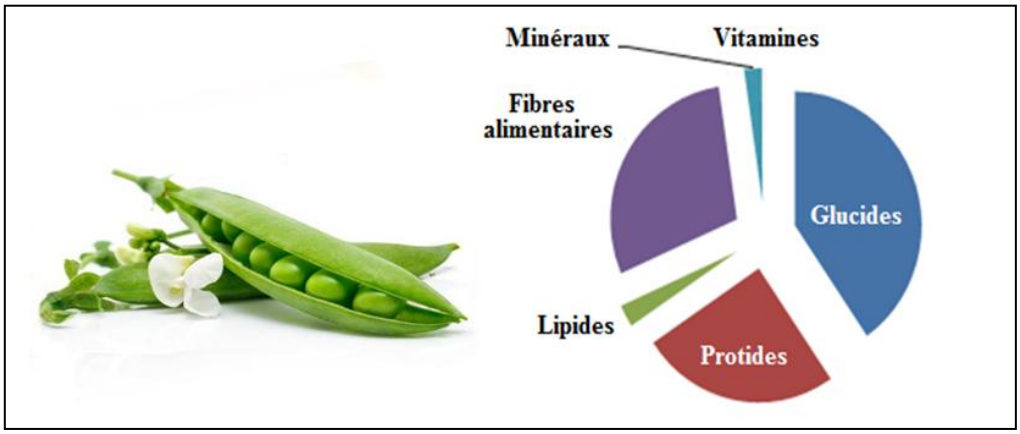


Figure 12.Photo de petits pois (gauche) et composition moyenne pour 100g de petits pois (droite)[59].

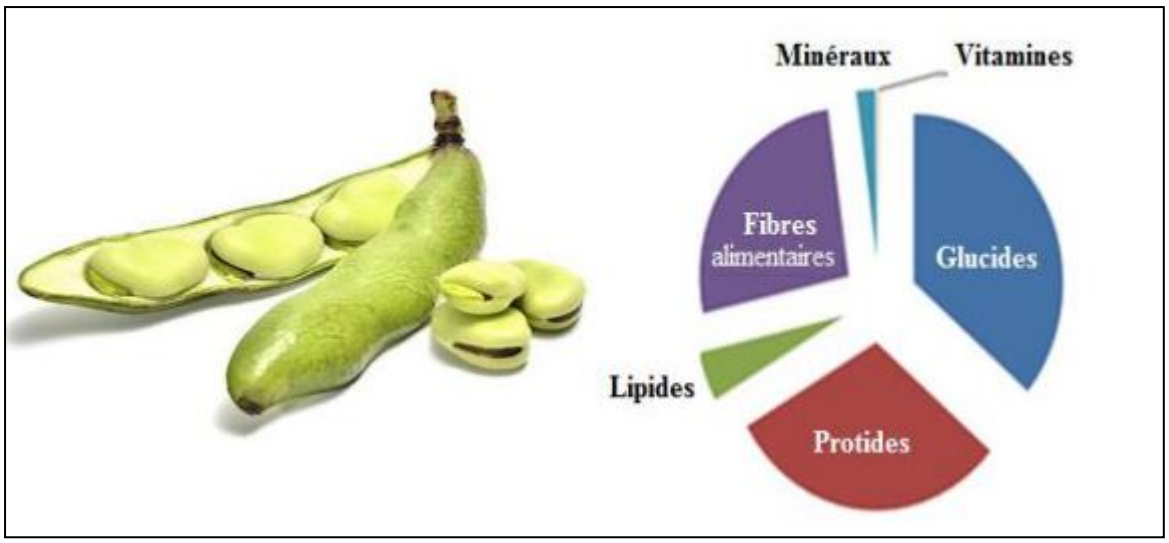


Figure 13 . Photo de fèves (gauche) et composition moyenne pour 100g des fèves (droite)

III.1.4. Préparation des charbons actifs

Après avoir séparé les pois et les fèves de leurs pelures, nous avons séché ces dernières en les exposant à la lumière du soleil pendant plusieurs jours afin d'éliminer l'humidité. Les pelures de petits pois (PPP) et de fèves (PF) ont ensuite été broyées et tamisées pour obtenir une poudre homogène. Puis, les PPP et les PF ont été lavés plusieurs fois à l'eau distillée chaude afin d'éliminer les impuretés, jusqu'à ce que le liquide de rinçage soit clair. Après cette étape, le matériau a été séché à 60 °C pendant 48 heures, puis broyé une seconde fois pour obtenir une poudre homogène.

En littérature, il existe plusieurs méthodes de préparation des charbons actifs, physique et chimique. La synthèse des charbons actifs à partir des résidus de l'agriculture par la méthode d'activation chimique a fait l'objet de nombreuses études. L'étude de consistait en la préparation de charbons actifs à partir des pelures de petits pois (CAPPP) et des pelures de fèves (CAPF). Afin d'obtenir un produit applicable dans le traitement des eaux. Ils ont utilisé comme agent activant l'acide phosphorique (H_3PO_4)[60].

III.1.4.1. Activation avec l'acide phosphorique

Parmi les acides, l'acide phosphorique a été très largement utilisé pour l'activation des charbons[60]. Pour cela, 10 g de chaque échantillon brut ont été mélangés à la solution de H_3PO_4 à des concentrations de (1.5M) et (3M) pour les pelures de petits pois (PPP) et les pelures de fèves (PF) respectivement, maintenus sous agitation (250 rpm) pendant 10 h. Les mélanges ont été mis à l'étuve pendant 24 h à 110 °C.

III.1.4.2. Activation thermique (Calcination)

Les produits ont été mis dans un four à calcination, avec une vitesse de chauffe de 10°C/min et maintenus à la température 450 °C pendant une heure (1h). Les produits obtenus après calcination, les charbons actifs des pelures des petits pois CAPPP et des pelures de fèves CAPF, sont lavés avec une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) (1 M), puis lavés avec de l'eau distillée plusieurs fois jusqu'à pH ≈6.5. Les produits sont ensuite séchés à 110 °C pendant 24 h[61].

III.1.4.3. Broyage des charbons (CAPPP et CAPF)

Le broyage des charbons est la dernière étape avant leur utilisation comme adsorbants pour l'élimination du colorant étudié. C'est une étape capitale en préparation des matériaux, dont les objectifs sont d'homogénéiser les échantillons et de réduire la taille des particules, ainsi que d'améliorer la surface spécifique de ces matériaux. Pour cela, une masse de chaque échantillon après calcination a été introduite dans une jarre contenant un nombre de billes, sachant que la masse de billes sur la masse de la poudre est de 4/1 avec une vitesse d'agitation de 350 rpm pendant une heure de temps[62].

III.1.5. Équipement et conditions opératoires du traitement par Adsorption, électrocoagulation et couplage EC-Adsorption.

Le montage expérimental d'adsorption est constitué d'un Becher dans lequel circule le colorant à éliminer (sous agitation) avec la quantité d'adsorbant ajoutée. D'autre part, le montage d'électrocoagulation et électrocoagulation-adsorption (**Figure 14** ***)*** est constitué d'une cellule électrochimique en verre (Becher) dans laquelle sont placées deux électrodes planes et parallèles en aluminium, fer et inox, entre lesquelles circule le colorant à éliminer (système statique) avec la quantité d'adsorbant ajoutée pour le couplage EC/Adsorption. Ce réacteur est de mise en œuvre et d'utilisation faciles. Les deux électrodes sont approximativement égales à 15 cm de longueur et 5 cm de largeur soit une surface de 75 cm^2 chacune, sachant que la surface active est de 21 cm^2. La distance inter-électrode est de 1 cm, choisie faible pour limiter non seulement la chute ohmique mais aussi d'éviter le colmatage.

Plusieurs facteurs ont été testés à savoir, la densité de courant, le temps d'électrolyse, et la quantité d'adsorbant (EC/Ads) sur un échantillon synthétique de colorant en poudre d'une concentration initiale de 50 mg/l. La solution est constamment agitée avec un agitateur magnétique pour réduire la surtension dans le réacteur d'électrocoagulation. Des prélèvements ont étés effectués chaque trois minutes pour toutes les expériences réalisées,

l'échantillon est filtré afin d'effectuer les mesures d'absorbance ainsi faire une comparaison de l'état initial et final de la solution[63]. Le taux de réduction de la coloration en fin d'expérience est calculé selon **l'équation (III.1)** suivante :

$$\boldsymbol{TR}(\%) = [(\boldsymbol{Abs_0} - \boldsymbol{Abs_{final}})/\boldsymbol{Abs_0}] * \mathbf{100}\% \textbf{ (Eq.III.1)}$$

$\boldsymbol{Abs_0} - \boldsymbol{Abs_{final}}$: Absorbance successivement avant et après EF

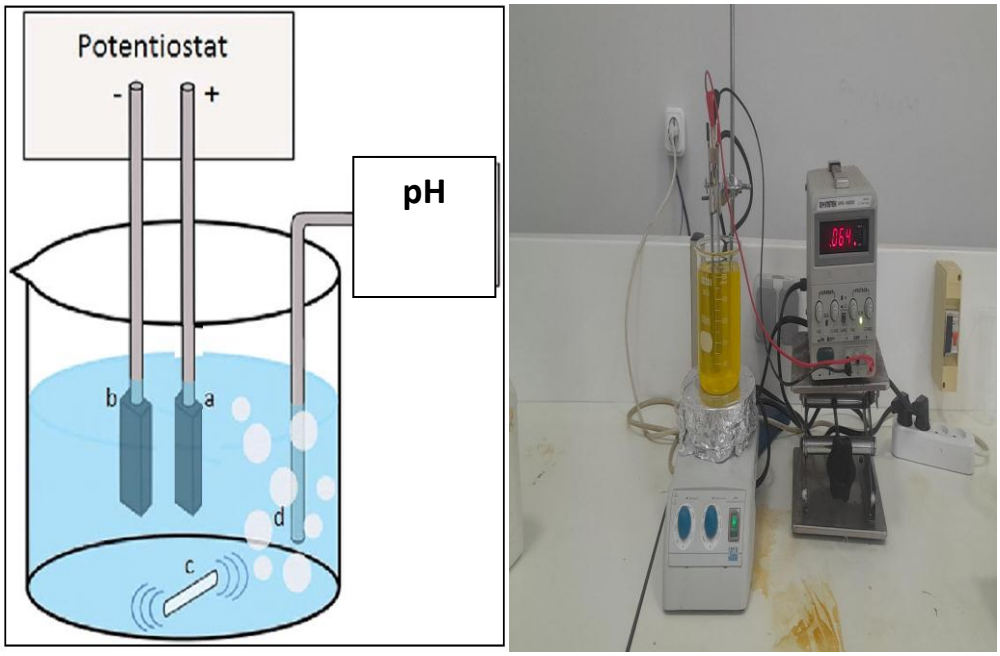


Figure 14 .Montage expérimental d'EC

III.2. Résultats et discussion

III.2.1. Données analytiques sur le colorant étudié

Comme il a été dit précédemment, un colorant a été étudié. Le **tableau 4** donne quelques caractéristiques physico-chimiques du colorant. On peut constater que pour une concentration de 50 mg/l utilisée, le colorant absorbe et peuvent être distingué par une valeur de λ_{max}(nm). Le spectre d'absorption dans le visible correspondant est représenté dans la **figure 15**. Compte tenu de l'absence de structure de base du colorant, et au vu des valeurs de pH, il est alors évident que les turbidités trouvées soient faibles et comparables à celles trouvées en eaux potables[64]. Les valeurs de conductivités trouvées en solution aqueuses ne sont pas éloignées aussi des eaux potables.

Les essais de stabilité ou de conservation du colorant dans le temps (échantillon de colorant à 50 mg/l gardé dans un flacon ambré à l'obscurité et ouverts une fois/3 jours pour analyse de l'absorbance) et un autre échantillon gardé sur une palliasse, les résultats ont

montré **(figure16)** une bonne stabilité puisque aucun changement d'absorbance initiale et de pH initial, n'a été observé sur la durée de conservation étudiée soit 20 jours.

Tableau 4 . Quelques caractéristiques du colorant étudié.

Couleur	**Orange**
λ_{max}(nm)	**425**
pH_0	**6.1**
Turbidité(NTU)	**08**
Absorbance	**2.059**
Concentration(mg/L)	**50**
Conductivité initiale (µS/cm)	**348**

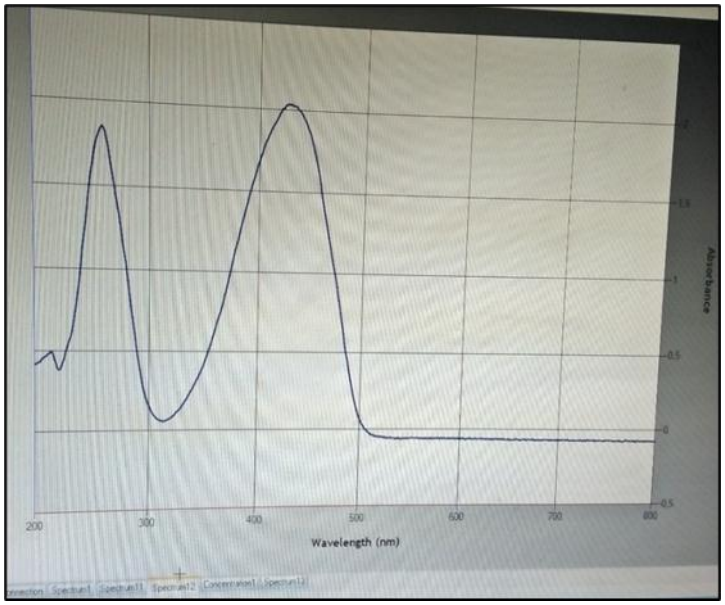


Figure 15 .Spectre du colorant étudié

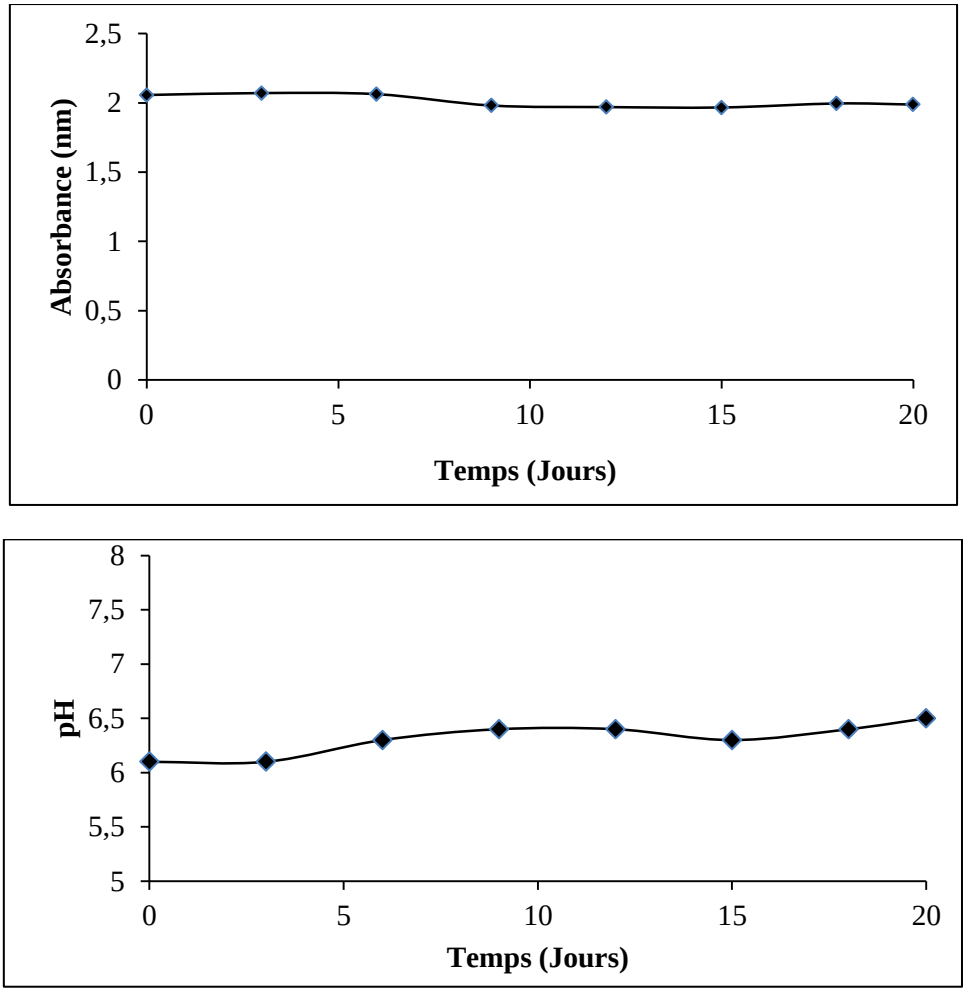


Figure 16 . Essais de stabilité ou de conservation des colorants dans le temps

III.2.2. Etablissement de la courbe d'étalonnage du colorant étudié :

La courbe d'étalonnage pour le colorant étudié a été établie à partir d'une solution mère à 50 mg/L, diluée avec de l'eau bi-distillée pour obtenir des solutions filles à 5, 10, 20, 30 et 40 mg/L. Toutes les solutions de colorant préparées ont été analysées par spectrométrie dans le visible, aux longueurs d'onde maximales préalablement optimisées, à savoir λmax = 425 nm. Le tracé de la courbe d'étalonnage, représentant l'absorbance en fonction de la concentration (mg/L), montre (**figure 17)** un bon coefficient de corrélation, sensiblement égal à 1.

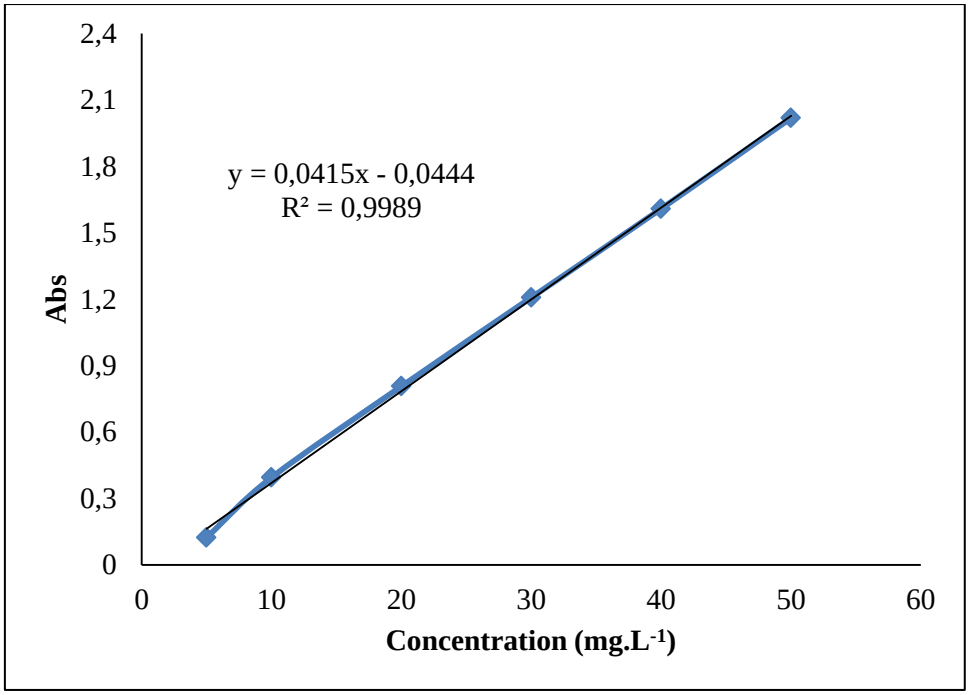


Figure 17 . Courbe d'étalonnage du colorant étudié

III.2.3. Résultats d'élimination du colorant par Adsorption

La technique d'adsorption est l'une des méthodes les plus utilisées pour l'élimination de certains polluants chimiques, notamment les pesticides, les métaux lourds, les hydrocarbures, les colorants, etc. L'efficacité de ce procédé dépend de plusieurs facteurs, tels que la surface spécifique du matériau adsorbant, la nature chimique des substances impliquées, et la température. De plus, la quantité de charbon actif peut influencer l'efficacité de l'adsorption, car elle détermine le degré d'adsorption, lequel est étroitement lié au rendement d'élimination, c'est-à-dire à la quantité de polluant retenue par unité de masse d'adsorbant.

L'étude de l'influence de la quantité d'adsorbant sur la réduction de la coloration est nécessaire, car la surface de contact conditionne la faisabilité du procédé en termes de temps d'agitation pour l'homogénéisation (entre l'adsorbat et l'adsorbant), ce qui impacte la consommation énergétique et le coût du procédé[65]**.** C'est pourquoi nous avons choisi d'étudier ce paramètre, en testant les quantités d'adsorbant suivantes : 100, 200, 300, 400 et 450 mg, afin d'évaluer leur effet sur l'efficacité d'élimination de la couleur par adsorption. Ce qui nous permet de faire des comparaisons des taux de réduction avec les autres systèmes envisagés tels que l'EC, L'EC/adsorption (CAC), l'EC/Adsorption (CAPPP) et EC/Adsorption (PF), les expériences ont été réalisées à pH libre égale à 6.1, temps de contact de 30 min et une concentration initiale de colorant de 50 mg/l, après avoir été filtrée, la solution a été

analysée pour mesurer l'absorbance (puis sa concentration), ce qui permet de déterminer le taux d'élimination du Tartrazine. Les résultats de cette influence montrent (**Figure18)** que 6 min suffisent à obtenir une bonne élimination, et avec des quantités de 400 et 450 gr, le taux d'élimination est maximal (>90%). alors que les taux d'abattement enregistrés avec des quantités d'adsorbant (CAPPP) de 300, 200 et 100 sont inférieurs à 85%, 50% et 30% successivement, ceci doit être explique par l'insuffisance de la surface de contact entre l'adsorbat et l'adsorbant.

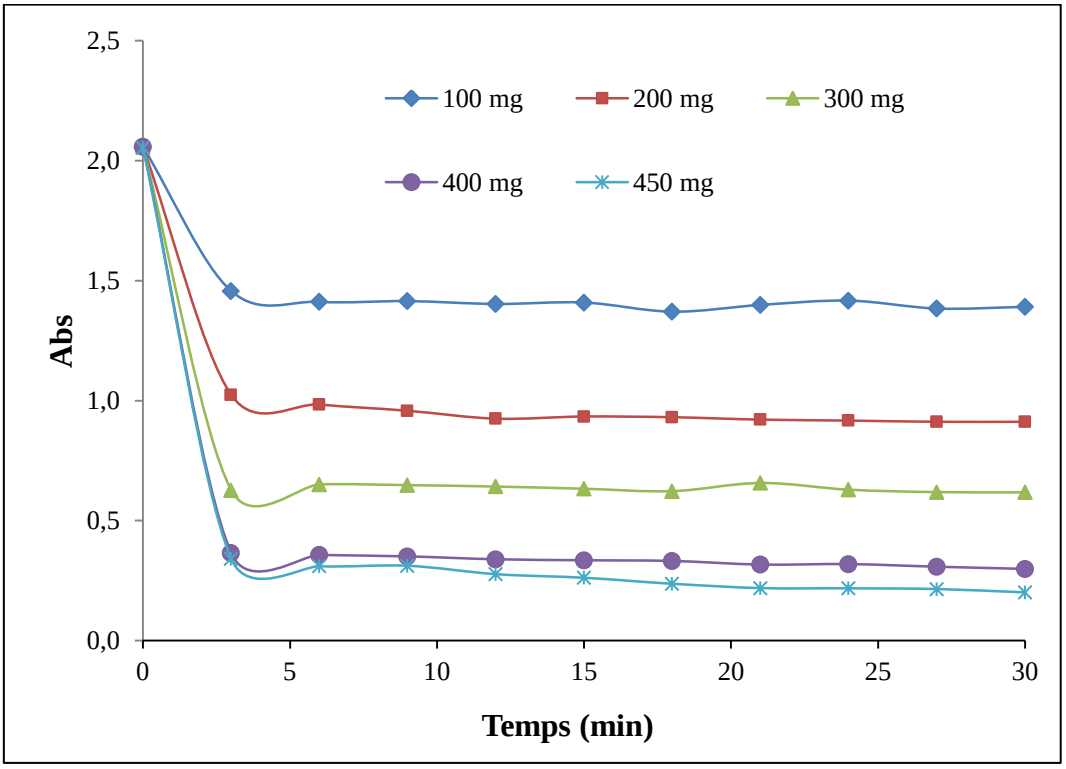


Figure 18 .Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de l'adsorbant (T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Adsorbant (CAPPP)).

Il est important de signaler que le pH peut affecte ce processus d'adsorption, car il peut modifier la charge de surface des charbons employés, de ce fait, nous avons suivre la variation de pH avec des mesures ponctuelles (pH initiaux et pH finaux) de chaque série d'expériences, La **figure 19** montre qu'il y a une stabilité de pH par rapport aux quantités d'adsorbant testés 100, 200, 300, 400 et 450 mg du CAPPP. Ainsi, la valeur de pH initial de tous les échantillons est de 6.1, alors que les valeurs de pH finaux varient entre 6.3 et 6.6, ce qui est bénéfique pour les traiteurs d'eaux qui peuvent rejetés l'eau traitée aux milieux naturel sans correction de pH.

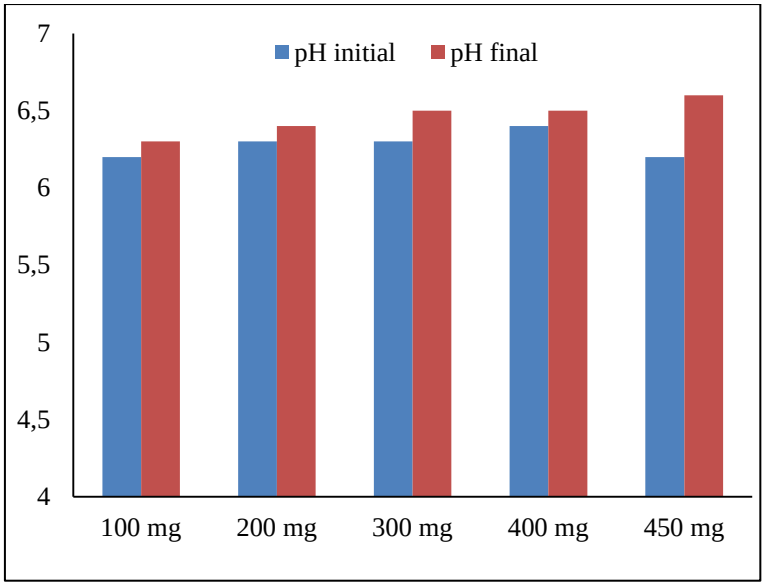


Figure 19 . pH initiaux et pH finaux en fonction de la masses de l'adsorbant (T = 24°C ± 1 ; concentration initiale du colorant = 50 mg/l ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Adsorbant (CAPPP)).

III.2.4. Résultats d'élimination du colorant par électrocoagulation

L'électrocoagulation est un procédé électrochimique utilisé pour traiter l'eau ou d'autres liquides en éliminant les polluants tels que les matières organiques, les métaux lourds, les huiles, etc. Pour optimiser ce procédé, nous avons choisi de tester la densité de courant en maintenant les autres paramètres optimaux obtenus lors de nos études antérieures, tels que l'espacement inter-électrodes (1 cm), la nature des électrodes (Al/Al), etc.

La densité de courant est l'un des paramètres de fonctionnement les plus importants qui affectent l'efficacité du processus d'EC[66]. Il peut déterminer la concentration du coagulantAl^{3+}, la quantité des hydroxydes [OH^-] formée, la vitesse et la taille des bulles produites aux électrodes, la vitesse de mélange dans la cellule d'EC et d'autres processus d'oxydoréduction [67], ainsi, le procédé d'électrocoagulation est basé sur l'effet catalytique des espèces mises en solution par oxydation (Al^{3+} ou Fe^{3+}), il nous est paru nécessaire d'optimiser l'étude par la détermination de la densité optimale pour le procédé utilisé.

Les expériences ont été réalisées avec l'ajout d'un électrolyte support de chlorure de sodium (NaCl) à une concentration de 20 mg/l. Ce choix est justifié par l'existence déjà au sein du laboratoire. Dans la série d'expériences, six valeurs de densités de courant dans la plage de 3 à 16 $mA.cm^{-2}$ ont étés appliquées pour les électrodes d'alliage d'aluminium à une

solution de pH libre égale 6.3, une distance inter-électrodes égale 1 cm, un temps d'électrolyse de 30 min. Les résultats sont illustrés dans la **figure 20**

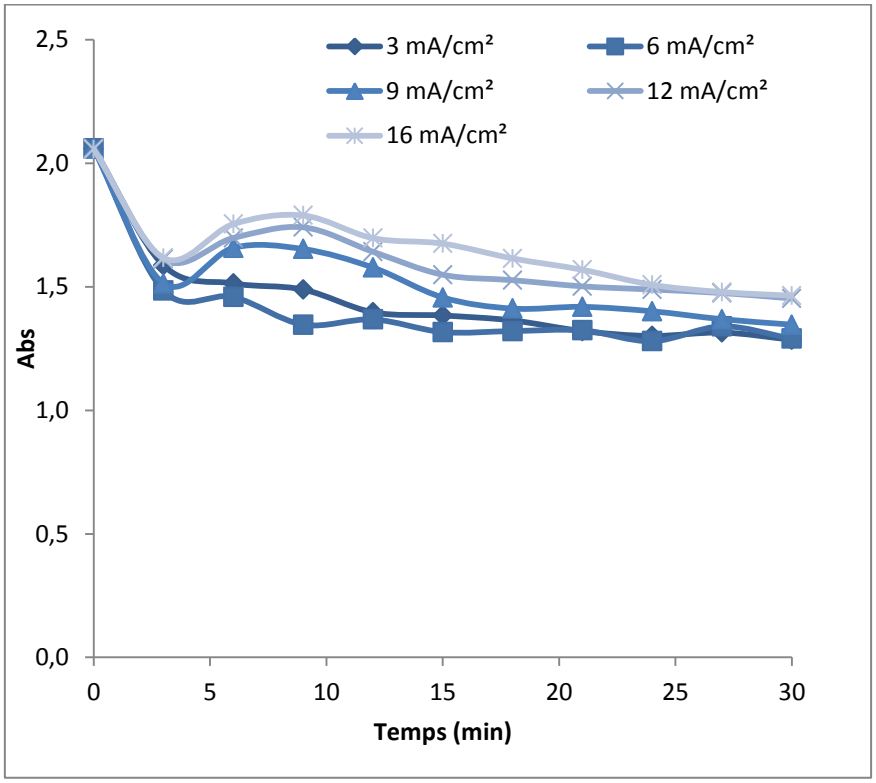


Figure 20 . Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes densités de courant (Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 50 rpm pendant 30 min)

La performance d'élimination de la coloration par le processus d'EC a été contrôlée à différentes densités de courant pendant 30 min d'expérience, comme nous avons indiqué auparavant. On peut constater que l'absorbance décroît avec le temps pour les six valeurs de densités de courant. Toutes les densités de courant appliquées conduisaient à une diminution de l'intensité de la coloration, le taux de réduction le plus important est d'environ 37 % avec la cinétique la plus rapide, ce taux est observée après 9 min d'électrolyse avec une densité de courant 6 mA/cm², et environ 24 min avec les mêmes électrodes à une densité de courant de 3 mA/cm^2.

On peut noter que le procédé d'EC est peu efficace pour réduire la coloration du colorant étudié (élimination des molécules organiques dissoutes) par la réaction de précipitation grâce à la formation d'espèces chimiques en solution (Al^{3+}), ainsi que d'autres réactions d'oxydation et de réduction[68]. Néanmoins, en traitement des eaux usées par n'importe quel procédé (physico-chimique ou biologique), le contrôle d'un paramètre indica+

teur de la pollution tel que la DCO est obligatoire pour mieux évaluer l'efficacité de traitement appliqué, dans cette partie d'étude, l'analyse de la DCO est intéressant pour confirmer l'élimination des molécules organique du colorant étudié, mais pour des raisons de la non disponibilité de cette analyse au laboratoire, nous avons pas pu mesurer ce paramètre.

Il est important de souligner que la densité de courant est directement liée à l'intensité du courant et au potentiel appliqué. La tension appliquée en tant que densité de courant est principalement responsable de l'oxydation électrolytique de l'électrode et assure ensuite la production de Al^{3+} en solution, conduisant à la déstabilisation des polluants. Enfin, plusieurs processus peuvent se produire, tels que la précipitation de flocs formés et les réactions chimiques d'oxydoréduction[69].

Pendant le processus d'EC, le pH du milieu change ; les écarts observés entre les pH initiaux et finaux sont remarquables surtout pour les essais de dépollution à pH initial inférieur à 7 (pH libre du colorant employé E102). Pour la densité de 16 mA/cm, la valeur de pH enregistré en fin de l'expérience est de 8.2 (**Figure 21)**, Cette valeur pourrait être justifiée par la production importante de OH^- en solution grâce aux réactions électrochimiques qui se produisent aux électrodes, en particulier à la cathode. La production d'ions OH^- provoque une augmentation de la basicité du milieu, ce qui entraîne par la suite à une augmentation du pH. Ces ions hydroxydes réagissent avec les cations métalliques Al^{3+} pour former des complexes amorphes insolubles tels que $Al(OH)_3$, les hydroxydes métalliques participent ensuite pour formés la boue flottante. L'observation de l'évolution des pH finaux, suggère que l'EC, présente une certaine capacité tampon liée à l'équilibre entre la production et la consommation d'OH- Ceci empêche le changement brusque de pH particulièrement en milieu alcalin[70].

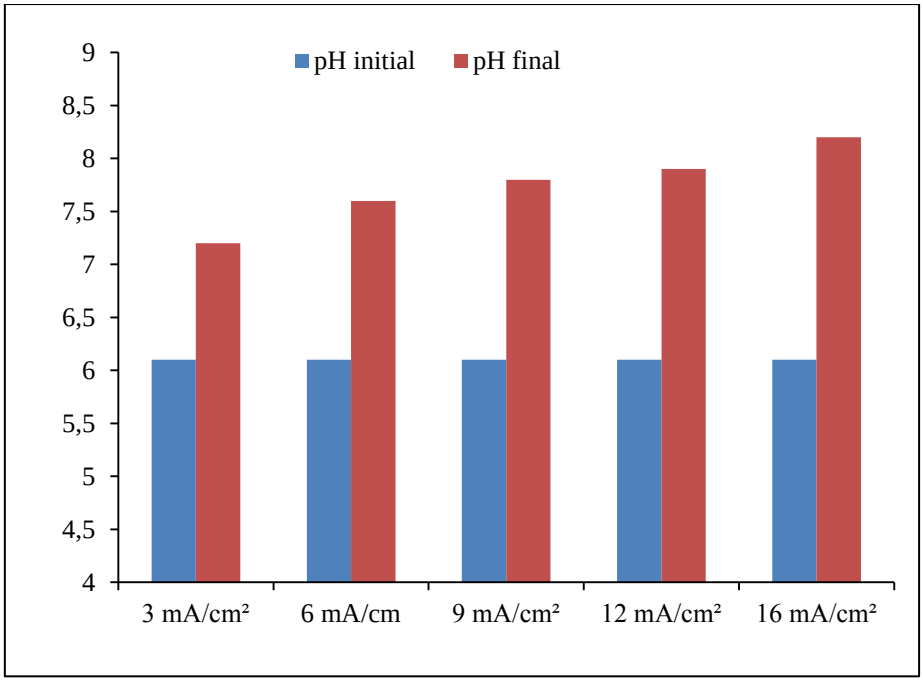


Figure 21 . pH initiaux et pH finaux en fonction de la densité de courant(T = 24°C ± 1 ; concentration initiale du colorant = 50 mg/l ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; électrodes Al/Al).

III.2.5. Résultats d'élimination du colorant par couplage électrocoagulation/adsorption

L'échantillon d'eau à traiter, a été réalisé en milieu synthétique (colorant plus eau de robinet). Le traitement physico-chimique employé est l'EC/Adsorption en mode statique. L'optimisation de traitement adopté est importante ; nécessite l'étude de l'influence de certains paramètres sur l'efficacité du traitement adopté[71]. Dans l'objectif de mieux optimiser cette groupage de procédés, et voir l'effet de l'ensemble de phénomènes et réactions mises dans la solution, nous avons travaillé essentiellement sur les paramètres clés influençant les deux techniques qui sont, la densité de courant pour l'EC et la masse de l'adsorbant sur.

L'effet des deux paramètres sur l'efficacité de traitement par EC/Adsorption ont étés examinés par cinq valeurs pour la densité de courant (3, 6, 9, 12, et 16 mA/cm²), et cinq masses d'adsorbant (200, 300, 350, 400 et 450) pour le charbon actif commercial (CAC), ainsi, nous avons procéder à tester deux masses pour le matériau préparé (CAPPP), de telle manière que chaque fois que nous définissons un paramètre et varions l'autre. Ceci nous permettra par la suite de faire des comparaisons d'efficacité entre les deux matériaux CAC et CAPPP. Toutes les expériences ont étés réalisées sous mêmes autres conditions tel que[72] : l'espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T ~ 24°C

; Agitation = 200 rpm pendant 30 min. Les résultats (**Figures 22 et 23)** montrent l'influence de la densité de courant avec la masse d'adsorbant sur l'efficacité d'EC/Adsorption.

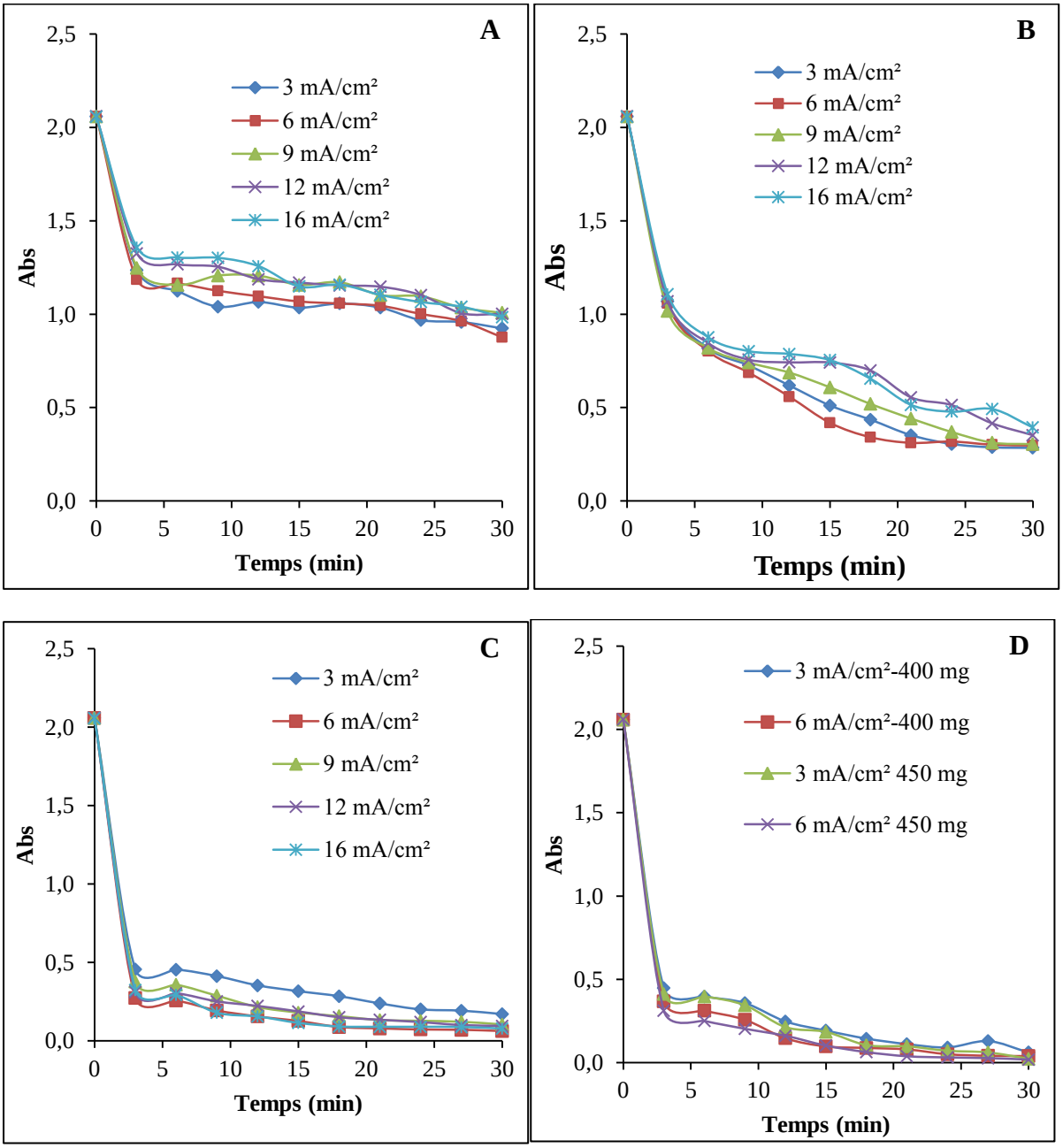


Figure 22 . Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps (Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant (CAC) A: 200 mg, B:300 mg; C: 350 mg, D: 400 et 450 mg).

On voit clairement qu'y a une dégradation de la coloration quel que soit la valeur de la densité de courant appliquée ou masse d'adsorbant utilisée. A une densité de courant de 6 mA/cm², le système de traitement envisagé montre l'augmentation des efficacités

d'élimination de la coloration de 47 % avec 200 mg (CAC) et 3 min d'électrolyse à 85 % avec 450 mg (CAC) et 3 min d'électrolyse. La **figure 23** montre bien l'effet de la densité de courant de 3 à 16 mA/cm² mais cette fois avec CAPPP, la densité de 6 mA/cm² donne un meilleur taux de réduction en comparant avec 12 et 16 mA/cm² avec les deux masses testés 300 et 400 mg. Les résultats des deux courbes (**22 et 23**) confirment la particularité de l'adsorption qui est un effet très dominant par rapport à l'électrocoagulation, cette particularité réside dans la sélectivité et la capacité de fixer les molécules sur la surface des matériaux [73].

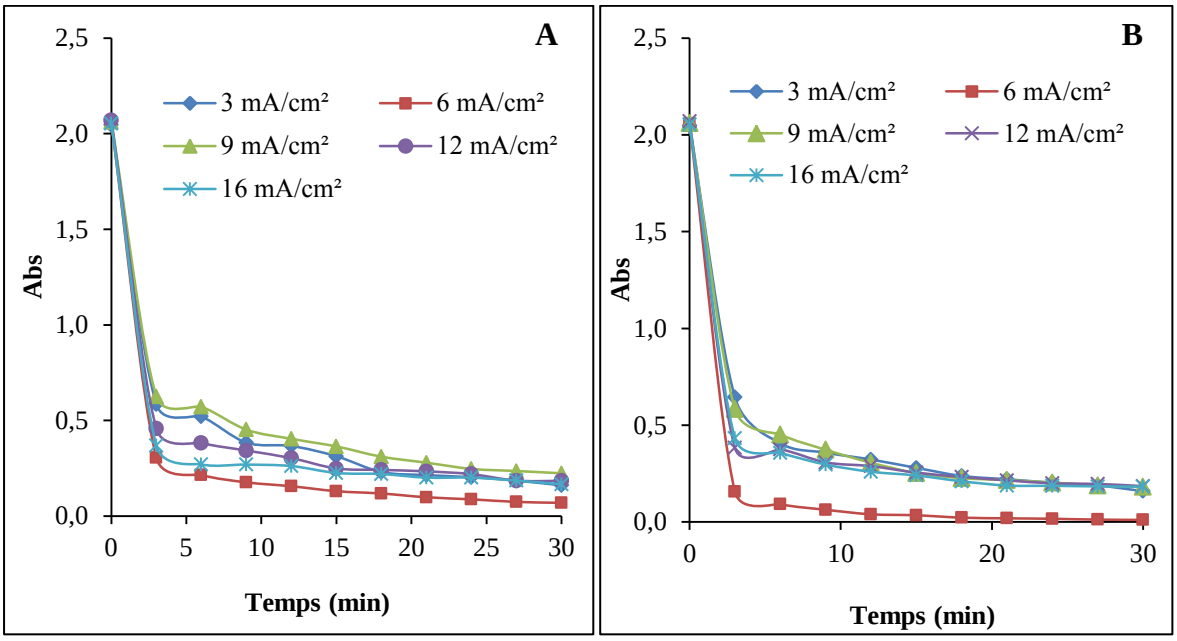


Figure 23. Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes densités de courant (Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant A: 300 mg CAPPP ; B 400 mg CAPPP).

La **figure 23** (B) montre clairement l'action de l'électrocoagulation sur le système de traitement combiné employé (EC/Adsorption), ou il a amélioré l'efficacité d'élimination en comparant avec l'adsorption. Cette amélioration est due principalement à l'action de déstabilisation des colloïdes, et précipitation des matières en suspension, ce qui libère ensuite les sites d'adsorption pour les autres composés plus fins ou dissous. Ainsi, l'avantage de cette combinaison est la modification de pH du milieu qui peut influencer la spéciation chimique des contaminants et la surface des matériaux adsorbants. Ce changement de pH peut améliorer l'affinité électrostatique entre les matériaux adsorbants et les polluants[73].

III.2.6. Effet de la nature et masse d'adsorbant sur l'élimination du colorant par couplage électrocoagulation/adsorption.

Le processus d'adsorption dépend fortement de la nature de l'adsorbant, car la quantité et le type de substance adsorbée peuvent être influencée par certaines caractéristiques de chaque adsorbant, tels que la surface spécifique, la structure des pores, les propriétés fonctionnelles et interactions de surface. Dans le but d'examiner l'effet de la nature de l'adsorbant sur l'efficacité d'élimination de la couleur par le traitement employé (EC/Adsorption), nous avons effectué une série d'essais avec deux adsorbants différents (CAPF et CAPPP), les masses testes sont 100, 200, 300, 400 et 450 mg. Les expériences ont été réalisées avec une densité de courant de 6 mA/cm², espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode en aluminium (Al/Al) ; T = 24°C et une agitation à 200 rpm pendant 30 min. Les résultats sont illustrés dans la figure **24 et 25.**

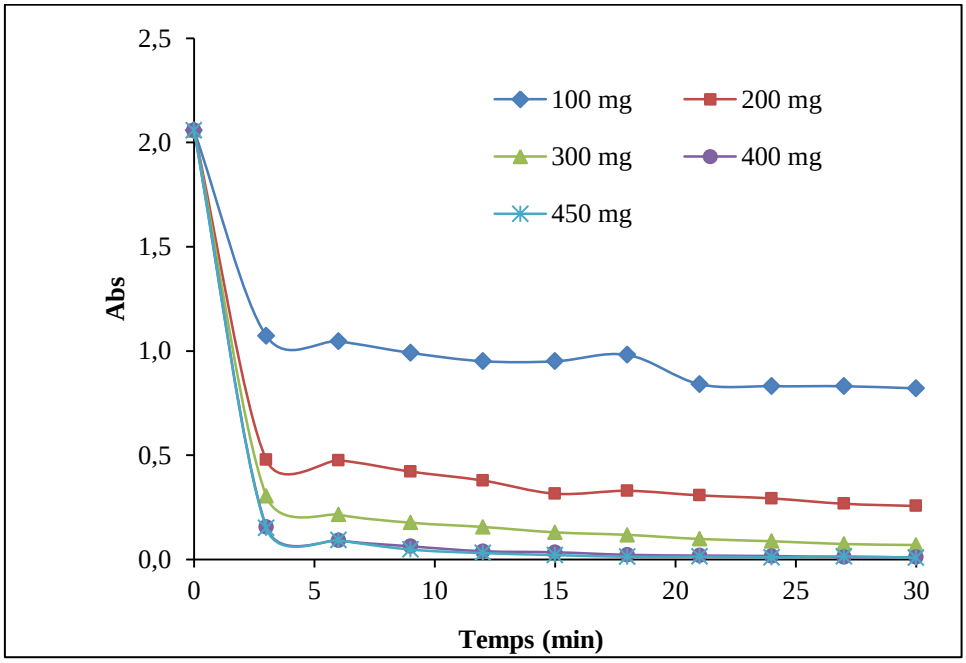


Figure 24 . Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de l'adsorbant (densité de courant 6 mA/cm², Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Adsorbant utilisé CAPPP).

D'après les deux figures **24 et 25**, on constate que le CAPPP présente des taux d'éliminations plus importants que CAPF, par exemple à une quantité de 400 mg de CAPPP, un taux d'élimination d'environ de 90 et 99 % après 3 et 12 min d'électrolyse successivement, alors qu'avec le CAPF, nous avons enregistré des taux de 75 et ~ 90 % après 3 et 30 min

d'électrolyse, ces résultats confirment l'impact direct de la nature d'adsorbant sur l'efficacité de traitement par ce système combiné. Cet écart d'efficacité peut être expliqué par le fait que le volume qui correspond à 400 mg de CAPPP est plus grand que le volume de même masse avec CAPF, et donc la surface de contact entre l'adsorbant et l'adsorbat est plus importante avec CAPPP qu'avec CAPF. Ce qui favorise la formation des petits flocs grâce à l'agglomération des molécules du Tartrazine avec le coagulant formé par phénomène d'oxydation [74]; ce phénomène d'agglomération peut conduire par la suite à la formation de structures plus grandes comme des cristaux, ou des complexes. D'autre part la surface spécifique du CAPPP est plus grande que CAPF ce qui fait la présence d'un nombre plus grand de sites actifs pour piéger les molécules de colorant, ainsi, l'existence de certains groupes fonctionnels peut affecter l'affinité avec certains polluants, ainsi, la compatibilité chimique de l'adsorbant doit résister aux conditions du système envisagé comme le pH et la densité de courant[75].

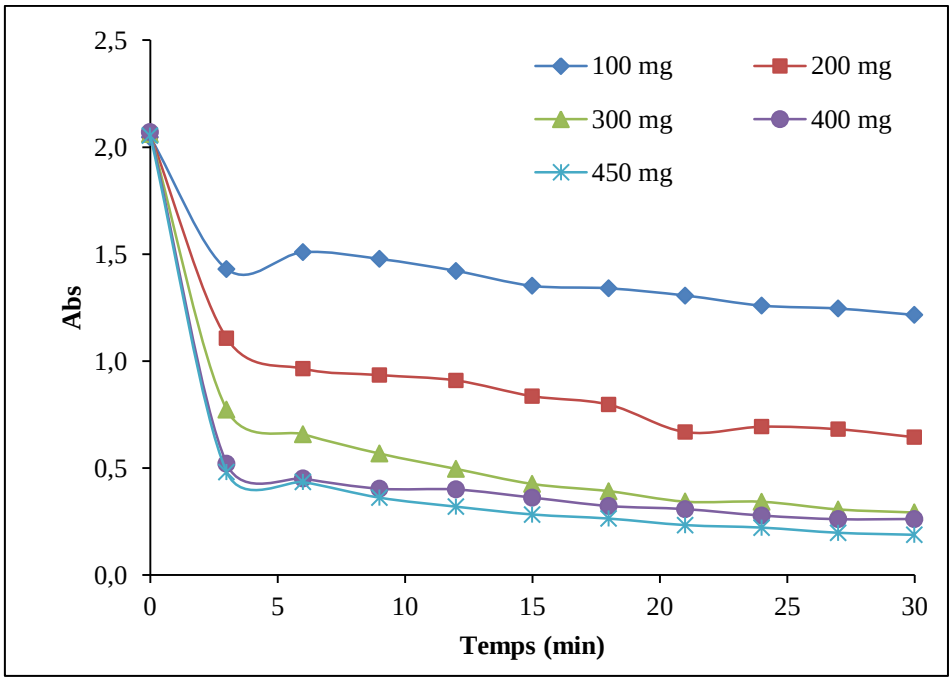


Figure 25 . Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes masses de l'adsorbant (densité de courant 6 mA/cm², Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Adsorbant utilisé CAPF).

III.2.7. Effet de la concentration de l'électrolyte support sur l'élimination du colorant par couplage électrocoagulation/adsorption.

L'objectif de cette partie est d'étudier l'influence de la concentration de l'électrolyte support sur l'efficacité d'élimination par électrocoagulation/adsorption, ce facteur crucial peut affecter la corrosion des électrodes, le volume de boue formé et la consommation énergétique, ce qui peut entraîner un coût énergétique élevé du procédé, surtout à grande échelle. Généralement, dans les procédés électrochimiques, plusieurs électrolytes supports peuvent être utilisés tels que KCl, NaCl, $MgSO_4$, Na_2SO_4) afin d'améliorer la conductivité de la solution et d'accélérer le transfert d'électrons[76]. L'ajout d'électrolyte est requis lorsque la conductivité de la solution ne permet pas d'atteindre l'intensité souhaitée. Ainsi, la conductivité initiale d'une eau brute permet de définir sa capacité à conduire le courant électrique, de ce fait, il était indispensable d'utiliser un électrolyte car la conductivité initiale de la solution de Tartrazine étant faible (< 200 µs/cm²). pour cette raison, nous avons choisi l'électrolyte NaCl afin d'augmenter la conductivité de la solution à traiter, différentes concentrations ont été testes 20, 100, 200 et 400 mg/l, les essais ont été réalisés avec une densité de courant de 6 mA/cm² et un temps d'électrolyse de 30 min, espace inter électrodes de 1 cm, agitation de 200 rpm, un pH égale 6.3, électrodes en aluminium, avec une quantité d'adsorbant de 350 mg de CAPPP. Les résultats sont illustrés dans la figure ci-dessous (**Figure 27).**

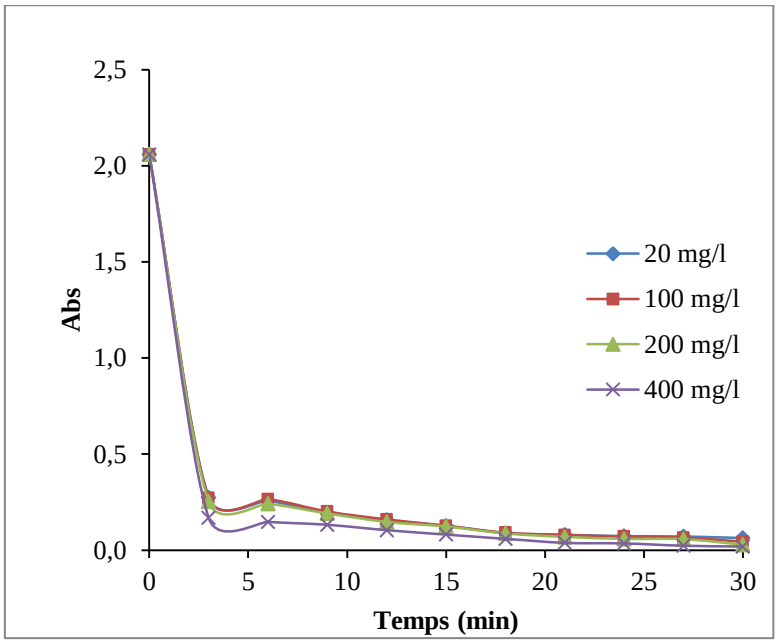


Figure 26 . Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes concentration de l'électrolyte support (densité de courant 6 mA/cm², Espace inter

électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl ; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant 350 mg CAPPP).

Les résultats montrent que les rendements de réduction de la coloration après 30 minutes d'électrolyse sont similaires avec les différentes concentrations testées 20, 100, 200 et 400 mg/l, mais la concentration de 400 mg/l présente une cinétique plus rapide que les autres concentrations pendant deuze minutes (de 0 à 12 minutes). Les trois autres concentrations présentent pratiquement les mêmes valeurs de réductions, tout au long des expériences (pendant 30 min), l'augmentation de la concentration de l'électrolyte support conduit à l'augmentation de la conductivité du milieu[77], ce dernier phénomène peut conduire à la déstabilisation et à la réduction des interactions entre les molécules du colorant et limite par la suite leur agrégation, et parfois augmente leur solubilité[78]. C'est pour cette raison, il a été décidé de travail avec une concentration de 20 mg/l en NaCl.

III.2.8. Comparaison des efficacités d'élimination du colorant par Electrocoagulation, Adsorption et Electrocoagulation / Adsorption.

Cette partie d'étude permette de chercher les meilleures efficacités d'élimination avec des couts réduits, ainsi de faire des comparaisons d'efficacité des traitements envisagés, adsorption, électrocoagulation, électrocoagulation / adsorption avec CAC, électrocoagulation / adsorption avec CAPPP et électrocoagulation / adsorption avec CAPF. C'est pour ces raisons que nous avons valorisés des déchets agricoles avec des couts très faibles pour les utilisés comme adsorbants après leur activation chimiques et thermiques. Les résultats de la courbe Figure.28, ont été choisies aux conditions optimales de densités de courant, espace inter-électrodes, conductivité électrique et quantité d'adsorbant pour l'électrocoagulation et l'électrocoagulation / adsorption, ainsi la quantité d'adsorbant et le temps de contact pour l'adsorption.

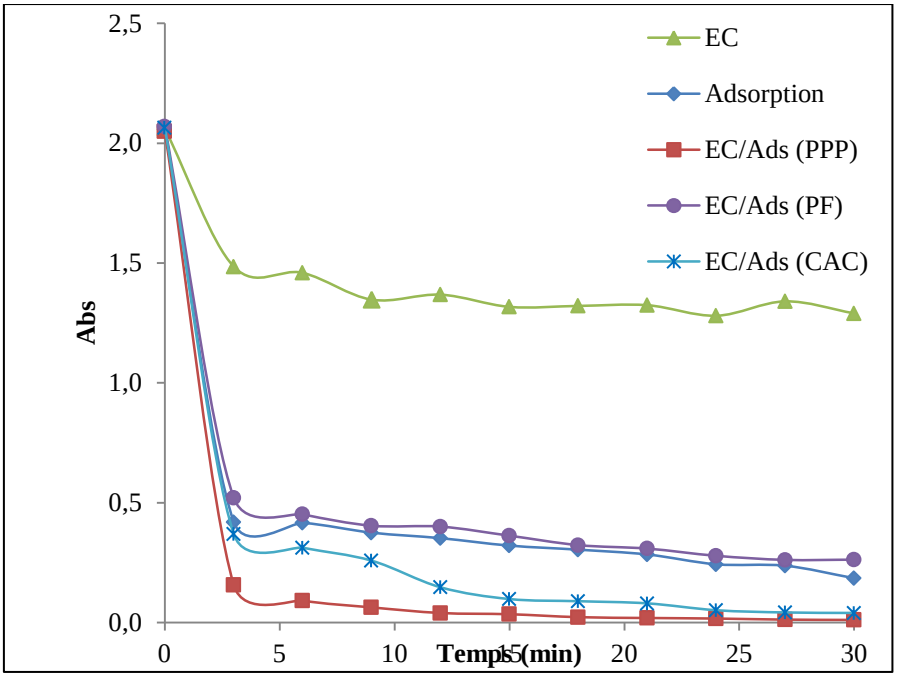


Figure 27 .Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différents systèmes de traitement (Densité de courant 6 mA/cm² ; Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant CAC, CAPPP et CAPF est 400 mg).

Les résultats de la **figure 27** confirment l'effet de la densité de courant et la nature de l'adsorbant sur l'efficacité d'élimination du colorant par le système combiné d'EC/adsorption, ainsi, on constate que l'EC/adsorption avec CAPPP présente les meilleurs taux d'élimination par rapport aux autres modèles tels qu'EC/adsorption avec CAPF et CAC. Par conséquent, et à travers les résultats obtenus, on peut dire que l'adsorbant préparé CAPPP à un avantage même avec le charbon actif commercial (CAC) car le taux d'élimination après 3 minutes d'électrolyse est d'environ 90 %, alors que le pourcentage d'élimination avec le CAC est estimé à 80% après 3 minutes. Les taux d'abattement par EC / adsorption (PF) sont pratiquement égaux avec les rendements d'éliminations par l'adsorption seul. Généralement un effluent prétraité par la procédé électrochimie d'électrocoagulation est plus propre, ce qui accélère les interactions entre les polluants et adsorbant et améliorer la cinétique de réduction des polluants, plusieurs auteurs ont estimé que l'électrocoagulation agit comme un traitement secondaire ou complémentaire qui optimise les conditions du procédé d'adsorption, de telle façon, en préparant le milieu, en enlevant les interférences et en introduisant des précipités d'hydroxydes de fer ou aluminium qui réagissent comme adsorbants supplémentaires[78]. L'association de l'adsorption et l'électrocoagulation peut mener à une élimination synergique bien plus efficace qu'un traitement seul[79].

III.2.9. Effet de la concentration initiale du colorant sur l'efficacité d'élimination par Electrocoagulation/Adsorption

Les **figures 28** et **29** représentent les courbes d'évolution de l'absorbance en fonction du temps de contact (temps d'électrolyse) à différentes concentrations initiales (30, 50 et 80 et 100 mg/l) en colorant pour CAC et CAPPP. Les expériences ont été réalisées avec les meilleures conditions de densité de courant (6 mA/cm²), espace inter électrodes de 1 cm, électrodes en aluminium, 20 mg/l en NaCl comme concentration en électrolyte support, pour les adsorbants, nous avons opté à tester charbon actif commercial comme référence, ainsi le charbon préparé a base de pelures de petits pois (CAPPP). On voit que le temps d'équilibre est indépendant de la concentration initiale de colorant et que la quantité adsorbée à l'équilibre augmente avec l'augmentation de la concentration. Il est aussi important de signaler que la vitesse d'adsorption initiale augmente avec l'élévation de la concentration, ce phénomène est peut-être dû à la forte diffusion des molécules du colorant de la solution à la surface des matériaux adsorbant par l'augmentation de la concentration en colorant[80].

Les deux figures montrent aussi que CAPPP peut remplacer le CAC dans le cas du système combiné entre l'électrocoagulation et l'adsorption, car les performances d'élimination sont importantes mêmes avec des grandes concentrations, ces performances ont été amélioré grâce à l'action de la densité de courant optimisée, qui favorise par la suite la formation des quantités importantes en hydroxydes métalliques. D'autre part, l'élévation de la concentration en colorant accuse la saturation rapide des sites de l'adsorbant, pour cela, et afin de garder les mêmes efficacités d'élimination, il est nécessaire dans la plus part des cas d'augmenter la densité de courant, allongement du temps de traitement ou appliquer une pré-dilution[81].

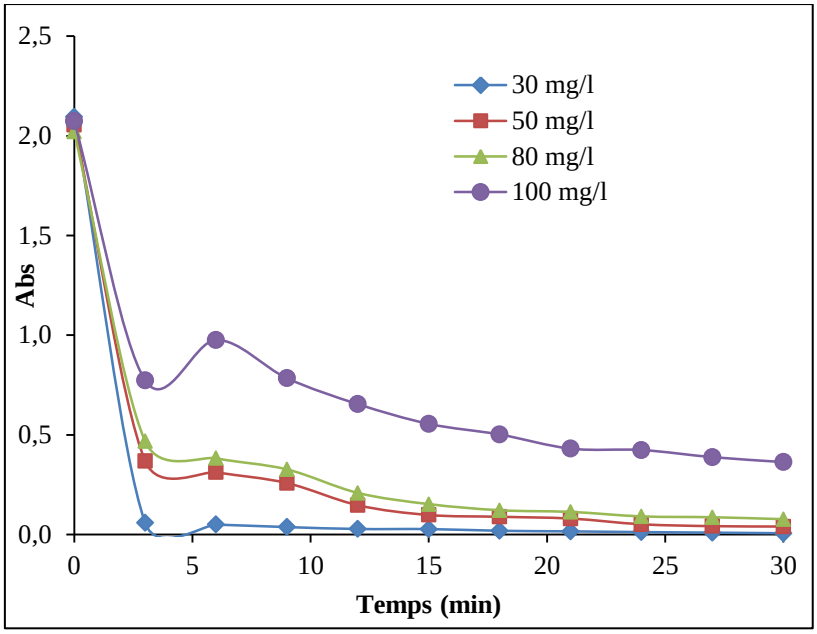


Figure 28 . Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes concentration du colorant étudié (Densité de courant 6 mA/cm² ; Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant CAC 400 mg).

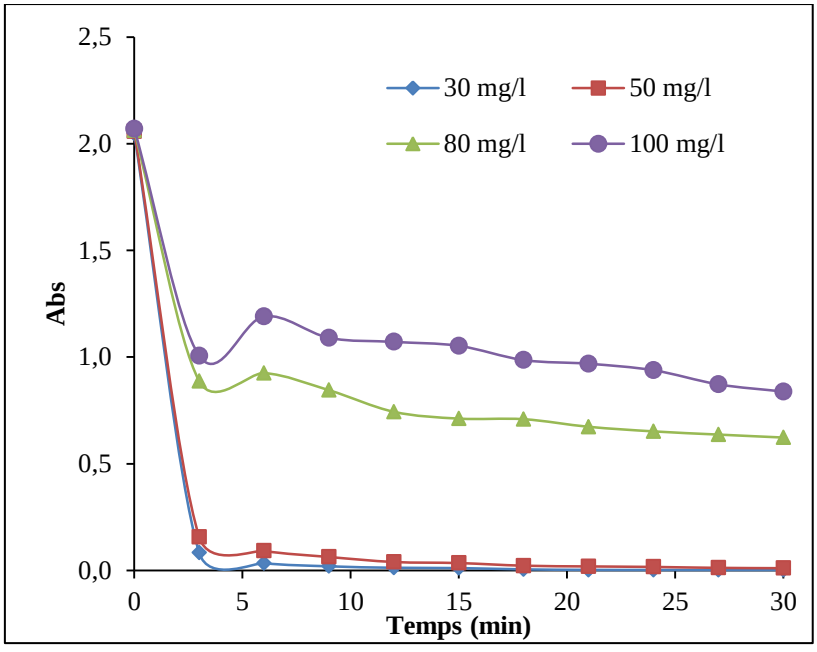


Figure 29 . Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes concentration du colorant étudié (Densité de courant 6 mA/cm² ; Espace inter électrodes 1 cm, électrolyte support NaCl à 20 mg/l; électrode Al/Al ; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant CAPPP 400 mg).

III.2.10. Effet de la nature des électrodes sur l'efficacité d'élimination par Electrocoagulation / Adsorption

La nature des électrodes est l'un des facteurs les plus importants qui peut affecter l'efficacité du traitement par la technique électrochimique d'électrocoagulation[82], ainsi que le traitement par combinaison entre l'EC et l'adsorption, pour cela, il est tenté de tester plusieurs couples (Al-Al), (Zn-ZN), (Inox-Inox) et (Fe-Fe) dans le système de traitement combiné d'EC/Adsorption, les expériences ont été réalisées avec les conditions optimales de densité de courant, conductivité électrique, espace inter-électrodes, quantité d'adsorbant…etc. Les résultats sont illustrés dans la **figure 30**.

La performance d'élimination de la coloration par la combinaison d'EC / Adsorption a été contrôlée à une densité de courant de 6 mA/cm², 1 cm d'espace inter-électrodes, 20 mg/l de NaCl comme électrolyte support, et 400 mg de CAPPP comme adsorbant. On peut constater que l'absorbance décroît avec le temps pour les couples testes, mais les électrodes en aluminium ont un atout considérable par rapport aux autres couples, car les flocs alumineux formés peuvent piéger efficacement des micropolluants. Par contre, les hydroxydes de fer ont une excellente capacité d'adsorption complémentaire.

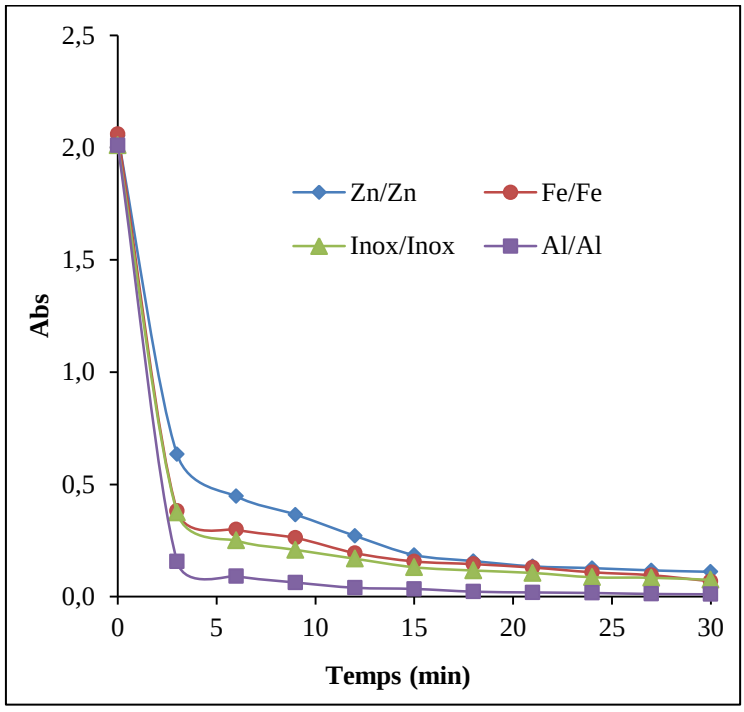


Figure 30 . Évolution de l'absorbance du colorant étudié en fonction du temps avec différentes natures d'électrodes (Densité de courant : 6 mA/cm², Espace inter électrodes 1 cm,

électrolyte support NaCl à 20 mg/l; T = 24°C ± 1 ; Agitation = 200 rpm pendant 30 min ; Quantité de l'adsorbant CAPPP 400 mg).

Comme nous avons indiqué auparavant, la combinaison entre l'EC et l'adsorption est très importantes pour l'élimination de certains polluants des eaux grâce aux multiples phénomènes mises en jeu dans la solution[83]. Cependant, ce qui importe le plus, c'est que l'électrocoagulation produit des coagulants in situ par dissolution anodique (Al^{3+} et Fe^{3+}), qui réagissent avec les hydroxydes (OH^-) pour former les hydroxydes métallique qui agglomèrent les polluants, ainsi, l'adsorption qui assure le piégeage des polluants sur la surface du matériaux CAPPP. D'autre part, la nature des électrodes à des effets directs sur le type de coagulant forme, le potentiel électrochimique, la cinétique de corrosion et de dissolution, ainsi la durabilité et la résistance à la corrosion[84]. C'est pour ces raisons que l'efficacité d'élimination de la coloration est influencée par la nature des électrodes, de ce fait, les matériaux solubles tels que l'aluminium ou fer, sont généralement les mieux choisies pour leur capacité élevée de production des coagulants, qui favorisent l'adsorption par formation de flocs actifs, le choix est également influencé par le type et la concentration de polluant, le pH du milieu et le coût des électrodes[85].

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'étudier et de démontrer l'intérêt de la combinaison de l'électrocoagulation et de l'adsorption pour le traitement et l'élimination de la couleur d'une eau (présence de molécules organiques en solution)."

La méthode d'électrocoagulation a été étudiée en combinaison avec l'adsorption comme alternative de traitement physico-électrochimique des eaux usées. Cette approche, à la fois fiable et efficace, vise à réduire la concentration en matières organiques solubles, ainsi qu'à assurer la dégradation et l'élimination de la couleur des effluents. L'étude met en évidence un ensemble de mécanismes impliqués dans le processus d'élimination de polluants potentiellement dangereux, en raison de leur impact nocif sur les milieux aquatiques récepteurs.

L'utilisation combinée de l'électrocoagulation et de l'adsorption a permis de réduire efficacement la coloration des eaux traitées, bien que chaque procédé présente une efficacité différente. Cette observation justifie l'intérêt d'optimiser leur synergie. L'étude d'optimisation s'appuie sur l'analyse de l'influence de plusieurs paramètres réactionnels clés, tels que la densité de courant, le type et la quantité d'adsorbant, ainsi que la concentration initiale en colorant, qui jouent un rôle déterminant dans le mécanisme de décoloration.

Les résultats des mesures d'absorbance du colorant, effectuées avant, pendant et après le traitement, permettent de conclure que l'application de cette combinaison de procédés conduit à des rendements d'élimination très satisfaisants (>99 %) avec l'adsorbant CAPPP, dans les conditions suivantes : concentration initiale en colorant de 50 mg/L, densité de courant de 6 mA/cm², pH initial de 6,1, dose d'adsorbant de 400 mg, et temps de traitement de 30 minutes. Par ailleurs, une efficacité supérieure à 90 % a également été obtenue avec le même système de traitement et les mêmes conditions opératoires, en utilisant cette fois l'adsorbant CAPF.

[1] F. Byoud *et al.*, « Electrocoagulation treatment of the food dye waste industry: Theoretical and experimental study », *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 8, n° 12, p. 4301‑4312, oct. 2017, doi: 10.26872/jmes.2017.8.12.453.

[2] V. Gbohaida *et al.*, « Etude de la qualité physico-chimique de l'eau de boisson dans deux localités du Bénin: Cotonou et Dassa-Zoumè », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 10, n° 1, p. 422, août 2016, doi: 10.4314/ijbcs.v10i1.32.

[3] M. Dettori, A. Arghittu, G. Deiana, P. Castiglia, et A. Azara, « The revised European Directive 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption. A step forward in risk assessment, consumer safety and informative communication », *Environ. Res.*, vol. 209, p. 112773, juin 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.112773.

[4] M. S. Makuei et N. Peleato, « Manipulation of particle microorganism association for improved UV disinfection of surface waters », *Sci. Rep.*, vol. 15, n° 1, p. 17798, mai 2025, doi: 10.1038/s41598-025-01101-3.

[5] J. Järvisalo et N. E. Saris, « Action of propranolol on mitochondrial functions--effects on energized ion fluxes in the presence of valinomycin », *Biochem. Pharmacol.*, vol. 24, n° 18, p. 1701‑1705, sept. 1975, doi: 10.1016/0006-2952(75)90009-x.

[6] K. E. Trenberth, J. T. Fasullo, et J. Kiehl, « Earth's Global Energy Budget », *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 90, n° 3, p. 311‑324, mars 2009, doi: 10.1175/2008BAMS2634.1.

[7] C. Le Quéré *et al.*, « Global Carbon Budget 2017 », *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 10, n° 1, p. 405‑448, mars 2018, doi: 10.5194/essd-10-405-2018.

[8] Laidia ZERKAOUI, M. BENSLIMANE, HAMIMED Abderrahmane, et Hadj BETICHA, « Adaptation Du Système D'Irrigation Dans Les Périmètres Agricoles Par Modélisation Du Tour D'Eau, Cas De Habra (Nord-Ouest Algérien) », juin 2017, doi: 10.5281/ZENODO.809967.

[9] L. Ritter, Keith Solomon, Paul Sibley, « SOURCES, PATHWAYS, AND RELATIVE RISKS OF CONTAMINANTS IN SURFACE WATER AND GROUNDWATER: A PERSPECTIVE PREPARED FOR THE WALKERTON INQUIRY », *J. Toxicol. Environ. Health A*, vol. 65, n° 1, p. 1‑142, janv. 2002, doi: 10.1080/152873902753338572.

[10] I. Hespanhol et A. M. E. Prost, « Who guidelines and national standards for reuse and water quality », *Water Res.*, vol. 28, n° 1, p. 119‑124, janv. 1994, doi: 10.1016/0043-1354(94)90125-2.

[11] O. Adedayo, S. Javadpour, C. Taylor, W. A. Anderson, et M. Moo-Young, « Decolourization and Detoxification of Methyl Red by Aerobic Bacteria from A Wastewater Treatment Plant », *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 20, n° 6, p. 545‑550, 2004, doi: 10.1023/B:WIBI.0000043150.37318.5f.

[12] P. K. Mondal et B. Chauhan, « Biodegradation of Azo Dyes from Wastewater », in *Environmental Chemistry for a Sustainable World*, E. Lichtfouse, J. Schwarzbauer, et D. Robert, Éd., in Environmental Chemistry for a Sustainable World. , Dordrecht: Springer Netherlands, 2012, p. 255‑275. doi: 10.1007/978-94-007-2439-6_6.

[13] F. C. R. Costa, F. S. L. Brito, M. J. R. De Grandi, et J. F. S. Daniel, « White Rot Fungi for Biodegradation of Dyes: Potential for Industrial Uses - A Review », *J. Braz. Chem. Soc.*, 2025, doi: 10.21577/0103-5053.20250024.

[14] T. Thiemann, Y. Tanaka, et J. Iniesta, « Brominated Thiophenes as Precursors in the Preparation of Brominated and Arylated Anthraquinones », *Molecules*, vol. 14, n° 3, p. 1013‑1031, mars 2009, doi: 10.3390/molecules14031013.

[15] A. Lopez-Montes, A. L. Dupont, N. Tello Burgos, T. Espejo, et R. Blanc, « Identification of colorant materials after an artificially aged process », *Opt. Pura Apl.*, vol. 49, n° 3, p. 143‑153, sept. 2016, doi: 10.7149/OPA.49.3.49006.

[16] K. S, B. Sam, L. George, S. Y. N, et A. Varghese, « Fluorescein Based Fluorescence Sensors for the Selective Sensing of Various Analytes », *J. Fluoresc.*, vol. 31, n° 5, p. 1251‑1276, sept. 2021, doi: 10.1007/s10895-021-02770-9.

[17] I. J. Enyedy, S. Sakamuri, W. A. Zaman, K. M. Johnson, et S. Wang, « Pharmacophore-Based discovery of substituted pyridines as novel dopamine transporter inhibitors », *Bioorg. Med. Chem. Lett.*, vol. 13, n° 3, p. 513‑517, févr. 2003, doi: 10.1016/S0960-894X(02)00943-5.

[18] Z. Liu, D. Wang, X. Sun, Q. Sun, Y. Wu, et Y. Xu, « Construction and Characterization of Phthalocyanine-Loaded Particles of Curdlan and Their Photosensitivity », *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 19, n° 11, p. 3323, oct. 2018, doi: 10.3390/ijms19113323.

[19] F. Mumtaz, B. Li, M. R. Al Shehhi, X. Feng, et K. Wang, « Treatment of phenolic-wastewater by hybrid technologies: A review », *J. Water Process Eng.*, vol. 57, p. 104695, janv. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2023.104695.

[20] K. Papson, S. Stachura, L. Boralsky, et J. Allison, « Identification of Colorants in Pigmented Pen Inks by Laser Desorption Mass Spectrometry* », *J. Forensic Sci.*, vol. 53, n° 1, p. 100‑106, janv. 2008, doi: 10.1111/j.1556-4029.2007.00599.x.

[21] T. Kahn, J. Bosch, M. F. Levitt, et M. H. Goldstein, « Effect of sodium nitrate loading on electrolyte transport by the renal tubule », *Am. J. Physiol.*, vol. 229, n° 3, p. 746‑753, sept. 1975, doi: 10.1152/ajplegacy.1975.229.3.746.

[22] S. E. Lipshultz *et al.*, « Long-term Cardiovascular Toxicity in Children, Adolescents, and Young Adults Who Receive Cancer Therapy: Pathophysiology, Course, Monitoring, Management, Prevention, and Research Directions: A Scientific Statement From the American Heart Association », *Circulation*, vol. 128, n° 17, p. 1927‑1995, oct. 2013, doi: 10.1161/CIR.0b013e3182a88099.

[23] L. C. D'Souza, J. G. Paithankar, H. Stopper, A. Pandey, et A. Sharma, « Environmental Chemical-Induced Reactive Oxygen Species Generation and Immunotoxicity: A Comprehensive Review », *Antioxid. Redox Signal.*, vol. 40, n° 10‑12, p. 691‑714, avr. 2024, doi: 10.1089/ars.2022.0117.

[24] A. Schmoldt, H. F. Benthe, et G. Haberland, « Digitoxin metabolism by rat liver microsomes », *Biochem. Pharmacol.*, vol. 24, n° 17, p. 1639‑1641, sept. 1975.

[25] L. Finch et P. E. Hicks, « Proceedings: Central hypertensive action of histamine in rats », *Br. J. Pharmacol.*, vol. 55, n° 2, p. 274P-275P, oct. 1975.

[26] Y. W. Chow, R. Pietranico, et A. Mukerji, « Studies of oxygen binding energy to hemoglobin molecule », *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 66, n° 4, p. 1424‑1431, oct. 1975, doi: 10.1016/0006-291x(75)90518-5.

[27] A. M. Yusof, N. F. Yanta, et A. K. H. Wood, « The use of bivalves as bio-indicators in the assessment of marine pollution along a coastal area », *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 259, n° 1, p. 119‑127, 2004, doi: 10.1023/B:JRNC.0000015816.16869.6f.

[28] G. Pérez-Lucas, M. Martínez-Menchón, N. Vela, et S. Navarro, « Removal assessment of disinfection by-products (DBPs) from drinking water supplies by solar heterogeneous photocatalysis: A case study of trihalomethanes (THMs) », *J. Environ. Manage.*, vol. 321, p. 115936, nov. 2022, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.115936.

[29] A. Hursthouse, « Environmental Impact of the Chemical Industry », in *An Introduction to Industrial Chemistry*, A. Heaton, Éd., Dordrecht: Springer Netherlands, 1996, p. 251‑288. doi: 10.1007/978-94-011-0613-9_10.

[30] P. P. Das, M. Sharma, et M. K. Purkait, « Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review », *Sep. Purif. Technol.*, vol. 292, p. 121058, juill. 2022, doi: 10.1016/j.seppur.2022.121058.

[31] A. Dąbrowski, « Adsorption — from theory to practice », *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 93, n° 1‑3, p. 135‑224, oct. 2001, doi: 10.1016/S0001-8686(00)00082-8.

[32] A. O. Alghamdi, N. M. Gonzalez, et F. M. Geiger, « Temperature Dependence of Proton Coverage and the Total Potential at Fused Silica:Water Interfaces from Phase-Resolved Nonlinear Optics », *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 147, n° 17, p. 14308‑14315, avr. 2025, doi: 10.1021/jacs.4c18310.

[33] M. Wahlgren, T. Arnebrant, et I. Lundström, « The Adsorption of Lysozyme to Hydrophilic Silicon Oxide Surfaces: Comparison between Experimental Data and Models for Adsorption Kinetics », *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 175, n° 2, p. 506‑514, nov. 1995, doi: 10.1006/jcis.1995.1482.

[34] P. D. Mier et J. J. van den Hurk, « Lysosomal hydrolases of the epidermis. 2. Ester hydrolases », *Br. J. Dermatol.*, vol. 93, n° 4, p. 391‑398, oct. 1975, doi: 10.1111/j.1365-2133.1975.tb06512.x.

[35] W. Silen, T. E. Machen, et J. G. Forte, « Acid-base balance in amphibian gastric mucosa », *Am. J. Physiol.*, vol. 229, n° 3, p. 721‑730, sept. 1975, doi: 10.1152/ajplegacy.1975.229.3.721.

[36] K. G. Bhattacharyya et S. S. Gupta, « Adsorption of Fe(III) from water by natural and acid activated clays: Studies on equilibrium isotherm, kinetics and thermodynamics of interactions », *Adsorption*, vol. 12, n° 3, p. 185‑204, mai 2006, doi: 10.1007/s10450-006-0145-0.

[37] F. C. Hartman, G. M. LaMuraglia, Y. Tomozawa, et R. Wolfenden, « The influence of pH on the interaction of inhibitors with triosephosphate isomerase and determination of the pKa of the active-site carboxyl group », *Biochemistry*, vol. 14, n° 24, p. 5274‑5279, déc. 1975, doi: 10.1021/bi00695a007.

[38] B. Noroozi et G. A. Sorial, « Applicable models for multi-component adsorption of dyes: A review », *J. Environ. Sci.*, vol. 25, n° 3, p. 419‑429, mars 2013, doi: 10.1016/S1001-0742(12)60194-6.

[39] N. V. Beck, S. E. Meech, P. R. Norman, et L. A. Pears, « Characterisation of surface oxides on carbon and their influence on dynamic adsorption », *Carbon*, vol. 40, n° 4, p. 531‑540, avr. 2002, doi: 10.1016/S0008-6223(01)00144-0.

[40] H. Ji, Y. Mao, et H. Su, « Effects of organic micromolecules in bituminous coal on its microscopic pore characteristics », *Fuel*, vol. 262, p. 116529, févr. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116529.

[41] P. Sinha, S. Banerjee, et K. K. Kar, « Characteristics of Activated Carbon », in *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I*, vol. 300, K. K. Kar, Éd., in Springer Series in

Materials Science, vol. 300. , Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 125‑154. doi: 10.1007/978-3-030-43009-2_4.

[42] R. Ganjoo, S. Sharma, A. Kumar, et M. M. A. Daouda, « Activated Carbon: Fundamentals, Classification, and Properties », in *Activated Carbon*, 1re éd., C. Verma et M. A. Quraishi, Éd., The Royal Society of Chemistry, 2023, p. 1‑22. doi: 10.1039/BK9781839169861-00001.

[43] M. G. Plaza, A. S. González, J. J. Pis, F. Rubiera, et C. Pevida, « Production of microporous biochars by single-step oxidation: Effect of activation conditions on CO2 capture », *Appl. Energy*, vol. 114, p. 551‑562, févr. 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.058.

[44] A. Rabajczyk, M. Zielecka, et D. Małozięć, « Hazards Resulting from the Burning Wood Impregnated with Selected Chemical Compounds », *Appl. Sci.*, vol. 10, no 17, p. 6093, sept. 2020, doi: 10.3390/app10176093.

[45] V. Kuokkanen, T. Kuokkanen, J. Rämö, et U. Lassi, « Recent Applications of Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater—A Review », *Green Sustain. Chem.*, vol. 03, no 02, p. 89‑121, 2013, doi: 10.4236/gsc.2013.32013.

[46] A. M. Elgarahy *et al.*, « A review on the synergistic efficacy of sonication-assisted water treatment process with special attention given to microplastics », *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 206, p. 524‑552, juin 2024, doi: 10.1016/j.cherd.2024.05.027.

[47] F. A. Osra, « Evaluation the effectiveness of the electrocoagulation technique for seawater desalination », *J. Umm Al-Qura Univ. Eng. Archit.*, vol. 16, no 2, p. 265‑272, juin 2025, doi: 10.1007/s43995-025-00105-4.

[48] M. López-Guzmán, M. A. Flores-Hidalgo, et L. Reynoso-Cuevas, « Electrocoagulation Process: An Approach to Continuous Processes, Reactors Design, Pharmaceuticals Removal, and Hybrid Systems—A Review », *Processes*, vol. 9, no 10, p. 1831, oct. 2021, doi: 10.3390/pr9101831.

[49] W.-H. Lee et J.-O. Kim, « Enhanced ballasted flocculation process using magnetite-based ballast materials and a vortex flash mixer for drinking water treatment in response to both flood and dry seasons », *Chem. Eng. J.*, vol. 474, p. 145589, oct. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.145589.

[50] Š. Zezulka, B. Maršálek, E. Maršálková, K. Odehnalová, M. Pavlíková, et A. Lamaczová, « Suspended Particles in Water and Energetically Sustainable Solutions of Their Removal—A Review », *Processes*, vol. 12, no 12, p. 2627, nov. 2024, doi: 10.3390/pr12122627.

[51] J. K. Martin, M. G. Luthra, M. A. Wells, R. P. Watts, et D. J. Hanahan, « Phospholipase A2 as a probe of phospholipid distribution in erythrocyte membranes. Factors influencing the apparent

specificity of the reaction », *Biochemistry*, vol. 14, n° 25, p. 5400‑5408, déc. 1975, doi: 10.1021/bi00696a003.

[52] B. C. Kim, J. Hong, G. G. Wallace, et H. S. Park, « Recent Progress in Flexible Electrochemical Capacitors: Electrode Materials, Device Configuration, and Functions », *Adv. Energy Mater.*, vol. 5, n° 22, p. 1500959, nov. 2015, doi: 10.1002/aenm.201500959.

[53] J. Kim, C. M. Chung, K. Cho, et T. H. Chung, « Revisiting Gas to Solids Ratio for Activated Sludge Clarification by Electrolytic Hydrogen Bubbles: Theoretical and Experimental Evaluations », *Catalysts*, vol. 11, n° 11, p. 1413, nov. 2021, doi: 10.3390/catal11111413.

[54] F. B. Alhasawi et J. V. Milanovic, « Techno-Economic Contribution of FACTS Devices to the Operation of Power Systems With High Level of Wind Power Integration », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, n° 3, p. 1414‑1421, août 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2186594.

[55] P. Cañizares, C. Jiménez, F. Martínez, M. A. Rodrigo, et C. Sáez, « The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters », *J. Hazard. Mater.*, vol. 163, n° 1, p. 158‑164, avr. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.06.073.

[56] P. Cañizares, C. Jiménez, F. Martínez, M. A. Rodrigo, et C. Sáez, « The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters », *J. Hazard. Mater.*, vol. 163, n° 1, p. 158‑164, avr. 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.06.073.

[57] U. N. Wiesmann, S. DiDonato, et N. N. Herschkowitz, « Effect of chloroquine on cultured fibroblasts: release of lysosomal hydrolases and inhibition of their uptake », *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 66, n° 4, p. 1338‑1343, oct. 1975, doi: 10.1016/0006-291x(75)90506-9.

[58] V. K. Gupta, R. Jain, A. Nayak, S. Agarwal, et M. Shrivastava, « Removal of the hazardous dye—Tartrazine by photodegradation on titanium dioxide surface », *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 31, n° 5, p. 1062‑1067, juill. 2011, doi: 10.1016/j.msec.2011.03.006.

[59] D.-T. Wu, W.-X. Li, J.-J. Wan, Y.-C. Hu, R.-Y. Gan, et L. Zou, « A Comprehensive Review of Pea (Pisum sativum L.): Chemical Composition, Processing, Health Benefits, and Food Applications », *Foods*, vol. 12, n° 13, p. 2527, juin 2023, doi: 10.3390/foods12132527.

[60] P. Gmaj, A. Hoppe, S. Angielski, J. Rogulski, et M. Metler, « Effects of maleate on renal reabsorption of bicarbonate », *Curr. Probl. Clin. Biochem.*, vol. 4, p. 101‑105, 1975.

[61] H. W. Bonner, C. A. Tate, et C. K. Buffington, « Changes in erythrocyte 2,3 diphosphoglycerate in women following short term maximal exercise », *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 34, n° 4, p. 227‑232, déc. 1975, doi: 10.1007/BF00999936.

[62] B. Bera, S. Saha Chowdhury, V. R. Sonawane, et S. De, « High capacity aluminium substituted hydroxyapatite incorporated granular wood charcoal (Al-HApC) for fluoride removal from

aqueous medium: Batch and column study », *Chem. Eng. J.*, vol. 466, p. 143264, juin 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.143264.

[63] E. Devred, S. Sathyendranath, V. Stuart, et T. Platt, « A three component classification of phytoplankton absorption spectra: Application to ocean-color data », *Remote Sens. Environ.*, vol. 115, n° 9, p. 2255‑2266, sept. 2011, doi: 10.1016/j.rse.2011.04.025.

[64] A. G. Mann, C. C. Tam, C. D. Higgins, et L. C. Rodrigues, « The association between drinking water turbidity and gastrointestinal illness: a systematic review », *BMC Public Health*, vol. 7, n° 1, p. 256, déc. 2007, doi: 10.1186/1471-2458-7-256.

[65] « Immune response to BCG and typhoid vaccines in nutritionally deprived mice », *Nutr. Rev.*, vol. 36, n° 10, p. 311‑312, oct. 1978, doi: 10.1111/j.1753-4887.1978.tb03691.x.

[66] R. D. Dennis, « Insect morphogenetic hormones and developmental mechanisms in the nematode, Nematospiroides dubius », *Comp. Biochem. Physiol. A*, vol. 53, n° 1, p. 53‑56, janv. 1976, doi: 10.1016/s0300-9629(76)80009-6.

[67] R. B. Tesh et L. Rosen, « Failure of rubella virus to replicate in mosquitos », *Intervirology*, vol. 5, n° 3‑4, p. 216‑219, 1975, doi: 10.1159/000149898.

[68] D. G. Bassyouni, H. A. Hamad, E.-S. Z. El-Ashtoukhy, N. K. Amin, et M. M. A. El-Latif, « Comparative performance of anodic oxidation and electrocoagulation as clean processes for electrocatalytic degradation of diazo dye Acid Brown 14 in aqueous medium », *J. Hazard. Mater.*, vol. 335, p. 178‑187, août 2017, doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.045.

[69] L. K. Wang, M.-H. S. Wang, N. K. Shammas, et H. H. Hahn, « Physicochemical Treatment Consisting of Chemical Coagulation, Precipitation, Sedimentation, and Flotation », in *Integrated Natural Resources Research*, vol. 22, L. K. Wang, M.-H. S. Wang, et Y.-T. Hung, Éd., in Handbook of Environmental Engineering, vol. 22. , Cham: Springer International Publishing, 2021, p. 265‑397. doi: 10.1007/978-3-030-61002-9_6.

[70] W. M. Stigliani, « Changes in valued ?Capacities? of soils and sediments as indicators of nonlinear and time-delayed environmental effects », *Environ. Monit. Assess.*, vol. 10, n° 3, p. 245‑307, mai 1988, doi: 10.1007/BF00395083.

[71] A. Azapagic, « Life cycle assessment and its application to process selection, design and optimisation », *Chem. Eng. J.*, vol. 73, n° 1, p. 1‑21, avr. 1999, doi: 10.1016/S1385-8947(99)00042-X.

[72] H. Sun, C. Wu, B. Shen, X. Zhang, Y. Zhang, et J. Huang, « Progress in the development and application of CaO-based adsorbents for CO2 capture—a review », *Mater. Today Sustain.*, vol. 1‑2, p. 1‑27, déc. 2018, doi: 10.1016/j.mtsust.2018.08.001.

[73] J. Järvisalo et N. E. Saris, « Action of propranolol on mitochondrial functions--effects on energized ion fluxes in the presence of valinomycin », *Biochem. Pharmacol.*, vol. 24, n° 18, p. 1701‑1705, sept. 1975, doi: 10.1016/0006-2952(75)90009-x.

[74] G. A. P. Mateus *et al.*, « Evaluation of a magnetic coagulant based on Fe_3O_4 nanoparticles and *Moringa oleifera* extract on tartrazine removal: coagulation-adsorption and kinetics studies », *Environ. Technol.*, vol. 41, n° 13, p. 1648‑1663, juin 2020, doi: 10.1080/09593330.2018.1543358.

[75] S. Lacks et M. Neuberger, « Membrane location of a deoxyribonuclease implicated in the genetic transformation of Diplococcus pneumoniae », *J. Bacteriol.*, vol. 124, n° 3, p. 1321‑1329, déc. 1975, doi: 10.1128/jb.124.3.1321-1329.1975.

[76] J. W. Severinghaus, « Analog computer for base excess and HCO3-from pH and PCO2 electrodes », *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 23, n° 1, p. 77‑81, janv. 1976, doi: 10.1109/tbme.1976.324622.

[77] B. A. Carroll, « Biliary cystadenoma and cystadenocarcinoma: gray scale ultrasound appearance », *J. Clin. Ultrasound JCU*, vol. 6, n° 5, p. 337‑340, oct. 1978, doi: 10.1002/jcu.1870060513.

[78] M. L. Ledbetter et R. D. Hotchkiss, « Recombination as a requirement for segregation of a partially diploid mutant of Pneumococcus », *Genetics*, vol. 80, n° 4, p. 679‑694, août 1975, doi: 10.1093/genetics/80.4.679.

[79] J. S. Price et R. Storck, « Production, purification, and characterization of an extracellular chitosanase from Streptomyces », *J. Bacteriol.*, vol. 124, n° 3, p. 1574‑1585, déc. 1975, doi: 10.1128/jb.124.3.1574-1585.1975.

[80] V. Riebeling, R. K. Thauer, et K. Jungermann, « The internal-alkaline pH gradient, sensitive to uncoupler and ATPase inhibitor, in growing Clostridium pasteurianum », *Eur. J. Biochem.*, vol. 55, n° 2, p. 445‑453, juill. 1975, doi: 10.1111/j.1432-1033.1975.tb02181.x.

[81] M. Ardenne et P. G. Reitnauer, « [Demonstration of tumor inhibiting properties of a strongly immunostimulating low-molecular weight substance. Comparative studies with ifosfamide on the immuno-labile DS carcinosarcoma. Stimulation of the autoimmune activity for approx. 20 days by BA 1, a N-(2-cyanoethylene)-urea. Novel prophylactic possibilities] », *Arzneimittelforschung.*, vol. 25, n° 9, p. 1369‑1379, sept. 1975.

[82] A. Storesund et K. B. Helle, « Practolol, caffeine and calcium in the regulation of mechanical activity of the cardiac ventricle in Myxine glutinosa (L.) », *Comp. Biochem. Physiol. C*, vol. 52, n° 1, p. 17‑22, oct. 1975, doi: 10.1016/0306-4492(75)90006-4.

[83] H. Okamura, T. Okazaki, et A. Nakajima, « [In vitro studies on human ovarian contractility (author's transl)] », *Nihon Funin Gakkai Zasshi*, vol. 20, n° 4, p. 38‑43, oct. 1975.

[84] R. Chilla et R. Arold, « [Parotid secretion and its pharmacologically induced variants (author's transl)] », *HNO*, vol. 23, n° 8, p. 229‑232, août 1975.

[85] W. A. Hendrickson et K. B. Ward, « Atomic models for the polypeptide backbones of myohemerythrin and hemerythrin », *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, vol. 66, n° 4, p. 1349‑1356, oct. 1975, doi: 10.1016/0006-291x(75)90508-2.

Résumé

La caractérisation des eaux résiduaires colorées issues des industries agroalimentaires, à travers l'analyse de plusieurs paramètres physico-chimiques et microbiologiques, a mis en évidence la nécessité de leur traitement. Dans cette étude, nous avons opté pour un système de traitement physico-électrochimique combinant électrocoagulation et adsorption, reconnu pour sa simplicité de mise en œuvre et son faible coût. Étant donné la complexité du suivi de l'efficacité du traitement à travers l'ensemble des paramètres, l'absorbance a été choisie comme indicateur représentatif de la décoloration des eaux étudiées. Le système adopté a permis d'atteindre un rendement d'élimination supérieur à 99 %, dans les conditions suivantes : utilisation de 40 mg d'adsorbant (CAPPP), une densité de courant de 6 mA/cm² avec des électrodes en aluminium, une concentration initiale en colorant de 50 mg/L, un pH de 6,1 et un temps de traitement de 30 minutes. Par ailleurs, une optimisation plus poussée de cette combinaison de procédés nécessite le suivi rigoureux de certains facteurs clés, tels que la demande chimique en oxygène (DCO), la concentration en ions Al^{3+} , ainsi que la consommation énergétique.
Mots clés : eaux usées, électrocoagulation, adsorption, CAPPP, CAPF, CAC, tartrazine, colorants alimentaires.

Abstract

Characterization of colored wastewater from agro-food industries based on various physical, chemical, and microbiological parameters clearly demonstrated the need for treatment. In this study, a physicochemical treatment system combining electrocoagulation and adsorption was selected due to its simplicity and low cost. Since it is difficult to monitor the treatment performance across all parameters, absorbance was chosen as a reliable indicator of color removal. The system achieved a removal efficiency greater than 98% under the following conditions: 40 mg of adsorbent (CAPPP), a current density of 6 mA/cm² using aluminum electrodes, an initial dye concentration of 50 mg/L, pH 6.1, and a treatment time of 30 minutes. For advanced optimization of this hybrid process, it is also essential to monitor key parameters such as chemical oxygen demand (COD), aluminum ion concentration, and energy consumption.
Keywords:

Wastewater, tartrazine (E102), electrocoagulation, adsorption, activated carbon, bio-adsorbent, hybrid treatment, food colorants..

الملخص

أظهر تحليل مياه الصرف الملونة الناتجة عن الصناعات الغذائية، من خلال مجموعة من المؤشرات الفيزيائية والكيميائية والميكروبيولوجية، الحاجة الضرورية إلى معالجتها. وفي إطار هذه الدراسة، تم اختيار نظام معالجة فيزيائي-كيميائي يجمع بين التخثير الكهربائي والامتزاز، نظرًا لبساطته وتكلفته المنخفضة. ونظرًا لصعوبة تتبع كفاءة المعالجة من خلال جميع المؤشرات، فقد تم اعتماد الامتصاص البصري كمؤشر فعّال لتقييم إزالة اللون.

حقق النظام معدل إزالة تجاوز 98% في ظل الشروط التالية: استخدام 40 ملغ من الممتز (CAPPP) ، كثافة تيار قدرها 6 مللي أمبير/سم² باستخدام أقطاب من الألمنيوم، تركيز ابتدائي للمُلوِّن قدره 50 ملغ/لتر، درجة حموضة (pH) تبلغ 6.1، ومدة معالجة قدرها 30 دقيقة. ومن أجل تحسين هذه العملية بشكل أكثر تقدمًا، من الضروري مراقبة بعض المؤشرات الأساسية مثل الطلب الكيميائي على الأوكسجين(DCO) ، تركيز أيونات الألمنيوم، واستهلاك الطاقة.
الكلمات المفتاحية: المياه المستعملة، التارترازين ((E102، التخثير الكهربائي، الامتزاز، الفحم النشط، الممتزات الحيوية، المعالجة الهجينة.