



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES



N^o d'ordre : M2/GPE/2019

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : GENIE DES PROCEDES

Option: GENIE DES PROCEDES DE L'ENVIRONNEMENT

Thème

**Dégradation du colorant AG25 dans l'eau en présence
de nano-Ferrite-Cobalt par un procédé photocatalytique
propre**

Présenté par :

BENBESSEKRI IBTISSEM

Soutenue le : 16/07/ 2019 devant le jury composé de :

Président : M.R. GHEZZAR

Professeur Université de Mostaganem

Examineur : S.I. ABDELLI

MCB Université de Mostaganem

Rapporteur : F. ABDELMALEK

Professeur Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2018/2019.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier **Dieu tout puissant**, De m'avoir donné la santé, la volonté et la patience pour mener à terme mon projet de fin d'étude.

Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur Professeur **F. ABDELMALEK** qui m'a guidé avec ses précieux conseils et suggestions, ainsi qu'à la confiance qu'elle m'a témoigné pour hisser mon valeureux projet à bon terme.

Je remercie très sincèrement Monsieur le professeur émérite **A. ADDOU** de la faculté des sciences et de technologies pour l'aide et le soutien qu'il m'a apporté, on lui exprimant mes profonds respects.

Je tiens à gratifier les membres de jury Professeur **M.R. GHEZZAR** et madame **I.S.ABDELLI** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant de l'examiner.

Je ne saurais oublier tous les membres du laboratoire STEVA pour leurs encouragements et leur soutien et je remercie particulièrement Melle **F. DAMEN**, technicienne du laboratoire STEVA.

Enfin, je remercie toute les personnes qui ont participées de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes parents L'inspecteur de police **BENBESSEKRI AHMED** et Docteur **BENBESSEKRI FATIHA** qui m'ont toujours soutenu et encouragé tout au long de mes études.

A Mes frères **AHMED EL-AMINE** et **BELKACEM ABDEL-MADJID**, ma sœur **CHAHINEZ** et ma meilleur amie **ZAHIRA BENYOUB**.

A mon grand-père **MOULAY HASSAN** qui a toujours été mon exemple, Paix à son âme.

Et en fin a ceux qui son présent dans mon **cœur**.

Résumer

La décoloration du colorant acide vert 25 dans l'eau a été étudiée en présence de Nano-Ferrite-Cobalt. Ce matériau a été choisi pour ses propriétés ferrimagnétique, oxydante et photosensible. Le procédé photocatalytique hétérogène nous a permis d'obtenir une dégradation totale du colorant acide vert 25 par l'intervention des rayons UV provenant du soleil. L'interaction colorant- Nano-Ferrite-Cobalt suit le modèle cinétique de Langmuir-Hinshelwood, modèle exclusivement appliqué en photocatalyse en phase hétérogène. Les Nano-ferrites-Co excités par des rayons solaires font partie des procédés de dépollution propres.

تلخيص

تم فحص تلون صبغة الحمض الأخضر في الماء في وجود نانو-فريت-كوبالت. وقد تم اختيار هذه المواد لخصائصها المغناطيسية ، المؤكسدة وحساسة للضوء. أتاحت لنا عملية التحفيز الضوئي غير المتجانسة تحقيق تدهور كامل في صبغة الحمض الأخضر بواسطة الأشعة فوق البنفسجية من الشمس. يتبع تفاعل صبغ نانو-الفريت-الكوبالت النموذج الحركي لـ Langmuir-Hinshelwood ، وهو نموذج مطبق حصرياً في التحفيز الضوئي الطوري غير المتجانس. نانو-فيريتس-متحمس بالأشعة الشمسية هي جزء من عمليات إزالة التلوث النظيفة.

The abstrat

Discoloration of the green acid dye in water was investigated in the presence of Nano-Ferrite-Cobalt. This material has been chosen for its ferrimagnetic, oxidizing and photosensitive properties. The heterogeneous photocatalytic process allowed us to achieve complete degradation of the green acid dye by UV rays from the sun. The dye-Nano-Ferrite-Cobalt interaction follows the kinetic model of Langmuir-Hinshelwood, a model exclusively applied in heterogeneous phase photocatalysis. Nano-ferrites-Co excited by solar rays are part of clean depollution processes.

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre 01	
Généralités sur les colorants et la photocatalyse	
Introduction	03
I. GENERALITES SUR LES COLORANTS	03
I.1. Définition.....	03
I.2. Nature des colorants.....	03
I.2.1. Colorants naturels	04
I.2.2. Colorants synthétiques.....	04
I.3. Classification des colorants	04
I.3.1. Classification chimique	05
a. Colorants anthraquinoniques	05
b. Colorants azoïques	06
c. Colorants du diphenyl-méthane et du triphenylméthane	06
d. Colorants indigoïdes	06
e. Colorants nitrés et nitrosés.....	07
I.4. Photocatalyse	08
I.4.1. Photocatalyse en milieu hétérogène	09
I.4.2. Facteurs affectant la photocatalyse hétérogène	09
I.5. Applications de la photocatalyse	09
I.6. Les avantages et les inconvénients de la photocatalyse	09
I.6.1. Les avantages de la photocatalyse	09
I.6.2. Les inconvénients de la photocatalyse	10
Conclusion.....	11
Chapitre 02	
Généralités sur les ferrites	
Introduction.....	13
II. Généralités sur le magnétisme	13
II.1. Classes de matériaux magnétiques	13
II.2. Magnétisme des nanoparticules	14
II.2.1. Généralités	14
II.3. Les ferrites spinelle et leur propriétés magnétiques	14
II.3.1. Structure cristalline des ferrites spinelles	14
II.3.2. Distribution des cations dans les spinelles	14
II.4. Principales méthodes de synthèse des nano-ferrites	15
II.4.1. Méthode Co-précipitation	16
II.4.2. Méthode microémulsion	16
II.4.3. Méthode sol/gel	16
II.5. Techniques de caractérisation	18

II.5.1. Analyse thermogravimétrique (ATG).....	18
II.5.2. Diffraction des rayons X	18
II.5.3 Spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier	18
II.5.4. Microscopie électronique.....	19
II.5.5 Microscopie électronique à transmission	19
II.5.6. Microscopie électronique à balayage	19
II.6. Les domaines d'utilisation des ferrites	19
II.7. Les avantages des ferrites	20
II.8. Exemple d'application des ferrites	20
II.8.1. Photo-dégradation d'un colorant textile à l'aide de ferrites de spinelle hétérogènes recyclables magnétiquement.....	20
II.8.2. Activité photocatalytique de catalyseurs à base de ferrite de zinc de type nanostructure lors de la dégradation du vert malachite sous ultraviolets.....	21
II.8.3. Les adsorbants magnétiques à base de ferrite de spinelle.....	21
Conclusion.....	23
Chapitre 03	
Partie expérimentale	
Introduction	25
III.1 Polluant de L'étude.....	25
III.2 Structure et caractéristiques physico-chimiques	25
III.3 Utilisations	26
III.4 Préparation du matériau.....	26
III.5 Méthode d'analyse	27
III.5.1. Loi de BEER LAMBERT	27
III.5.2. Etablissement des courbes d'étalonnage de l'AG25.....	27
III.6. Photo-catalyse de l'AG25 en présence de Ferrites de cobalt II.....	28
III.6.1. Matériel et Méthodes.....	28
III.6.2 Dose et pH optimaux.....	29
III.5.3 Cinétique de la réaction photo-catalytique.....	32
III.6.3. Modélisation mathématique	33
Conclusion	35
Conclusion Générales	36

Introduction générale

De nos jours, l'eau est l'élément central de tous les processus socio-économiques, quel que soit le degré de développement de la société. L'augmentation des activités industrielles engendre une pression sur les réserves en eau douce de la planète

Le concept : mieux produire et moins polluer sont les défis auxquels sont confrontés les industriels de tout secteur.

Les rejets de l'industrie du cosmétique et pharmaceutique sont parmi les effluents toxiques qui constituent d'énormes nuisances pour la santé humaine, en particulier, les différents colorants qui sont utilisés en excès. De ce fait les eaux de rejets se trouvent fortement concentrées en colorants dont la faible biodégradabilité rend les traitements biologiques difficilement applicables, ce qui constitue une source de dégradation de l'environnement.

Différents types de colorants synthétiques apparaissent dans les effluents d'eaux usées des diverses industries par exemple, textile, papier, cuir, nourriture. Ces derniers sont connus pour être toxiques, mutagènes, cancérigènes, tératogènes, et leur libération dans l'environnement est une source de pollution non esthétique puisque l'existence de faibles concentrations de colorants sont clairement visibles surtout dans la coloration des eaux superficielles qui peut affecter l'activité photochimique du système aquatique en réduisant la pénétration de lumière. La mise au point de traitements appropriés pour la dégradation de colorants dans les effluents intéresse un grand nombre de chercheurs, des techniques sont proposées telles que la filtration, l'oxydation, l'adsorption, la photocatalyse etc.

L'objectif de cette étude est de montrer l'intérêt d'un procédé de traitement qui est la photocatalyse sur la dégradation d'un colorant anthraquinonique Acide vert 25 (AG25) utilisant des matériaux nouveaux : les nano-ferrites spinelle (NFS).

- Le premier chapitre aborde quelques généralités sur les colorants et leurs classifications ainsi qu'une étude bibliographique de la photocatalyse.
- La seconde partie est destinée au matériau nano-ferrite et ses caractérisations.

La troisième partie du travail concerne la partie expérimentale qui englobe les méthodes analytiques et les résultats obtenus lors du traitement du colorant AG25 par le procédé de la photocatalyse utilisant ce matériau nano-ferrite spinelle, ainsi que les discussions des résultats.

Enfin, en guise de conclusion, nous faisons quelques propositions et perspectives pour la poursuite de notre travail dans ce domaine.



Généralités sur les colorants et la photocatalyse

Chapitre 01



Introduction

Le traitement des eaux contaminées par les colorants connaît ces dernières années un grand essor. En effet, les colorants de nature organique sont des constituants largement utilisés dans le textile, le papier, les industries alimentaires et cosmétiques et constituent un des principaux groupes de polluants dans les eaux usées. Certains de ces colorants sont transformés en intermédiaires qui provoquent des effets nocifs sur la vie aquatique même à très faible concentration. Ces colorants peuvent subir des décolorations anaérobies qui sont cancérigènes dans la nature, susceptibles de provoquer des problèmes d'allergies [1].

Il est donc très important de protéger l'environnement de ces contaminants, c'est dans ce contexte que différentes méthodes ont été utilisées pour l'élimination de la couleur des effluents textiles telles que l'adsorption, précipitation, extraction à l'air, la floculation, l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Parmi ces diverses méthodes de traitement utilisées pour dégrader ces polluants réfractaires, le processus de la photo-catalyse [2] qui est réalisée avec des matériaux semi-conducteurs comme le TiO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , Cd , Gap et le ZnS [3.4].

Dans ce qui suit, nous allons aborder des notions sur les colorants puisque le polluant de notre étude appartient à cette catégorie de molécule. Nous allons également présenter la photocatalyse qui rejoint parfaitement le principe de la méthode de traitement employé dans notre travail.

I. Généralités sur les colorants

I.1. Définition

Un colorant est une substance chimique colorée capable de transmettre sa coloration à d'autres corps qui sont des composés organiques insaturés et aromatiques. Les premières matières colorantes étaient d'origines végétales (garance, indigo, gaude) ou même animales (carmin tiré de la cochenille). A l'heure actuelle presque la totalité des matières colorantes employées sont des dérivées des hydrocarbures contenus dans le goudron de houille [5].

I.2. Nature des colorants

Colorants : composés chimiques colorés, naturels ou synthétiques, en général organiques, qui ont la propriété de colorer durablement le support sur lequel ils sont appliqués dans certaines conditions. Ces composés sont utilisés pour colorer les textiles, les encres, les peintures, les vernis, les produits alimentaires, etc... La terminologie industrielle moderne définit un colorant comme un produit contenant le colorant organique pur avec différents additifs et agents de

coupage, qui facilitent son utilisation. Les colorants sont différents des pigments, composés solides finement divisés qui doivent être mélangés avec des liants avant leur application sur les surfaces. Les pigments sont en effet insolubles dans le milieu où ils sont appliqués.

I.2.1. Colorants naturels

Il existe seulement une dizaine de colorants naturels, alors que l'on compte des milliers de colorants synthétiques. Les colorants naturels sont extraits des plantes, des arbres, des lichens ou insectes et des mollusques. Les colorants jaunes sont les plus nombreux. On rencontre deux catégories de colorants naturels : les colorants à mordant et les colorants de cuve. Seuls les premiers sont peu solubles dans l'eau.

I.2.2. Colorants synthétiques

Les matières premières des colorants synthétiques sont des composés tels que le benzène, issu de la distillation de la houille. C'est pour cette raison que les colorants de synthèses sont communément appelés colorants de goudron de houille. A partir de ces matières premières, les intermédiaires sont fabriqués par une série de procédés chimiques, qui en générale, correspondent au remplacement d'un ou de plusieurs atomes d'hydrogènes du produit de départ, par des éléments ou des radicaux particuliers.

I.3. Classification des colorants

Les matières colorantes se caractérisent par leur capacité à absorber les rayonnements lumineux dans le spectre visible (de 380 à 750 nm). La transformation de la lumière blanche en lumière colorée par réflexion sur un corps, ou par transmission ou diffusion, résulte de l'absorption sélective d'énergie par certains groupes d'atomes appelés chromophores. La molécule colorante est un chromogène. Plus un groupement chromophore donne facilement un électron, plus la couleur est intense. Le tableau I.1 donne les groupements chromophores classés par intensité décroissante. D'autres groupes d'atomes du chromogène peuvent intensifier ou changer la couleur due au chromophore, ils sont appelés les groupements auxochromes. Les chromophores sont des systèmes à liaisons π conjuguées ou des complexes de métaux de transition. Les colorants diffèrent les uns des autres par des combinaisons d'orbitales moléculaires. La coloration correspond aux transitions possibles après absorption du rayonnement lumineux entre ces niveaux d'énergie propres à chaque molécule [6].

Tableau I.1: Principaux groupements chromophores et auxo-chromes, classés par intensité croissante.

Groupes chromophores	Groupes auxo-chromes
Azo (-N=N-)	Amino (-NH ₂)
Nitroso (-NO ou -N-OH)	Méthylamino (-NHCH ₃)
Carbonyl (=C=O)	Diméthylamino (-N(CH ₃) ₂)
Vinyl (-C=C-)	Hydroxyl (-HO)
Nitro (-NO ₂ ou =NO-OH)	Alkoxy (-OR)
Sulphure (>C=S)	Groupes donneurs d'électrons

Il ya plusieurs critères de classification des colorants parmi ces critères, les suivants :

I.3.1. Classification chimique

Le classement des colorants selon leurs structures chimiques repose sur la nature du groupe chromophore. Il est à signaler que le colorant anthraquinonique fait l'objet de cette étude.

a. Colorants anthraquinoniques

Ces colorants sont d'un point de vue commercial, les plus importants après les colorants azoïques. Leur formule générale dérivée de l'anthracène (Fig.I.1) montre que le chromophore est un noyau quinonique sur lequel peuvent s'attacher des groupes hydroxyles ou amino [7].

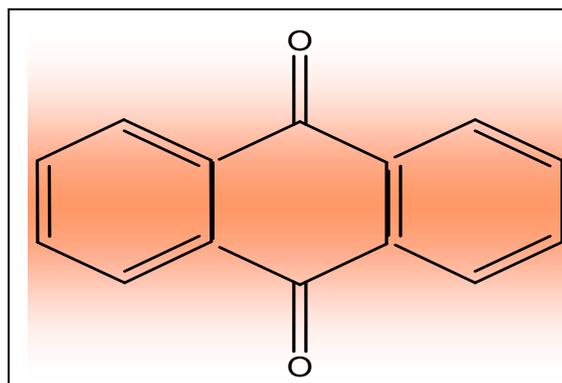


Figure I.1: Squelette anthra-quinonique.

b. Colorants azoïques

Les colorants azotés sont les colorants les plus couramment utilisés dans l'industrie textile, ce sont des composés organiques contenant un groupe azoté (Fug.I.2) qui s'avère être stable comme colorants de textile [8]. Les colorants azotés sont résistants à la lumière, aux acides, aux bases et à l'O₂, ce qui fait que leur utilisation dans l'industrie textile soit très répandue [9].

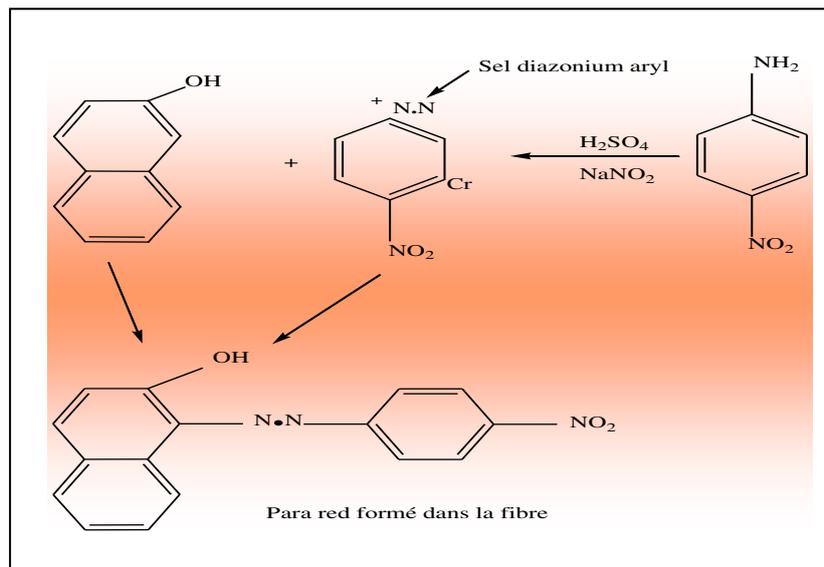


Figure I.2: Squelette azoïque.

c. Colorants du diphenyl-méthane et du triphénylméthane

Les colorants du diphenyl-méthane et du triphénylméthane représentant une catégorie beaucoup moins importante que celle des composés azoïques et anthraquinoniques. Leur principale application est la coloration du papier pour laquelle le caractère du résultat obtenu n'est pas un handicap majeur [10, 11].

d. Colorants indigoïdes

Ils tirent leur appellation de l'indigo dont ils dérivent. Ainsi, les homologues sélénié, soufré et oxygéné du bleu indigo provoquent d'importants effets hypsochromes avec des coloris pouvant aller de l'orange au turquoise [5].

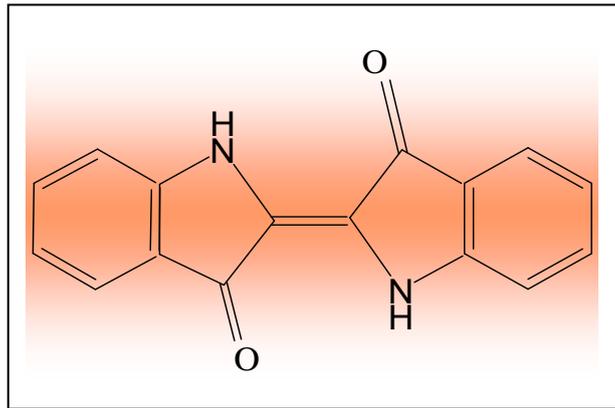


Figure I.3: Squelette d'indigoïdes.

e. Colorants nitrés et nitrosés

Ils forment une classe de colorants très limitée en nombre et relativement ancienne. Ils sont actuellement encore utilisés du fait de leur prix très modéré lié à la simplicité de leur structure moléculaire (Fig.I.4), caractérisée par la présence d'un groupe nitro ($-NO_2$) en position ortho d'un groupement électro donneur (hydroxyle ou groupes aminés) [5, 7].

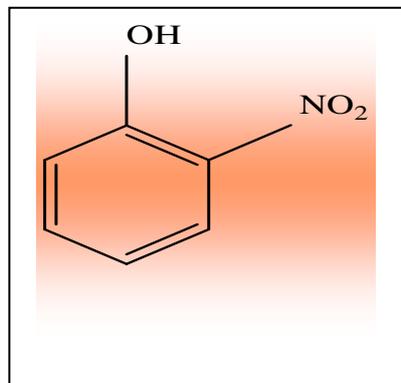


Figure I.4 Squelette denitrosés.

I.4. Photocatalyse

La photocatalyse repose sur le principe d'activation d'un semi-conducteur à l'aide de l'énergie apportée par la lumière. Le semi-conducteur est considéré comme étant un catalyseur. Son principe est proche de la catalyse hétérogène où la réaction d'oxydoréduction se passe à la surface du catalyseur.

La photocatalyse consiste en l'absorption par un semi-conducteur d'un photon d'énergie au moins égale à la largeur de la bande interdite provoquant l'éjection d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et formation d'une lacune (ou trou) dans la bande de valence. La présence d'un couple d'oxydoréduction approprié entraîne des réactions entre l'électron photo génère et des espèces adsorbées réductibles, et entre le trou et des espèces adsorbées oxydables.

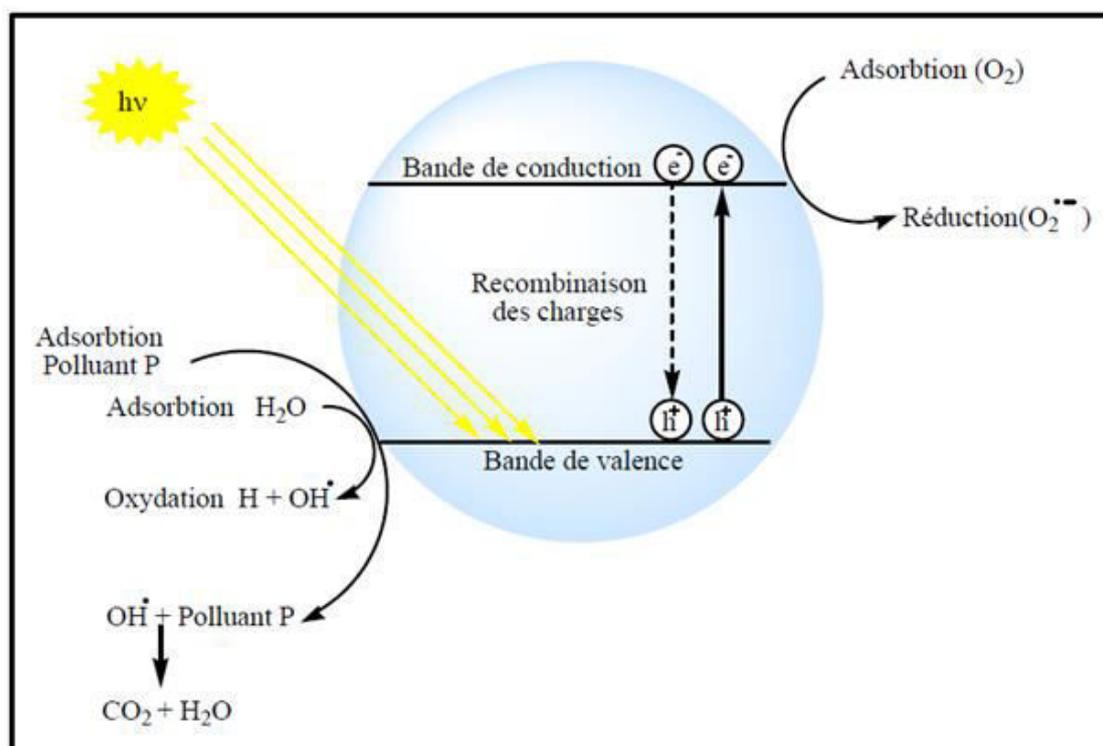


Figure I.5 : Principe de la photo catalyse

I.4.1. Photocatalyse en milieu hétérogène

La photocatalyse hétérogène implique les photos réactions se produisant à la surface du catalyseur. Si le processus de photo excitation initial se produit sur une molécule adsorbée, le processus est nommé photo réaction catalysée. Si la photo excitation initiale à lieu sur le catalyseur et qu'ensuite le catalyseur photo-excité réagi avec une molécule adsorbée, on parle de photo-réaction sensibilisée. Dans tous les cas, la photocatalyse hétérogène fait référence à un semi-conducteur photo-catalyseur ou à un semi-conducteur photo-sensibilisateur.[12]

II.4.2. Facteurs affectant la photocatalyse hétérogène

Parmi les facteurs influençant la dégradation photo-catalytique, nous pouvons citer : [12]

- la présence des accepteurs d'électrons (O_2 , H_2O_2 , $S_2O_8^{-2}$...),
- le pH de la solution aqueuse,
- la concentration en catalyseur,
- la concentration initiale en polluant,
- le flux lumineux,
- la température,
- la présence d'ions en solution.

I.5. Applications de la photocatalyse

La photo-catalyse trouve son application dans différents domaines en particulier : [13]

- Application dans le revêtement autonettoyant de surfaces (verre, métaux, béton, ciments,..).
- Purification de l'eau.
- Potabilisation de l'eau.
- Purification de l'air.
- Elimination des odeurs.
- Détoxification des eaux de rinçage de matériel agricole ou industriel.
- Décoloration d'effluents aqueux colorés (industries textiles).

I.6 Les avantages et les inconvénients de la photocatalyse

I.6.1. Les avantages de la photocatalyse

- Installation simple, dégradation efficace des organiques.
- La minéralisation complète.

- Processus pouvant être exécuté a la basse température.
- Pas d'additif chimique.
- Pas de résidus polluants.
- Destruction par minéralisation complète des polluants (COV) a température ambiante
- Effet bactéricide fort.
- Destruction possible d'une grande variété de composés organiques.
- Aucun après traitement n'est nécessaire puisque les polluants organiques peuvent être minéralisés.
- Procédé favorisé par rayonnement solaire, ayant pour résultat le bas cout énergétique.
- Régénération sur place de l'adsorbant épuisé et destruction possible de la matière organique adsorbée.
- L'aide perte d'adsorbants dus a l'usure qui se produit dans la régénération thermique.

I.6.2. Les inconvénients de la photocatalyse

- Limitation par le Transfert de masse.
- Récupération nécessaire du photo-catalyseur après réaction.
- Colmatage des filets.
- Efficacité et durée de vie de la lampe limitée.
- Eaux usées troubles posent des problèmes sur la dégradation photo catalytique. [14,15]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évoqué la photo catalyse classique en donnant le principe de base de la méthode, qui donne une dégradation efficace des matières organiques par une minéralisation complète à faible coût.

D'une façon globale, l'activité photo catalytique présente un grand intérêt pour le stockage de l'énergie solaire et pour la décomposition des polluants dans les eaux.

Cette technique présente évidemment quelque lacune comme sa limitation par le transfert de masse et la nécessité de récupérer la photo catalyseur après réaction ce qui est difficile généralement. Pour les raisons invoquées ci-dessous et par soucis d'efficacité, nous avons utilisé dans notre travail un matériau possédant des propriétés magnétiques qui nous permettent de le séparer facilement des phases aqueuses.

Quelques notions théoriques de ce matériau appelé nano-ferrites spinelle (NFS) seront abordées dans le chapitre suivant.



Généralités sur les ferrites

Chapitre 02



Introduction

Le magnétisme est un des phénomènes les plus anciens de l'histoire de la science. Les premières apparitions du magnétisme remontent à la Grèce antique qui à également donné un nom à ce phénomène « magnétisme ». Il découle de la Magnésie, une ville grecque. La magnétite Fe_3O_4 a fait le sujet des premières observations afin d'utiliser la puissance cachée dans ces matériaux magnétiques.

De nos jours, ces matériaux magnétiques peuvent être considérés comme étant indispensables dans la technologie moderne. Ils entrent dans la composition de nombreux dispositifs électromécaniques et électroniques. Parmi les matériaux les plus étudiés, nous trouvons les ferrites spinelles de type MFe_2O_4 , ils présentent l'avantage d'exister sous forme de nanoparticules, couche mince... ce qui leur confère la possibilité d'être utilisés dans divers domaines.

II. Généralités sur le magnétisme

Le moment magnétique d'un atome résulte de la contribution de ses couches électroniques incomplètes. La contribution des électrons explique pratiquement toutes les propriétés magnétiques de la matière, tout simplement parce que l'électron est une charge électrique en mouvement, et toute charge électrique en mouvement produit un champ magnétique. L'électron est principalement caractérisé par deux mouvements, un mouvement orbital autour du noyau, et un mouvement de spin qu'on peut assimiler à la rotation du spin autour de lui-même.

Très peu d'éléments sont des aimants permanents, à l'état solide est à température ambiante (ex : fer, cobalt, nickel ...) [16]. Les matériaux peuvent être classés de point de vue magnétique selon leurs moments magnétiques, et les interactions magnétiques présentes à l'intérieur de ces derniers.

II.1. Classes de matériaux magnétiques

- Diamagnétisme
- Paramagnétisme
- Ferromagnétique

Dans ces matériaux les moments magnétiques atomiques présentent une forte interaction qui donne naissance à un alignement parallèle. Cet alignement conduit à une forte aimantation spontanée (en absence du champ magnétique).

- Antiferromagnétisme
- Ferrimagnétique

Comme dans les antiferromagnétiques, les matériaux ferrimagnétiques sont constitués de deux réseaux magnétiques dont les moments magnétiques sont couplés antiparallèlement.

II.2. Magnétisme des nanoparticules

II.2.1. Généralités

Les propriétés magnétiques des nanoparticules sont très sensibles à la taille, la composition et l'environnement chimique donnant ainsi lieu à de nombreux phénomènes physique.

II.3. Les ferrites spinelle et leur propriétés magnétiques

Les ferrites spinelles ont des propriétés tout à fait analogues à celles des ferromagnétique ; d'ailleurs l'un d'eux, la magnétite, a été le premier ferromagnétique connu, et a donné son nom au phénomène du magnétisme. Plusieurs oxydes magnétiques d'importance commerciale ont la structure spinelle [17,18].

Ainsi les ferrites spinelles sont des oxydes magnétiques très importants de point de vue technologique, en raison de leurs propriétés magnétiques et électriques. Les ferrites sont intensément employées dans les dispositifs à micro-ondes, les têtes d'enregistrement magnétique, dans le traitement des eaux [19,20],... etc. Ainsi la connaissance de la structure, de la distribution des cations et de l'alignement de spin, sont essentielle pour comprendre les propriétés de ses matériaux.

II.3.1. Structure cristalline des ferrites spinelles

Les ferrites de structure spinelle forment des cristaux de symétrie cubique de type $MgAl_2O_4$ dont la formule générale est AB_2O_4 , où B correspond à un cation trivalent (Fe pour le cas des ferrites) et A, un cation divalent (Co, Zn, Ni, Mn, Sn, Fe,...). Dans les oxydes de structure spinelle, les anions O^{2-} de rayon relativement élevés par rapport à celui des cations entrant dans la composition du spinelle, forment un réseau cubique à face centrées, définissant deux types de sites interstitiels, des sites tétraédriques et des sites octaédriques.

II.3.2. Distribution des cations dans les spinelles

Dans les spinelles AB_2O_4 , les cations A (divalent) et B (trivalent) occupent les sites tétraédriques et octaédriques, le mode de répartition des cations dans ces deux sites permet de définir trois types de ferrites spinelle.

Généralement la distribution de cation est indiquée par (A) [B₂] O₄ où les crochets indiquent l'occupation des sites octaédriques, et les cations entre parenthèses sont situés dans les sites tétraédriques. Si les cations A occupent les sites tétraédriques et les cations B occupent les sites octaédriques on parle alors de distribution normale ou directe. La phase cristalline associée est la Franklinite. Les spinelles directs les plus connus sont les ferrites de zinc et les ferrites de cuivre. Une deuxième distribution extrême des cations est (B) [AB] O₄, qui représente un spinelle inverse, où les tétraèdres sont occupés par la moitié des ions trivalents, et les octaèdres par l'autre moitié des mêmes ions trivalents et par les ions divalents. La phase cristalline associée est la Trévorite. Parmi ces spinelles on trouve les ferrites de nickel et les ferrites de cobalt. La troisième distribution est celle des spinelles mixtes, dans ce cas, une distribution intermédiaire caractérisée par un degré d'inversion de cation (A_{1-δ}B_δ) [A_δB_{2-δ}] O₄, δ est le degré d'inversion, avec une valeur allant de 0 pour une distribution normale, jusqu'à 1 pour une distribution inverse. Ce paramètre dépend fortement du mode d'élaboration de ces ferrites.

La préférence des ions individuels pour les deux types de sites du réseau est déterminée par :

1. Les rayons ioniques des ions.
2. La taille des interstices.
3. La température.
4. La préférence orbitale pour une coordination spécifique.

II.4. Principales méthodes de synthèse des nano-ferrites

Le contrôle de la taille, et de la morphologie des nanoparticules d'oxydes formées par précipitation en solution aqueuse, a fait depuis longtemps l'objet de très nombreuses recherches, et des techniques variées sont utilisées à cette fin. La synthèse est alors le plus souvent conduite en milieu multiphasé. Le réacteur peut être constitué par des micelles ou des microémulsions, ou encore dans des résines échangeuses d'ions. La synthèse peut aussi être effectuée en milieu homogène mais visqueux (gels), l'abaissement de la vitesse de diffusion des précurseurs, limitant par conséquent la taille des objets.

Toutes ces méthodes de synthèse ont été utilisées pour la préparation de particules de ferrites spinelles de taille nanométrique, présentant une distribution de taille monodisperse et une composition homogène. Dans ce qui suit, nous présenterons tout d'abord la méthode de synthèse la plus utilisée pour obtenir les ferrites de taille nanométrique, qui est la méthode co-

précipitation. Nous décrirons ensuite la synthèse en microémulsion. Et nous finirons par la description de la méthode sol-gel, que nous utiliserons dans ce travail.

II.4.1. Méthode Co-précipitation

La Co-précipitation est une des méthodes de synthèse les plus simple à mettre en oeuvre, elle consiste à précipiter simultanément au moins deux composants métalliques dans une solution. Le précipité obtenu est lavé, filtré, séché puis calciné pour obtenir les oxydes mixtes.

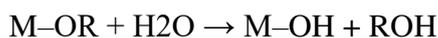
II.4.2. Méthode microémulsion

La technique de synthèse par microémulsion est l'une des méthodes les plus récentes pour la préparation de nanoparticules inorganiques. Une émulsion se forme quand une quantité appropriée d'un agent tensio-actif, est mécaniquement agité avec de l'huile et de l'eau produisant une dispersion à deux phases, où on distingue l'une des phases sous forme de gouttelettes enrobées de tensio-actif, qui est dispersé dans l'autre phase.

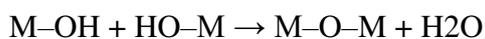
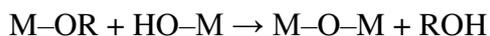
II.4.3. Méthode sol/gel

Le procédé sol-gel est connu depuis plusieurs années, il a été décrit pour la première fois par le chimiste Ebelmen [21] vers la moitié du XIX^{ème} siècle. Le terme sol-gel correspond à l'abréviation « solution-gélification ». Où le « sol » est une suspension colloïdale d'oligomères dont le diamètre, est de quelques nanomètres seulement. Par la suite, on peut faire évoluer ce « sol », par le biais de réactions chimiques, en un réseau à viscosité infinie, appelé « gel ». Ce procédé [22,23] offre de nombreux atouts pour produire des matériaux de plus grandes homogénéité et pureté, à des températures inférieures à celles des méthodes conventionnelles. Il utilise une solution contenant des précurseurs réactifs tels que les alcoxydes ou les sels métalliques. La chimie du procédé sol-gel est basée sur l'hydrolyse et la condensation de précurseurs moléculaires comme les alcoxydes des métaux dispersés dans un solvant organique, ou bien, des ions métalliques hydroxylés dans des solutions aqueuses [24].

L'étape d'hydrolyse se schématise par la réaction :



L'étape de condensation se représente comme suit :



Où M représente un cation métallique tel que le silicium, le titane, le zirconium, etc. ; et R, un groupement organique alkyl. L'évolution de la gélification dépend fortement des précurseurs

utilisés. Par conséquent, les cinétiques de gélification et les microstructures finales des gels ne sont pas identiques.

La méthode sol-gel permet l'élaboration d'une grande variété d'oxydes sous différentes configurations (monolithes, films minces, fibres, poudres). Cette grande diversité, tant du côté des matériaux que de la mise en forme, a rendu ce procédé très attractif dans des domaines technologiques tels que l'optique, l'électronique, les biomatériaux, les senseurs (détection), les supports de séparation (chromatographie). Elle présente, en outre, l'avantage d'utiliser une chimie douce et de pouvoir conduire à des matériaux très purs ou dopés selon l'application visée [25-26]. En fonction du mode de séchage du gel, le matériau final prend des formes très différentes : matériaux massifs (monolithes de verres ou de céramiques), poudres, aérogels (séchage supercritique), fibres, composites, gels poreux ou membranes, et bien entendu, films ou couches minces [27].

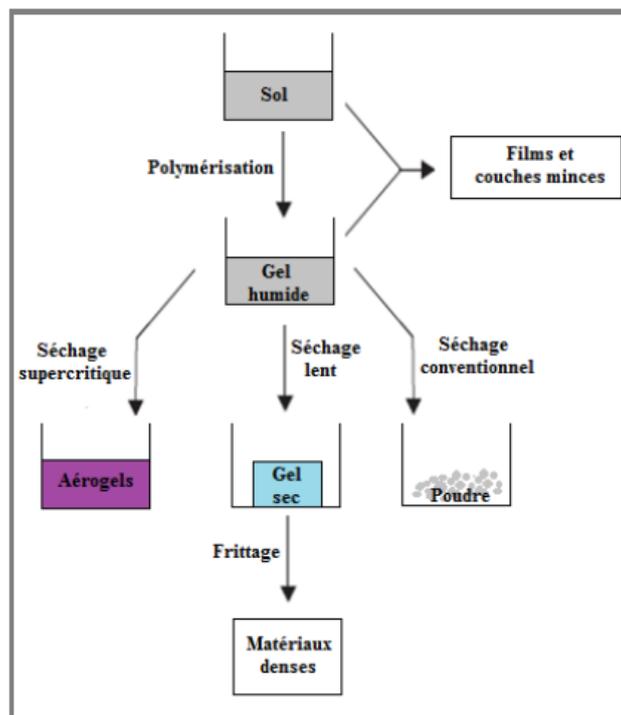


Figure II.1 : Méthode de fabrication des Nano-ferrite Sol/gel.

II.5. Techniques de caractérisation

II.5.1. Analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique est l'une des méthodes d'analyse thermique qui a été développé afin de mettre en évidence les changements d'un matériau sous effet du chauffage. Elle consiste à mesurer le changement de la masse d'un échantillon lorsqu'il est soumis à une variation de température sous atmosphère contrôlée. Cette variation peut être une perte de masse en cas d'émission de vapeur, ou un gain de masse comme dans le cas de l'oxydation. Cette méthode nous permet d'évaluer la quantité de résidus d'hydroxydes ou de matière organique encore présente dans les échantillons ainsi que la température de leur évaporation. Ceci nous permet de fixer la température de calcination optimale pour chaque échantillon.

II.5.2. Diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X est la technique de base de la caractérisation des matériaux, elle permet la détermination des phases minérales des matériaux, en utilisant la capacité de la matière à dévier le faisceau des rayons X. La diffraction X permet d'accéder à de nombreuses informations contenues dans l'arrangement même des atomes au sein d'un matériau cristallisé. Le type d'arrangement géométrique, le paramètre de maille et la taille des grains.

Le principe consiste à projeter un faisceau de rayons X sur un réseau constitué par les plans atomiques d'un cristal. Ce faisceau est diffracté par l'échantillon à un angle spécifique, suivant la loi de Bragg [28].

$$\lambda_x = 2d \sin \theta \quad \text{Equation.01}$$

Où d est la distance inter-plans et λ_x la longueur d'onde du faisceau incident.

La variation de l'angle θ permet d'obtenir un diagramme constitué de raies dont les positions et les hauteurs dépendent de la structure cristallographique et de la nature du composé étudié.

II.5.3. Spectroscopie infrarouge à transformé de Fourier

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans l'échantillon. Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité réfléchi ou transmise. Et par conséquent à un matériau de composition chimique et de structure donnée va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier le matériau [29].

II.5.4. Microscopie électronique

La microscopie électronique utilise un faisceau d'électrons accélérés sous une différence de potentiel donnée pour produire une image agrandie de la matière. Ce type de microscopie présente le grand intérêt de pouvoir donner une image d'un objet très petit, pouvant maintenant atteindre une résolution meilleure qu'un dixième de nanomètre.

En une fraction de seconde, on peut passer d'une image de l'objet au diagramme de diffraction de la même région. Son principe ressemble à celui de la microscopie photonique, la différence reposant sur l'origine de la source de lumière qui n'est plus le photon mais l'électron.

II.5.5. Microscopie électronique à transmission

La microscopie électronique en transmission est un outil indispensable dans l'étude des matériaux. L'utilisation des électrons par rapport aux photons permet d'améliorer la résolution. Son principe repose sur l'utilisation d'un faisceau d'électrons accélérés à une grande vitesse et focalisé sur l'échantillon étudié par des bobines créant un champ magnétique de l'ordre du tesla.

II.5.6. Microscopie électronique à balayage

Le microscope électronique à balayage (MEB) est un appareil d'analyses, pouvant fournir rapidement des informations sur la morphologie et la composition chimique d'un objet solide. Sa grande commodité d'utilisation a fait de lui un outil indispensable pour visualiser la surface d'échantillons très divers et lui a permis de s'imposer rapidement comme un outil incontournable dans un grand nombre de laboratoires industriels.

II.6. Les domaines d'utilisation des ferrites

Ces composés sont un groupe très important dans les matériaux magnétiques, ils sont utilisés dans de nombreuses applications large du bas aux dispositifs élevés de perméabilité y compris dans la technologie des Ferro fluide, les dispositifs à micro-ondes, dans le stockage de l'information par haute densité, la réfrigération magnétocalorique et dans les diagnostics médicaux, grâce à leur perfectionnement de résonance magnétique de formation d'image ainsi que dans les sondes de gaz. Ces matériaux peuvent être utilisés en électronique grâce à leur résistance électrique élevée comme support pour réaliser des selfs, plus particulièrement dans des montages haute fréquence, du fait de très faibles pertes induites sous forme de courant de Foucault. Il en existe de différentes tailles et formes : des plates, des toriques, des cylindriques, des creuses, des pleines, des grosses, des petites... Ces matériaux présentent la propriété de modifier plus ou moins les caractéristiques des selfs avec lesquelles il est

généralement employé. Dans de nombreux cas, l'ajout de ferrite à un bobinage permet d'obtenir des caractéristiques qui seraient très difficile d'obtenir avec des selfs de dimensions raisonnables. L'utilisation des ferrites en tant que photo catalyseur pour la dégradation des composés organiques a gagné beaucoup d'intérêt ces dernières années. Ce processus prometteur pour la purification d'eau est efficace grâce à la substitution du fer en positions octaédriques avec différents cations trivalents et à la forme spinelle car cette structure cristalline augmente l'efficacité due aux emplacements catalytiques supplémentaires disponibles. De plus ces ferrites possèdent des propriétés magnétiques permettant d'être facilement séparés de la réaction quand ils sont employés comme catalyseurs [30].

II.7. Les avantages des ferrites

Les ferrites présentent des avantages qui leur permettent de supplanter dans un certain nombre d'applications. Apparus plus récemment, les méta matériaux constituent une approche originale pour obtenir des propriétés magnétiques hyperfréquences et ouvrent la voie à des perspectives remarquables. S'ils ne peuvent pas remplacer les matériaux magnétiques conventionnels, ils peuvent se combiner avec eux pour en augmenter les potentialités. La faible taille des ferrites leur confère des propriétés intéressantes : elle offre en effet une importante surface spécifique et une grande stabilité. Ces particules ont effectivement l'avantage de former des solutions homogènes qui ne sédimentent ou n'écument pas mais ce sont surtout leurs capacités à esquiver les défenses immunitaires et leur capacité à cibler une population de cellules particulières qui en font des vecteurs prometteurs [31].

II.8. Exemple d'application des ferrites

II.8.1. Photo-dégradation d'un colorant textile à l'aide de ferrites de spinelle hétérogènes recyclables magnétiquement

L'article de Rimi Sharma and Sonal Singhal intitulé photo-dégradation d'un colorant textile à l'aide de ferrites spinelle hétérogènes recyclables magnétiquement est une application intéressante. En effet, l'utilisation généralisée de colorants dans les industries textiles entraîne des rejets d'effluents de colorants dans les masses d'eau, ce qui pose un problème pour la vie humaine et aquatique. À cet égard, des nano-spinelles magnétiques répondant à la formule MFe_2O_4 ($M = Cu, Zn, Ni$ et Co) ont été développés et caractérisés par analyse thermogravimétrique (TGA), spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), microscopie électronique à transmission (TEM), rayons X en poudre Diffraction (DRX) et

spectres de réflectance diffuse (DRS). L'activité de toutes les ferrites en tant que catalyseur hétérogène de Fenton et de Photo fenton a été évaluée à travers la dégradation de Remazol Black 5 (RB5) utilisé dans l'industrie textile pour teindre le coton.[32]

II.8.2 Activité photocatalytique de catalyseurs à base de ferrite de zinc de type nanostructure lors de la dégradation du vert malachite sous ultraviolets

Tsvetkov et al ont publié des travaux portant sur l'activité photo-catalytique de catalyseurs nanostructure de type ferrite de zinc et leur application dans la dégradation du vert malachite sous lumière ultraviolette. Une série de matériaux de type ferrite de zinc nano-structurés $Zn_xFe_{3-x}O_4$ ($x = 0,25, 0,5, 1$) avec une taille moyenne de cristallite d'environ 8 nm préparés par co-précipitation ou co-précipitation et traitement mécano-chimique ont été testés pour déterminer la dégradation photo-catalytique de l'oxalate de vert malachite en tant que contaminant modèle dans une solution aqueuse sous une lumière UV. Les expériences réalisées ont permis de déterminer que les poudres de type ferrite de zinc co-précipitées présentaient une activité photo-catalytique supérieure à celle des échantillons traités par voie mécano-chimique. Les résultats ont montré que l'augmentation du degré de substitution des ions fer par des ions zinc conduit à une activité photo-catalytique plus élevée pour les échantillons de type ferrite synthétisés par co-précipitation. Le traitement mécano-chimique des matériaux de type ferrite de zinc Co-précipités conduit à l'obtention d'un catalyseur à activité photo-catalytique plus élevée en augmentant le temps de broyage et en diminuant la teneur en ions zinc incorporés dans la structure hôte de la magnétite. La spectroscopie Mössbauer a été réalisée afin d'étudier les changements de comportement catalytique des photo-catalyseurs de type ferrite de zinc utilisés au cours du processus de photo-dégradation du colorant [33].

II.8.3. Les adsorbants magnétiques à base de ferrite de spinelle

La publication de Harikishore et al a abordé les adsorbants magnétiques de type ferrite spinelle en tant qu'alternative future dans la purification des eaux. Il en ressort que les matériaux magnétiques ferrites spinelles (FS) constituent une classe importante d'oxydes métalliques composites contenant des ions ferriques et répondant à la formule développée générale $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4$ (où $M = Mg^{2+}; Co^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, etc.$).

Cette importance de FS est attribuée aux propriétés physicochimiques uniques, notamment d'excellentes caractéristiques magnétiques, une surface spécifique élevée, des sites actifs de

surface, une stabilité chimique élevée, une forme et une taille ajustables et la facilité avec laquelle ils peuvent être modifiés ou fonctionnalisés. En raison de leurs propriétés multifonctionnelles, de leur prix abordable et de leur capacité de séparation magnétique, les adsorbants SF constituent un choix gagnant pour les applications de purification de l'eau qui nécessitent une efficacité d'absorption élevée et une cinétique rapide. Dans cet article, il est question de performances d'adsorption et des applications possibles des SF et de leurs dérivés pour traiter une large gamme de polluants aqueux tels que les ions métalliques, les colorants et les produits pharmaceutiques. Les paramètres clés influençant les performances de sorption, tels que la taille des particules, la forme, la température de recuit, la fonctionnalisation et le dopage aux ions métalliques ont été examinés de manière exhaustive. En outre, les interactions adsorbant-adsorbant, la désorption, la régénération et l'utilisation de l'adsorbant usé ont également été résumées. Cette publication cite la manière dont les SF sont préparés à partir de déchets industriels par des voies de synthèse vertes, ainsi que des remarques générales sur les effets toxicologiques [34].

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une présentation générale des ferrites. Nous avons aussi décrit les propriétés magnétiques particulières de ces ferrites et nous avons présenté quelques exemples d'application de Ferrite.

Dans le chapitre suivant nous allons exposer la partie expérimentale qui contient les principaux travaux réalisés dans le cadre de la photocatalyse ainsi que les résultats et discussion de ces expériences.



Partie Experimentale

Chapitre 03



Introduction

Les traitements de rejets liquides contenant des colorants ont été largement étudiés par de nombreuses méthodes telles que la coagulation [35], l'oxydation [36], l'adsorption [37], la nano filtration [38], l'ultrafiltration [39] et la photocatalyse [40]. Cette dernière se révèle pratique et efficace pour des applications environnementales.

Notre choix de traitement s'est porté sur une méthode dont le principe se base sur la photocatalyse mais qui diffère de la méthode classique par le matériau utilisé. En effet, le photocatalyseur employé se présente sous forme de nanoparticules dotées de plusieurs pouvoirs dont l'oxydation des polluants [41].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes expériences réalisées avec les nano-ferrites appliqués dans la décoloration de l'acide vert 25.

III.1 Polluant de l'étude

Dans ce travail, le colorant acide vert 25 (AG25) est choisi comme polluant modèle. C'est un colorant acide de la famille des anthraquinoniques utilisé dans l'industrie cosmétique et pharmaceutique. Il est retrouvé dans les effluents causant des problèmes environnementaux évidents [42]. Il est fourni par Acros Organics sous forme solide.

III.2 Structure et caractéristiques physico-chimiques

Le spectre UV-visible ainsi que la structure de l'AG25 sont présentés dans la figure ci-après :

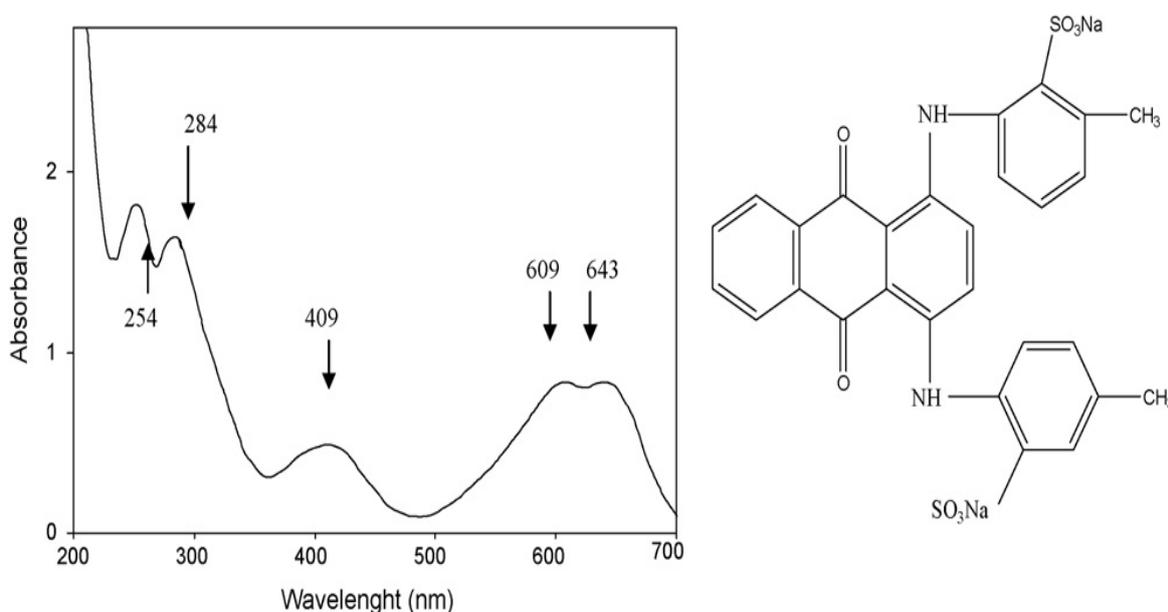


Figure III.1 : Spectres d'absorption UV-vis et structure du colorant AG25 dans l'eau.[43]

Les caractéristiques physico chimiques du colorant sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Caractéristiques physico-chimiques de la molécule cible

Nom technique	Acide green 25, Ag25
Nom scientifique	66'-(1,4-anthraquinonylenemino)
Masse molaire, g/mol	622.58
Origine	Synthétique
Formule brute	(C ₂₈ H ₂₂ N ₂ O ₈ S ₂ 2Na)

III.3 Utilisations

Un colorant anthraquinonique est un type de colorants extrêmement courant, provenant de l'antraquinone, une molécule chimique présente à l'état naturel dans la rhubarbe, l'aloès, les insectes ou les champignons et lichens. On retrouve le colorant anthraquinonique dans certains produits cosmétiques et pharmaceutiques, notamment dans des dentifrices antitartres. Cependant, cette famille de colorant est interdite depuis les années 1970 dans les produits alimentaires [44].

III.4 Préparation du matériau

Le matériau utilisé dans les expériences photocatalytiques appartient à la famille des ferrites spinelle à base de cobalt, il a été synthétisé au niveau du laboratoire STEVA, par la méthode auto-combustion sol-gel et selon le protocole représenté dans la figure III.2 suivante:

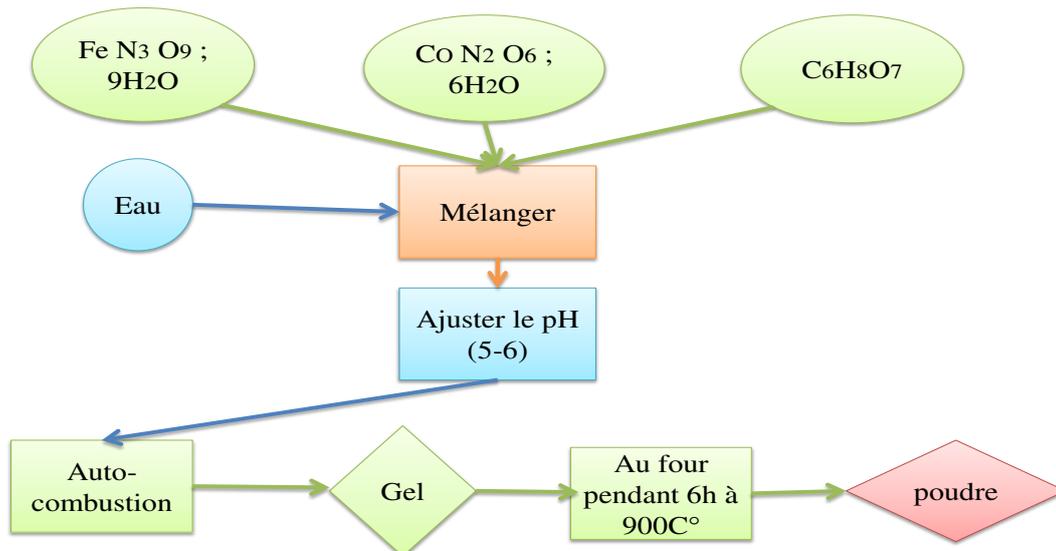


Figure III.2. : Schéma du protocole de synthèse de Nano-ferrite-Cobalt.

III.5 Méthode d'analyse

III.5.1. Loi de BEER LAMBERT

Soit un faisceau de lumière monochromatique traversant une épaisseur l de solution d'un corps adsorbant. Soit I_0 la puissance rayonnante à l'entrée de la solution et I la puissance rayonnante à la sortie, C la concentration du corps absorbant et ℓ l'épaisseur de la cuve.

La loi de Beer Lambert s'exprime sous la forme suivante :

$$A = \log(I_0/I) = \log(1/T) = k C \ell \quad (\text{III.1})$$

Avec :

T : facteur de transmission ou transmittance.

A : absorbance ou densité optique.

C : concentration molaire du composé dosé.

I_0/I : rapport des intensités du faisceau émergent et incident.

K : coefficient spécifique d'absorbance, et ℓ : épaisseur de la cuve.

III.5.2. Etablissement des courbes d'étalonnage de l'AG25

Avant d'établir la courbe d'étalonnage de l'Ag25 par spectrophotométrie, un balayage est fait afin de déterminer la longueur d'onde maximale d'absorption qui est 643 nm pour l'Ag25. Pour tous les composés étudiés, nous avons utilisé la même méthode qui consiste à préparer d'abord une solution mère I (SMI) de concentration donnée, à partir de laquelle nous préparons par dilutions successives, une série de solutions de concentrations bien déterminées. Nous établissons ainsi, la droite de la courbe d'étalonnage de l'Ag25. Les résultats sont présentés comme suit :

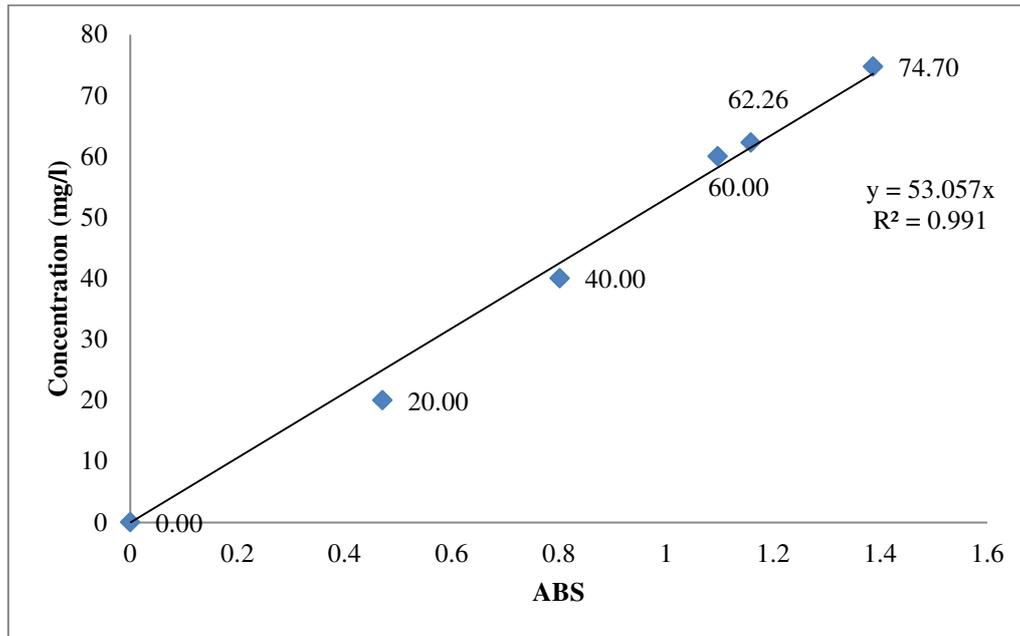


Figure III.3 : Courbe d'étalonnage de l'AG25 dans l'eau à $\lambda_{\max} = 643 \text{ nm}$

Nous avons obtenu un coefficient de régression $R^2 = 0,991$, ce qui représente un très bon ajustement linéaire.

III.6. Photocatalyse de l'AG25 en présence de nano-ferrites de cobalt II

III.6.1. Matériel et Méthodes

Les solutions de colorant Acide vert 25 de concentrations 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 et 100 mg/l ont été préparées dans de l'eau distillée. Les expériences ont été réalisées sur des volumes de 50 ml de suspension composée de la solution de colorant et une quantité de nano-ferrite cobalt.

La suspension obtenue est modérément mélangée par des agitateurs magnétiques. La séparation solide-liquide est assurée par une centrifugeuse à 500 rpm pendant 10 min. Le surnageant est systématiquement analysé à 643 nm dans un spectrophotomètre de marque (OPTIZEN UV2120).

Les expériences ont été réalisées en absence puis en présence de la lumière solaire. Dans l'obscurité, on recherche l'effet de l'adsorption très compétitive avec la photo-catalyse. La présence de la lumière déclenche le processus photocatalytique si le matériau est photosensible.

Les taux de décolorations ont été calculés à partir de la formule suivante :

$$R(\%) = \left(1 - \frac{ABS_f}{ABS_i}\right) \times 100 \quad (\text{III.2})$$

Avec :

ABS_i : absorbance initiale.

ABS_f : absorbance finale.

III.6.2 Dose et pH optimaux

Le couple dose-pH joue un rôle important dans la photocatalyse et dans la majorité des processus de dépollution. Beaucoup d'études [45] ont montré que c'est un facteur important pour l'élimination des colorants cationique et/ou anionique. Dans ce qui suit, nous présenterons l'effet de la dose à différents pH pour un temps de contact de 2 h.

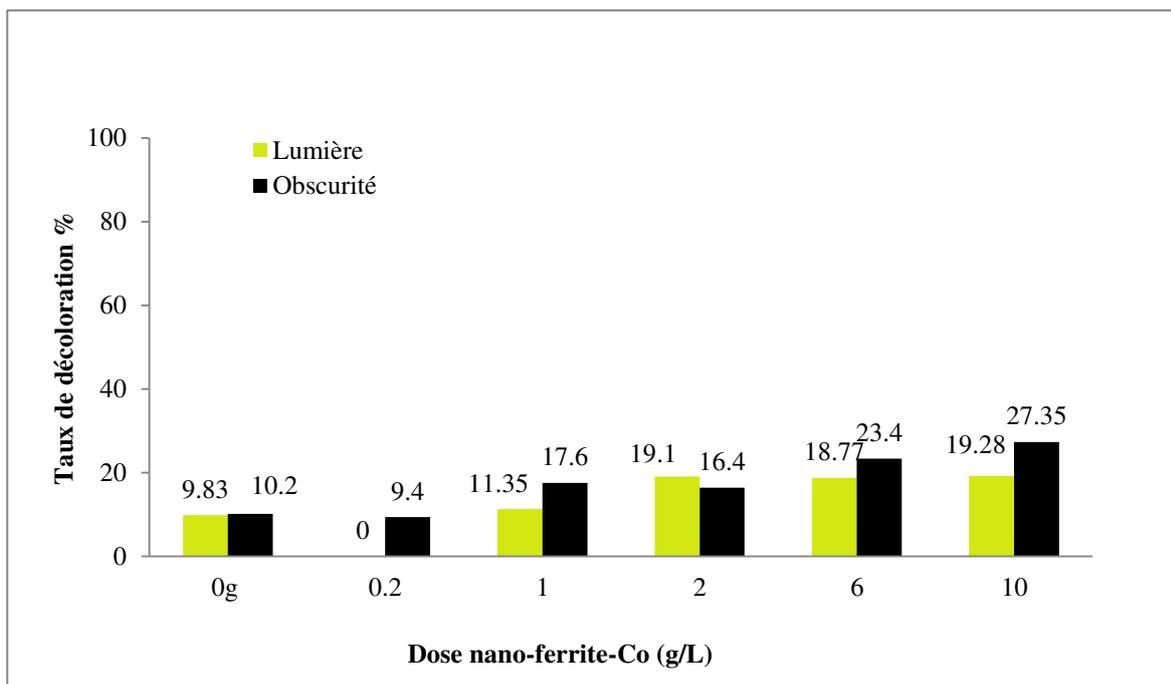


Figure III.4 : Effet de la dose à pH naturel = 5,6

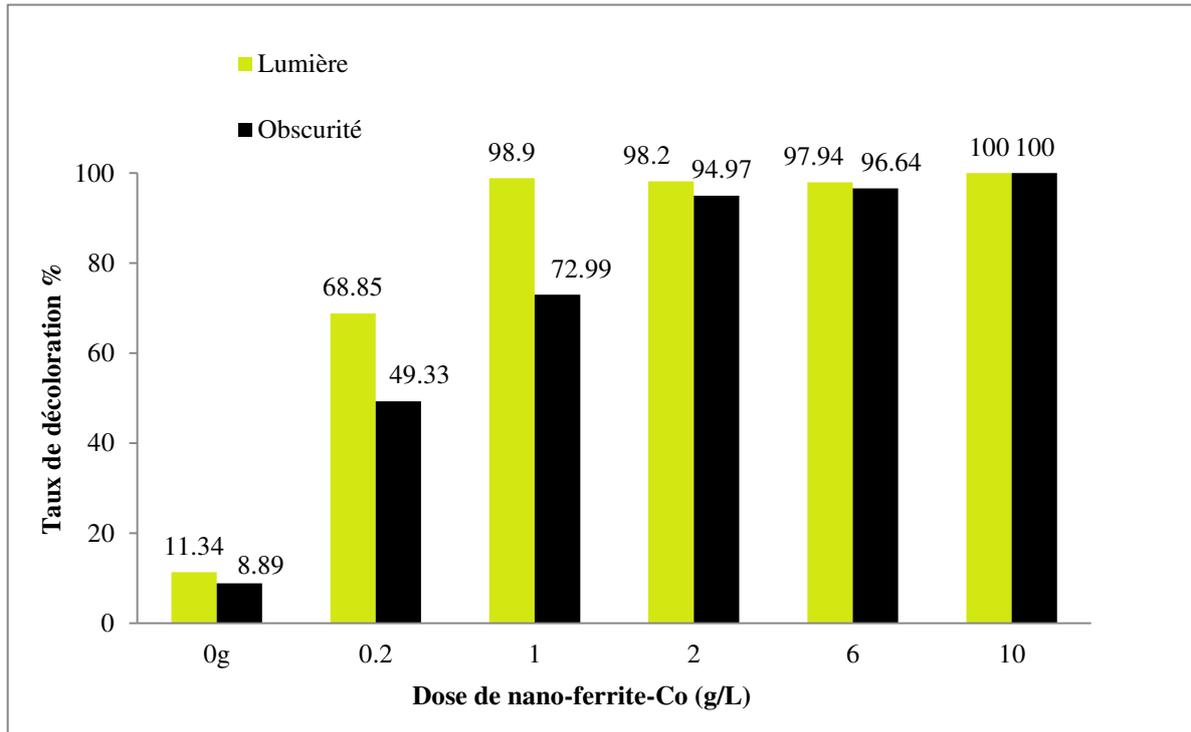


Figure III.5 : Effet de la dose à pH imposé = 2

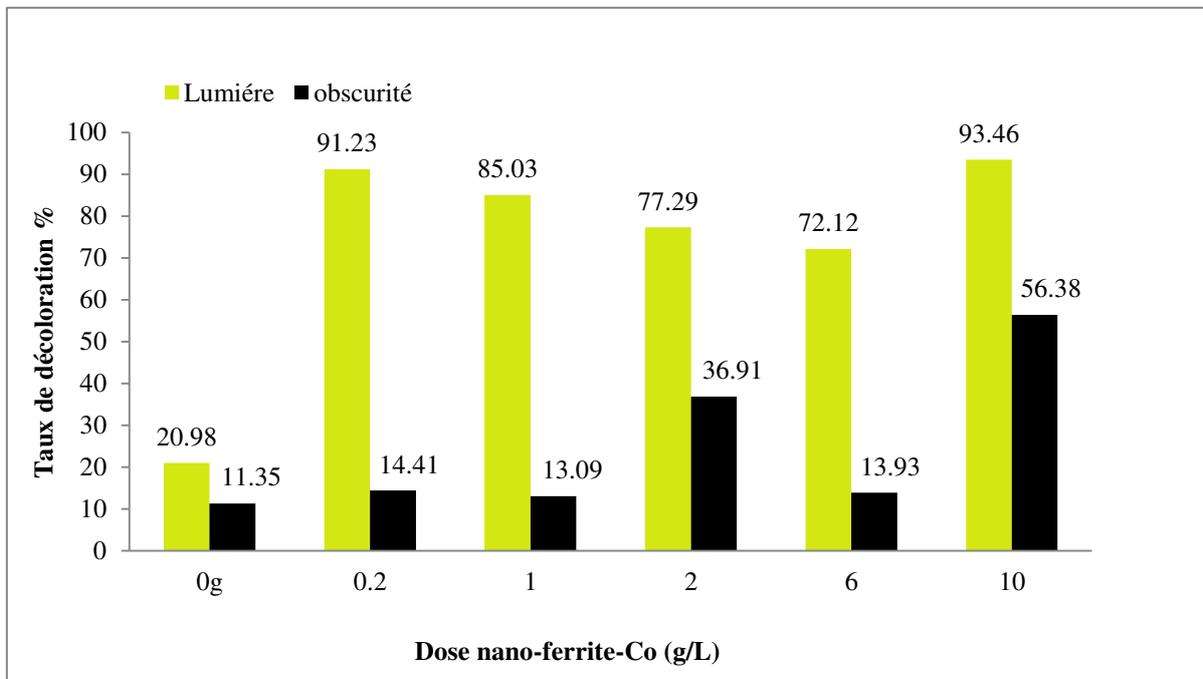


Figure III.6 : Effet de la dose à pH imposé = 4

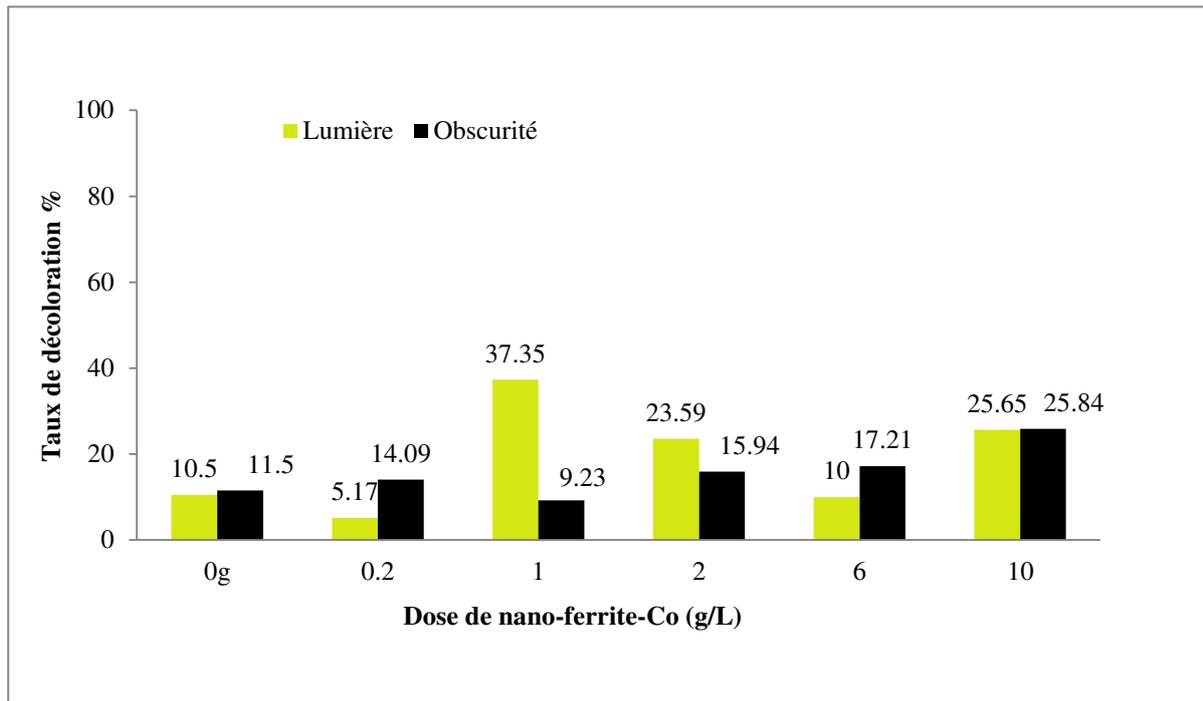


Figure III. : Effet de la dose à pH imposé = 8

Les taux de décoloration de l'Ag25 sont substantiellement plus élevés dans les expériences réalisées sous la lumière solaire. L'ajout des nano-ferrites-Co intensifie cette tendance. En effet, pour une dose de 6 g/l et à pH = 4, dans une obscurité totale, le taux de décoloration est de 13.93%, pour la même dose et pour le même pH, mais en présence de lumière, ce taux devient égal à 72.12%.

Le pH acide renforce la décoloration puisqu'à pH naturel (5,6), le taux de décoloration n'a pas dépassé les 27%. La décoloration en question était totale pour un pH = 2. Selon les résultats obtenus, la variation du pH influence l'adsorption des molécules de colorant sur la surface des nano-ferrites-Co. Vraisemblablement, la photocatalyse en présence de ces derniers, dépend des propriétés acido-basiques du matériau à l'instar des autres photocatalyseurs comme le TiO₂.

III.5.3 Cinétique de la réaction photocatalytique

Des suspensions aqueuses de nano-ferrites-Co sont préparées par addition d'une quantité de matériau à la solution (50 ml) contenant le colorant à une concentration bien définie. Le mélange est agité dans l'obscurité pendant 15 min afin d'établir l'équilibre d'adsorption. Les béchers sont par la suite exposés à la lumière pendant 1 h et des prélèvements sont réalisés chaque 5 min pour analyse UV/visible à 643 nm. Les résultats sont illustrés par la figure III.7.

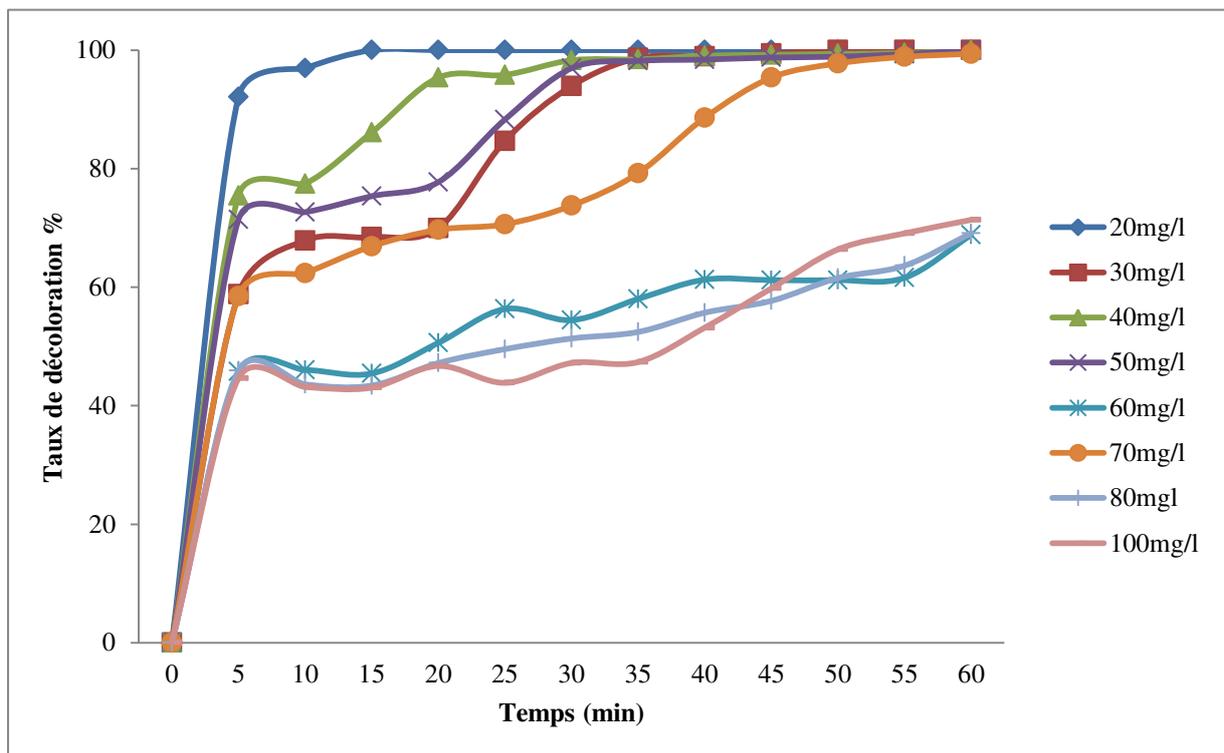


Figure III.8: Etude de l'influence de la concentration de l'AG25 sur la décoloration

Le taux de décoloration augmente progressivement avec le temps de traitement jusqu'à atteindre un palier à partir de 15 minutes pour une concentration d'AG25 égale à 20 mg/l. Il devient égal à 35 minutes pour les concentrations d'AG25 30, 40 et 50 mg/l.

On constate aussi que plus le colorant est concentré, plus le taux de décoloration est faible. Ceci est probablement dû à deux causes : [46]

- L'indisponibilité d'espèces oxydantes capables de diffuser en solution,
- L'effet écran qui empêche la lumière solaire d'exciter les agrégats de nano-ferrites-Co.

Le tableau III.2 donne les différents temps optimaux pour chaque concentration de colorant.

Concentration d'AG25 (mg/l)	Temps optimal (minutes)
20	15
30	35
40	35
50	35
60	60
70	60
80	60
100	60

Ces temps seront utilisés dans ce qui suit pour modéliser la cinétique de la réaction photocatalytique.

III.6.3. Modélisation mathématique

Pour décrire la cinétique de disparition du colorant avec le temps, il serait pratique d'utiliser le modèle de Langmuir-Hinshelwood (L-H), largement utilisé dans le domaine de la photocatalyse [47]. Il stipule que la vitesse de réaction est proportionnelle à la surface de couverture. Par conséquent, r_0 ($\text{mg L}^{-1} \text{min}^{-1}$), qui correspond à la vitesse de décoloration initiale, pourrait être écrit sous la forme suivante:

$$r_0 = \frac{-dC_e}{dt} = \frac{K_r * K_{L-H} * C_e}{1 + K_{L-H} * C_e} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

k_r : est la vitesse constante ($\text{mg L}^{-1} \text{min}^{-1}$),

K_{L-H} : constante d'adsorption (L/mg)

C_e : Concentration à t optimal (mg/l).

L'équation (III.2) peut s'écrire sous la forme linéaire suivante :

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{K_r * K_{L-H}} * \frac{1}{C_e} + \frac{1}{K_r} \quad (\text{III.4})$$

Pour valider les expériences précédentes et connaître le domaine de validité de la photocatalyse, des solutions aqueuses d'AG25 à différentes concentrations (20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 et 100 mg/l) sont traitées en présence de nano-Ferrite-Co (1 g/L). Pour chaque concentration, l'inverse de la vitesse initiale calculée ($1/r_0$) est tracé en fonction de l'inverse de la concentration résiduelle ($1/C_e$). La Fig.III.8 donne l'aspect pratique de cette variation.

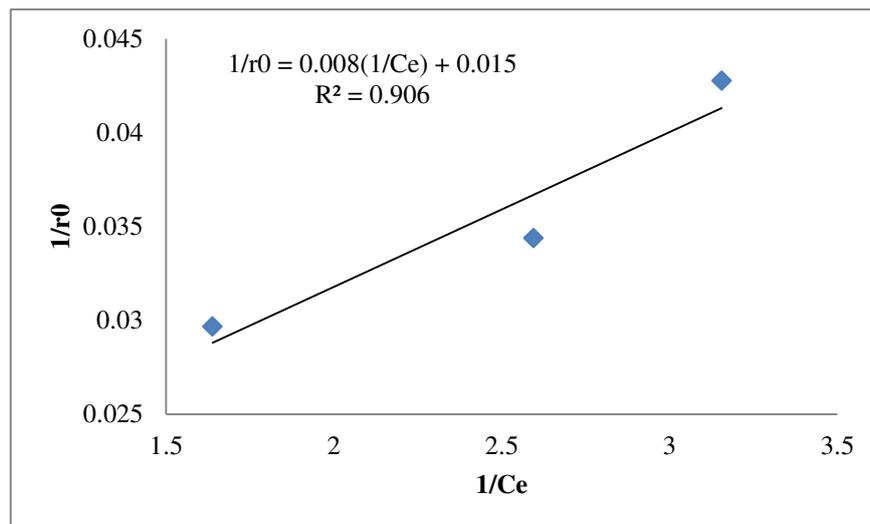


Figure III.9: Modélisation de Langmuir Hinshelwood.

La variation de r_0^{-1} avec C_e^{-1} est linéaire avec un $R^2 = 0,9066$. En utilisant la pente et l'ordonnée à l'origine de l'équation $1/r_0 = f(1/C_e)$, les constantes du modèle L-H sont: **$K_r = 65.36 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$** et **$K_{L-H} = 1.87 \text{ L/mg}$** .

D'une manière générale, il a été observé que la photocatalyse des substrats organiques, tels que le colorant AG25, suit la loi de Langmuir-Hinshelwood (LH) selon les hypothèses suivantes : [48]

- la réaction a lieu entre substances adsorbées,
- la réaction se produit entre un radical en solution et le substrat non adsorbée.
- la réaction a lieu entre un radical lié à la surface et une molécule de substrat en solution,
- la réaction se produit entre deux espèces en solution.

En général, l'expression de l'équation de vitesse est similaire à celle dérivée du modèle L-H. Ce dernier a été utile dans la modélisation du processus, bien qu'il ne soit pas possible de savoir si le processus a lieu à la surface de la solution ou à l'interface [49]. Ioannis KONSTANTINOOU et al. [48] ont noté que l'adsorption du colorant est un paramètre important dans la détermination des taux de dégradation photocatalytique.

Des études antérieures [50-51] ont montré que les substances organiques présentant une forte adsorption à la surface sont plus susceptibles d'être dégradées dans le processus photocatalytique.

Conclusion

La photocatalyse en milieu hétérogène de l'AG25 dans l'eau en présence des nano-ferrites-Co donne un résultat satisfaisant. Dans des conditions opératoires bien précises de pH et de dose en photocatalyseur, le colorant disparaît totalement. Le modèle mathématique faisant valoir la photocatalyse a permis d'identifier les limites entre adsorption et photocatalyse. D'autres investigations sont nécessaires pour déterminer la compétition entre les deux phénomènes.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail rentre dans un contexte de dépollution des eaux par des procédés d'oxydation avancés. Un colorant type anthraquinonique type Ag25 a été choisi pour ses caractéristiques récalcitrantes et sa solubilité élevée dans l'eau. Un traitement photocatalytique en présence d'un nano-ferrite de cobalt synthétique a été appliqué pour réduire la concentration du colorant Ag25. L'excitation du matériau a été réalisée en présence du soleil afin de réduire le coût énergétique du procédé.

Les résultats montrent que le procédé de la photocatalyse est efficace pour le traitement des eaux polluées par des colorants anthraquinoniques tel que l'Ag25. Cette décoloration est effectuée par l'action des UV combinée avec le matériau Nano-ferrite Cobalt.

Le traitement de l'Ag25 a été réalisé à ciel ouvert sous les rayons du soleil sans apport d'énergie avec des conditions opératoires optimisées. La décoloration était de 100% en présence pour des temps de traitement de 15 et 35 et 60 minutes pour les gammes de concentrations en colorant de 20 mg/l, (30-50) mg/l et (60 – 100) mg/l, respectivement.

La réaction photocatalytique étudiée suit le modèle L-H avec les constantes suivantes : $K_r = 65.36 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}$ et $K_{L-H} = 1.87 \text{ L / mg}$.

Notre travail a montré l'efficacité de l'utilisation des Nano-ferrites-Co dans la photocatalyse pour la décoloration du Ag25 dans l'eau.

Références Bibliographique

Chapitre01

- [1]. <https://www.allergienet.com/conservateurs-allergie/>
- [2]. Materials Science in Semi conductor Processing 26 (2014) 467–476
- [3] M. Katoh, H. Aihara, T. Horikawa, T. Tomida, Spectroscopic study for photocatalytic decomposition of organic compounds on titanium dioxide containing sulfur under visible light irradiation, J. Colloid Interface Sci. 298 (2006) 805-809.
- [4] M. Behnajady, N. Modirshahla, R. Hamzavi, Kinetic study on photocatalytic degradation of CI Acid Yellow 23 by ZnO photocatalyst, J. Hazard. Mater. 133 (2006) 226-232.
- [5] R.PERRIN, J.PSCHARFF, « Chimie industrielle », 2^{ème} Edition Dunod, Paris, 1999, pp : 661-679.
- [6] Zhenwang L., Zhenlu C., Jianyan L., The PT dye molecular structure and its chromophoric luminescence mechanism. 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 15-21 October 2000, Rome.
- [7] M. HEDAYTULLAH, « Les colorants synthétiques », Presses Universitaires de France, Paris, pp : 166.
- [8] K. WINNACKER, L.KUCGLER, « chimie organique » 3^{ème} partie, Edition Eyrolles, Paris, 1968, pp : 5-17.
- [9] J.BANDARO « Abatement of azo-dyes and bichlorophenoles mediated by iron-oxides : Mechanism and flow reactor studies », thèse de doctorat, University of Peradeniya, Sri Lanka de nationalité ceylanaise, 1999.
- [10] M. R. GHEZZAR, « Traitement par plasma glidarc de composés toxiques et de rejets industriels », thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2007.
- [11] M. CAPON, V.COURILLEAU, C.VALTE, « Chimie des couleurs et des odeurs », Edition FOF, Berlin Springer, ISBN 2-9502444-2-4, 1999, pp : 14-16.
- [12] élimination du 2- mercaptobenzothiazole par voie photochimique et par adsorption sur la bentonite et le charbon actif en poudre mémoire de magistère denouzhabouziane université mentouri de constantine
- [13] Guittouneau S., De Laat J., Doré M., Duguet J.P et Bonnel C., Environ. Technol. Letters., 9, 1115-1128, (1988 b).

[14] Nicole I., Contribution à l'étude de la dégradation de quelques composés organotalogénés en milieu aqueux par photolyse du peroxyde d'hydrogène. Etude Cinétique et modélisation., université de Poitiers, Thèse de doctorat, (1990).

[15] A J Dekker Solid State Physics.

Chapitre02

[16] E. du Trémolet de Lacheisserie, Magnétisme I fondements, éditeur, presses universitaires de Grenoble, ISBN: 2-7061-0831-2 (1999).

[17] J. Dorman and M. Nogues, Journal of Physics: Condensed Matter 2, 1223 (1990).

[18] D. Fiorani, S. Viticoli, J.L. Dormann, J.L. Tholence, A.P. Murani, Physical Review B 30 2776 (1984).

[19] K. Shirane. Journal of Applied Physics 35 954 (1964).

[20] L.G. Antoshina, A.N. Goryaga, A.I. Kokorev, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 516–519 (2003).

[21] J. J. Ebelmen, Comptes rendus de l'Académie des Sciences 19, 398 (1844).

[22] J. Ebelmen, “Untersuchungen über die Verbindung der Borsäure und Kieselsäure mit Aether“, Annals of Chemistry and of Physics 57 319-355 (1846).

[23] W. Geffcken, E. Berger, “Verfahren zur Änderung Reflexionsvermögens Optischer Gläser“, Deutsches Reichs patent 736 411, assigned to Jenaer Glaswerk Schott & Gen (1939).

[24] J. Brinker, G. W. Scherer, The physics and chemistry of sol-gel processing, Sol-gel science Academic Press, (1990).

[25] T. Tawara, I. Suemune, H. Kumano, Physica E 13, 403 (2002)

[26] M.P. Piléni, Advanced Functional Materials 11 323 (2001).

[27] C. J. Brinker, G. W. Scherer, “Sol - Gel Science“, Academic Press, New York (1990).

[28].R. Guinebrière, Diffraction des rayons X sur échantillons polycristallins 2ème édition (2006).

[29]. F. Rouessac et A. Rouessac, Analyse Chimique, Méthodes et techniques instrumentales modernes 6ème édition (2004).

[30] KasiViswanath ,YInMurthya,KondalaRao,TatabEtRajendraSinghc ,Synthèse Et Caractérisation DesNanoFerritesPar Le CitrateGel.MéthodeIV .Int. J. Chem. Sci.: 11(1), 2013, 64-72.

[31] Erik Casbeer , Virender K. Sharma , Xiang-Zhong Li band photocatalytic activity of ferrites under visible light ,revu.

[32] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jctb.4409>.

[33]. http://bgcryst.com/symp14/papers/354_Tsvetkov_BCC_47-1_2015.pdf.

[34]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0010854515300539>

Chapitre 03

[35] M.L. Marechal, Y.M. Slokar, T. Taufer, Decolouration of chlorotriazine reactive azo dyes with H₂O₂/UV, *Dyes Pigments* 33 (1997) 181–298.

[36] W.X. Chen, W.Y. Lu, Y.Y. Yao, M.H. Xu, Highly efficient decomposition of organic dyes by aqueous-fiber phase transfer and in situ catalytic oxidation using fibersupported cobalt phthalocyanine, *Environ. Sci. Technol.* 41 (2007) 6240–6245.

[37] J. Fernandez, J. Kiwi, C. Lizama, J. Freer, J. Baeza, H.D. Mansilla, Factorial experimental design of orange II photocatalytic discoloration process, *J. Photochem. Photobiol. A* 151 (2002) 213–219.

[38] M. Arami, N.Y. Limaee, N.M. Mahmoodi, N.S. Tabrizi, Removal of dyes from colored textile wastewater by orange peel adsorbent: equilibrium and kinetic studies, *J. Colloid Interface Sci.* 288 (2005) 371–376.

[39] S. Chakraborty, M.K. Purkait, S. Dasgupta, S. De, J.K. Basu, Nanofiltration of textile plant effluent for color removal and reduction in COD, *Sep. Purif. Technol.* 31 (2003) 141–151.

[40] M.K. Purkait, S. DasGupta, S. De, Removal of dye from wastewater using micellar-enhanced ultrafiltration and recovery of surfactant, *Sep. Purif. Technol.* 37 (2004) 81–92.

[41] A.I. Borhan P. Samoila Vasile Hulea A.R. Iordan ,M.N. Palamaru Effect of Al³⁺ substituted zinc ferrite on photocatalytic degradation of Orange I azo dye JPC 9598 To appear in: *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*.

[42] . Joaquim Pedro Silva A,1, Sónia Sousa A, José Rodrigues B, Helena Antunes A, John J. Porter C, Isolina Gonçalves A, Suzana Ferreira-Dias D, Adsorption Of Acid Orange 7 Dye In Aqueous Solutions by Spent Brewery Grains Separation And Purification ,*Technology* 40 (2004) 309–315.

[43] <http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/8231>.

[44] <https://sante-medecine.journaldesfemmes.fr/faq/48306-colorant-anthraquinonique-definition>.

- [45] Filali Mohamed salah , la dégradation photocatalytique des composés organiques récalcitrants en phase aqueuses en présence de UV/Zno et en utilisant le Tio2fixe sur support, 21.06.2016
- [46] Mr.Ghezzar et all, in Gliding arc plasma assisted photocatalytic degradation of anthraquinonic acid green 25 in solution with TiO2. 14 december 2006
- [47] Goncalves M S T, Oliveira-Campos A M F, Pinto M M S, et al. 1999, Chemosphere, 39: 781
- [48] Ioannis Konstantinou K, Triantafyllos Albanis A.2004, Appl. Catal. B: Environ., 49: 1
- [49] Bizani E, Fytianos K, Poulios I, et al. 2006, J. Hazard Mater., 136: 85
- [50] Bianco-Prevot A, Baiocchi C, Brussino M C, et al.2001, Environ. Sci. Technol, 35: 971
- [51] Yoneyama H, Torimoto T. 2000, Catal. Today, 58: 133

Liste des figures

Chapitre 01	
Figure I.1: Squelette anthra-quinonique.....	05
Figure I.2: Squelette azoïque.....	06
Figure I.3: Squelette d'indigoïdes.....	07
Figure I.4 Squelette denitrosés.....	07
Figure I.5 : Principe de la photo catalyse.....	08
Chapitre 02	
Figure II.1 : Méthode de fabrication des Nano-ferrite Sol/gel.....	17
Chapitre 03	
Figure III.1 : Spectres d'absorption UV-vis et structure du colorant AG25 dans L'eau...	25
Figure III.2. : Schéma du protocole de synthèse de Nano-ferrite-Cobalt.....	26
Figure III.3 : Courbe d'étalonnage de l'AG25 dans l'eau à $\lambda_{\max} = 643 \text{ nm}$	28
Figure III.4 : Effet de la dose à pH naturel = 5,6.....	29
Figure III.5 : Effet de la dose à pH imposé = 2.....	30
Figure III.6 : Effet de la dose à pH imposé = 4.....	30
Figure III.7 : Effet de la dose à pH imposé = 8.....	31
Figure III.8: Etude de l'influence de la concentration de l'AG25 sur la décoloration.....	32
Figure III.9: Modélisation de Langmuir Hinshelwood.....	34

Liste des tableaux

Chapitre 01	
Tableau I.1: Principaux groupements chromophores et auxo-chromes, classés par intensité croissante.....	05
Chapitre 03	
Tableau III.1 : Caractéristiques physico-chimiques de la molécule cible.....	26
Tableau III.2 donne les différents temps optimaux pour chaque concentration de colorant.....	33

Annexe

Tableaux nécessaires pour les graphiques du chapitre 03

Tableau III.3 : Valeurs obtenues pour l'établissement de la courbe d'étalonnage de l'Ag25
 $\lambda_{\max}=643 \text{ nm}$

échantillon	C (mg/l)	ABS
1	0,00	0,000
2	74,70	1,387
3	62,26	1,159
4	60,00	1,097
5	40,00	0,802
6	20,00	0,471

Tableau III.4 : Les résultats de la variation du taux de décoloration de l'Ag25 en fonction du
 pH naturel=5.6 sous les rayons UV du soleil.

Dose de Ferrite	0g	0.01g	0.05g	0.1g	0.3g	0.5g
pH Naturel	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
ABS	0.477	0.605	0.515	0.470	0.472	0.469
Taux de décoloration	9.83%	00%	11.35%	19.1%	18.77%	19.28%

Tableau III.5 : Les résultats de la variation du taux de décoloration de l'Ag25 en fonction du
 pH naturel=5.6 dans le noir.

Dose de Ferrite	0g	0.01g	0.05g	0.1g	0.3g	0.5g
pH Naturel	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
ABS	0.475	0.540	0.419	0.498	0.456	0.433
Taux de décoloration	10.20%	9.40%	17.6%	16.4%	23.4%	27.35%

Tableau III.6: Les résultats de la variation du taux de décoloration de l'Ag25 en fonction du
 pH = 2 sous les rayons UV du soleil.

Dose de Ferrite	0g	0.01g	0.05g	0.1g	0.3g	0.5g
pH	2	2	2	2	2	2
ABS	0.469	0.181	0.006	0.01	0.012	00
Taux de décoloration	11.34%	68.85%	98.9%	98.2%	97.94%	100%

Annexe

Tableaux nécessaires pour les graphiques du chapitre 03

Tableau III.7: Les résultats de la variation du taux de décoloration de l'Ag25 en fonction du pH= 2 dans le noir.

Dose de Ferrite	0g	0.01g	0.05g	0.1g	0.3g	0.5g
pH	2	2	2	2	2	2
ABS	0.482	0.302	0.161	0.03	0.02	00
Taux de décoloration	8.89%	49.33%	72.99%	94.97%	96.64%	100%

Tableau III.8: Les résultats de la variation du taux de décoloration de l'Ag25 en fonction du pH =4 sous les rayons UV du soleil.

Dose de Ferrite	0g	0.01g	0.05g	0.1g	0.3g	0.5g
pH	4	4	4	4	4	4
ABS	0.481	0.051	0.087	0.132	0.162	0.038
Taux de décoloration	20.98%	91.23%	85.03%	77.29%	72.12%	93.46%

Tableau III.9 : Les résultats de la variation du taux de décoloration de l'Ag25 en fonction du pH= 4 dans le noir.

Dose de Ferrite	0g	0.01g	0.05g	0.1g	0.3g	0.5g
pH	4	4	4	4	4	4
ABS	0.469	0.528	0.518	0.376	0.513	0.260
Taux de décoloration	11.35%	14.41%	13.09%	36.91%	13.93%	56.38%

Tableau III.10: Les résultats de la variation du taux de décoloration de l'Ag25 en fonction du pH =8 sous les rayons UV du soleil.

Dose de Ferrite	0g	0.01g	0.05g	0.1g	0.3g	0.5g
pH	8	8	8	8	8	8
ABS	0.473	0.551	0.364	0.444	0.523	0.432
Taux de décoloration	10.5%	5.17%	37.35%	23.59%	10%	25.65%

Annexe

Tableaux nécessaires pour les graphiques du chapitre 03

Tableau III.11 : Les résultats de la variation du taux de décoloration de l'Ag25 en fonction du pH= 8 dans le noir.

Dose de Ferrite	0g	0.01g	0.05g	0.1g	0.3g	0.5g
pH	8	8	8	8	8	8
ABS	0.388	0.512	0.541	0.501	0.493	0.442
Taux de décoloration	26.66%	14.09%	9.23%	15.94%	17.21%	25.84%

Tableau III.12 : Temps de traitement pour [Ag25]=20mg/l.

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ABS	0	0.031	0.012	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
Taux de décoloration	0	92.11%	96.95%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tableau III.13 : Temps de traitement pour [Ag25]=30mg/l.

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ABS	0	0.218	0.170	0.167	0.159	0.081	0.032	0.007	0.006	0.003	00	00	00
Taux de décoloration	0	58.8%	67.87%	68.44%	69.95%	84.69%	93.95%	98.67%	98.86%	99.44%	100%	100%	100%

Tableau III.14: Temps de traitement pour [Ag25]=40mg/L.

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ABS	0	0.159	0.146	0.09	0.03	0.027	0.011	0.01	0.006	0.005	0.004	0.003	00
Taux de décoloration	0	75.47%	77.47%	86.11%	95.37%	95.83%	98.3%	98.45%	99.07%	99.22%	99.38%	99.54%	100%

Tableau III.15 : Temps de traitement pour [Ag25]=50mg/L

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ABS	0	0.254	0.243	0.219	0.198	0.104	0.027	0.016	0.014	0.011	0.009	0.006	00
Taux de décoloration	0	71.43%	72.67%	75.36%	77.73%	88.3%	96.96%	98.2%	98.42%	98.76%	98.9%	99.33%	100%

Annexe

Tableaux nécessaires pour les graphiques du chapitre 03

Tableau III.16: Temps de traitement pour [Ag25]=60mg/L.

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ABS	0	0.548	0.545	0.551	0.499	0.441	0.460	0.424	0.391	0.280	0.392	0.388	0.315
Taux de décoloration	0	45.75 %	46.04 %	45.44 %	50.6 %	56.33 %	54.45 %	58.02 %	61.28 %	72.3 %	61.19 %	61.59 %	68.82 %

Tableau III.17: Temps de traitement pour [Ag25]=70mg/L.

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ABS	0	0.448	0.406	0.357	0.327	0.317	0.283	0.224	0.123	0.05	0.024	0.012	0.006
Taux de décoloration	0	58.49 %	62.38 %	66.91 %	69.7 %	70.62 %	73.77 %	79.24 %	88.6 %	95.37 %	97.77 %	98.88 %	99.4 %

Tableau III.18 : Temps de traitement pour [Ag25]=80mg/L.

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ABS	0	0.784	0.817	0.824	0.765	0.731	0.705	0.689	0.642	0.613	0.557	0.527	0.448
Taux de décoloration	0	45.9 %	43.61 %	43.41 %	47.2 %	49.55 %	51.35 %	52.45 %	55.7 %	57.7 %	61.55 %	63.64 %	69.1 %

Tableau III.19: Temps de traitement pour [Ag25]=100mg/L.

Temps (min)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
ABS	0	0.876	0.899	0.901	0.843	0.888	0.835	0.827	0.741	0.636	0.532	0.489	0.453
Taux de décoloration	0	44.63 %	43.18 %	43.05 %	46.72 %	43.87 %	47.22 %	47.37 %	53.17 %	59.8 %	66.38 %	69.09 %	71.37 %

Liste des Abréviations

Ag25	Acid green 25
Fig	Figure
UV	Ultra violet
NFS	Nano-ferrite spinelle
ATG	Analyse thermographique
STEVA	Sciences et techniques de l'environnement et de la valorisation
Co	Cobalt