



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des Sciences appliquées

Département de Génie des procédés

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Industries pétrochimique

Spécialité : Génie de raffinage

Présenté par :

Hadile REGGAB - Ahlam HADID

Thème :

Traitement des eaux usées par la photo-catalyse

Soutenu le:

Devant le jury

MOKHBI Yasmine

MCA.UKM.Ouargla

Présidente

ZIGHMI Souad

MCA.UKM.Ouargla

Examinatrice

SELLAMI Med Hassan

Prof.UKM.Ouargla

Encadreur

Année universitaire :2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





Remerciements

*Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos profondes gratitudees,
avant tout à Allah le tout puissant qui nous a donné le courage pour
mener à terme ce modeste travail.*

*Nous remercions sincèrement notre encadreur, Pr. **SELLAMI Med
Hassan**, pour son soutien, ses encouragements, sa confiance et ses
précieux conseils qui nous ont permis de mieux maîtriser le sujet.*

Nous ne saurons terminer sans remercier tous les membres des jurys

*Dr. **MOKHBI Yasmine** et Dr. **ZIGHMI Souad***

D'avoir accepté d'être dans ce jury de mémoire.

*Enfin, un grand merci à nos parents, à tous nos enseignants du
département de génie de des procédés.*



Dédicace

Je dédie ce travail à ceux qui m'ont ouvert le chemin de la réussite et qui en ont été la cause, après la volonté d'Allah Tout-Puissant.

À celle qui m'a accompagnée par ses prières tout au long de ma vie et de mon parcours scolaire, à celle qui m'a appris la première lettre, ma chère mère.

À celui qui a consacré sa vie et s'est sacrifié pour notre confort, notre réussite et la réalisation de nos rêves, mon cher père.

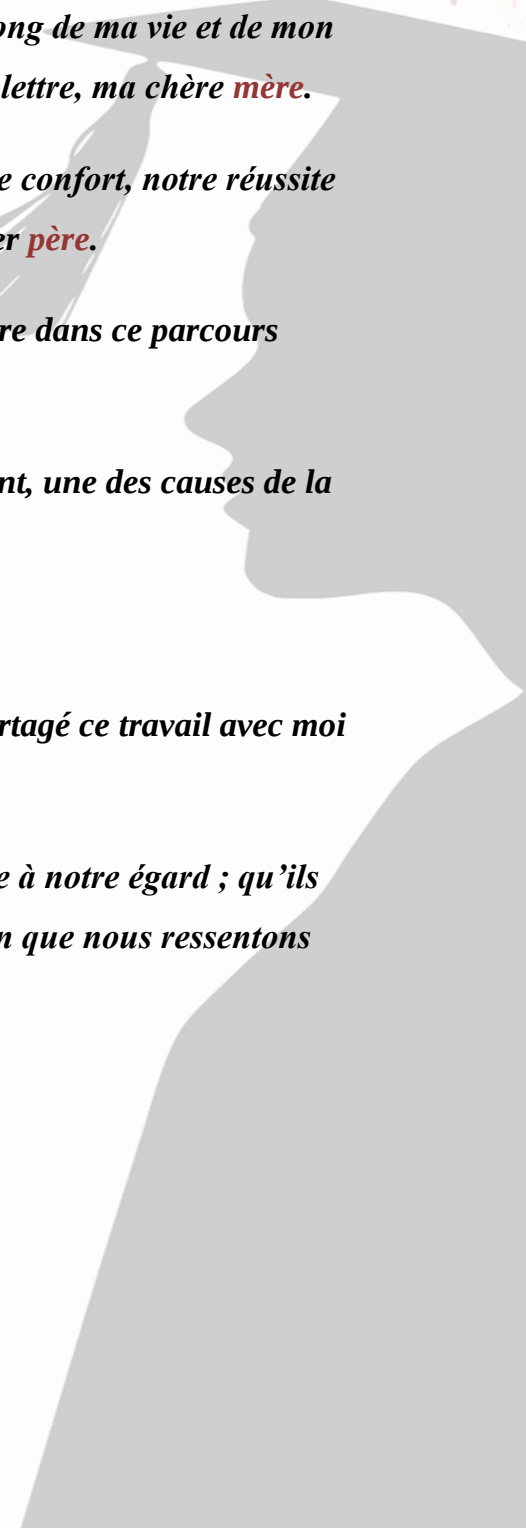
À mon fiancé, qui a été mon soutien après mon père dans ce parcours académique.

À mon frère Saber, qui a été, après Allah Tout-Puissant, une des causes de la réussite de notre mémoire.

À ma chère grand-mère.

Et à ma coéquipière dans ce mémoire, Hadile, qui a partagé ce travail avec moi avec sincérité et dévouement.

À mes deux frères, à mes sœurs, pour leur indulgence à notre égard ; qu'ils trouvent ici l'expression de la plus profonde affection que nous ressentons pour eux.



Ahlam



*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour à celle qui m'a arrosée de tendresse et d'espoir et ma source d'amour inépuisable, à **ma mère** des sentiments si nobles, qui m'a bénie par ses prières.*

*A mon support dans ma vie, qui m'a appris, m'a soutenue et m'a dirigé vers la gloire...**Mon père.***

*A mes chers **frères** et **sœurs**, pour leur présence et leur soutien constant. Un hommage tout particulier à ma chère tante **Houria** ainsi qu'à mon cher cousin **Youssef**, pour leur bienveillance et leur affection qui m'ont toujours accompagnée.*

A tous ceux qui ont cru en moi, de près ou de loin, et qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'aboutissement de ce travail.

*Enfin, je tiens à partager ce succès avec ma chère binôme et amie **Ahlam**, en souvenir de notre collaboration, de notre persévérance pour mener à bien ce projet.*



SOMMAIRE

Remerciements	I
Dédicace 1	II
Dédicace 2	III
Liste des matières	IV
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux	X
Liste des abréviations	XI
Introduction générale.....	1

Partie Théorique

Chapitre I : Généralité sur les eaux usées et leurs pollutions

I.1. Introduction	3
I.2. Définition de l'eau	3
I.3. Importance de l'eau	4
I.4. Classification de l'eau	5
I.4.1. Selon Origines	5
I.4.2. Selon la salinité de l'eau.....	7
I.5. Eaux usées	8
I.5.1. Définition des eaux usées	8
I.5.2. Sources des eaux usées	9
I.5.2.1. Eaux usées domestiques.....	9
I.5.2.2. Eaux usées industrielles.....	9
I.5.2.3. Eaux usées des agricoles	10
I.5.2.4. Eaux usées de ruissellement.....	10
I.6. Pollution des eaux.....	11
I.6.1. Définition de la pollution des eaux.....	11

SOMMAIRE

I.6.2. Principaux types de pollutions des eaux.....	11
I.6.2.1. Pollution physique	11
I.6.2.2. Pollution chimique.....	12
I.6.2.3. Pollution microbiologique	13
I.7. Conclusion.....	14

Chapitre II : Généralité sur La photo-catalyse hétérogène

II.1. Introduction.....	15
II.2. Photo-catalyse hétérogène	15
II.2.1. Définition	15
II.2.2. Historique.....	15
II.2.3. Principe et mécanisme de la photocatalyse hétérogène.....	16
II.2.3.1. Adsorption à l'obscurité.....	16
II.2.3.2. Activation du photocatalyseur	17
II.2.3.3. Réactions de surface	17
II.3. Soleil	19
II.3.2. Énergie solaire.....	19
II.3.3. Rayonnement solaire.....	20
II.3.4. Spectre de rayonnement solaire.....	21
II.4. Utilisation de la photocatalyse	23
II.4.1. Distillation solaire	23
II.4.1.1. Définition	23
II.4.1.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire.....	23
II.4.1.3. Différents types de distillateurs solaires	24
II.4.1.4. Différents paramètres influents sur le fonctionnement du distillateur.....	26
II.4.2. Production d'hydrogène (par craquage de l'eau (water splitting)).....	27
II.5. Conclusion.....	30

SOMMAIRE

Partie Pratique

Chapitre III : Matériel et Méthodes

III.1. Introduction	31
III.2. Matériaux.....	31
III.2.1. Appareillage.....	31
III.2.2. Produits chimiques	33
III.2.3. Instruments de laboratoire	34
III.2.4. Échantillons	34
III.2.5. Dispositif expérimental.....	35
III.3. Procédure expérimentale	36
III.3.1. Expérience I : Effet de type photocatalyseur	36
III.3.2. Expérience II : L'effet de la masse du photocatalyseur.....	40
III.4. Conclusion.....	40

Chapitre IV : Résultats et Discussion

IV.1. Introduction	41
IV.2. Présentation et discussion des résultats	41
IV.2.1. Présentation et discussion des résultats de la première expérience	42
IV.2.1.1. Pour les eaux usées domestiques.....	42
IV.2.2. Présentation et discussion des résultats de la deuxième expérience.....	55
IV.3. Discussion générale	63
IV.4 Conclusion.....	65
Conclusion générale	66
Références bibliographiques	68
Annexes	
Résumé	

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Cycle de l'eau.	04
Figure I.2	Procédés de traitement des eaux usées.	08
Figure I.3	Pollution par les rejets des eaux usées.	11
Figure I.4	Nature de produits polluants et leurs origines.	13
Figure II.1	Principe de la photocatalyse hétérogène.	18
Figure II.2	Flux de lumière solaire.	20
Figure II.3	Processus de transmission du rayonnement solaire dans l'atmosphère.	21
Figure II.4	Analyse spectrale du rayonnement solaire.	22
Figure II.5	Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire.	24
Figure II.6	Distillateur solaire simple à pente unique.	25
Figure II.7	Distillateur solaire simple à double pentes.	26
Figure II.8	Production d'hydrogène à partir de l'eau par photocatalyse et photo-électrochimie.	28
Figure II.9	Largeur de bande interdite de différents photocatalyseurs avec la position de leurs bandes de valence et conduction par rapport au potentiel de l'eau.	29
Figure III.1	Multi-paramètre.	32
Figure III.2	Balance analytique.	32
Figure III.3	Photocatalyseurs.	33
Figure III.4	Eaux usées domestiques.	35
Figure III.5	Eaux usées industrielles.	35
Figure III.6	Schéma du dispositif expérimental approuvé.	35
Figure III.7	Préparation de l'échantillon, mesures préliminaires et ajout de catalyseurs (eau domestique)	37
Figure III.8	Échantillons sont imbibés de 3 heures de rayonnement solaire	37

Liste des figures

Figure III.9	Filtration de l'échantillon et mesures finales	38
Figure III.10	Préparation de l'échantillon, mesures préliminaires et ajout de catalyseurs (eau artificielle)	38
Figure III.11	Exposition au rayonnement solaire des échantillons	38
Figure III.12	Échantillons sont imbibés pour le rayonnement solaire pendant 3 heures	39
Figure IV.1	Décoloration des eaux usées domestiques après traitement	41
Figure IV.2	Décoloration des eaux usées industrielles après traitement	41
Figure IV.3	Variation de pH	43
Figure IV.4	Variation du ORP	43
Figure IV.5	Variation du TDS	44
Figure IV.6	Variation de la salinité	44
Figure IV.7	Variation de température	44
Figure IV.8	Variation de la densité de l'eau	44
Figure IV.9	Variation du (DO)	45
Figure IV.10	Variation du DO saturation	45
Figure IV.16	Efficacité de rendement du TDS	48
Figure IV.17	Variation de pH	50
Figure IV.18	Variation du ORP	50
Figure IV.19	Variation de TDS	50
Figure IV.20	Variation de la salinité	50
Figure IV.21	Variation de température	51
Figure IV.22	Variation de la densité de l'eau	51
Figure IV.23	Variation du DO	51
Figure IV.24	Variation de saturation du DO	51
Figure IV.25	Rendement du TDS	52

Liste des figures

Figure IV.29	Courbe TDS en termes de masse MnO_2	58
Figure IV.30	Courbe de variation du TDS en fonction de la Masse du CaO	62

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau II.1	Valeurs énergétiques des photos issues spectre solaire	22
Tableau III.1	Blocs photocatalyseurs les plus efficaces.	40
Tableau IV.1	Mesures multinormes des eaux usées domestiques	42
Tableau IV.2	Montre l'efficacité de la suppression du TDS en utilisant différents photocatalyseurs.	50
Tableau IV.3	Mesures multi-normes des eaux usées industrielles	52
Tableau IV.4	Efficacité de l'élimination du TDS à l'aide des cinq catalyseurs est montrée.	55
Tableau IV.5	Mesures des eaux usées domestiques avec différentes masses de MnO_2 .	61
Tableau IV.6	Mesures des eaux usées industrielles avec différentes masses de CaO	64

Liste des abréviations

BC:	Bande de Conduction
BV:	Bande de Valence
DCO:	Demande Chimique en Oxygène
DO:	Dissolved Oxygen (Oxygène Dissous)
Eg:	Énergie de la Bande Interdite
ERU:	Eaux Résiduaires Urbaines
IUPAC:	International Union of Pure and Applied Chemistry
NHE:	Normal Hydrogen Electrode
ORP:	Oxidation Reduction Potential
pH:	Potentiel Hydrogène
SC:	Semi-Conducteur
TDS:	Total Dissolved Solids
UV:	Ultraviolet



Introduction générale



Introduction générale

Depuis l'Antiquité, l'eau a été l'un des éléments les plus essentiels de la vie quotidienne, et autrefois elle était facilement obtenue, mais elle est désormais rare dans le monde. À mesure que les villes s'étendent et que les modes de consommation changent, l'eau potable s'épuise plus rapidement, augmentant le volume d'eaux usées souvent rejetées directement dans l'environnement sans traitement.

En Algérie, les ressources en eau disponibles sont menacées par la pollution causée par le rejet d'eau urbaine et industrielle dans les environnements récepteurs. Ces propositions contiennent de nombreuses substances, solides ou en décomposition, ainsi que des micro-organismes pathogènes, qui menacent la qualité globale de l'environnement.

Les activités domestiques et industrielles produisent de grandes quantités d'eaux usées chargées de divers polluants organiques et inorganiques, leur nature varie selon leur origine. Ces contaminants sont composés de divers produits chimiques très stables et résistants aux processus de décomposition conventionnels. Ces substances s'accumulent dans le milieu aquatique, entraînant une détérioration de la qualité de l'eau, un faible taux d'oxygène dissous et une forte demande chimique en oxygène. Par conséquent, le traitement des eaux usées est devenu absolument essentiel pour réduire le risque de contamination et préserver les ressources en eau, ce qui a conduit au développement de Des technologies modernes plus efficaces pour éliminer les contaminants intractables, y compris la photocatalyse hétérogène.

Récemment, l'intérêt pour la technologie de photocatalyse hétérogène dans le traitement de l'eau a augmenté en raison de sa grande efficacité à éliminer les polluants organiques complexes difficiles à traiter par des méthodes conventionnelles. Cette technique a montré des résultats prometteurs dans la réduction de la concentration de nombreux composés toxiques, ainsi que dans l'amélioration des propriétés physiques et chimiques de l'eau traitée. Cela est principalement dû aux réactions redox qui se produisent sous l'influence du rayonnement lumineux en présence de certains catalyseurs, qui aident à décomposer les composés polluants et à les transformer en substances moins nocives pour l'environnement. En ce qui concerne l'utilisation de l'énergie solaire et la réduction de l'utilisation des produits chimiques, cette technologie est considérée comme une solution écologiquement efficace pour le traitement et la réutilisation des eaux usées.

Dans ce contexte, notre étude vise à évaluer l'efficacité de cette technique pour améliorer la qualité des eaux usées et traiter divers types de polluants, et les expériences appliquées de ce travail ont été réalisées au niveau du Laboratoire de Génie des Procédés et

du Laboratoire Génie de l'eau et de l'environnement en Milieu Saharien -Ouargla, où cette partie représente l'aspect pratique principal de notre étude. Elle constitue la transition du cadre théorique vers l'application en laboratoire et sur le terrain, dans le but d'évaluer l'efficacité des procédés de photooxydation.

Ce travail est divisé en deux parties :

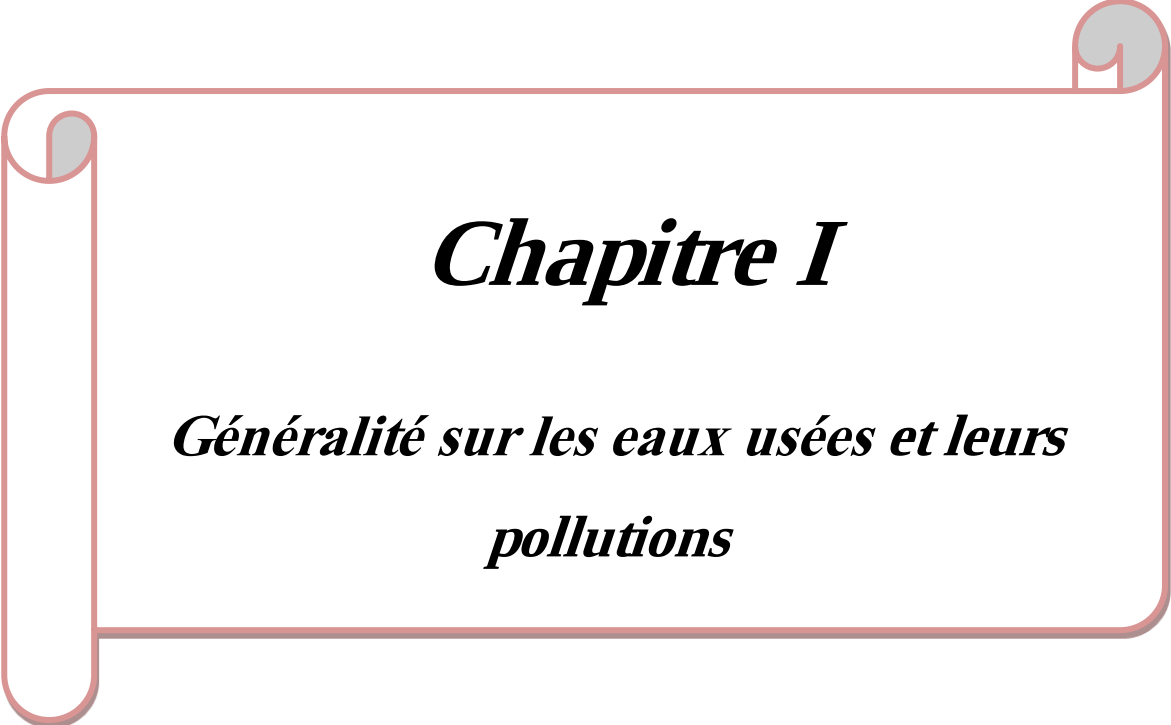
- **Partie théorique** : Il représente la base scientifique sur laquelle repose cette étude, puisqu'il traite des concepts fondamentaux liés au travail étudié, qui sont divisés comme suit :
 - **Chapitre I** : Ce chapitre est consacré à fournir des généralités sur les eaux usées, leurs diverses sources de pollution et leurs impacts environnementaux.
 - **Chapitre II** : Ce chapitre a traité la technique de photocatalyse hétérogène en abordant son principe de fonctionnement, les mécanismes d'oxydation photochimique, ainsi que les principaux facteurs influençant son rendement et son efficacité dans le traitement des eaux usées.
- **Partie Pratique** : Il vise à suivre les variations physiques et chimiques du pH, des solides dissous totaux (TDS), de la demande chimique en oxygène DCO, et d'autres éléments présents dans des échantillons d'eau domestiques et industriels sous l'influence de catalyseurs directement exposés à la lumière solaire. Cet aspect est également divisé en deux parties :
 - **Chapitre III** : Le troisième chapitre est consacré à la présentation des matériaux et dispositifs utilisés ainsi qu'à la méthodologie de travail expérimentale utilisée pour mener à bien l'étude.
 - **Chapitre IV** : Ce chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus, tout en évaluant l'efficacité de la technologie photocatalytique pour améliorer les propriétés des eaux usées et traiter divers contaminants.

Enfin, nous concluons ce travail par une conclusion générale qui inclut les conclusions les plus importantes que nous avons obtenues, et présente un ensemble de suggestions liées au sujet de l'étude et aux perspectives de son développement futur.



Partie ***Théorique***





Chapitre I

***Généralité sur les eaux usées et leurs
pollutions***

I.1. Introduction

L'eau joue un rôle essentiel dans la vie humaine et les écosystèmes. Cependant, son utilisation dans les activités domestiques, agricoles et industrielles génère des eaux usées, contenant divers polluants pouvant nuire à la santé et à l'environnement.

Dans ce chapitre, nous aborderons la définition de l'eau, son importance, sa classification, en mettant l'accent sur les eaux usées et leurs principaux types de pollution.

I.2. Eau

Le mot "eau" est un nom féminin d'origine latine qui désigne un corps liquide, incolore. Insipide et inodore à température ambiante. Dans l'antiquité, elle était considérée comme l'un des quatre éléments fondamentaux, aux côtés de la terre, du feu et de l'air. L'eau est indispensable à la vie, constituant le substrat fondamental des activités biologiques et représentant en moyenne 70% du poids des êtres vivants [1].

Ainsi, l'eau est un composé chimique ubiquitaire sur la terre, essentiel pour tous les organismes vivants connus. C'est le milieu de vie de la plupart des êtres vivants. Elle se trouve en général dans état liquide et possède à température ambiante dès ses propriétés uniques : c'est notamment un solvant efficace pour beaucoup de corps solides trouvés sur terre, et elle est quelque fois désignée sous le nom de <solvant universel > [2].

❖ Cycle de l'eau

Le processus naturel de circulation de l'eau sur terre est communément appelé cycle de l'eau, qui implique des étapes clés telles que l'évaporation des océans, des eaux terrestres et de la végétation, la précipitation sous forme de pluie ou de neige, l'infiltration, le ruissellement ou l'écoulement souterrain, et la sortie aux exutoires. Cependant, la quantité d'eau impliquée dans chaque phase du cycle et la durée de ces phases sont souvent méconnues, la figure I.1 ci- dessous représente le cycle de l'eau [2].

En résumé, voici les principaux processus du cycle de l'eau : D'abord l'évaporation : sous l'action de la chaleur solaire, l'eau des océans, des rivières, des lacs s'évapore et monte dans l'atmosphère.

Ensuite, la condensation : la vapeur d'eau, en se mêlant à des couches d'air froid, se transforme en minuscules gouttelettes qui, sous l'action des vents, se groupent pour former des nuages.

Troisièmement, les précipitations: les nuages libèrent leur contenu sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Quatrièmement, le ruissellement : la majeure partie de l'eau tombe directement dans les océans, tandis que le reste s'infiltre dans le sol pour alimenter les nappes phréatiques et les sources, ou s'écoule vers les rivières, qui, à leur tour, alimentent les océans et recommencent ainsi le cycle de l'eau [2].

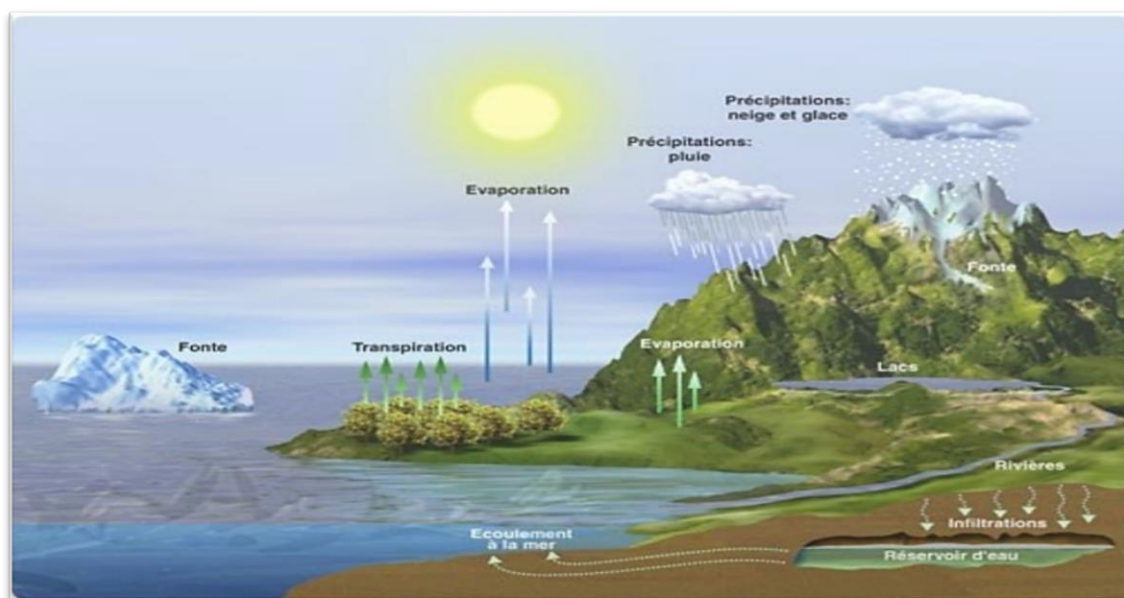


Figure I.1. Cycle de l'eau [3]

I.3. Importance de l'eau

L'eau est un bien naturel vital à la survie de l'humanité et de tout être animal ou végétal vivant sur terre et pour l'environnement de façon générale. Rien ne remplace l'eau, pas même une autre substance liquide. Effectivement, elle a plusieurs particularités qui la rendent unique parmi les autres substances minérales. Dans l'état liquide, elle a le mérite de servir de support à des formes de vie. C'est le solvant des composants qui va transporter les molécules clés et activer les réactions chimiques. On parle également d'eau comme d'une molécule polaire qui possède une extrémité positive (l'hydrogène) et une autre négative (l'oxygène). Ses atomes d'hydrogène peuvent se lier à d'autres molécules. Aucun autre liquide ne saurait former un réseau à la fois aussi souple et aussi résistant, et agir comme solvant d'autant de corps acides ou basiques [4].

I.4. Classification de l'eau

I.4.1. Selon Origines

Il existe quatre sources principales d'eaux brutes: les eaux de pluie, les eaux de surface, les eaux souterraines et les eaux de mer. Les caractéristiques générales de chacune de ces sources reflètent l'interaction Eau- milieu environnant [5].

a) Eaux de pluie

Les eaux de pluie constituent une eau de bonne qualité pour l'alimentation humaine. Ces eaux sont saturées d'oxygène et d'azote, elles ne contiennent pas de sels dissous, comme les sels de magnésium et de calcium, elles sont très douces. Dans les régions industrialisées, les eaux pluviales peuvent être souillées par les poussières atmosphériques. Seules quelques municipalités exploitent cette source d'eau, en raison de la répartition des précipitations dans le temps et des problèmes de captage [5].

b) Eaux de surface

On peut répartir ces eaux en trois catégories : eaux de rivière (partie amont), eaux de rivière (partie aval) et eaux de lac. La dureté de toutes les eaux de surface est modérée.

❖ Eaux de rivières (partie amont)

L'amont d'une rivière est général situé dans une région montagneuse, où la densité de Population faible et les industries pratiquement inexistantes. Les principales caractéristiques de ces eaux sont présentées ci-dessous :

- ✓ Turbidité élevée: le régime des rivières étant torrentiel, les eaux transportent de grandes quantités de matières en suspension.
- ✓ Contamination bactérienne faible: la pollution causée par l'homme ou l'industrialisation y est pratiquement inexistante.
- ✓ Température froide : Ces eaux proviennent soit de sources, soit de fonte de neige et des glaciers.
- ✓ Indice de couleur faible : Ces eaux n'ont pas eu le temps de dissoudre des matières végétales, principales sources de couleur [5].

❖ Eaux de rivières (partie aval)

L'aval d'une rivière se trouve généralement dans des zones où la population est dense, où l'agriculture est largement développée et où les activités industrielles, qu'elles soient peu ou très nombreuses, sont présentes. Par conséquent, la qualité de l'eau dans ces régions est souvent inférieure à celle observée en amont, ce qui la rend également plus complexe à traiter. Les principales caractéristiques de ces eaux sont résumées ci-après :

- ✓ Contamination bactérienne élevée, Cette contamination est surtout imputable au déversement des égouts domestique et agricoles.
- ✓ Contamination organique et inorganique élevée. Les eaux usées domestiques, agricoles et industrielles contiennent de grandes quantités de matières organiques et inorganiques.
- ✓ Indice de couleur pouvant être élevé. Dans beaucoup de cas, les eaux ont eu le temps de dissoudre des matières végétales qui les colorent.

Signalons que le débit et la qualité des eaux de rivière (amont et aval) peuvent varier en peu de temps. C'est pourquoi les usines de purification doivent être suffisamment complexes pour réagir rapidement à toute modification des caractéristiques des eaux de rivière [6].

❖ Eau de lac

- c) Un lac peut être perçu comme un bassin naturel de décantation ayant une longue période de rétention. En conséquence, l'eau y présente généralement une faible turbidité et une contamination bactérienne limitée. Les propriétés d'un lac évoluent lentement au fil de l'année, sauf durant deux brèves phases au printemps et à l'automne. À ces moments-là, les différences de température entre les eaux superficielles et profondes peuvent entraîner un brassage des eaux, ce qui augmente rapidement la turbidité [6].

d) Eaux souterraines

Les eaux souterraines enfouies dans le sol, sont habituellement à l'abri des sources de pollution. Puisque les caractéristiques de ces eaux varient très peu dans le temps, les usines de purification n'ont pas à résoudre les problèmes dus aux variations brusques et importantes de la qualité de l'eau brute. Les principales caractéristiques des eaux souterraines sont

présentées ci-dessous :

- Turbidité faible : Les eaux bénéficient d'une filtration naturelle dans le sol.
- Contamination bactérienne faible : Le très long séjour dans le sol, la filtration naturelle et l'absence de matières organique ne favorisent pas la croissance des bactéries.
- Température constante : Les eaux souterraines sont à l'abri du rayonnement solaire et de l'atmosphère.
- Indice de couleur faible : Les eaux souterraines ne sont pas en contact avec les substances végétales, sources de couleur.
- Débit constant : Contrairement à celles des eaux de rivière, la qualité et la quantité des eaux souterraines demeurent constantes durant toute l'année.
- Dureté souvent élevée : Les eaux peuvent être en contact avec des formations rocheuses contenant des métaux bivalents (Mg^{2+} , Ca^{2+} , etc.) responsables de la dureté.
- Concentration élevée de fer et de manganèse : ces métaux souvent présents dans le sol, sont facilement dissous lorsque l'eau ne contient pas d'oxygène dissous [6].

e) Eaux de mer

L'eau de mer constitue une ressource en eau brute qui n'est généralement exploitée qu'en l'absence de sources d'eau douce accessibles. Elle se distingue par sa forte concentration en sels dissous, un phénomène désigné sous le terme de salinité. Cette salinité dans les eaux marines oscille généralement entre 33 000 et 37 000 mg/L [6].

I.4.2. Selon la salinité de l'eau

La salinité de l'eau correspond à sa teneur en sel dissous dans un volume donné. C'est en mesurant cette concentration que l'on peut classer les eaux en trois catégories: douce, saumâtre et salée.

L'eau est considérée comme "douce" lorsque sa salinité est inférieure à 1 gramme par litre. Cette qualité est souvent associée à la potabilité. Les eaux douces représentent environ 2,5% de l'eau présente sur Terre.

Les eaux sont qualifiées de saumâtres lorsque leur salinité est comprise entre 1 et 10 grammes de sel par litre. On trouve ces eaux au niveau des zones de transition entre l'eau douce et l'eau salée, telles que les embouchures des fleuves et les deltas.

Enfin, l'eau salée a une salinité qui dépasse les 10 grammes par litre et constitue l'eau des mers et des océans [7].

I.5. Eaux usées

I.5.1. Définition des eaux usées

Selon REJSK (2002), les eaux résiduaires urbaines (ERU), ou eaux usées, sont des eaux chargées de polluants, solubles ou non, provenant essentiellement de l'activité humaine. Une eau usée est généralement un mélange de matières polluantes répondant à ces catégories, dispersées ou dissoutes dans l'eau qui a servi aux besoins domestiques ou industriels [8].



Figure I.2. Procédés de traitement des eaux usées [9].

Une eau usée, appelée encore eau résiduaire ou effluent. La pollution des eaux dans son sens le plus large est défini comme « Tout changement défavorable des caractéristiques naturelles (biologiques ou physico-chimiques) dont les causes sont directement ou indirectement en relation avec les activités humaines » [10].

I.5.2. Sources des eaux usées

I.5.2.1. Eaux usées domestiques

Elles proviennent des habitations, et sont généralement véhiculées par le réseau d'assainissement jusqu'à la station d'épuration. Ces eaux se caractérisent par leurs fortes teneurs en matières organiques, en sels minéraux (azote, phosphore), en détergents et en germes fécaux [11].

Les eaux usées domestiques peuvent provenir de trois origines possibles :

- * **Eaux de cuisines** : Elles comprennent des particules minérales en suspension issues du lavage des légumes, des résidus alimentaires riches en matières organiques (glucides, lipides, protides...) ainsi que des produits détergents utilisés pour le nettoyage de la vaisselle, favorisant notamment la dissolution des graisses.
- * **Eaux des salles de bains** : Elles sont chargées en produits utilisés pour l'hygiène corporelle, généralement des matières grasses hydrocarbonées.
- * **Eaux de vannes**: Elles proviennent des sanitaires, et sont très riches en matières hydrocarbonées, en azote, et en phosphore. Ces eaux représentent un substrat adapté aux procédés de traitements biologiques, mais peuvent contenir des éléments pathogènes (bactéries, virus et parasites divers) [11].

I.5.2.2. Eaux usées industrielles

Provenant des usines, elles sont caractérisées par une grande diversité, suivant l'utilisation de l'eau. Tous les produits ou sous-produits de l'activité industrielle se retrouvent concentrés dans l'eau (pollution) [11]:

- ✓ Pollution due aux matières en suspension minérales (Lavage de charbon, carrière, tamisage du sable et gravier, industries productrices d'engrais phosphatés...).

- ✓ Pollution due aux matières en solution minérales (usine de galvanisation...).
- ✓ Pollution due aux matières organiques et graisses (industries agroalimentaires, équarrissages, pâte à papier...).
- ✓ Pollution due aux rejets hydrocarbonés et chimiques divers (raffineries de pétrole, pharmaceutiques...).
- ✓ Pollution due aux rejets radioactifs toxiques (déchets radioactifs non traités, effluents radioactifs des industries nucléaires...).
- ✓ Pollution due à l'eau chaude (circuits de refroidissement des centrales thermiques).
- ✓ Pollution due aux sels métalliques (traitement de surface, métallurgie) [11].

I.5.2.3. Eaux usées des agricoles

Ce sont des eaux qui ont été polluées par des substances utilisées dans le domaine agricole. Les effluents agricoles renferment diverses substances, d'origine agricole ou animale. Il s'agit de solutions d'engrais lessivées par les sols fortement fertilisés (engrais minéraux du commerce ou déjections animales), des produits phytosanitaires (herbicides, fongicides, insecticides,...) et des déjections animales (fumiers et lisiers de bétail) [11].

I.5.2.4. Eaux usées de ruissellement

Les eaux concernées sont principalement celles issues des précipitations et du nettoyage des chaussées. Les eaux de pluie se distinguent par un débit hautement variable, marqué par des fluctuations saisonnières significatives et une répartition des écoulements imprévisible. La pollution associée atteint son paroxysme au début des précipitations, moment où les toits et les chaussées sont rincés, avant de décroître nettement en cas de pluie prolongée. Les principaux polluants identifiés sont des matières en suspension d'origine minérale, ainsi que des hydrocarbures liés à la circulation automobile. On recense également des contaminants atmosphériques tels que des poussières, des oxydes d'azote, des oxydes de soufre ou encore du plomb [11].

I.6. Pollution des eaux

I.6.1. Définition de la pollution des eaux

On appelle pollution de l'eau toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui perturbe l'équilibre de cette eau induit d'importantes nuisances, mauvaise odeur, fermentation, inconfort divers, risque sanitaire, etc [12].



Figure I.3. Pollution par les rejets des eaux usées [13]

I.6.2. Principaux types de pollutions des eaux

I.6.2.1. Pollution physique

C'est une pollution due aux agents physiques (tout élément solide entraîné par l'eau), elle est d'origine domestique, essentiellement industrielle.

On peut la répartir en deux classes: thermique et radioactive [14].

a) Pollution thermique

Provoquée par l'accroissement excessive de la température de l'eau, par suite de rejets des eaux des circuits de refroidissement des établissements industriels spécialement les centrales énergétiques. Un abaissement important de température ralenti la plupart des réactions chimiques vitales. Au contraire, des augmentations de température peuvent tuer certaines espèces, mais également favoriser le développement d'autres organismes causant ainsi un dés équilibre écologique [14].

b) Pollution radioactive

C'est celle occasionnée par une éventuelle radioactivité artificielle des rejets qui trouvent leur source dans l'utilisation de l'énergie nucléaire sous toutes ces formes (installations et centrales d'exploitation de mine d'uranium, traitement des déchets radioactifs). Les éléments radioactifs s'incorporent dans les molécules des organismes vivants. Plus on s'élève dans la chaîne alimentaire plus les organismes sont sensibles aux rayonnements [14].

I.6.2.2. Pollution chimique

Les produits chimiques qui polluent l'eau sont issus des engrais et des produits phytosanitaires qu'on utilise, comme les insecticides ou pesticides.

Ces produits peuvent être charriés par les eaux de ruissellement et polluer les nappes phréatiques. Les engrais chimiques sont transportés dans les lacs ou les rivières par les eaux de pluie et entraînent ainsi la dégradation de l'eau.

Le domaine de l'industrie est lui aussi très nocif pour l'eau, soit à cause des déchets industriels charriés par les eaux de ruissellement ou déversés directement dans les rivières ou dans la mer. L'eau peut également être polluée par les métaux, les plus dangereux étant ceux employés dans les industries [14].

a) Pollution minérale

Elle est constituée essentiellement des cyanures des métaux lourds en provenance des industries métallurgiques.

b) Pollution organique

La pollution organique constitue la partie la plus importante et comprend essentiellement des composés biodégradables, les protéides, les lipides, les glucides, hydrocarbures, détergents. Fournis par les industries alimentaires et agroalimentaires (laiteries, abattoirs, sucreries...) [14].

c) Pollution agricole

L'utilisation excessive d'engrais chimiques et des pesticides pour l'agriculture et l'élevage apporte une présence d'azote et de phosphore en quantité excessive dans les cours d'eau.

Les pesticides constituent un problème majeur pour l'environnement. On inclut dans les pesticides toutes les substances avec lesquelles on combat les animaux et végétaux nuisibles à l'homme et aux êtres vivants supérieurs [14].

I.6.2.3. Pollution microbiologique

Se manifeste lors de l'existence de certains types de micro-organisme capables de se proliférer dans l'eau.

Un grand nombre de micro-organisme peut proliférer dans l'eau, qui sert d'habitat naturel ou comme un simple moyen de transport pour ces micro-organismes.

Les principaux organismes pathogènes qui se multiplient dans l'eau sont: Les bactéries, les virus, les parasites et les champignons [14].

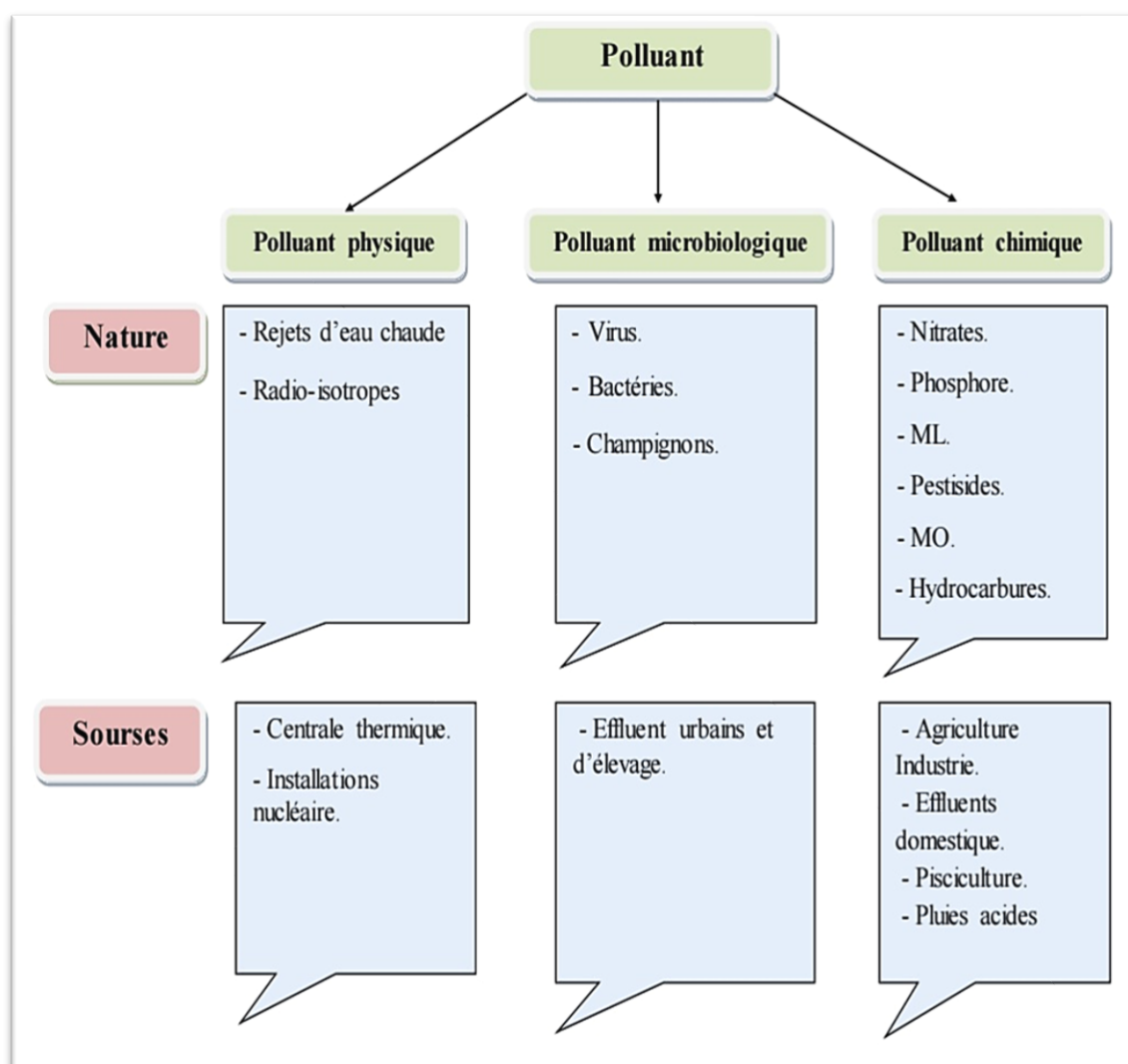


Figure I.4. Nature de produits polluants et leurs origines [14].

I.7. Conclusion

Ce chapitre a offert un aperçu global de l'eau en tant que ressource indispensable, en explorant son cycle naturel, ses différentes classifications et son rôle fondamental dans l'équilibre écologique ainsi que dans le développement humain. Une attention particulière a été accordée aux eaux usées, en mettant en lumière leurs origines et les principaux types de polluants qu'elles génèrent. Il ressort que la gestion et le traitement des eaux usées constituent un défi crucial pour protéger la santé publique et préserver l'environnement, nécessitant une vigilance constante et l'application de stratégies efficaces pour lutter contre la pollution.



Chapitre II

Généralité sur la photo-catalyse hétérogène

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, la photocatalyse hétérogène est présentée comme une technique innovante de dépollution et de valorisation de l'énergie solaire, en mettant en évidence ses principes, ses mécanismes et ses principales applications dans les domaines environnemental et énergétique.

II.2. Photo-catalyse hétérogène

II.2.1. Définition

La photo-catalyse hétérogène est un processus au cours duquel un catalyseur (souvent un semi- conducteur) est activé par l'absorption de photons (lumière). Cette activation produit des agents oxydants capables de décomposer les molécules organiques [15].

La photocatalyse hétérogène est dite hétérogène lorsque le photocatalyseur se trouve dans un état physique différent de celui des polluants. Dans ce cas, le photocatalyseur ne doit être ni consommé ni altéré au cours du processus. D'après l'IUPAC (Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée), la photocatalyse est le domaine de la catalyse qui fait intervenir la lumière comme moyen d'activation du catalyseur [15].

II.2.2. Historique

L'étude de la photocatalyse hétérogène est une discipline scientifique dont les premières publications datent du XX^{ème} siècle. La première d'entre elles comportant le terme de photocatalyse dans son titre remonterait même à 1911 dans un journal allemand (Bruner et Kozak, 1911). En France, Marc Landau publiera en 1913 à l'académie des sciences un rapport évoquant le pouvoir photocatalytique des sels d'uranium sur la dégradation de l'acide oxalique (Landau, 1913). La photocatalyse se serait ainsi développée en Europe avec notamment le travail de Hauffe et Doerffler sur l'oxydation du CO en présence d'oxyde de zinc publié en anglais dans le journal scientifique Journal of Catalysis (Doerffler et Hauffe, 1964a et 1964b). Les auteurs parlent alors de « photocatalyse hétérogène » pour la première fois dans une revue internationale. Cette notion de « photocatalyse hétérogène » sera par la suite développée à partir des années 1970 à Lyon par l'équipe de Teichner via leur travaux sur l'oxydation partielle des paraffines et à travers plusieurs publications dans les Bulletins de la Société Chimique de France. En 1972, la

publication dans la revue Nature d'un travail sur la photolyse de l'eau sur une électrode semi-conductrice publiée initialement au Japon en 1969, créera selon certains un véritable « séisme » marquant alors le début de l'essor de la discipline au niveau international.[16].

La photocatalyse s'est considérablement développée depuis, d'abord pour la production de H₂ lors de la crise pétrolière de 1973, puis pour la dégradation de polluants aqueux tels que les pesticides, les insecticides, les composés azotés et les colorants qui peuvent être complètement oxydés en CO₂ et H₂O [17].

II.2.3. Principe et mécanisme de la photocatalyse hétérogène

Le principe de la photocatalyse hétérogène repose sur la génération de photoélectrons (é) dans la bande de conduction et de trous (h⁺) dans la bande de valence d'un semi-conducteur lorsqu'il est exposé à une lumière dont la longueur d'onde est supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite. Ce processus électronique se déroule à la surface du catalyseur, où les charges é/h⁺ migrent et agissent comme des sites redox, facilitant ainsi la dégradation des polluants adsorbés [17].

II.2.3.1. Adsorption à l'obscurité

L'adsorption des réactifs sur la surface du photocatalyseur a pour but d'établir l'équilibre adsorption-désorption et de déterminer la quantité de polluant adsorbée.

L'adsorption peut être définie comme étant le processus au cours duquel des molécules d'un fluide appelées adsorbat, adhèrent à la surface d'un solide appelé adsorbant. Les sites où les molécules adsorbées se fixent, sont appelés sites actifs. L'adsorption est due aux phénomènes de diffusion et d'interactions entre la surface de l'absorbant et les molécules de l'adsorbat [17].

La nature des liaisons établies, ainsi que la quantité d'énergie libérée lors de la rétention d'une molécule sur la surface solide permettent de distinguer deux types d'adsorption [17]:

❖ Chimisorption

La chimisorption implique une ou plusieurs liaisons chimiques de type ionique ou covalent entre l'adsorbant et l'adsorbat. Elle est souvent irréversible, entraînant un changement des molécules adsorbées, ces dernières ne peuvent pas être adhérentes sur plus

d'une monocouche. Ce type d'adsorption ne concerne que les molécules qui sont directement liées à la surface du solide. L'énergie d'adsorption est assez élevée, comprise entre 40 et 200 Kcal /mol [17].

❖ Physisorption

La physisorption repose sur des interactions faibles de nature physique, telles que les forces de Van der Waals. Ce phénomène se manifeste à basse température. Les molécules adsorbées forment généralement des multicouches, avec une énergie d'adsorption qui ne dépasse généralement pas 40 kcal/mol. Ce type d'adsorption est rapide, réversible et n'altère pas la structure des molécules impliquées [17].

II.2.3.2. Activation du photocatalyseur

La photocatalyse hétérogène est basée sur l'absorption, par un semi-conducteur SC, de photons dont l'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite (gap) E_g , permettant aux électrons de se déplacer de la bande de valence BV vers la bande de conduction BC. Des lacunes électroniques, également appelées trous sont ainsi générées dans la bande de valence [17].



En l'absence de piègeurs des porteurs de charge appropriés, les paires électron-trou photogénérés peuvent se recombiner à l'intérieur du volume du semi-conducteur ou à sa surface en un temps très court. La recombinaison s'accompagne d'une perte d'énergie qui est généralement traduite par un dégagement de chaleur (Equation II.2). Les charges qui migrent vers la surface sans se recombiner peuvent participer à une série de réactions d'oxydoréduction avec les espèces adsorbées en surface du catalyseur [17].



II.2.3.3. Réactions de surface

Les trous photoinduits peuvent réagir directement avec le polluant adsorbé (Equation II.3), comme ils peuvent oxyder des molécules d'eau (Equation II.4) ou des anions hydroxyles (Equation II.5) pour former des radicaux hydroxyles HO très réactifs, participant à la dégradation des contaminants [17].



Les électrons peuvent réduire l'oxygène dissous dans l'eau pour former des radicaux superoxydes $\text{O}_2^{\cdot-}$ (Equation II.6). Les superoxydes $\text{O}_2^{\cdot-}$ peuvent aussi générer des radicaux.

Hydroperoxydes H_2O_2 par la réaction avec les ions H^+ (Equation II.7). Cependant, le peroxyde d'hydrogène H_2O_2 est produit par la combinaison de deux radicaux hydroperoxydes (Equation II.8). Ensuite, il réagit avec l'électron (Equation II.9) et le radical $\text{O}_2^{\cdot-}$ (Equation II.10) pour former des radicaux $\text{HO}^\cdot$. Capables d'oxyder les polluants organiques.



Les radicaux $\text{HO}^\cdot$ générés réduisent les impuretés organiques en composés intermédiaires qui sont encore dégradés par la même réaction jusqu'à ce que le CO_2 et l'eau soient libérés comme sous-produits [17].



Les étapes décrites ci-dessous peuvent être résumées sur la figure II.1.

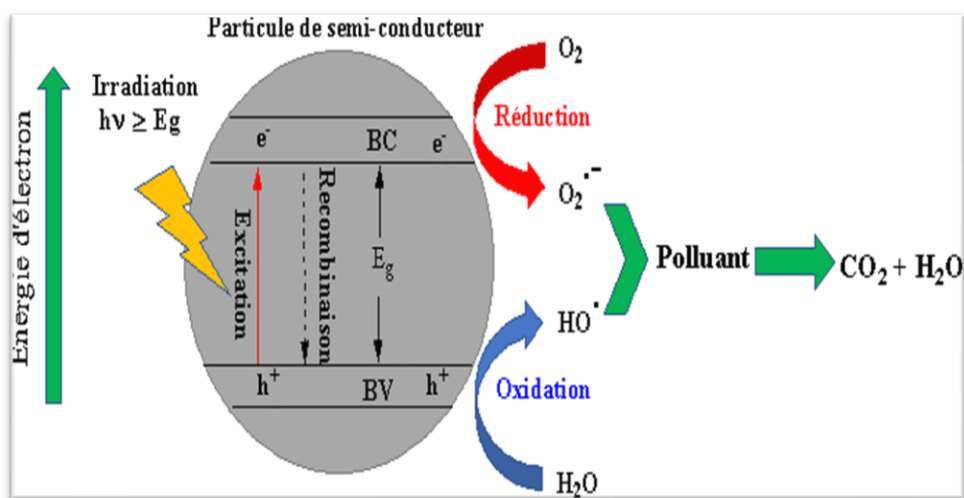


Figure II.1. Principe de la photocatalyse hétérogène [17]

II.3. Soleil

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000 km de la terre. Le soleil est composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium et il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 107 K [18].

Le soleil est composé chimiquement de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2 % restant étant mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connues. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à 150×10^6 Km; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise [19].

II.3.2. Énergie solaire

Le soleil libère d'énormes quantités d'énergies qui, après avoir été parcourues très longue distance atteignent la surface de la terre, il produit un rayonnement qui peut être assimilé, en première approximation, à celui d'un corps noir à 5800°k [20].

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau, deux cycles ont été imaginés pour décrire les étapes conduisant à cette fusion. Le cycle proton–proton fournit 90% de l'énergie solaire et le cycle de carbone (ou cycle de Bethe), fournit les 10% restants. Les deux cycles sont résumés par l'équation [18] :



La quantité d'énergie solaire que recevrait un m^2 de la surface terrestre exposée directement aux rayons du Soleil si l'atmosphère terrestre n'existait pas. Elle correspond au flux solaire ramené à la distance Terre-Soleil Selon l'excentricité de l'orbite terrestre, sa moyenne annuelle étant égale à $\Phi_S = 1368 \text{ W/m}^2$, ce dernier nommé la constante solaire.

Donc une sphère (la terre) de rayon r dont la surface $S = 4\pi r^2$ recevra une puissance:

$$P = \Phi_S \cdot S \quad (\text{II. 2})$$

La puissance P du Soleil est donc $P = 3,84 \times 10^{26} \text{ W}$ pour une surface perpendiculaire à la direction Terre–Soleil [18].

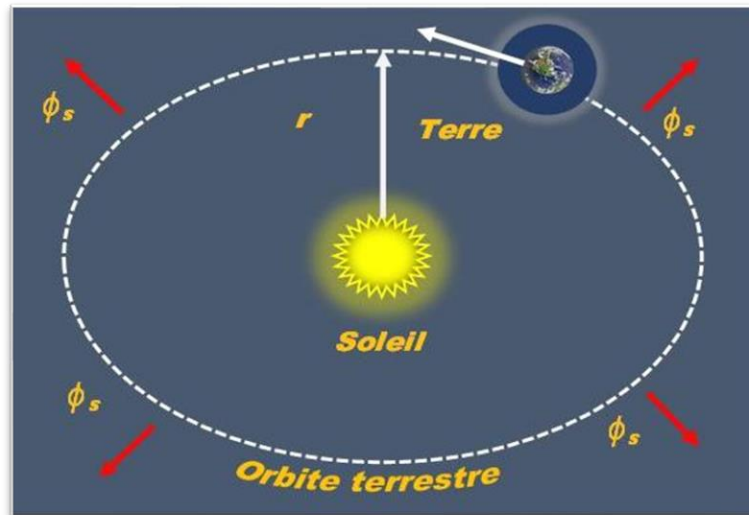


Figure II.2. Flux de lumière solaire [18]

On distingue deux branches principales d'applications de l'énergie solaire :

- a) L'énergie solaire photovoltaïque : Qui consiste à transformer une partie des rayons du soleil en électricité au moyen d'une cellule photovoltaïque [18].
- b) L'énergie solaire thermique : Qui consiste plutôt à exploiter la chaleur dégagée par ces rayons solaires pour diverses utilisations :
 - Pour un usage direct : chauffe-eau, chauffage solaire, fours solaires, cuisinières et sécheuses solaires, le dessalement de l'eau (distillation solaire) [18].
 - Pour un usage indirect : La chaleur utilisée ici, sert pour un second usage. On parle d'énergie solaire thermodynamique [18].

II.3.3. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0,2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2,5 \mu\text{m}$) [21].

Le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit:

❖ Rayonnement direct

C'est la fraction du rayonnement solaire qui arrive directement au sol, dont le trajet est « linéaire » (il y a, en fait, de légères déviations) et unique à un instant donné [18].

❖ Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus désigne l'énergie lumineuse émise par l'ensemble de la voûte céleste. Cela résulte de l'absorption et de la diffusion partielle du rayonnement solaire par l'atmosphère, ainsi que de la réflexion opérée par les nuages. Par temps clair, ce rayonnement représente environ 20 % de l'énergie globale reçue. En revanche, lorsque le ciel est couvert, il en constitue la totalité.

❖ Rayonnement global

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus [21].

$$G = I_d + I_f \quad (\text{II-3})$$

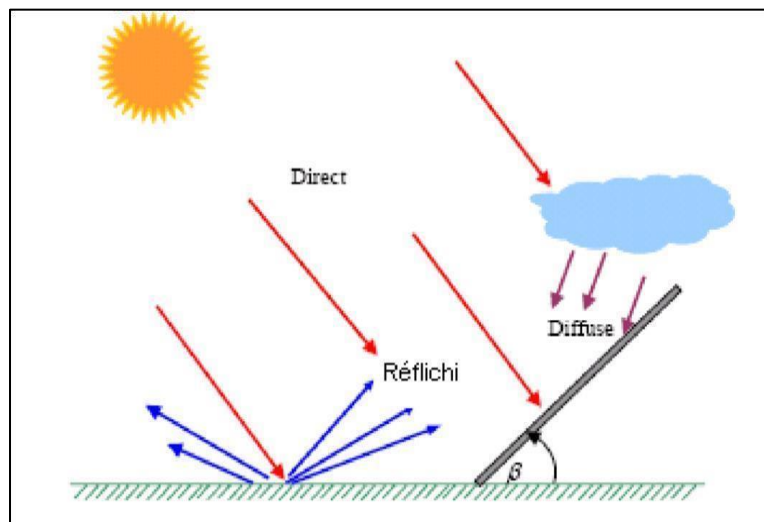


Figure II.3. Processus de transmission du rayonnement solaire dans l'atmosphère [21].

II.3.4. Spectre de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2 μm) à l'infrarouge lointain (2,5 μm) [18].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement de :

- 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 μm).

- 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 μm).
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

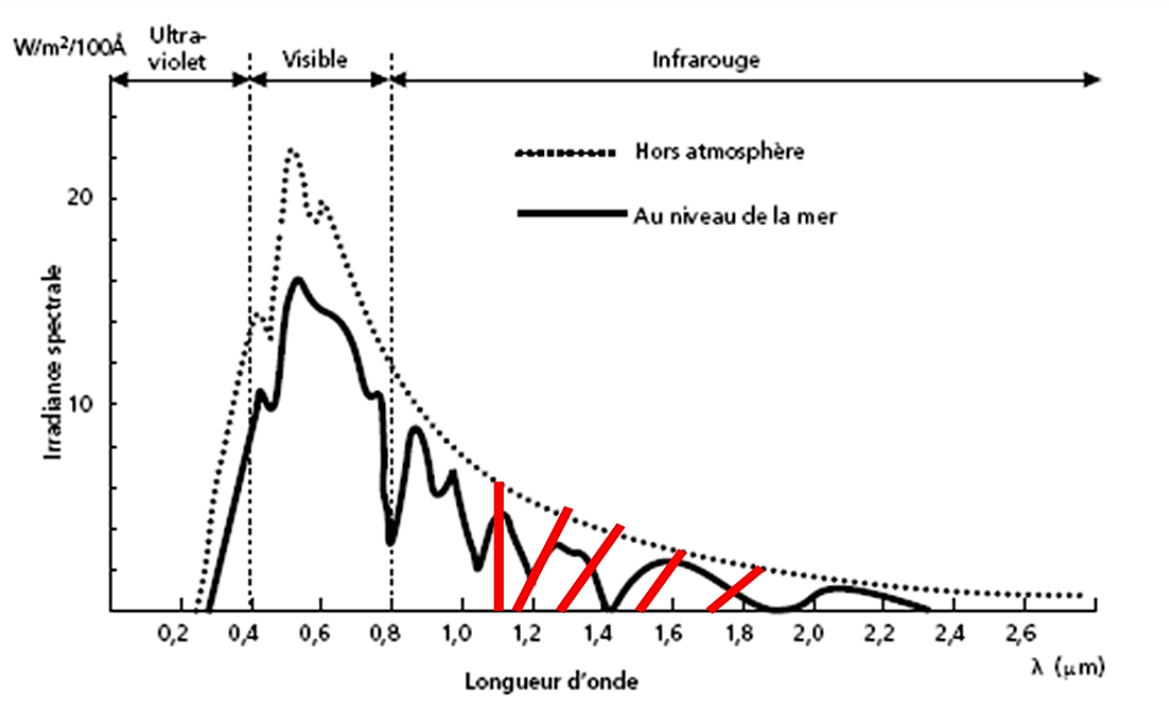


Fig. II.4. Analyse spectrale du rayonnement solaire [18]

Le tableau 1.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des photos pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux [18].

Tableau II.1. Valeurs énergétiques des photos issues spectre solaire [18]

λ (μm)	E_{ph} (eV)	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons.

Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global [18].

II.4. Utilisation de la photocatalyse

II.4.1. Distillation solaire

II.4.1.1. Définition

La distillation solaire est l'une des techniques utilisées pour la production de l'eau douce à partir d'eau saumâtre et d'eau de mer grâce à l'énergie solaire. La distillation solaire a été utilisée depuis plusieurs siècles ; mais la plus grande réalisation est apparue en 1872 près de Las-Salinas dans le nord du Chili. Le modèle a été fabriqué par Carlos Wilson, un ingénieur suédois avec une surface vitrée de 5000 m², produisant jusqu'à 20 m³ d'eau douce par jour à partir d'une eau saline contenant 140 g/L. Ce système fonctionna jusqu'en 1910 à cause d'un problème d'accumulation rapide des sels dans le bassin, nécessitant un nettoyage régulier du distillateur [22].

II.4.1.2. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire

Le distillateur solaire est un appareil largement utilisé dans les procédés de dessalement solaire. Il utilise l'énergie solaire pour produire de l'eau potable à partir d'eau saumâtre ou d'eau saline. Le fonctionnement d'un distillateur solaire repose sur les étapes suivantes :

- L'eau salée dans le bac va se chauffer par l'irradiation solaire absorbée (d'autant plus vite que le bassin est noir).
- Après l'augmentation de température, une partie de l'eau s'évapore.
- La vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente.
- Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin [21].

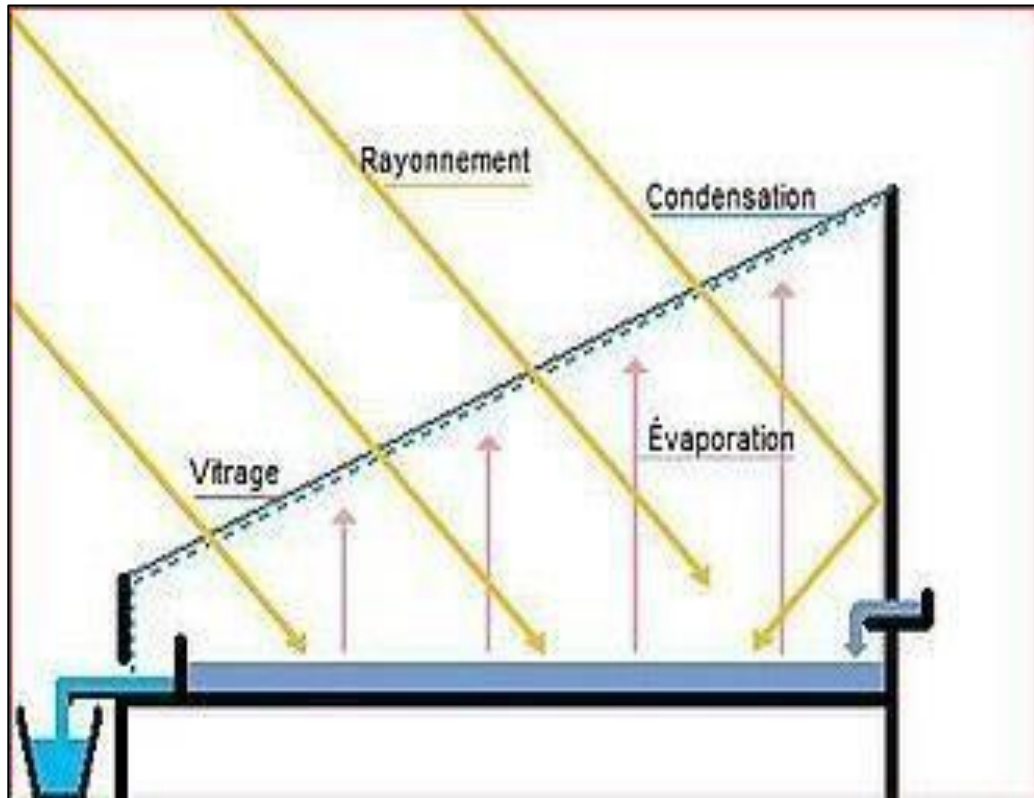


Figure II.5. Principe de fonctionnement d'un distillateur solaire [21].

II.4.1.3. Les différents types de distillateurs solaires

Il existe plusieurs modèles et types de distillateurs solaires, Ils peuvent être distincts, en termes de conception et en termes de construction (matériaux de fabrication utilisés), mais tous ils possèdent le même principe de fonctionnement [21]. On distingue les types des distillateurs suivants :

- Distillateurs solaires à multiples effets.
- Distillateurs solaires à simple effet.

a) Distillateurs à multiples effets

Les distillateurs solaires à multiples effets sont constitués de plusieurs évaporateurs, et opérant à des pressions décroissantes ; l'effet de tête et l'effet de queue. Ils contiennent plusieurs modèles qui sont les suivants [21] :

- Distillateurs solaires inclinés à cascades.
- Distillateurs solaires à plusieurs bassins.

b) Distillateurs à simple effet

Les distillateurs à simple effet sont des systèmes rudimentaires conçus pour produire de l'eau distillée à partir d'eau salée. Ils se composent généralement d'un couvercle en verre placé en haut et d'un bassin contenant de l'eau au-dessous. Le verre, largement transparent au rayonnement solaire, permet à celui-ci de traverser et de chauffer l'eau contenue dans le bassin, générant ce qu'on appelle un effet de serre. En parallèle, la surface supérieure en verre perd de la chaleur au contact de l'environnement par convection et rayonnement thermique, ce qui la maintient à une température inférieure à celle de l'eau dans le bassin. Cette différence de température transforme la surface de verre en un lieu propice à la condensation. Parmi ce type de distillateurs, on peut citer certains exemples [21]:

➤ Distillateur à pente unique

Le distillateur solaire à pente unique ou encore le distillateur de Charles Wilson (son créateur au Chili en 1872), C'est un distillateur à capteur unique incliné d'un angle (β), il a généralement un rendement inférieur à celui d'autres types de distillateurs à multi-effets, mais il est très souple par ce que il est facile à entretenir et à démonter et bien sûr à assembler. Le principe de fonctionnement est représenté dans la figure (II.6) [21].

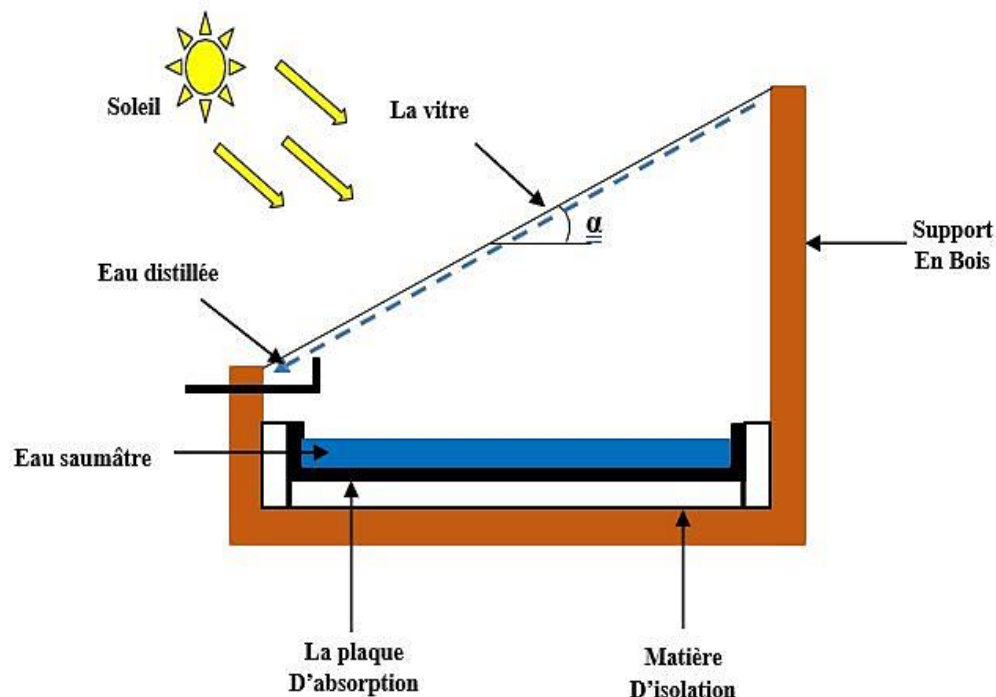


Figure II.6. Distillateur solaire simple à pente unique [23].

➤ Distillateur à pente doublée

C'est un distillateur toujours très simple, mais avec un double couvercle en verre ou chacun d'eux est incliné d'un angle (β), son avantage est d'exposer un côté au soleil et l'autre côté à l'ombre pour accélérer et augmenter le taux de condensation. La figure (II.7) présente le principe de fonctionnement [17].

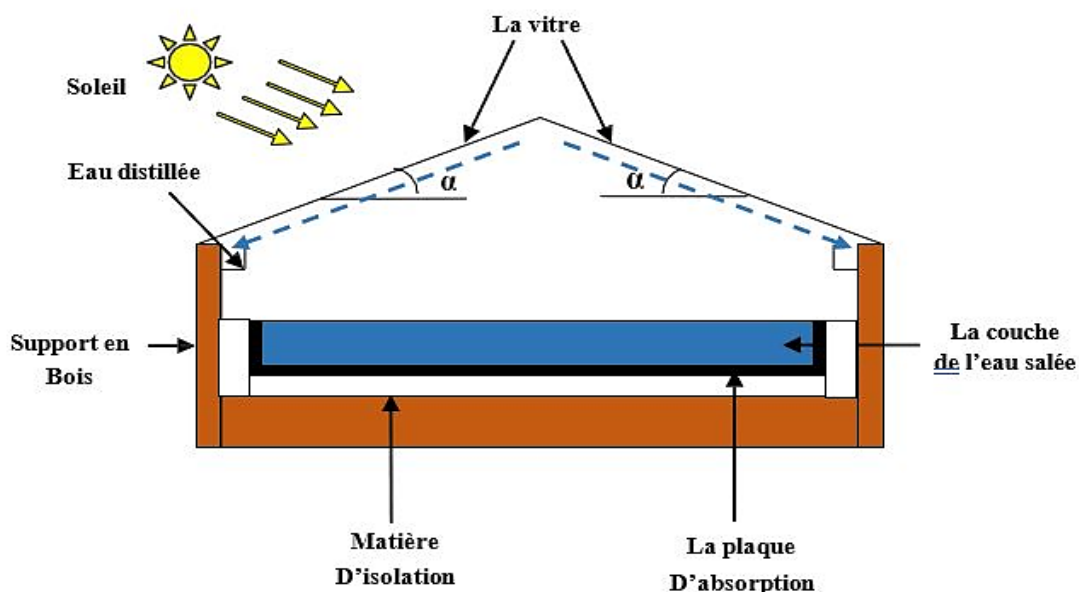


Figure II.7. Distillateur solaire simple à double pentes [23].

II.4.1.4. Différents paramètres influents sur le fonctionnement du distillateur

Les différents paramètres agissant sur le fonctionnement du distillateur solaire, généralement dépendent des deux paramètres :

❖ Paramètres externes

Ces paramètres influent sur le fonctionnement et le rendement du distillateur, ils dépendent des facteurs météorologiques telques ; le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent.

• Rayonnement solaire

La production en eau du distillateur solaire dépend essentiellement de l'intensité de la radiation solaire [21].

- **Température ambiante**

La production en eau augmente légèrement quand la température de l'air augmente.

- **Vitesse du vent**

La vitesse du vent est liée à la convection forcée qui se produit au niveau de la surface externe de vitre, donc elle conduit à une augmentation de l'écart entre les températures de l'eau salée au niveau de bassin et celle de la vitre.

- ❖ **Paramètres interne**

Ces paramètres sont liés à la conception de l'appareil (l'absorbeur, la profondeur, la nature de condenseur et son inclinaison ... etc.).

- **Absorbeur**

La surface absorbante peut être construite de plusieurs matériaux (bois, métal, béton, matière synthétique).

- **Profondeur de l'eau saumâtre**

L'un des paramètres de conception les plus importants qui affectent le rendement du distillateur solaire est la profondeur de l'eau. La profondeur de l'eau affecte le taux d'évaporation et le rendement du distillat.

- **Nature de condenseur et son inclinaison**

Elle doit être transparente, fabriquée en verre ou en plastique et inclinée par rapport à l'horizontale suivant la latitude de la région [21].

II.4.2. Production d'hydrogène (par craquage de l'eau (water splitting))

La photocatalyse trouve ses applications dans plusieurs domaines, principalement dans l'environnement comme la dépollution de l'eau et de l'air, et dans la réalisation de surfaces autonettoyantes. L'une des applications les plus attractives est celle de la production d'hydrogène à partir de l'eau. Dans ce contexte, deux approches sont disponibles : la voie photo catalytique où le semi-conducteur est généralement en suspension dans d'eau et la voie photo-électrochimique où une électrode photosensible est immergée dans l'eau (figure II.8) [24].

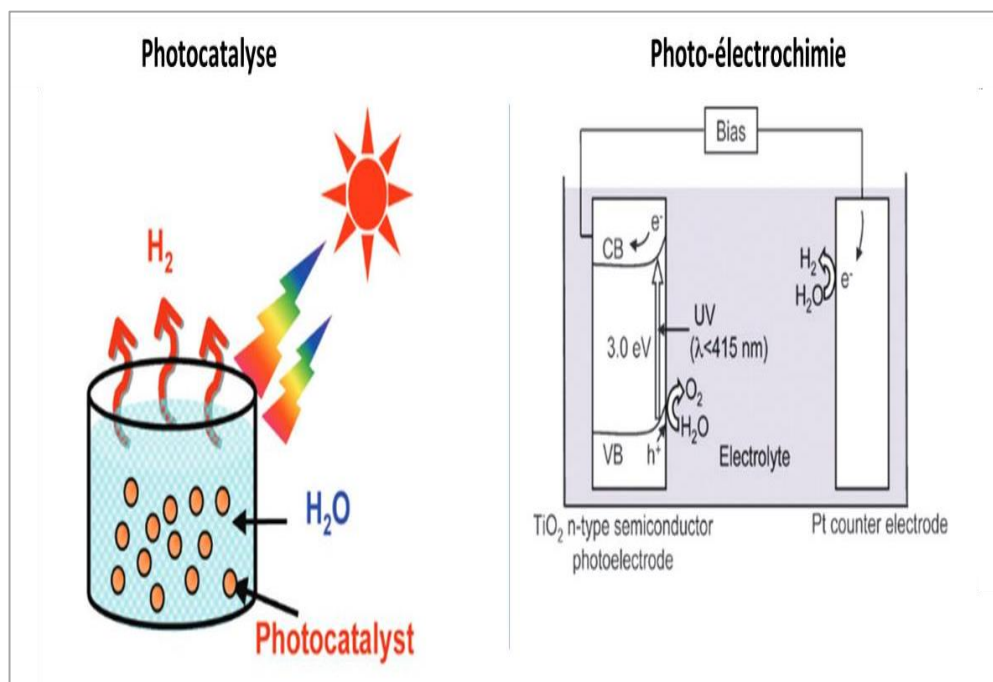
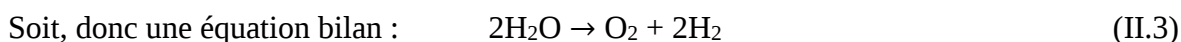
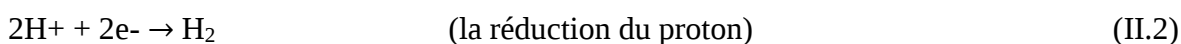
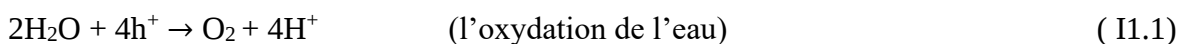


Figure II.8. Production d'hydrogène à partir de l'eau par photocatalyse et photo-électrochimie [24].

Par définition, le craquage de l'eau, communément appelé « water-splitting » dans le domaine scientifique, est un processus dans lequel l'eau est dissociée en hydrogène et oxygène par une source d'énergie externe (l'énergie solaire) [24].

Le craquage de l'eau se déroule selon les deux réactions électrochimiques suivantes :



La production de l'hydrogène par la dissociation de l'eau est une réaction endothermique avec une variation d'énergie libre de Gibbs positive ($\Delta G > 0$; $\Delta G^0 = +237,2 \text{ kJ mol}^{-1}$ ou $2,46 \text{ eV}$ par molécule de H_2O). La réaction du craquage de l'eau est à deux électrons soit $1,23 \text{ eV}$ par électron. L'utilisation de la lumière solaire nécessite la présence de semi-conducteurs capables d'absorber théoriquement des photons d'une énergie supérieure à $1,23 \text{ eV}$ ($< 1000 \text{ nm}$) et de convertir cette énergie en H_2 et O_2 . Ainsi, un matériau semi-conducteur utilisé pour le craquage de l'eau sous lumière visible doit satisfaire plusieurs conditions comme [24]:

- ❖ Energie de la bande interdite inférieure à 3 eV (> 400 nm) et des potentiels redox de la BV et BC adaptés pour les réactions d'oxydation et de réduction, respectivement.
- ❖ Capacité de séparation des électrons et trous photo-excités.
- ❖ Minimisation des pertes d'énergie liées au transport des charges et aux recombinaisons.
- ❖ Stabilité chimique envers la photo-corrosion en milieu aqueux.
- ❖ Propriétés cinétiques appropriées de transfert des électrons de la surface du SC vers l'eau.
- ❖ Faible coût de production.
- ❖ Des propriétés structurales et morphologiques optimisées.

La structure électronique du semi-conducteur est un point crucial pour le craquage de l'eau par photocatalyse. La figure II.9 représente l'énergie de la bande interdite de différents semi-conducteurs couramment étudiés en photocatalyse, avec la position de leurs bandes de valence et conduction [24].

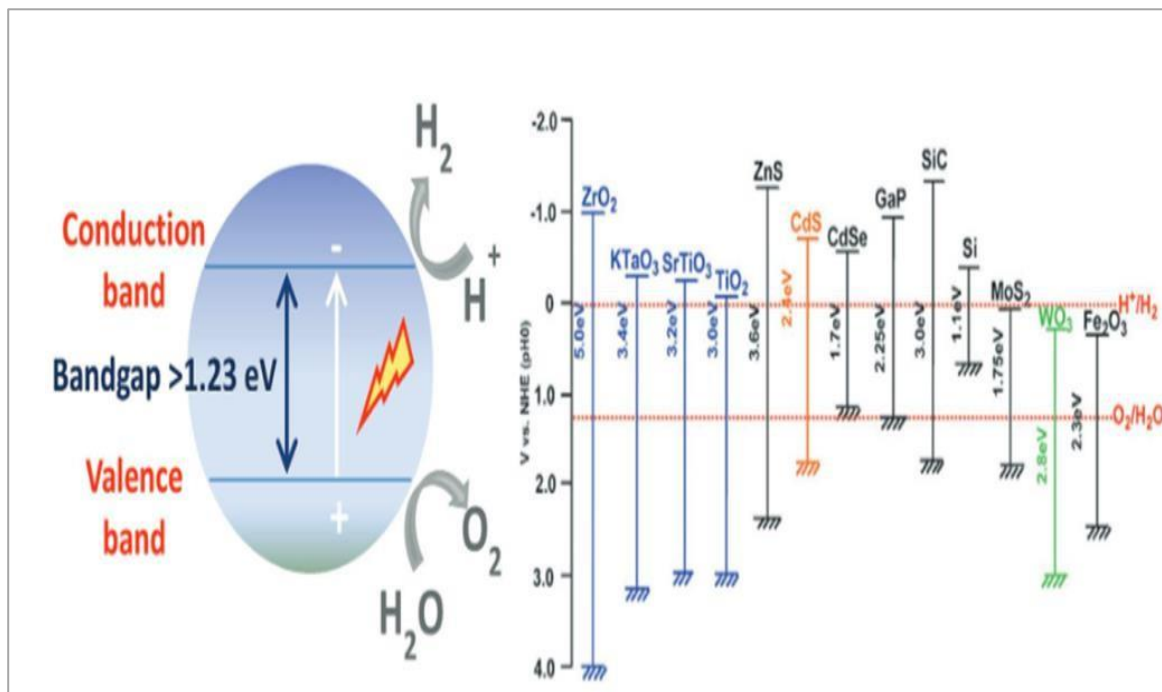


Figure II.9. Largeur de bande interdite de différents photocatalyseurs avec la position de leurs bandes de valence et conduction par rapport au potentiel de l'eau [24].

Concrètement, en plus d'une énergie de bande interdite adéquate, la bande de valence doit se situer à un potentiel électrochimique plus positif que celui du couple O_2/H_2O (1,23 V vs. NHE) pour l'oxydation de l'eau, tandis que pour réduire les H^+ en H_2 , la bande de conduction doit se situer à un potentiel électrochimique plus négatif que celui du couple H^+/H_2 (0V vs. NHE) [24].

Divers photocatalyseurs sont employés dans le processus de craquage de l'eau, principalement des oxydes métalliques de transition incluant des cations métalliques ayant des configurations électroniques d0 et d10. Les oxydes d0 regroupent les éléments des groupes IVB (Ti^{4+} , Zr^{4+}), VB (Nb^{5+} , Ta^{5+}) et VIB (Mo^{6+} , W^{6+}), tandis que les oxydes d10 incluent ceux des groupes IIIA (Ga^{3+} , In^{3+}), IVA (Ge^{4+} , Sn^{4+}) et VA (Sb^{5+}). En complément, certains matériaux comme les nitrures, sulfures, carbures et phosphures métalliques sont également identifiés comme de bons photocatalyseurs pour la production d'hydrogène à partir de l'eau. La figure II.9 présente plusieurs photocatalyseurs potentiels utilisables dans le craquage de l'eau, notamment TiO_2 , $SrTiO_3$, $KTiO_3$ et CdS . Ces composés possèdent des bandes de valence (BV) et des bandes de conduction (BC) capables, sur le plan théorique, de faciliter la réduction de l'hydrogène et l'oxydation de l'eau. Toutefois, leur large bande interdite nécessite un apport énergétique sous forme de rayons UV, qui ne constituent que 3 à 4 % du spectre solaire. Cette restriction pose un défi majeur, au cœur de nombreuses recherches visant à étendre la capacité d'absorption vers le spectre visible, afin d'optimiser l'utilisation du rayonnement solaire pour une production d'hydrogène plus efficace [24].

II.5. Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière l'efficacité de la photocatalyse en tant que technique avancée d'oxydation, capable de dégrader les polluants grâce à l'interaction entre la lumière et un photocatalyseur, en soulignant l'importance de l'adsorption dans le mécanisme réactionnel. Il a également valorisé l'utilisation du gisement solaire comme une source d'énergie renouvelable et durable. En complément, la photocatalyse offre des perspectives encourageantes pour la dépollution et le développement de technologies énergétiques respectueuses de l'environnement.



Partie Pratique





Chapitre III

Matériel et Méthodes

III.1. Introduction

Ce chapitre vise à présenter l'aspect appliqué de l'étude, en présentant les matériaux et dispositifs utilisés (Matériel), en plus de décrire la méthodologie expérimentale adoptée (Méthodes) dans le traitement des eaux usées à l'aide de la technologie photocatalytique.

Cette section décrit également les différentes étapes du travail de laboratoire adoptées afin d'assurer la précision et la fiabilité des résultats obtenus.

III.2. Matériaux

III.2.1. Appareillage

Dans cette étude, nous avons utilisé un multi-paramètre HANNA (Figure III.1). Cet appareil est un instrument de mesure portable avancé qui permet de déterminer simultanément plusieurs paramètres physicochimiques de la qualité de l'eau à l'aide d'une sonde multi-capteur.

L'appareil mesure principalement les paramètres suivants :

- **Température (°C) :** C'est une mesure de la température de l'eau ou de l'eau froide, affectant les réactions chimiques et biologiques ainsi que la dissolution des gaz.
- **pH :** Il s'agit d'une mesure du pH ou de l'alcalinité de l'eau selon la concentration d'ions hydrogène (H^+).
- **mV pH :** La tension (en millivolts) mesurée par une électrode de pH, et est utilisée pour déterminer indirectement la valeur de pH.
- **Salinité (PSU) :** La concentration totale de sels dissous dans l'eau de mer, mesurée en unités de salinité pratiques.
- **Oxygène dissous (DO – ppm) :** La quantité d'oxygène dans l'eau disponible pour les organismes aquatiques, mesurée en parties par million.
- **Saturation en oxygène dissous (saturation DO) :** Le rapport entre la quantité d'oxygène dissous dans l'eau et le maximum que l'eau peut contenir à une température et pression données.

- **Résistance électrique ($M\Omega \cdot cm$)** : C'est une mesure de la résistance de l'eau au courant électrique, et cela reflète son degré de pureté (plus la résistance est élevée, plus l'eau est pure).
- **Potentiel d'oxydation (ORP – mV)** : Il s'agit de la capacité oxydante ou réductrice de l'eau, exprimant la tendance de l'eau à gagner ou à perdre des électrons.
- **Solides dissous totaux (TDS – mg/L)** : La somme des substances dissoutes dans l'eau telles que les sels et minéraux, mesurée en mg/L.
- **Densité de l'eau de mer (σ_t)** : C'est la densité de l'eau de mer corrigée à une certaine température, et dépend principalement de la salinité, de la température et de la pression.

L'appareil a été régulièrement calibré avant chaque série de mesures selon les instructions du fabricant afin d'assurer la précision et la fiabilité des résultats.

Une balance analytique précise (Figure III.2) a également été utilisée pour peser les quantités de photocatalyseurs avec une grande précision.



Figure III.1. Multi-paramètre

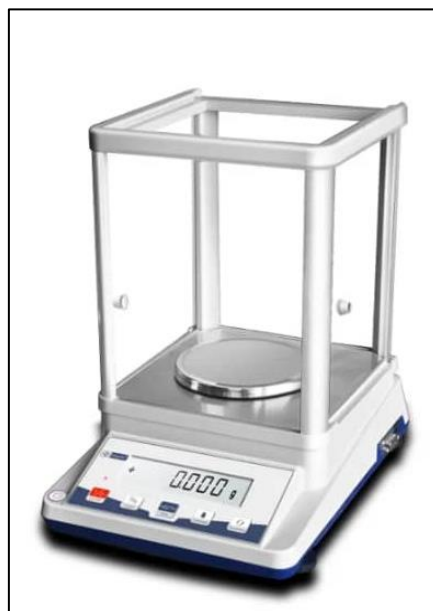


Figure III.2. Balance analytique

III.2.2. Produits chimiques

Les produits chimiques utilisés comprenaient 5 photocatalyseurs sous forme de poudre fine commerciale (Figure III.3) :

- ZnO (oxyde de zinc).
- Al₂O₃ (oxyde d'aluminium).
- CuO (oxyde de cuivre).
- CaO (oxyde de calcium).
- MnO₂ (dioxyde de manganèse).

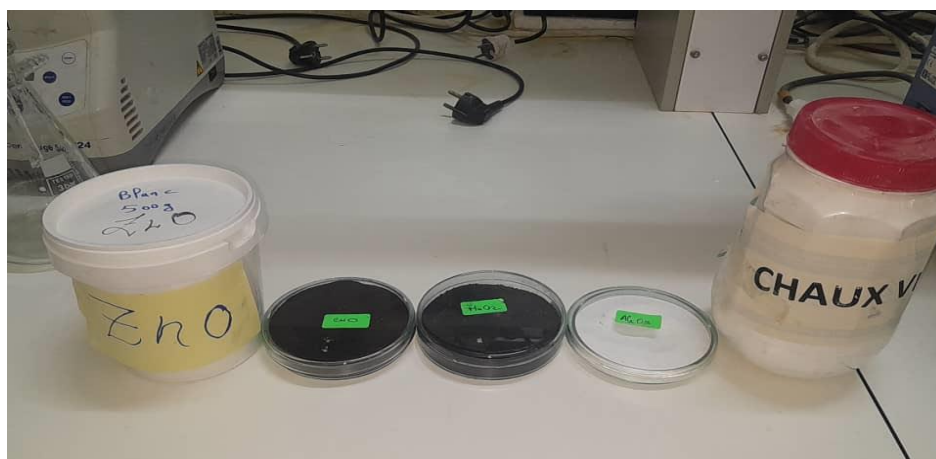


Figure III.3. Photocatalyseurs

Sélection des photocatalyseurs

Ces photocatalyseurs ont été sélectionnés en fonction de leurs propriétés photocatalytiques, de leur écart d'énergie adapté au rayonnement solaire, de leur stabilité chimique dans le milieu aquatique, ainsi que de leur disponibilité et coût relativement faibles.

Ces oxydes ont la capacité de générer des espèces réactives puissantes (par exemple, les radicaux hydroxyles OH[•] et les ions superoxyde) lorsqu'ils sont exposés au soleil, ce qui entraîne l'oxydation et la dégradation des polluants organiques et inorganiques dans les eaux usées.

III.2.3. Instruments de laboratoire

Les outils comprenaient :

- 5 béchers d'une capacité de 500 ml.
- 5 Entonnoirs.
- 5 Erlenmeyers.
- 5 bouteilles de verres de laboratoire (Verres de montre).
- Bouteille Pissette.
- Papier filtre qualitatif.
- Une Spatule.

Tous les outils ont été soigneusement nettoyés à l'eau distillée et séchés avant chaque utilisation.

III.2.4. Échantillons

Deux principaux échantillons d'eaux usées ont été prélevés :

- **Eaux usées domestiques** : c'est un mélange d'eau utilisée dans les activités quotidiennes (lavage des légumes et des fruits, ustensiles de nettoyage, eau provenant d'autres usages domestiques... etc.). Nous avons ensuite retiré les grosses particules et impuretés en suspension avant de poursuivre les expériences.
- **Eaux usées industrielles** : collectées à la station d'épuration industrielle de la raffinerie de Barkawi Sonatrach (Guellala).

Après la collecte, les échantillons étaient laissés fermenter au moins deux ou trois jours au maximum à température ambiante.

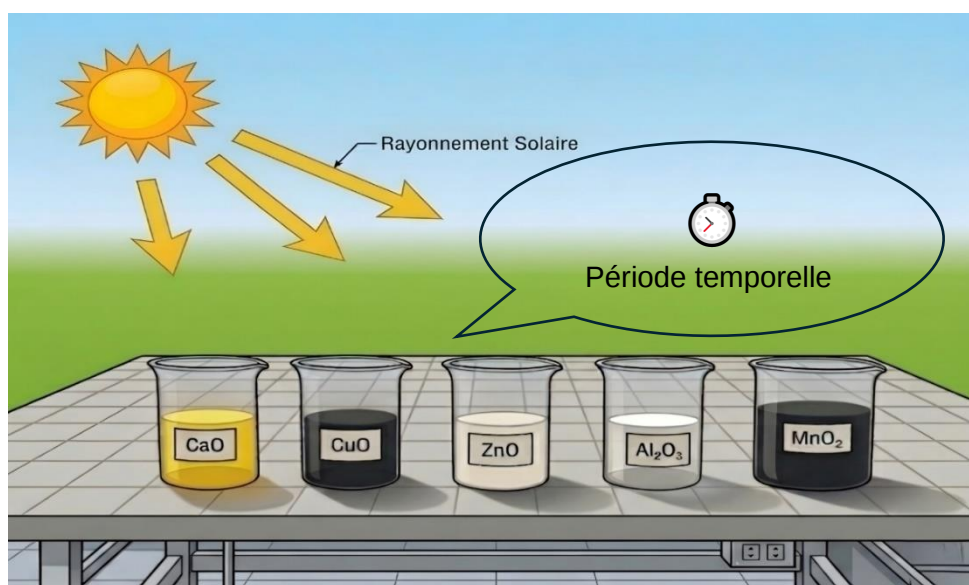
Les échantillons étaient stockés séparément dans des bouteilles en plastique propres (une bouteille pour l'eau domestique (Figure III.4) et une bouteille pour l'eau industrielle (Figure III.5)).

**Figure III.4.** Eaux usées domestiques**Figure III.5.** Eaux usées industrielles

III.2.5. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental repose sur un système qui consiste simplement en des gobelets ouverts contenant un mélange d'eau d'échantillon sélectionnée et un photocatalyseur, exposés directement à la lumière du soleil à l'extérieur pendant une certaine période.

La figure III.6 illustre le dispositif expérimental adopté dans cette étude.

**Figure III.6.** Schéma du dispositif expérimental approuvé

Cette conception permet d'évaluer l'efficacité photocatalytique dans des conditions environnementales réelles, tout en garantissant que l'échantillon interagit directement avec la lumière solaire et l'air, ce qui le rend adapté à notre étude.

III.3. Procédure expérimentale

Cette étude se concentre sur deux variables principales pour évaluer l'efficacité de la photothérapie catalytique pour les eaux usées : la première est le type de photocatalyseur afin d'étudier l'effet de sa nature sur l'efficacité du traitement, qui sera abordé lors de la première expérience, tandis que la seconde variable concerne la masse du photocatalyseur afin de déterminer l'effet de la quantité de catalyseur utilisée et de choisir la masse optimale pour obtenir le meilleur rendement dans le processus de photolyse catalytique, ce qui sera abordé lors de la seconde expérience.

III.3.1. Expérience I : Effet de type photocatalyseur

- **Objectif** : Évaluer l'effet de la nature du photocatalyseur sur l'efficacité du processus de phototraitement catalytique pour les eaux usées.
- **Protocole** :

Le premier jour de l'expérience, elle a été réalisée sur un échantillon d'eaux usées domestiques, tandis que le lendemain a été consacrée à la même expérience sur des échantillons d'eaux usées industrielles.

a) Pour les eaux usées domestiques

L'expérience a été menée selon les étapes suivantes :

1. Nous avons distribué 200 ml d'échantillons d'eaux usées domestiques à chacun des 5 bishers.
2. Nous avons mesuré les principaux paramètres physicochimiques (pH, ORP, conductivité, turbidité, etc.) à l'aide d'un multiparamètre.
3. Nous avons ajouté 10 g de chaque photocatalyseur (ZnO , Al_2O_3 , CuO , CaO ou MnO_2) à chaque bischer individuel.

La figure III.7 montre la préparation des échantillons, les mesures initiales et l'ajout de catalyseurs.

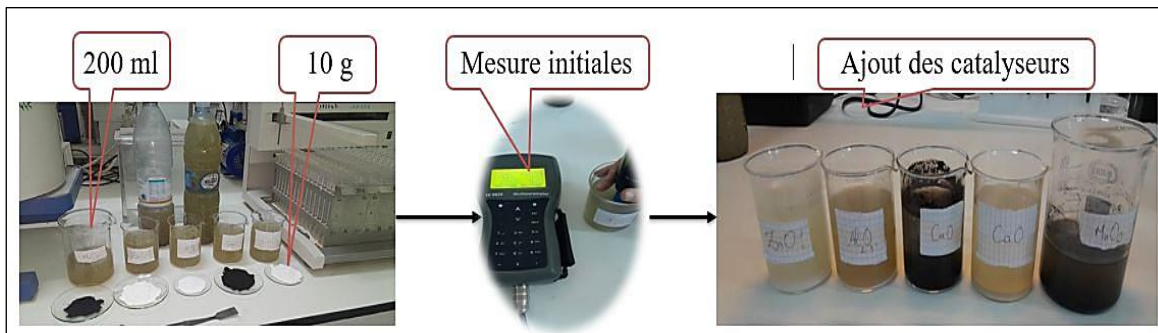


Figure III.7. Préparation de l'échantillon, mesures préliminaires et ajout de catalyseurs (eau domestique)

4. Toutes les coupes ont été directement exposées au rayonnement solaire pendant 3 heures (180 minutes).
5. Un mouvement manuel régulier (toutes les demi-heures) est adopté pendant la période d'exposition au rayonnement solaire afin d'assurer un contact bon et continu entre le photocatalyseur et les contaminants.

La figure III.8 montre l'échantillonnage du rayonnement solaire pendant 3 heures.



Figure III.8. Échantillons sont imbibés de 3 heures de rayonnement solaire

6. À la fin de la période d'irradiation, le mélange était filtré à l'aide de papier filtre pour séparer le catalyseur solide de l'eau traitée.
7. Après la filtration, nous avons mesuré les mêmes paramètres physicochimiques sur l'eau filtrée.

La figure III.9 montre le processus de filtration des échantillons puis les mesures

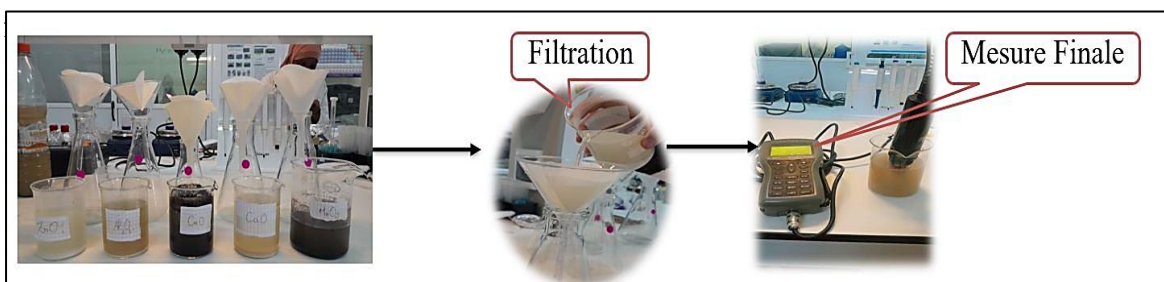


Figure III.9. Filtration de l'échantillon et mesures finales

b) Pour les eaux usées industrielles

L'expérience a été menée aux mêmes étapes précédentes concernant les eaux usées domestiques selon les critères suivants :

1. Préparation des échantillons, mesures préliminaires, puis ajout de catalyseurs.

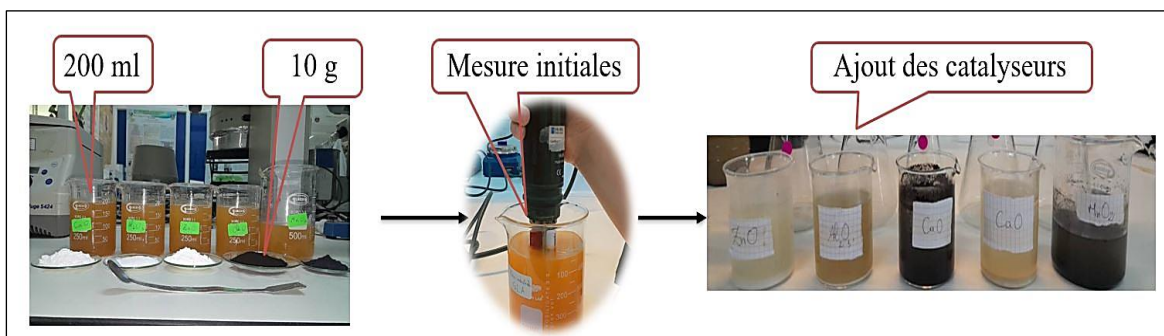


Figure III.10. Préparation de l'échantillon, mesures préliminaires et ajout de catalyseurs (eau artificielle)

2. Les échantillons sont imbibés pour le rayonnement solaire pendant 3 heures avec un brassage manuel régulier.



Figure III.11. Exposition au rayonnement solaire des échantillons

3. Filtration et mesures finales.

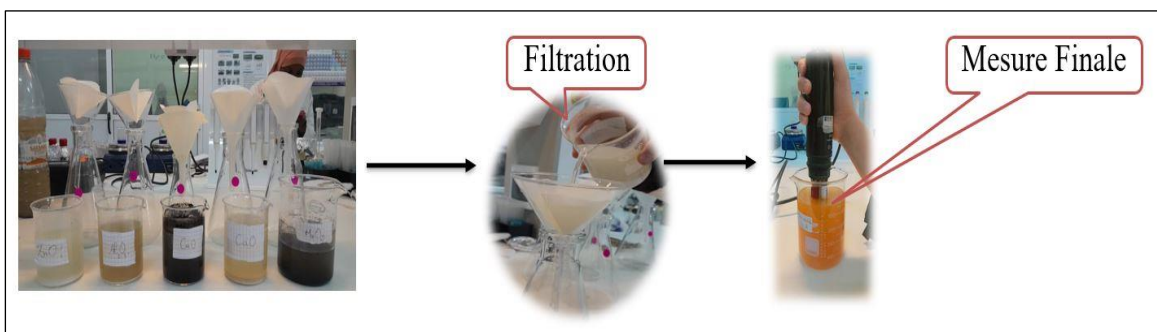


Figure III.12. Échantillons sont imbibés pour le rayonnement solaire pendant 3 heures

❖ Calcul du rendement

Pour évaluer l'efficacité du traitement, l'efficacité de chaque stimulus a été calculée en fonction de la nature des indicateurs physico-chimiques étudiés. Calculer le rendement est une étape essentielle pour déterminer la capacité de chaque catalyseur à améliorer la qualité des eaux usées.

L'efficacité du traitement a été calculée sur la base du critère du pourcentage de retrait des décontaminants (TDS), indicateur le plus important utilisé dans notre étude, afin d'évaluer l'efficacité de la technologie de photocatalyse pour réduire la concentration de contaminants et améliorer la qualité des eaux usées.

La formule générale suivante a été adoptée pour calculer le pourcentage de suppression ou de changement :

$$\text{Rendement}(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Où :

- C_i : La valeur initiale de l'indice avant le traitement.
- C_f : La valeur finale de l'indice après traitement.

Le calcul du rendement vise à comparer les performances de différents photocatalyseurs (ZnO , CuO , CaO , MnO_2 , Al_2O_3) et à déterminer les plus efficaces pour améliorer les propriétés physico-chimiques de l'eau.

III.3.2. Expérience II : L'effet de la masse du photocatalyseur

- **Objectif :** Étudier l'effet de la quantité (masse) du photocatalyseur sur l'efficacité du processus de photocatalyse, afin que cette partie vise à déterminer la masse optimale du photocatalyseur pour les eaux usées domestiques et les eaux usées industrielles.

- **Protocole :**

La même procédure a été suivie lors de la première expérience, seul le photocatalyseur le plus efficace changeant selon le tableau III.1 montrant la variation des photocatalyseurs sélectionnés.

- Pour l'eau usée domestique : 5 g, 10 g, 15 g, 20 g, 25 g.
- Pour l'eau usée industrielle : 10 g, 15 g, 20 g, 25 g.

Tableau III.1. Blocs photocatalyseurs les plus efficaces.

Masse du photocatalyseur le plus efficace (g)	Eaux usées domestiques	Eaux usées industrielles	Volume d'eau (mL)	Temps d'irradiation
5	✓	×	200	3 Heures
10	✓	✓		
15	✓	✓		
20	✓	✓		
25	✓	✓		

III.4. Conclusion

À la fin de ce chapitre, les matériaux et dispositifs utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale employée dans le traitement des eaux usées avec la technologie photocatalytique sont présentés, garantissant que les différentes étapes du travail en laboratoire sont clarifiées. Cette base appliquée constitue un point de départ pour présenter et analyser les résultats du chapitre suivant.



Chapitre IV

Résultats et Discussion

IV.1. Introduction

Ce chapitre traite de la présentation et de la discussion des résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude, où les changements enregistrés dans les différents paramètres physiques et chimiques des eaux usées sont analysés, en fonction des changements des conditions expérimentales, en particulier la masse du photocatalyseur. Ce chapitre vise également à évaluer l'efficacité du procédé adopté pour améliorer la qualité de l'eau.

IV.2. Présentation et discussion des résultats

Les résultats expérimentaux sont présentés de manière ordonnée et précise. Bien que certains changements puissent être observés visuellement à l'œil nu, notamment par décoloration de l'eau (Domestique : Fig. IV.1, industrielle : Fig. 02)), l'évaluation réelle et quantitative de l'efficacité du traitement repose principalement sur des mesures précises utilisant un multi-paramètre. Cela permet de déterminer les changements réels des paramètres physiochimiques avant et après le traitement.

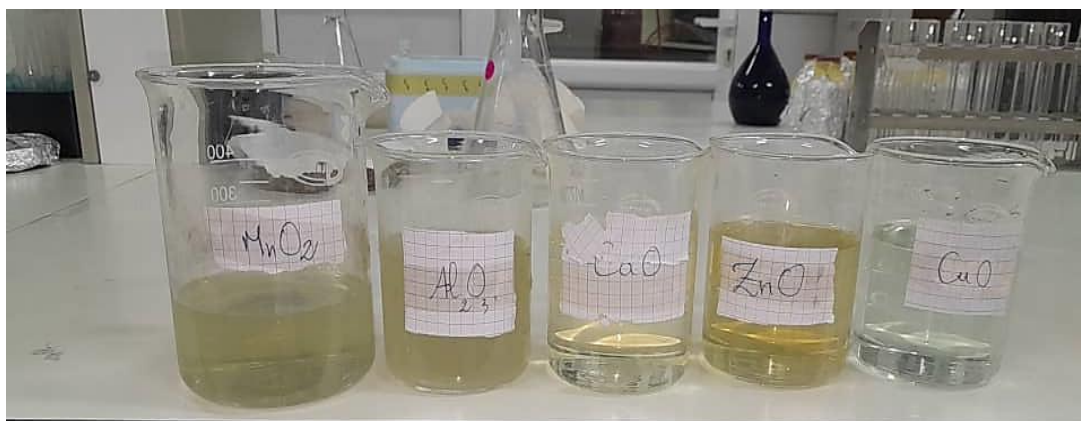


Figure IV.1. Décoloration des eaux usées domestiques après traitement



Figure IV.2. Décoloration des eaux usées industrielles après traitement

IV.2.1. Présentation et discussion des résultats de la première expérience

IV.2.1.1. Pour les eaux usées domestiques

Le tableau IV.1 présente les mesures multi-standards des eaux usées domestiques avant et après traitement.

Tableau IV.1. Mesures multinormes des eaux usées domestiques

Mesures Paramètres	Mesure initiale	Mesure finale				
		Avec ZnO	Avec CuO	Avec CaO	Avec MnO ₂	Avec Al ₂ O ₃
Température (°C)	22.62	24.57	22.53	25.50	23.75	24.06
Salinité (PSU)	4.96	5.58	5.47	9.05	2.73	5.58
DO (ppm)	0.74	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00
% DO saturation	8.9	0.0	9.1	0.0	0.0	0.0
Le pH	4.31	6.81	5.62	11.27	4.50	5.10
mV pH	143.4	2.9	66.4	-259.3	132.7	97.3
Résistance (MΩ)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001
ORP	-47.1	224.9	347.3	21.3	323.5	293.4
TDS (mg/L)	4430	4962	4858	8400	2540	4958
La densité de l'eau de mer (σ _t)	1.4	1.4	1.8	4.3	1.5	1.5

Les résultats enregistrés dans le tableau montrent qu'il existe des différences claires entre les mesures initiales et finales de l'eau domestique utilisée après traitement à l'aide de différents photocatalyseurs métalliques, où des changements ont été enregistrés dans plusieurs paramètres physiques et chimiques, notamment au niveau du pH, de l'oxydation et de la contrainte de retour (ORP), des solides dissous totaux (TDS) et de la température. Les résultats montrent également que les valeurs obtenues varient d'un stimulus à l'autre, avec des différences variables dans les différents indicateurs mesurés sur l'ensemble des essais complétés.

Les critères adoptés dans le tableau sont classés en quatre grandes catégories : bilan chimique de l'eau, élimination des contaminants dissous, propriétés physiques et qualité biologique de l'eau. Ces classifications peuvent être représentées graphiquement afin de

faciliter la comparaison visuelle entre différents stimuli et de mettre en avant l'efficacité de ces stimuli dans le traitement.

1. Bilan chimique de l'eau

Pour étudier la stabilité du milieu chimique et l'effet du traitement sur celui-ci, le pH et la réduction du stress oxydatif (ORP) ont été présentés avant et après le traitement.

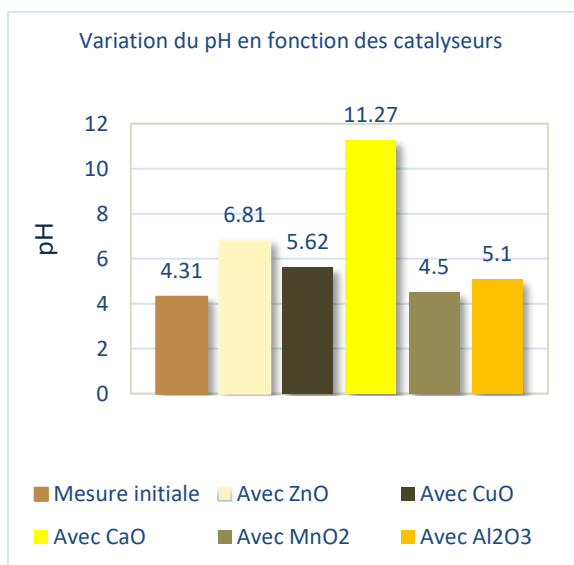


Figure IV.3. Variation de pH

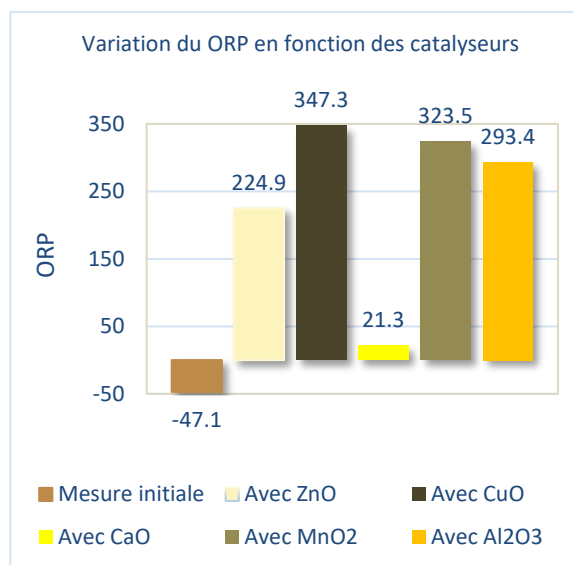


Figure IV.4. Variation du ORP

La figure IV.3 montre qu'il existe une différence nette dans la réponse de la valeur de pH selon le type de stimulus utilisé, car des changements variables ont été enregistrés après la réalisation du traitement. La figure IV.4 montre les changements dans les valeurs ORP.

2. Élimination des contaminants dissous

L'élimination des matériaux dissous est l'un des indicateurs les plus importants pour évaluer l'efficacité du processus de photocatalyse. À cette fin, la variation à la fois du total des solides dissous (TDS) et du niveau de salinité (Salinité) avant et après le traitement a été analysée et représentée.

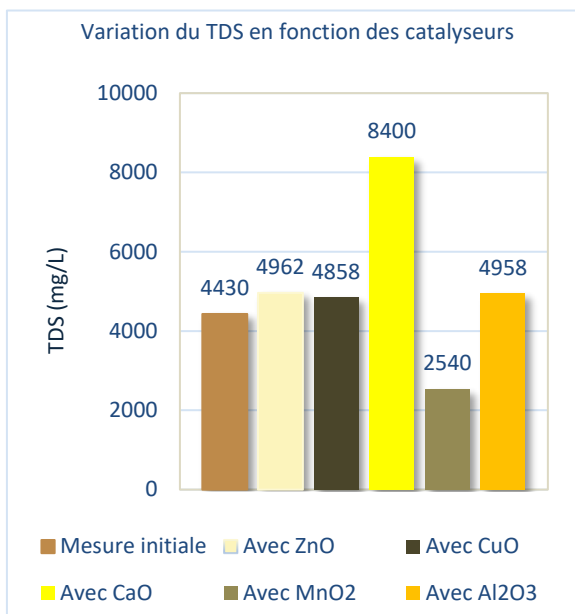


Figure IV.5. Variation du TDS

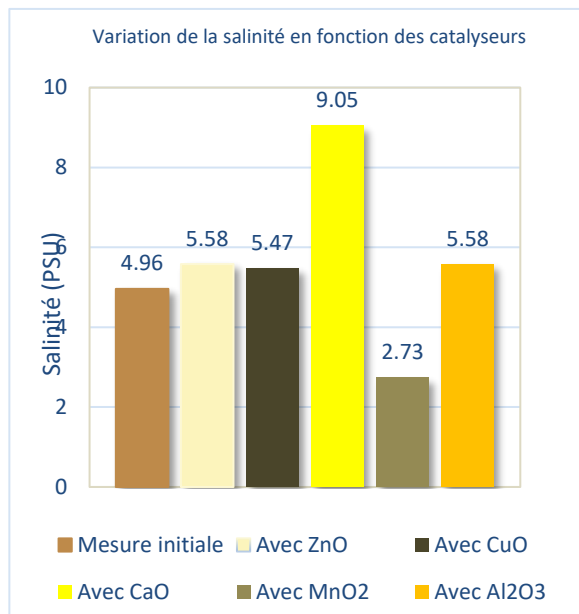


Figure IV.6. Variation de la salinité

Les figures (IV.5 et IV.6) montrent une différence significative dans la performance des stimuli testés par rapport à ces deux indicateurs, avec des baisses nettes dans certains cas et des augmentations dans d'autres.

3. Propriétés physiques

L'impact du traitement sur les propriétés physiques fondamentales de l'eau a été évalué en surveillant la température et la densité.

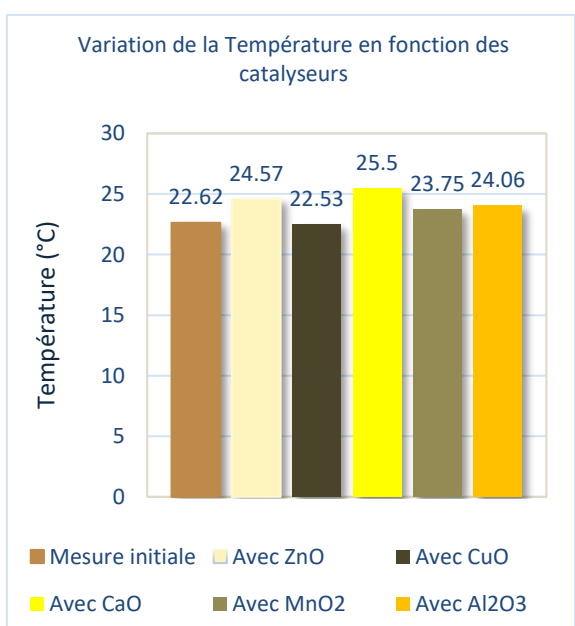


Figure IV.7. Variation de température

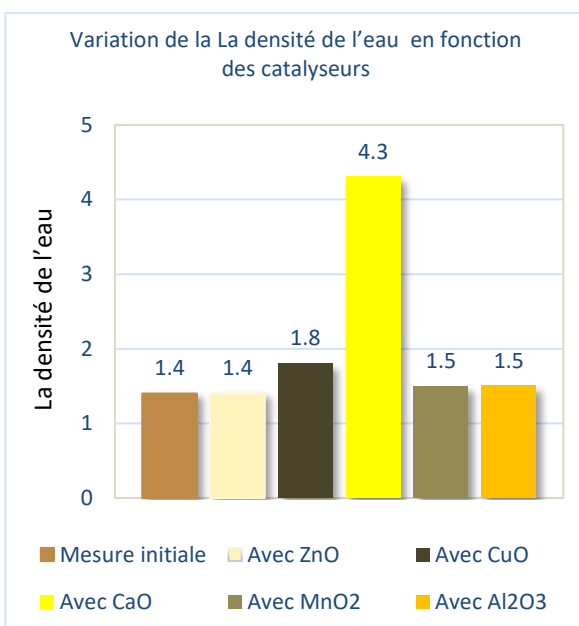


Figure IV.8. Variation de la densité de l'eau

Les figures IV.7 et IV.8 montrent que les variations enregistrées de température et de densité étaient relativement limitées parmi les différents stimuli utilisés.

4. Qualité biologique

La qualité biologique de l'eau a été évaluée en suivant la concentration d'oxygène dissous (DO) et la saturation en oxygène.

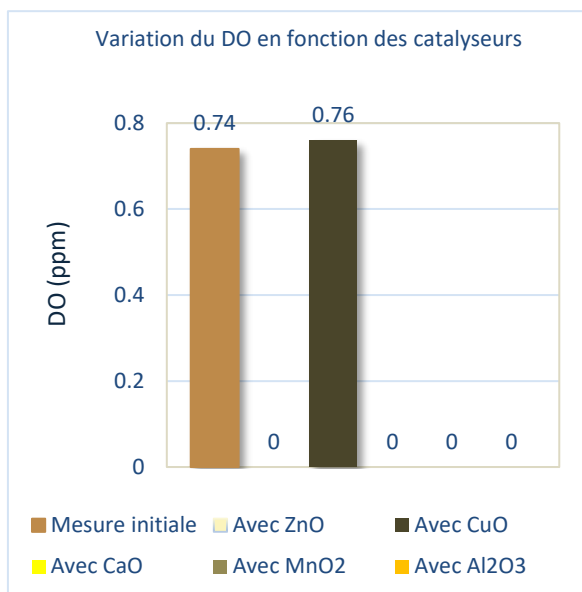


Figure IV.9. Variation du (DO)

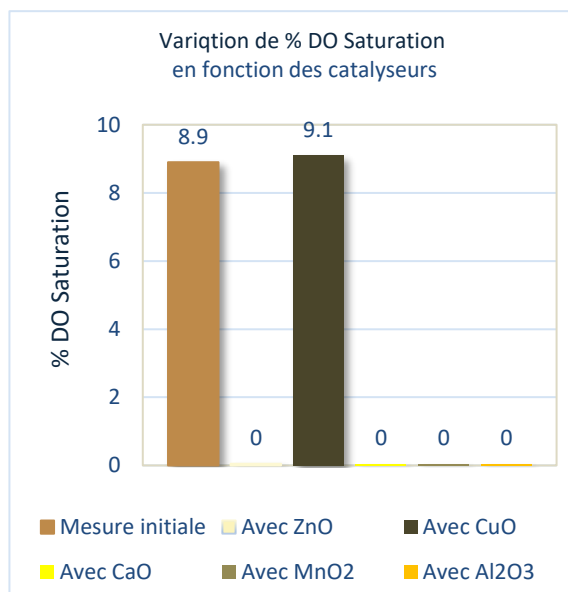


Figure IV.10. Variation du DO saturation

Le suivi de ces deux indicateurs montre des variations de leurs valeurs après la photostimulation utilisant des stimuli différents.

1. Pour le pH, ORP et l'indice de pH mV

L'échantillon initial a commencé avec un pH fortement acide (4.31) et un ORP négatif (-47.1 mV), reflétant un environnement relativement acide et réduit.

- Avec le CaO, le pH a augmenté de façon spectaculaire à 11.27, le pH en mV est tombé à -259.3 mV, et l'ORP est tombé à 21.3 mV, démontrant une réaction de base très forte due à la formation d'hydroxyde de calcium. Cela signifie que le CaO a une grande capacité de neutralisation mais conduit à une alcalinité excessive.
- Avec le ZnO, le pH est monté à 6.81 (proche du neutre), avec un bon ORP positif (22419 mV), ce qui signifie que le ZnO a atteint un bon équilibre entre neutralisation et conditions oxydatives renforcées.

- Avec le CuO, la valeur d'ORP la plus élevée (347.3 mV) a été enregistrée, démontrant une forte capacité à favoriser des réactions oxydatives même si le pH reste dans la plage acide (5.62).
- Avec MnO₂ et Al₂O₃, l'amélioration du pH a été limitée (4.50 et 5.10), mais l'ORP a augmenté de manière significative (323.5 mV et 293.4 mV). Cela signifie que ces deux catalyseurs augmentent davantage la capacité oxydative que leur capacité à moduler l'acidité.

2. Pour les solides totaux dissous (TDS) et la salinité

Les valeurs initiales étaient élevées (TDS = 4430 mg/L, Salinité = 4.96 PSU).

- Le MnO₂ a réduit le TDS à 2540 mg/L et la salinité à 2.73 PSU, démontrant une grande efficacité dans l'adsorption de surface et la sédimentation ou la décomposition par dissolution. Cela signifie que le MnO₂ a réussi à éliminer une grande partie des contaminants dissous.
- CaO a entraîné une augmentation significative (TDS = 8400 mg/L, Salinité = 9.05 PSU) ce qui indique la libération de grandes quantités d'ions (Ca²⁺ et OH⁻) dans la solution. Cela signifie que l'augmentation du TDS ici est due à l'ajout de nouveaux sels et non à son élimination.
- ZnO, CuO et Al₂O₃ ont entraîné une légère à modérée augmentation du TDS et de la salinité, ce qui signifie que l'effet positif de ces stimuli sur l'élimination des décontaminants était limité dans ces conditions expérimentales.

3. Pour l'oxygène dissous (DO) et la saturation (% saturation en DO)

Le DO initial était faible (0.74 ppm, saturation 8.9 %).

- Réduite à 0.00 ppm avec ZnO, CaO, MnO₂ et Al₂O₃, démontrant une forte consommation d'oxygène dissous lors des réactions de réduction. Cela signifie que ces catalyseurs utilisent l'oxygène comme récepteur pour les électrons afin de générer des espèces réactives d'oxygène.

- CuO a maintenu une valeur de DO proche du primaire (0.76 ppm), indiquant un mécanisme d'oxydation différent qui repose davantage sur des trous positifs (h^+) que sur la consommation de DO.

4. Pour la température et la densité

- La température a légèrement augmenté dans la plupart des cas, la hausse la plus marquée étant avec CaO (25.50 °C) et ZnO (24.57 °C), indiquant la survenue de réactions exothermiques. Cela signifie que la réaction de ces deux photocatalyseurs avec l'eau est accompagnée d'une libération d'énergie thermique.
- La densité a augmenté significativement avec le CaO à 4.3, indiquant une augmentation significative de la concentration d'ions dissous. Les autres photocatalyseurs ont maintenu une densité proche de la valeur initiale (1.4–1.8).

5. Par rapport à la résistance électrique (résistance)

Il n'y avait pas de changements substantiels de résistance (environ 0.0001 M Ω restait). Cela signifiait que la conductivité électrique de la solution restait élevée, et que les variations des ions n'étaient pas suffisantes pour modifier significativement la conductivité.

a) Résultats du calcul de rendement

L'efficacité du traitement de chaque catalyseur a été calculée en mesurant la variation de la concentration de TDS, et les calculs ont été effectués sur la base des valeurs mesurées avant et après le processus de traitement.

Tableau IV.2. Montre l'efficacité de la suppression du TDS en utilisant différents photocatalyseurs.

Catalyseur	TDS avant traitement (mg/L)	TDS après traitement (mg/L)	(%) Rendement d'élimination
ZnO	4430	4962	-12.01
CuO	4430	4858	-9.66
CaO	4430	8400	-89.62
MnO ₂	4430	2540	42.66
Al ₂ O ₃	4430	4958	-11.92

Le tableau IV.2 montre les valeurs absolues de la concentration de TDS avant et après le traitement, ainsi que le pourcentage d'efficacité d'élimination calculé pour chaque stimulus individuel.

Le pourcentage de rendement du prélèvement est représenté à la Figure IV.16.

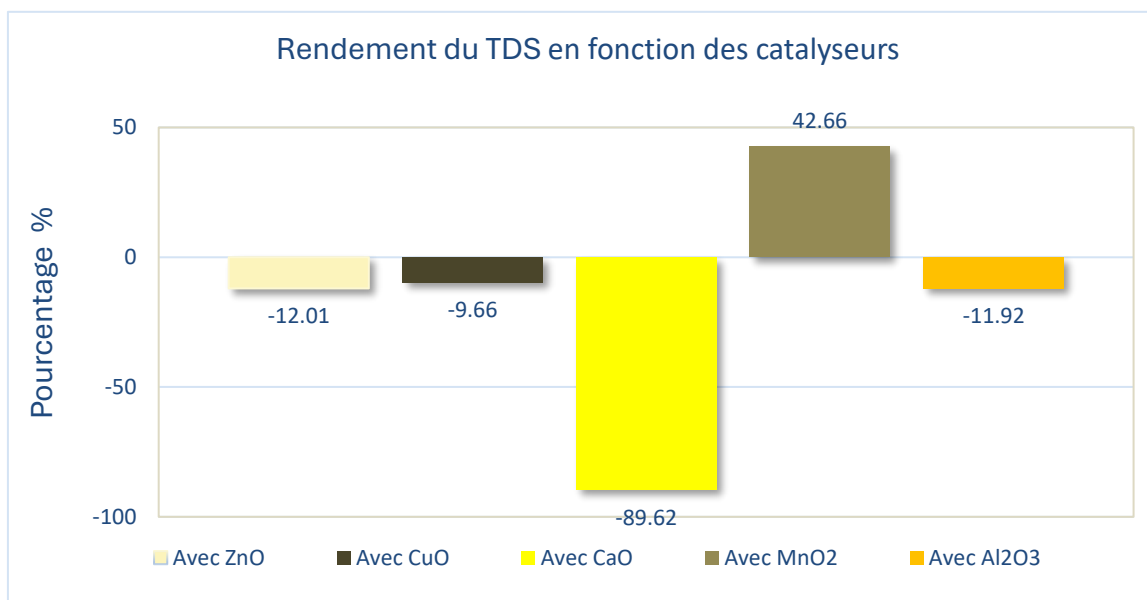


Figure IV.16. Efficacité de rendement du TDS

Ce graphique permet de comparer la performance relative de suppression entre les 5 stimuli testés.

Les résultats ont montré une nette disparité dans l'efficacité des photocatalyseurs utilisés, le photocatalyseur MnO₂ enregistrant la meilleure efficacité d'élimination de 42.66 %, la valeur TDS passant de 4430 mg/L à 2540 mg/L, ce qui indique sa grande efficacité pour réduire la concentration de solides dissous et améliorer la qualité de l'eau traitée. Cette performance reflète sa meilleure efficacité dans le processus photocatalytique par rapport à d'autres stimuli étudiés.

En revanche, le reste des stimuli a enregistré des rendements négatifs, avec des valeurs TDS plus élevées après traitement que la valeur initiale, comme dans le cas de ZnO, CuO, Al₂O₃ et CaO. Cela s'explique par la possibilité de dissolution partielle de certains composants de ces photocatalyseurs ou de la libération d'impuretés et d'ions dans le milieu aqueux lors du traitement, augmentant plutôt que diminuant la concentration de solides dissous.

Par conséquent, le MnO_2 peut être considéré comme le catalyseur le plus efficace dans les conditions expérimentales approuvées, ce qui justifie son choix de poursuivre les études dans le second essai sur l'effet de la masse sur l'efficacité du traitement.

IV.2.1.2. Pour les eaux usées industrielles

Le tableau IV.3 présente les mesures multi-standards des eaux usées industrielles avant et après traitement.

Tableau IV.3. Mesures multi-normes des eaux usées industrielles

Mesures Paramètres	Mesure initiale	Mesure finale				
		Avec ZnO	Avec CuO	Avec CaO	Avec MnO_2	Avec Al_2O_3
Température (°C)	20.87	23.49	23.37	23.46	23.44	23.38
Salinité (PSU)	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
DO (ppm)	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% DO saturation	22.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Le pH	1.93	6.42	6.47	8.32	3.94	4.15
mV pH	281.2	19.9	16.5	-89.4	165.3	152.7
Résistance ($\text{M}\Omega$)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ORP	464.1	294.1	310.9	161.1	499.4	4.14
TDS (mg/L)	116.2	113.7	116.3	112.9	118.6	116.9
La densité de l'eau de mer (σ_t)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0

Les résultats montrent qu'il existe des différences significatives dans les valeurs mesurées après traitement de l'eau ménagère gaspillée à l'aide de stimulants minéraux différents.

Avec la même classification standard adoptée précédemment, nous avons représenté graphiquement ces classifications comme suit :

1. Bilan chimique de l'eau

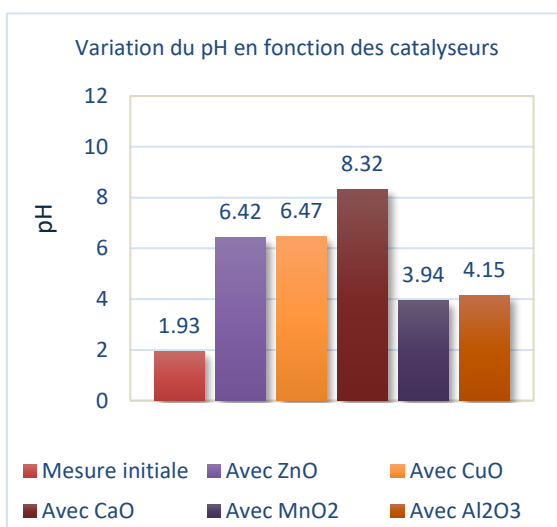


Figure IV.17. Variation de pH

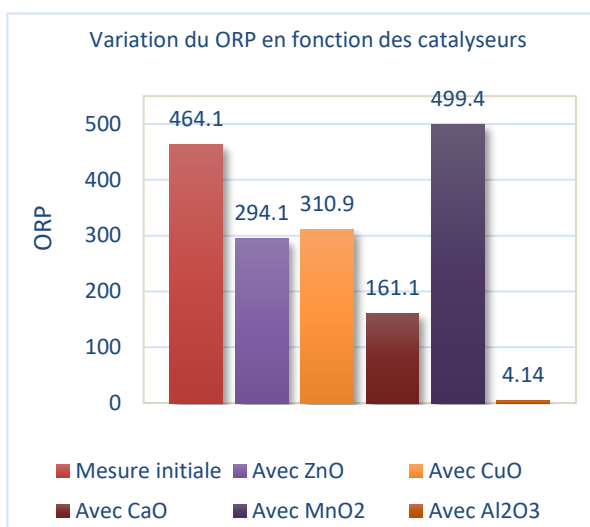


Figure IV.18. Variation du ORP

2. Élimination des contaminants dissous

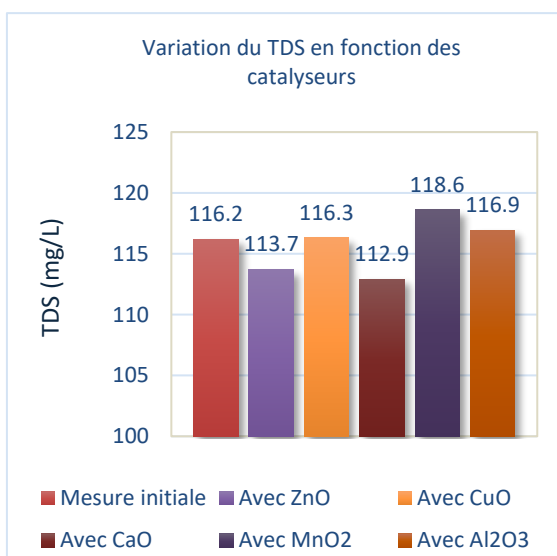


Figure IV.19. Variation de TDS

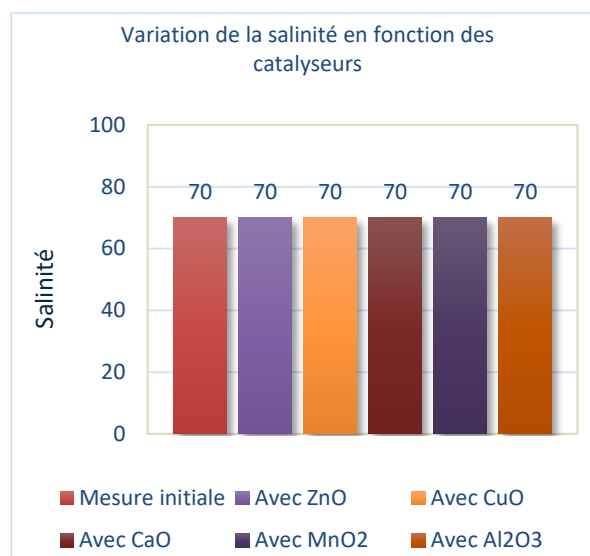


Figure IV.20. Variation de la salinité

3. Propriétés physiques

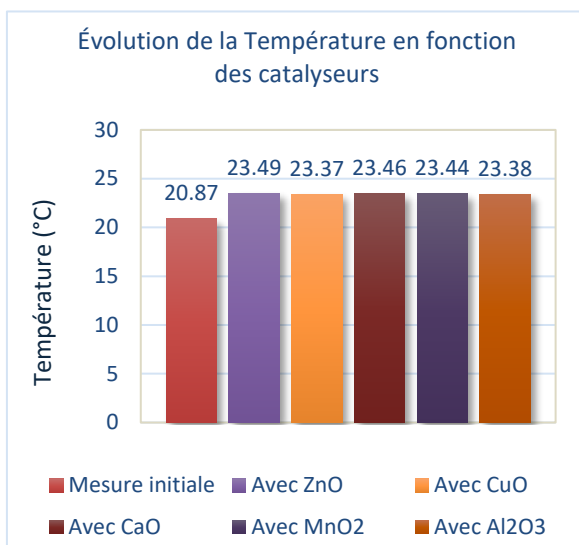


Figure IV.21. Variation de température

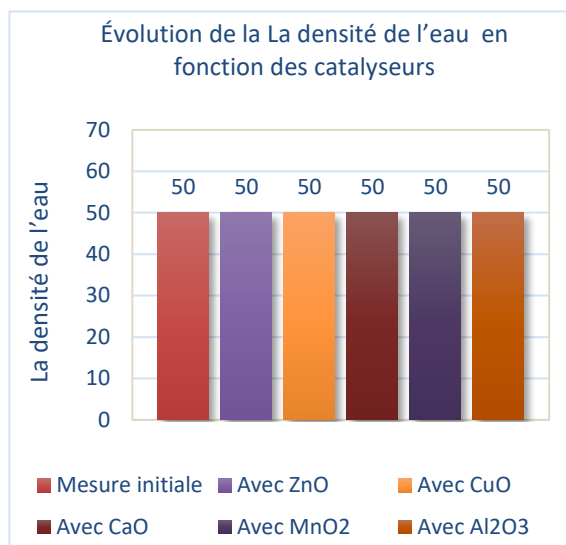


Figure IV.22. Variation de la densité de l'eau

4. Qualité biologique

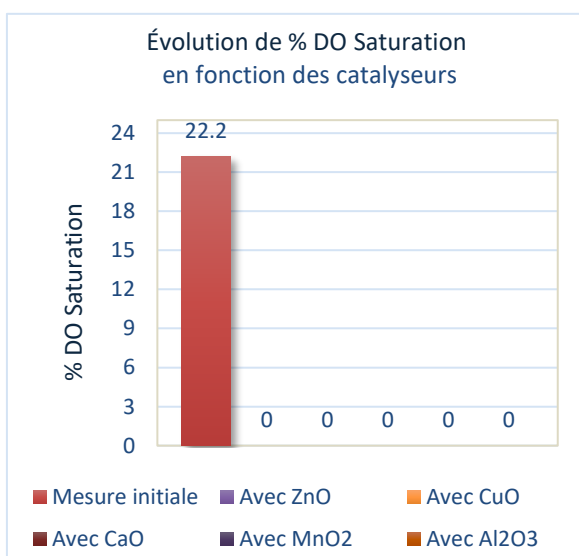


Figure IV.23. Variation du DO

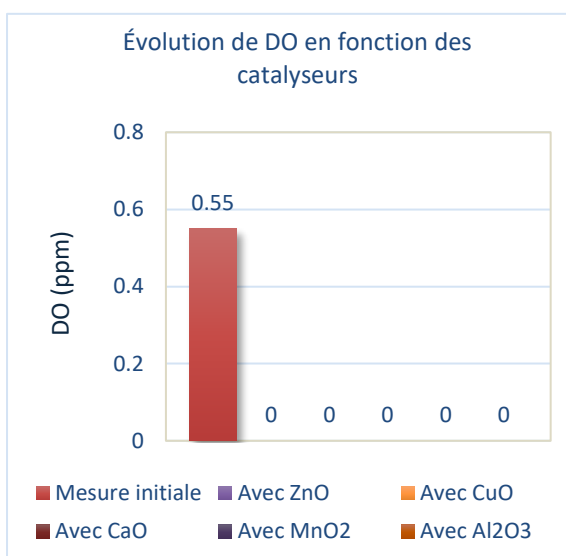


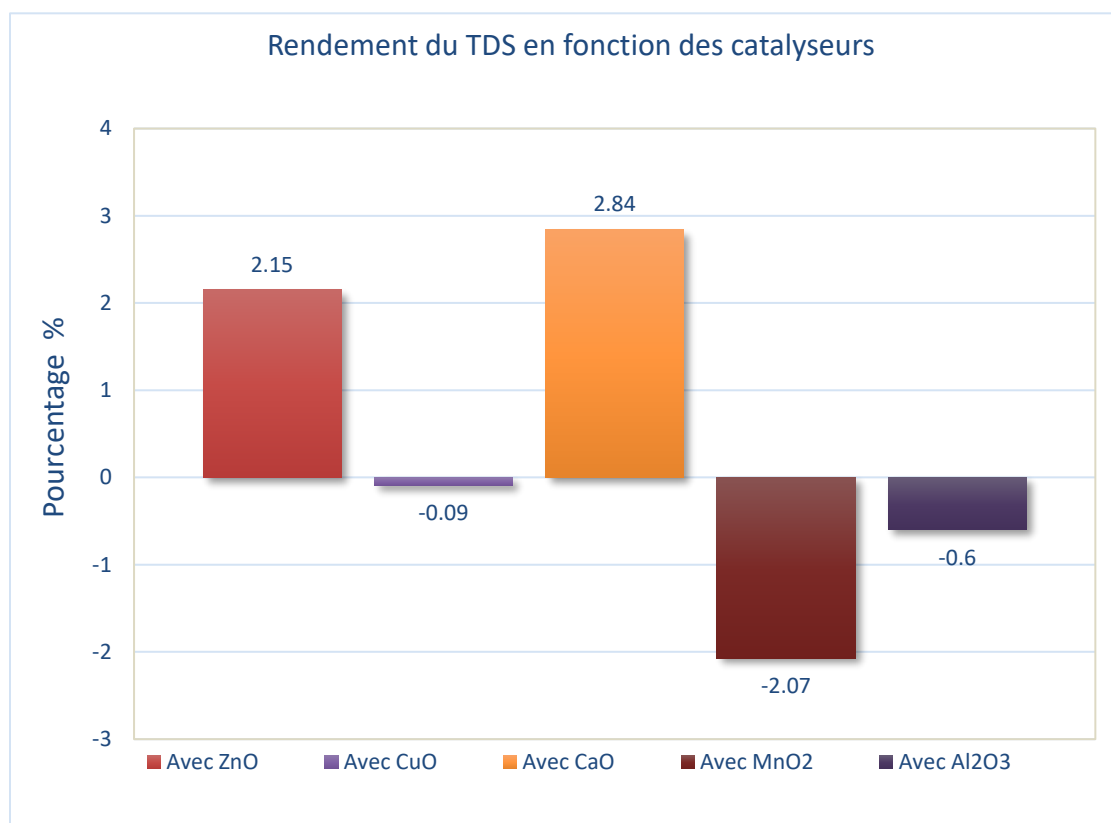
Figure IV.24. Variation de saturation du DO

❖ Rendement

Tableau IV.4. Efficacité de l'élimination du TDS à l'aide des cinq catalyseurs est montrée.

Catalyseur	TDS avant traitement (mg/L)	TDS après traitement (mg/L)	(%) Rendement d'élimination
ZnO	116.2	113.7	+2.15 %
CuO	116.2	116.3	-0.09 %
CaO	116.2	112.9	+2.84 %
MnO ₂	116.2	118.6	-2.07 %
Al ₂ O ₃	116.2	116.9	-0.60 %

• Diagramme :

**Figure IV.25.** Rendement du TDS

1. Le pH, contrainte réductrice redox (ORP) et indice de pH mV

L'échantillon initial a commencé avec un pH très acide (1,93) et un ORP élevé (464,1 mV), reflétant un milieu acide fort et oxydant.

- Avec CaO, le pH a augmenté significativement à 8,32, le pH mV a diminué à -89,4 mV, tandis que l'ORP a diminué à 161,1 mV. Cela montre un fort effet de base causé par la libération d'ions OH^- et l'ajustement d'une acidité élevée. Cela signifie que le CaO possède une capacité efficace à neutraliser l'acidité de l'eau industrielle, tout en réduisant la capacité oxydative du milieu.
- Avec ZnO et CuO, le pH est monté à 6,42 et 6,47 respectivement, avec des valeurs moyennes d'ORP (294,1 mV et 310,9 mV). Cela démontre une neutralisation partielle réussie de l'acidité tout en maintenant un environnement relativement oxydé, propice aux photoréactions.
- Avec MnO_2 et Al_2O_3 , la hausse du pH était relativement limitée (3,94 et 4,15), tandis que MnO_2 a maintenu l'ORP le plus élevé (499,4 mV) par rapport aux autres catalyseurs. Cela signifie que le MnO_2 favorise les réactions oxydatives encore plus que son effet sur la modulation de l'acidité.

2. Solides totalement dissous (TDS) et salinité

Les valeurs initiales étaient relativement faibles pour le TDS (116,2 mg/L), tandis que la salinité est restée constante à 70 PSU dans tous les cas.

- Le CaO a réduit le TDS à 112,9 mg/L, démontrant la meilleure performance pour réduire les solides dissous dans les catalyseurs étudiés. Cela signifie que le CaO a contribué au dépôt ou à l'élimination d'une partie des composés dissous grâce à la modification du milieu vers la base.
- Le ZnO a légèrement réduit le TDS à 113,7 mg/L, indiquant une efficacité acceptable mais inférieure à celle du CaO.
- CuO et Al_2O_3 ont maintenu à peu près les mêmes valeurs initiales (116,3 et 116,9 mg/L), démontrant un effet limité sur le retrait dissous.

- MnO_2 a entraîné une augmentation du TDS à 118,6 mg/L, ce qui peut indiquer la libération de certains ions ou la redissolution de certains composés dans le milieu.

La salinité est restée constante à 70 PSU dans toutes les expériences, indiquant que le traitement n'a pas affecté de manière significative la concentration totale de sels.

3. Oxygène dissous (DO) et saturation (% saturation en DO)

La valeur initiale de DO était de 0,55 ppm avec un taux de saturation de 22,2 %.

- La DO est descendue à 0,00 ppm dans tous les cas après traitement, et la saturation est tombée à 0,0 %. Cela montre la consommation complète d'oxygène dissous lors des réactions.
- Cela signifie que tous les catalyseurs ont catalysé de fortes réactions d'oxydation qui ont consommé l'oxygène comme accepteur d'électrons ou lors de la génération d'espèces réactives d'oxygène.

4. Température et densité

La température a légèrement augmenté après le traitement dans tous les cas, variant de 23,37 °C à 23,49 °C contre la valeur initiale de 20,87 °C, indiquant des réactions accompagnées d'une libération thermique limitée.

Cela signifie que les réactions lumineuses ou les interactions de contact entre les stimuli et l'eau étaient semi-exothermiques.

La densité de l'eau de mer (σ) est restée inchangée, restant constante à 50,0 dans tous les cas, indiquant la stabilité des propriétés physiques de la solution à cet égard.

5. Résistance électrique (résistance)

La résistance est restée inchangée, restant de 0,0000 M Ω dans tous les cas, ce qui signifie que la conductivité électrique est restée très élevée et n'a pas été significativement affectée par le traitement ou la variation de la concentration d'ions.

Les résultats du calcul d'efficacité d'élimination ont montré qu'il y avait une différence relative dans les performances des photocatalyseurs utilisés pour le traitement des eaux usées industrielles, le catalyseur CaO ayant atteint la plus grande efficacité de 2.84 %, la concentration de TDS passant de 116.2 mg/L avant traitement à 112.9 mg/L après traitement. Ce résultat indique la capacité de ce catalyseur à réduire une partie des solides dissous et à améliorer les propriétés physiques et chimiques de l'eau, principalement grâce à son effet de base efficace dans la modulation du milieu acide et l'aide au dépôt de certains composés dissous.

Le catalyseur de ZnO a également montré une efficacité positive de 2.15 %, en réduisant la valeur TDS à 113.7 mg/L, indiquant qu'il avait une efficacité thérapeutique acceptable, bien qu'inférieure à celle enregistrée par CaO.

Les autres stimuli CuO, MnO₂ et Al₂O₃ ont été récompensés négativement en raison d'une légère augmentation des valeurs de TDS après traitement par rapport à la valeur de base. Ce comportement peut s'expliquer par la possibilité que certains ions ou impuretés aient été libérés par ces catalyseurs dans le milieu aqueux lors de l'expérience, ce qui a augmenté plutôt que diminué la concentration de solides dissous.

D'après les résultats obtenus, le CaO est le photocatalyseur le plus efficace pour le traitement des eaux usées industrielles dans des conditions expérimentales approuvées, ce qui justifie son adoption lors du second essai.

IV.2.2. Présentation et discussion des résultats de la deuxième expérience

1. Pour les eaux usées domestiques

L'expérience a été menée en utilisant différents blocs du catalyseur MnO₂ avec les mêmes conditions de fonctionnement stabilisées, dans le but d'évaluer l'effet du changement de masse sur l'efficacité du traitement. Le tableau suivant présente les valeurs enregistrées pour divers paramètres physicochimiques avant et après le traitement.

Tableau IV.5. Mesures des eaux usées domestiques avec différentes masses de MnO_2 .

La Masse Paramètres	Mesure initiale	$\text{MnO}_2=5\text{g}$	$\text{MnO}_2=10\text{g}$	$\text{MnO}_2=15\text{g}$	$\text{MnO}_2=20\text{g}$	$\text{MnO}_2=25\text{g}$
Température (°C)	25.81	30.50	30.48	30.84	28.88	28.39
Salinité (PSU)	1.97	2.64	2.72	2.72	2.79	2.83
DO (ppm)	0.00	00.0	0.00	0.00	0.00	000
% DO saturation	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
Le pH	4.33	4.13	4.19	4.05	4.09	4.14
mV pH	143.3	157.6	154.0	162.5	159.2	156.0
Résistance (MΩ.cm)	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
ORP	254.8	278.0	278.8	284.6	286.1	286.2
TDS (mg/L)	1876	2480	2557	2559	2615	2645
La densité de l'eau de mer (σ_t)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Les résultats enregistrés dans le tableau ci-dessus indiquent qu'il existe des différences claires et notables dans les différentes valeurs obtenues selon le changement de masse du catalyseur MnO_2 utilisé, car une différence progressive dans les résultats enregistrés est observée lors du passage d'une masse à une autre.

➤ Effet de la masse MnO_2 sur le pH, l'ORP et l'indice de pH mV

L'échantillon initial a commencé avec un pH = 4.33, reflétant un milieu relativement acide, avec une valeur ORP = 254.8 mV indiquant un milieu à capacité oxydative modérée.

- Après traitement avec différentes masses de MnO_2 (5 g à 25 g), les valeurs de pH sont restées relativement stables entre 4.05 et 4.19, indiquant que l'augmentation de la masse photocatalyseur n'a pas affecté de manière significative l'acidité du milieu, et que le MnO_2 n'a eu aucun effet apparent sur la modification du pH.
- En revanche, les valeurs d'ORP ont enregistré une augmentation progressive de 278.0 mV à 5 g à 286.2 mV à 25 g. Cela montre que la capacité oxydative du milieu s'améliore avec l'augmentation de la masse du photocatalyseur.

- Les valeurs de pH sont passées de 143.3 mV à des valeurs allant de 154.0 à 162.5 mV, reflétant une stabilité relative et une légère amélioration de l'activité électrochimique.

Cela signifie que l'augmentation de la masse de MnO_2 a principalement contribué davantage à l'amélioration des conditions oxydatives qu'à la modulation de l'acidité.

➤ **Effet de la masse sur le total des solides dissous (TDS) et la salinité**

Les valeurs initiales étaient :

- TDS = 1876 mg/L
- Salinité = 1.97 PSU

Après traitement, les valeurs de TDS augmentaient progressivement à mesure que la masse augmentait, démontrant qu'augmenter la masse du catalyseur entraînait une concentration plus élevée plutôt que plus faible de solides dissous.

La salinité a également augmenté progressivement, passant de 1.97 PSU à 2.83 PSU à la masse la plus élevée.

Cela signifie que l'augmentation de la masse a contribué à la libération de certains ions ou particules fines du catalyseur dans le milieu aqueux, ou à la resuspension de certaines substances dissoutes, entraînant une augmentation à la fois du TDS et de la salinité.

➤ **Oxygène dissous (DO) et saturation (% saturation en DO)**

La valeur initiale de DO était de = 0,00 ppm et le taux de saturation était de 0.0 %.

Ces valeurs sont restées constantes après traitement sur toutes les masses, indiquant l'absence d'un changement notable d'oxygène dissous, de sorte que la différence de masse n'a pas affecté cet indice dans les conditions expérimentales.

➤ **Température et densité**

- La température après traitement par rapport à la valeur initiale (25,81°C) a augmenté à :

- 30.50°C à 5 g.
- 30.84 °C à 15 g (valeur maximale).
- Elle est ensuite progressivement descendue à 28.39°C à 25 g.

Cela indique la survenue de réactions accompagnées de décharge thermique, en particulier dans les masses moyennes.

Cela signifie que l'interaction entre le catalyseur et l'eau était plus active à masses moyennes qu'à masses élevées.

La densité (σ) est restée inchangée puisqu'elle est restée de 0.0 dans tous les cas.

➤ Résistance électrique

La résistance est passée de 0,0003 M Ω à 0,0002 M Ω après traitement dans tous les cas, démontrant une légère augmentation de la conductivité électrique due à la forte concentration d'ions dissous.

Afin de comprendre l'effet de la masse du catalyseur sur l'efficacité du traitement et de comprendre l'évolution des solides dissous, les courbes graphiques suivantes ont été analysées :

• Courbe du TDS en fonction de la masse du MnO₂

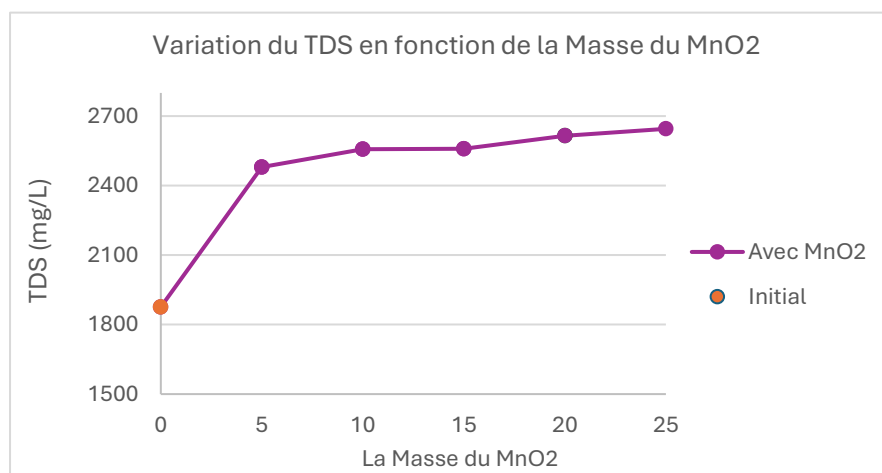


Figure IV.29. Courbe TDS en termes de masse MnO₂

La courbe montre la variation de la concentration de TDS en fonction de la masse du photocatalyseur MnO₂ utilisé (5 g, 10 g, 15 g, 20 g, 25 g). Une augmentation progressive des valeurs de TDS a été enregistrée, passant de 2480 mg/L à 5 g à 2645 mg/L à 25 g, contre la

valeur initiale de 1876 mg/L, indiquant que l'augmentation de la masse du photocatalyseur n'a pas amélioré l'élimination des solides dissous, mais a plutôt contribué à leur concentration plus élevée dans le milieu aqueux.

Cela signifie que l'augmentation de la masse a conduit à la libération de certains ions ou particules fines du catalyseur vers la solution, ou à la saturation du milieu avec le photocatalyseur, ce qui a réduit l'efficacité de la photocatalyse et augmenté la valeur TDS plutôt que de la diminuer.

La valeur TDS la plus faible est également notée à 5 g, ce qui suggère que les masses faibles sont plus adaptées dans les conditions expérimentales approuvées.

Les résultats ont montré que l'augmentation de masse n'améliorait pas l'efficacité d'élimination des solides dissous, mais conduisait plutôt à une augmentation progressive du TDS. Ainsi, le bloc 5g peut être considéré comme le plus adapté dans les conditions expérimentales approuvées, puisqu'il obtient la valeur TDS la plus faible comparée aux autres masses étudiées.

2. Pour les eaux usées industrielles

Tableau IV.6. Mesures des eaux usées industrielles avec différentes masses de CaO

<i>La Masse</i> <i>Paramètres</i>	CaO=10g	CaO=15g	CaO=20g	CaO=25g
Température (°C)	23.46	26.24	24.27	24.22
Salinité (PSU)	70.00	70.00	70.00	70.00
DO (ppm)	0.00	0.00	0.00	0.00
% DO saturation	0.0	0.0	0.0	0.0
Le pH	8.32	8.21	8.59	8.74
mV pH	-89.4	-83.6	-104.9	-113.3
Résistance(MΩ)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ORP	161.1	136.6	120.9	119.5
TDS (g/L)	112.9	113.6	112.2	111.6
La densité de l'eau de mer (σt)	50.00	50.00	50.00	50.00

➤ **Effet de la masse de CaO sur le pH, ORP et l'indice de pH mV**

Les résultats ont montré que les valeurs de pH restaient dans le domaine basal dans toutes les masses étudiées, allant de 8.21 à 8.74, contre la valeur précédemment enregistrée avec 10 g (8.32), indiquant que l'augmentation de la masse de CaO a maintenu l'effet basal du photocatalyseur avec une légère augmentation de l'acidité aux masses plus élevées, surtout à 25 g.

- À 15 g, le pH est légèrement descendu à 8.21, tandis qu'il est remonté à 8.74 à 25 g.
- Les valeurs de pH en mV ont également progressivement diminué de -89.4 à -113.3 mV à mesure que la masse augmentait.
- Cela montre un caractère basal accru du milieu tout en augmentant la quantité de stimulant.
- L'ORP a enregistré une diminution progressive de 161.1 mV à 10 g à 119.5 mV à 25g.

Cela signifie qu'augmenter progressivement la masse de CaO réduit la capacité oxydative du milieu en raison de l'amélioration des conditions de base, ce qui est le comportement attendu de ce type d'oxyde.

➤ **Effet de la masse sur le total des solides dissous (TDS) et la salinité (Salinité)**

La salinité est restée constante à 70.00 PSU dans tous les cas, indiquant l'absence d'effet clair de l'augmentation de la masse sur la teneur totale en sel.

En ce qui concerne le TDS :

- 112.9 g/L à 10 g.
- Elle a légèrement augmenté à 113.6 g/L à 15 g.
- Puis il est tombé à 112.2 g/L à 20 g.
- La valeur la plus basse a été enregistrée à 25 g = 111.6 g/L.

Cela montre une amélioration relative progressive de l'élimination de la matière dissoute lorsque la masse augmente, surtout à 25 g.

Cela signifie que l'augmentation de la quantité de CaO a contribué à améliorer l'élimination de certains matériaux dissous, probablement grâce à des mécanismes de sédimentation renforcés ou à la modification du milieu vers des conditions plus favorables au dépôt de certains composés.

➤ **Oxygène dissous (DO) et saturation (% saturation en DO)**

- DO = 0,00 ppm et une saturation de 0,0 % sont restées dans toutes les expériences, indiquant l'absence d'oxygène dissous après traitement dans toutes les masses étudiées.

Cela signifie que le changement de masse n'a pas affecté cet indice, et que le milieu est resté dans un état de consommation complète ou d'absence d'oxygène dissous.

➤ **Température et densité**

- La température est passée de 23,46 °C à 10 g à 26,24 °C à 15 g, puis a diminué relativement aux masses plus élevées pour atteindre 24,22 °C à 25 g, indiquant que l'activité thermique la plus élevée a été enregistrée à la masse moyenne de 15 g.

Cela signifie que l'interaction entre CaO et l'eau peut être plus active à des masses moyennes, avec une stabilité relative à des masses plus élevées.

- La densité de l'eau de mer (σ_t) est restée inchangée, restant stable à 50,00.

➤ **Résistance électrique (résistance)**

- La résistance est restée constante à 0,0000 M Ω dans tous les cas, ce qui signifiait que la conductivité électrique de la solution n'était pas significativement affectée par le changement de masse du catalyseur.

❖ **Analyse graphique :**

- **Courbe de variation du TDS en fonction de la Masse du CaO**

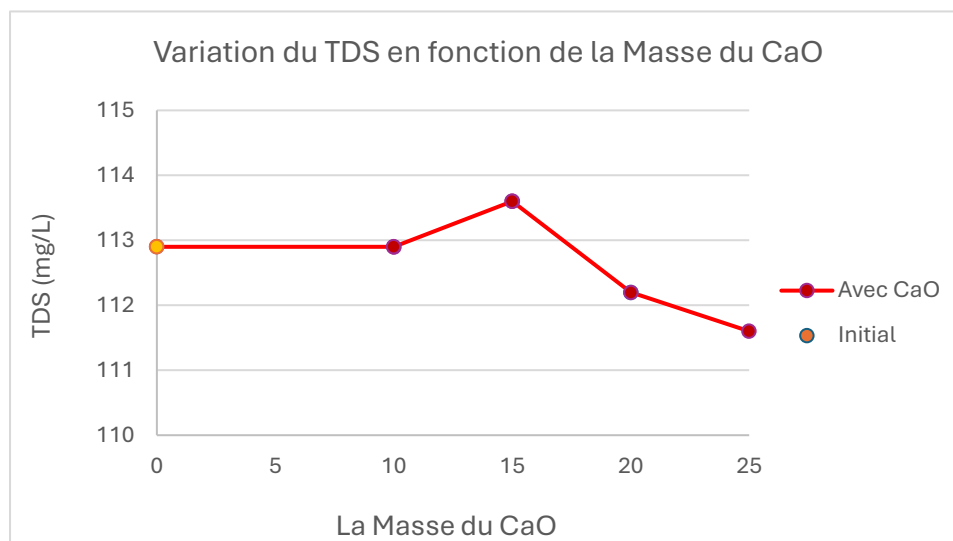


Figure IV.30. Courbe de variation du TDS en fonction de la Masse du CaO

La courbe montre la variation de la concentration de TDS en fonction de la masse du catalyseur CaO utilisé (10 g, 15 g, 20 g, 25 g). Le TDS a légèrement augmenté à 15 g pour atteindre 113.6 g/L contre 112.9 g/L à 10 g, puis a progressivement diminué à des masses plus élevées pour atteindre 112.2 g/L à 20 g et 111.6 g/L à 25 g, ce qui montre qu'augmenter la masse du photocatalyseur après un certain seuil a contribué à une meilleure élimination des solides dissous.

Cela signifie que les masses plus élevées de CaO ont amélioré l'efficacité du traitement, probablement en raison d'un meilleur dépôt de certains composés dissous et de la modification du milieu chimique vers des conditions plus favorables.

La valeur TDS la plus faible a été enregistrée à 25 g, ce qui suggère que cette masse représente la meilleure performance dans les conditions expérimentales étudiées.

Les résultats ont montré que l'augmentation de la masse de CaO maintenait le milieu dans le champ basal. Les valeurs TDS se sont également légèrement améliorées dans les blocs supérieurs, la valeur la plus basse étant enregistrée à la masse de 25 g.

Ainsi, la masse de 25 g peut être considérée comme la masse optimale pour le catalyseur CaO dans le traitement des eaux usées industrielles, car il permet d'obtenir la meilleure réduction relative des solides dissous tout en stabilisant le reste des paramètres physicochimiques.

IV.3. Discussion générale

Les résultats obtenus grâce à l'étude expérimentale montrent une différence nette dans les performances des photocatalyseurs utilisés pour le traitement des eaux usées domestiques et des eaux usées industrielles grâce à la technologie de photocatalyse, ce qui reflète l'effet de la nature du photocatalyseur et de la composition chimique de l'eau sur l'efficacité du traitement.

➤ Effet du type de photocatalyseur sur l'efficacité du traitement

Les résultats de la première expérience comparant différents photocatalyseurs ont montré que l'efficacité de traitement varie selon la nature de l'oxyde utilisé et ses propriétés physiques et chimiques.

Pour les eaux usées domestiques, le photocatalyseur MnO_2 a été le mieux efficace en réduisant la concentration de solides dissous (TDS) et en améliorant certaines propriétés physiques et chimiques de l'eau, obtenant la plus grande efficacité d'élimination par rapport aux autres photocatalyseurs. Ce résultat s'explique par les propriétés d'oxydation élevées du MnO_2 et sa bonne capacité à générer des espèces actives oxydantes sous rayonnement lumineux, ce qui favorise la désintégration de certains contaminants en composés plus simples ou moins solubles.

En revanche, des photocatalyseurs tels que ZnO , CuO et Al_2O_3 ont montré une efficacité limitée, tandis que CaO a conduit à une augmentation significative de certains indices, notamment la salinité et le degré basal, en raison de la libération d'ions Ca^{2+} et OH^- dans le milieu, ce qui a reflété négativement les valeurs de TDS dans l'eau domestique.

Quant aux eaux usées industrielles, les résultats ont montré un comportement différent, le photocatalyseur CaO enregistrant la meilleure performance relative par rapport aux autres photocatalyseurs, en obtenant la meilleure réduction du TDS et un ajustement significatif du pH. Cela est principalement dû à la capacité de ce photocatalyseur à neutraliser le milieu hautement acide et à stimuler le dépôt de certains composés dissous, le rendant plus adapté à la nature de l'eau industrielle étudiée.

➤ Effet des paramètres physicochimiques sur l'efficacité du traitement

Les résultats ont démontré que le changement des paramètres physicochimiques est directement lié à l'efficacité de la photostimulation. Le pH a montré une sensibilité nette

pendant le traitement, avec un milieu basal proche ou modéré améliorant certains résultats, tandis qu'un excès basal a dans certains cas entraînés des résultats moins stables. Un potentiel redox (ORP) plus élevé était également généralement associé à une meilleure capacité oxydative de la solution, en particulier avec des photocatalyseurs tels que MnO_2 , reflétant l'activation des réactions oxydatives dans le milieu. Les solides dissous totaux (TDS) étaient l'indicateur principal pour évaluer l'efficacité du traitement, car ils permettaient de déterminer le catalyseur et la masse les plus efficaces en suivant la variation de la concentration des substances dissoutes avant et après le traitement. La salinité montrait une corrélation claire avec les variations du TDS dans l'eau domestique, tout en restant relativement stable dans l'eau industrielle. Dans le cas de l'oxygène dissous (DO), une réduction significative ou presque nulle a été enregistrée dans la plupart des expériences, indiquant la consommation d'oxygène lors des réactions oxydatives associées à la photocatalyse.

➤ Comparaison des eaux usées domestiques et industrielles

Les eaux usées domestiques diffèrent des eaux usées industrielles par leur composition physique et chimique ainsi que par la nature des contaminants présents. Les eaux usées domestiques contiennent souvent de la matière organique, des résidus de détergents, des sels et des substances en suspension provenant d'une utilisation quotidienne, ce qui rend leur installation relativement moins compliquée. En revanche, les eaux usées industrielles ont une composition plus complexe en raison de leurs fortes concentrations de produits chimiques, de sels minéraux et de divers ions, ainsi que d'une variation notable du pH et d'autres propriétés physicochimiques.

Cette différence de composition affecte directement la réponse de chaque type d'eau au procédé de traitement photocatalytique, car l'efficacité des photocatalyseurs varie en fonction de la nature du milieu traité et de la concentration de contaminants présents.

Grâce à cette comparaison, la différence est mise en évidence : le choix du photocatalyseur dépend non seulement de ses propriétés subjectives, mais aussi des caractéristiques de l'eau à traiter, en particulier le pH initial, la structure ionique et la concentration des contaminants dessous.

➤ **L'effet de la masse catalyseur sur l'efficacité du traitement**

Après avoir déterminé le catalyseur le plus approprié pour chaque type d'eau, l'étude de l'effet de masse a été réalisée.

Dans l'eau domestique, l'étude de l'effet de masse MnO_2 a montré que l'augmentation de masse n'améliorait pas nécessairement l'efficacité du traitement. Bien que certains indices oxydatifs tels que l'ORP se soient améliorés, la montée de masse s'est accompagnée d'une augmentation progressive du TDS et de la salinité, suggérant que certains ions ou particules fines peuvent être libérés du catalyseur dans le milieu aqueux à des masses plus élevées.

Ces résultats indiquent une limite de masse optimale, car un excès peut saturer le milieu de particules solides ou bloquer une partie du rayonnement lumineux, limitant ainsi l'efficacité de la photostimulation.

Dans l'eau artificielle, une masse accrue de CaO a montré une amélioration relative de la réduction du TDS à des masses plus élevées, avec une masse de 25 g qui a obtenu les meilleurs résultats. Cela peut s'expliquer par une augmentation de la quantité d'ingrédients actifs capables de modifier le milieu acide et de favoriser le dépôt de composés dissous.

Par conséquent, l'effet de masse n'est pas soumis à une règle uniforme, mais dépend de l'équilibre entre la quantité du catalyseur, la nature du milieu et le mécanisme dominant de la réaction.

IV.4 Conclusion

Dans cette étude, il a été constaté que la technologie de photocatalyse hétérogène montrait une efficacité variable dans le traitement des eaux usées selon le type d'eaux usées utilisées, la nature du photocatalyseur utilisé et sa masse. L'étude a également permis d'identifier le catalyseur le plus adapté à chaque type d'eau, ainsi que d'identifier la masse qui obtient les meilleures performances dans les conditions expérimentales approuvées.

Les résultats ont également montré l'importance des paramètres physico-chimiques, en particulier le TDS, le pH, l'ORP et la salinité, comme indicateurs clés pour évaluer l'efficacité du traitement et comprendre le comportement des différents photocatalyseurs pendant la réaction.



Conclusion général



Conclusion générale

À l'issue de ce travail, qui s'est concentré sur le traitement des eaux usées par la photocatalyse hétérogène, nous avons conclu que cette technologie est considérée comme l'une des technologies les plus écologiques et durables, capables de répondre aux défis et problèmes environnementaux les plus graves et difficiles auxquels le monde est confronté à ce jour, principalement représentés par l'élimination des polluants organiques et inorganiques des eaux usées et l'amélioration de leur qualité, notamment dans les pays souffrant de pénurie ou de pénurie de ressources en eau, comme l'Algérie.

Grâce à l'étude expérimentale que nous avons menée, nous avons obtenu de nombreux résultats précieux et importants qui mettent en lumière la technologie photocatalytique dans le traitement des eaux usées ainsi que l'évaluation des performances d'un groupe de stimuli lumineux, les résultats sont les suivants :

- L'efficacité de l'oxyde de magnésium (MnO_2) se manifeste dans le traitement de l'eau domestique par rapport à d'autres catalyseurs, en atteignant le meilleur taux d'élimination de TDS, et contribuant également à l'amélioration des conditions d'oxydation de la solution.
- Dans le cas des eaux usées industrielles, l'oxyde de calcium (CaO) s'est révélé être le meilleur catalyseur et traité parmi les catalyseurs étudiés, obtenant une réduction significative du pourcentage d'élimination des solides.
- Les expériences ont confirmé l'importance de la quantité de stimulant utilisée, car dans les eaux usées domestiques, la petite masse du catalyseur était ($\text{MnO}_2=5\text{g}$) C'est le traitement le plus adapté et il a offert les meilleurs résultats, contrairement aux eaux usées industrielles, c'était la grande masse du catalyseur ($\text{CaO}=25\text{g}$) C'est le meilleur et cela donne de bons résultats.
- La diminution significative du niveau d'oxygène dissous (DO) nous a assuré que de fortes réactions d'oxydation survenaient pendant le processus de photocatalyse.

En général, la photocatalyse hétérogène a contribué à des changements positifs dans plusieurs indicateurs physicochimiques, et dans certains cas, nous avons observé que la couleur de l'eau contaminée changeait et revenait à une couleur plus claire et plus pure, ce qui témoigne de l'efficacité de cette technique pour éliminer les contaminants et améliorer la qualité des eaux usées.

Conclusion générale

La photocatalyse hétérogène est l'une des technologies les plus prometteuses et efficaces dans le domaine de la purification de l'eau, en raison de sa grande efficacité dans la réduction de la pollution, en plus de son rôle essentiel dans la protection des ressources en eau et la préservation de l'environnement.

❖ Recommandations et suggestions

Sur la base des résultats obtenus lors de ce travail, et afin d'améliorer la recherche et d'améliorer l'efficacité de la technologie photocatalytique dans le traitement des eaux usées, nous avons proposé un ensemble de recommandations et de perspectives futures comme suit:

- ✓ Exploitant la forte radiation solaire en Algérie, notamment dans les zones désertiques, pour développer cette technologie localement.
- ✓ Étudier plus en profondeur l'effet du temps d'exposition au soleil et de l'intensité lumineuse.
- ✓ Effectuer une analyse complète (DCO, des analyses DBO des métaux lourds et des analyses microbiologiques) afin d'évaluer plus précisément la qualité de l'eau traitée.
- ✓ Testez la réutilisation du stimulus et l'utilisez plusieurs fois au lieu de l'utiliser une seule fois.



Références bibliographiques



Références bibliographiques

- [1] Selaimia, N., & Boukerche, M. (2023). Évaluation de la qualité microbiologique de l'eau potable (Eau de robinet) et l'eau de quatre sources naturelles dans la région de Guelma. Mémoire de Master en Sciences Alimentaires, Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [2] Meradaci I. caractérisation des eaux de surface (barrage Chefia) au niveau de ADE Chaiba-sidi Amar- ; mémoire de fin d'étude ; Université Badji Mokhtar d'Annaba ; 2016.
- [3] République Algérienne Démocratique et Populaire, Ministère de l'Hydraulique, Agence Nationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (AGIRE), Agence du Bassin Hydrographique Chellif-Zahrez. <http://www.abh-cz.com.dz/eau.html>
- [4] RAMDANI Israa, « Etude sur la station de dessalement d'eau de mer (Honaine) », Mémoire de Master, Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEM, 2024.
- [5] Henada, S., & Hemaïdia, N. (2019). Etude de la qualité physico-chimique des eaux industrielles du complexe sidérurgique d'El-Hadjar-Annaba. Mémoire de Master en Génie des Procédés, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [6] Boutahrine F. optimisation des traitements des eaux potable de la station de KHENIFRA en amont de la déminéralisation ; mémoire master ; Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fes, 2014.
- [7] Mazouzi Yassmine et Hammana Douaa. (2024). Contrôle de la qualité de l'eau d'approvisionnement : cas du complexe sidérurgique d'El Hadjar (Mémoire de master). Université Badji Mokhtar, Annaba.
- [8] ABIBSI NADJET, 2011. Reutilization des eaux usées épurées par filtres plantes (phytoépuration) pour l'irrigation des espaces verts application à un quartier de la Ville de Biskra. Mem de Magister. Université de Mohamed Khider-Biskra.
- [9] Bouziane Mounir, Etude de conception de station d'épuration des eaux usées par boues activées (Base Vie Sonatrach Irara Hassi Messaoud). Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2017.
- [10] MOUSSA MOUMOUNI DJERMAKOYE HAMSATO, 2005. Les eaux résiduaires des Tanneries et des Teintureries: Caractéristiques physico-chimiques, bactériologiques et

Références bibliographiques

impact sur les eaux de surface et les eaux souterraines. Thèse de doctorat. Université de Bamako.

[11] Laabassi Ayache, Traitement des eaux usées domestiques par culture mixte sous climat semi-aride, Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2018.

[12] CHERIF Mohammed Amin, « Contribution à l'élaboration d'un logiciel pour le dimensionnement D'une station d'épuration », Mémoire de Master, Université Abou bekr Belkaïd – Tlemcen, Faculté de Technologie, 2017.

[13] KHADRAOUI Amira et MOUSSAOUI SABRINA, « Traitement d'une eau usée par les procédés de photocatalyse et électrophotocatalyse », Mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2022.

[14] DECHACHE Boubakeur. Amélioration de la qualité des eaux usées épurées par filtre à sable : cas de la STEP de N'goussa (Ouargla). Mémoire de Master professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla. (2018).

[15] DJEZZAR Dounia, « Étude des propriétés photocatalytiques d'un oxyde mixte », Mémoire de Master, Université de Biskra, 2025.

[16] CAZOIR David-Alexandre, « Traitement d'eaux huileuses par photocatalyse hétérogène : application à la dépol-lution des eaux de cales », Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, Français, 2011.

[17] FAR Houda, « Synthèse et Caractérisation des Oxydes Application en Photocatalyse », Thèse de Doctorat de troisième cycle, Université Mohammed Seddik Benyahia, Jijel, 2023.

[18] MISSOUM Mohammed, « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie », Mémoire de Magistère en génie mécanique Université HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF, 2011.

[19] Dahoui Okba, Dimensionnement d'un Système d'alimentation En Energie Electrique Par Voie Photovoltaïque Pour l'irrigation d'un Périmètre Agricole, mémoire de Master- Université Mohamed Khider Biskra, 2018.

[20] Bendjamâa Ibrahim, Modélisation Et Commande D'un Système De Stockage Photovoltaïque, Mémoire De Magistère, Université Abou-Bakr Belkaid De Tlemcen, 2012.

Références bibliographiques

[21] DJOUAD Ahmed Ouassim et RABEHI Mohamed Ayoub, « Etude du comportement photocatalytique des oxydes métalliques dans la distillation solaire », Mémoire de Master Académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2025.

[22] G.N. Tiwari, H.N. Singh, R. Tripathi, Present status of solar distillation, Solar energy., 75 (5) (2003) 367-373.

[23] Salima, Guerfi Née Karroute,, Optimisation et dimensionnement d'un système de dessalement performant. Thèse de doctorat, Université des Frères Mentouri Constantine 1, 2017.

[24] EL MAROUAZI Hamza, « Élaboration, caractérisation et évaluation photocatalytique de matériaux de type TiO_2 dopé – graphène », Thèse de Doctorat de l'Université de Strasbourg, 2021.



Annexes



Annexes

❖ Mesures multinormes des eaux usées domestiques

Mesures Paramètres	Mesure initiale	Mesure finale				
		Avec ZnO	Avec CuO	Avec CaO	Avec MnO ₂	Avec Al ₂ O ₃
Température (°C)	22.62	24.57	22.53	25.50	23.75	24.06
Salinité (PSU)	4.96	5.58	5.47	9.05	2.73	5.58
DO (ppm)	0.74	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00
% DO saturation	8.9	0.0	9.1	0.0	0.0	0.0
Le pH	4.31	6.81	5.62	11.27	4.50	5.10
mV pH	143.4	2.9	66.4	-259.3	132.7	97.3
Résistance (MΩ)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001
ORP	-47.1	224.9	347.3	21.3	323.5	293.4
TDS (mg/L)	4430	4962	4858	8400	2540	4958
La densité de l'eau de mer (σt)	1.4	1.4	1.8	4.3	1.5	1.5

❖ Mesures multinormes des eaux usées industrielles

Mesures Paramètres	Mesure initiale	Mesure finale				
		Avec ZnO	Avec CuO	Avec CaO	Avec MnO ₂	Avec Al ₂ O ₃
Température (°C)	20.87	23.49	23.37	23.46	23.44	23.38
Salinité (PSU)	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00
DO (ppm)	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% DO saturation	22.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Le pH	1.93	6.42	6.47	8.32	3.94	4.15
mV pH	281.2	19.9	16.5	-89.4	165.3	152.7
Résistance (MΩ)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ORP	464.1	294.1	310.9	161.1	499.4	4.14
TDS (mg/L)	116.2	113.7	116.3	112.9	118.6	116.9
La densité de l'eau de mer (σt)	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0

Annexes

❖ Mesures des eaux usées domestiques avec différentes masses de MnO_2

La Masse Paramètres	Mesure initiale	$\text{MnO}_2=5\text{g}$	$\text{MnO}_2=10\text{g}$	$\text{MnO}_2=15\text{g}$	$\text{MnO}_2=20\text{g}$	$\text{MnO}_2=25\text{g}$
Température (°C)	25.81	30.50	30.48	30.84	28.88	28.39
Salinité (PSU)	1.97	2.64	2.72	2.72	2.79	2.83
DO (ppm)	0.00	00.0	0.00	0.00	0.00	0.00
% DO saturation	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
Le pH	4.33	4.13	4.19	4.05	4.09	4.14
mV pH	143.3	157.6	154.0	162.5	159.2	156.0
Résistance (MΩ.cm)	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
ORP	254.8	278.0	278.8	284.6	286.1	286.2
TDS (mg/L)	1876	2480	2557	2559	2615	2645
La densité de l'eau de mer (σt)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

❖ Mesures des eaux usées domestiques avec différentes masses de CaO

La Masse Paramètres	$\text{CaO}=10\text{g}$	$\text{CaO}=15\text{g}$	$\text{CaO}=20\text{g}$	$\text{CaO}=25\text{g}$
Température (°C)	23.46	26.24	24.27	24.22
Salinité (PSU)	70.00	70.00	70.00	70.00
DO (ppm)	0.00	0.00	0.00	0.00
% DO saturation	0.0	0.0	0.0	0.0
Le pH	8.32	8.21	8.59	8.74
mV pH	-89.4	-83.6	-104.9	-113.3
Résistance(MΩ)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ORP	161.1	136.6	120.9	119.5
TDS (g/L)	112.9	113.6	112.2	111.6
La densité de l'eau de mer (σt)	50.00	50.00	50.00	50.00

Annexes

❖ Fiche technique : Appareil Multiparamètre

Nom du Laboratoire : Génie de l'Eau et de l'Environnement en Milieu Saharien (GEEMS)
Nom du directeur : MESSAÏTEA Amar **Date de création:** 08 /07 / 2012
Etablissement : Université d'Ouargla

FICHE TECHNIQUE

Désignation de l'équipement : Multi paramètre

Description : Multi paramètre professionnel, avec une sonde autonome pour l'analyse des paramètres chimiques des eaux (salinité jusqu'à 12 paramètres).

Marque : HANNA	N° SERIE : GM8651	N° d'inventaire : 188428	Année d'acquisition: 2016
-----------------------	--------------------------	---------------------------------	----------------------------------

Localisation : Salle 4 (GEEMS), bloc de laboratoires, site campus 2, Université d'Ouargla.



	Fonctionnel	En panne	Hors service	Observations sur le fonctionnement (**)
Etat de l'équipement(*)	X			
Accessoires(**)	Non	Oui		Si oui précisez (**) Becher d'établage ; Kit de maintenance des capteurs ; logiciel de transfert des données ; Mallette de transport ; Manchon de protection court pour sonde avec capteur de turbidité ; membranes de rechange pour sonde oxygène (5x).
Personnel de soutien (*)	Présent	Absent		Si Absent mais nécessaire indiquez les qualifications requises (**) X
Consommable de l'équipement(*)	Non	X	Oui	Si oui précisez (**) Solution étalon, maintenance des capteurs ; membranes de rechange pour sonde oxygène (5x)
				Coût estimatif par an en Dinar(**)
				2.000,00

(*) Mettre une croix dans la case correspondante

(**) Donner des informations s'il y a lieu

Cette fiche doit être dûment remplie pour chaque équipement (manipulation, instrument et home de mesure) de mesure) et doit ensuite être déposée dès la récupération du laboratoire et renvoyée à l'adresse email : geems.documents@gmail.com

Résumé :

L'objectif principal de ce travail est l'étude du traitement des eaux usées par la photocatalyse hétérogène. Réalisé dans le cadre d'un stage de fin d'études au laboratoire génie des procédés de l'Université de Ouargla, il s'appuie sur l'utilisation des catalyseurs suivants: ZnO, Al₂O₃, CuO, CaO et MnO₂. Cette étude vise à évaluer le potentiel de cette technique verte à travers la dépollution des eaux par conversion des polluants en CO₂ et H₂O, ainsi que la production d'hydrogène (H₂) comme énergie propre, la valorisation énergétique par l'exploitation du rayonnement solaire, ainsi que l'optimisation des réactions chimiques sous irradiation UV ou visible. Elle s'intéresse également aux mécanismes fondamentaux tels que l'adsorption et les transferts de charges à la surface du photocatalyseur afin d'améliorer l'efficacité du procédé. Ce travail a également pour objectifs spécifiques de déterminer le photocatalyseur le plus performant parmi les cinq étudiés, ainsi que d'identifier la masse optimale du photocatalyseur retenu.

Mots clés : la photocatalyse hétérogène, dépollution, eaux usées, photocatalyseur.

Abstract:

The main objective of this work is to study wastewater treatment using heterogeneous photocatalysis. Conducted as part of a final-year internship at the Process Engineering Laboratory of the University of Ouargla, it focuses on the use of the following catalysts: ZnO, Al₂O₃, CuO, CaO, and MnO₂. This study aims to evaluate the potential of this green technology through water purification by converting pollutants into CO₂ and H₂O, as well as the production of hydrogen (H₂) as clean energy, energy recovery through the exploitation of solar radiation, and the optimization of chemical reactions under UV or visible irradiation. It also examines fundamental mechanisms such as adsorption and charge transfer at the surface of the photocatalyst in order to improve process efficiency. This work also aims to determine the most efficient photocatalyst among the five studied, as well as to identify the optimal mass of the selected photocatalyst.

Keywords : heterogeneous photocatalysis, pollution control, wastewater, photocatalyst.

ملخص:

يهدف هذا العمل بشكل أساسي إلى دراسة معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام التحفيز الضوئي غير المتجانس. أُجري هذا العمل كجزء من تدريب عملي لطلاب السنة النهائية في مختبر هندسة العمليات بجامعة ورقلة، ويركز على استخدام المحفزات التالية: أكسيد الزنك (ZnO)، وأكسيد الألومنيوم (Al₂O₃)، وأكسيد النحاس (CuO)، وأكسيد الكالسيوم (CaO)، وثاني أكسيد المنغنيز (MnO₂). تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانات هذه التقنية الصديقة للبيئة من خلال تنقية المياه بتحويل الملوثات إلى ثاني أكسيد الكربون (CO₂) والماء (H₂O)، بالإضافة إلى إنتاج الهيدروجين (H₂) كمصدر طاقة نظيف، واستعادة الطاقة من خلال استغلال الإشعاع الشمسي، وتحسين التفاعلات الكيميائية تحت الأشعة فوق البنفسجية أو الضوء المرئي. كما نتناول الدراسة الآليات الأساسية مثل الامتزاز ونقل الشحنات على سطح المحفز الضوئي لتحسين كفاءة العملية. ويهدف هذا العمل أيضًا إلى تحديد المحفز الضوئي الأكثر كفاءة من بين المحفزات الخمسة المدروسة، بالإضافة إلى تحديد الكتلة المثلى للمحفز الضوئي المختار.

الكلمات المفتاحية: التحفيز الضوئي غير المتجانس، مكافحة التلوث، مياه الصرف الصحي، المحفز الضوئي.