



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



Université Echahid Hamma Lakhdar. El Oued
Faculté de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies
Filière: Génie des Procédés
Spécialité: Génie Pétrochimie

Thème

***La faisabilité d'élimination des polluants par les procédés
d'oxydation avancée
(traitement des eaux et des effluents industriels)***

Rédiger par :

MANSOURI Hadj ali

MANSOURI Aissa

SOULTANI Hatem

KHALDI Anis

Devant le Jury:

Bouhrira Abdelaziz

MAA

Encadreur

Université d'El Oued.

Zoumali Djafer

MCA

Présidente

Université d'El Oued.

Rgeoia Abd Allah

MAA

Examinatrice

Université d'El Oued.

Année Universitaire :2022/2023

Remerciements

Au nom de Dieu le Miséricordieux, Louange à Dieu, par la grâce duquel de bonnes actions ont été accomplies, et que la prière et la paix soient sur le Prophète de la miséricorde, Maintenant, nous remercions Dieu d'avoir pu accomplir ce mémoire après beaucoup d'efforts.

Nous ne pouvons manquer d'exprimer nos remerciements et notre gratitude à notre encadreur le Docteur " BOUHRIRA Abdelaziz ", qui nous a accompagnés tout au long de cette recherche minutieuse et nous a guidés sur le chemin avec ses précieux et précieux conseils. Nous remercions également les membres du jury pour l'acceptation à examiner ce travail, sans oublier la contribution de l'administration du département et ces enseignants pour les facilités qu'ils nous ont fournies, ainsi que tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin par des conseils ou des critiques.

Résumer

L'eau est abondamment utilisée dans l'environnement industriel pour des applications, nombreuses et diverses. Lors de son utilisation dans des différentes étapes des procédés ou lors du nettoyage de ces installations industrielles, l'eau se charge des contaminants. Ces composés sont d'origines chimiques très diverses, sont plus ou moins polluants et/ou toxiques, et sont ensuite déversés, directement ou indirectement, dans les milieux aquatiques naturels. Ce travail de recherche a eu pour but d'étudier la faisabilité d'élimination et la dégradation des polluants par procédé d'oxydation avancée en solution. Parmi toutes les techniques de traitement possibles des effluents aqueux contaminés par des composés organiques, les procédés d'oxydation avancée (POAs) apparaissent comme des procédés de choix car ils permettent d'obtenir une dégradation totale du polluant en association avec une diminution de la toxicité globale de l'effluent. Les POA sont basés sur la production in situ des radicaux hydroxyles ($\bullet\text{OH}$), espèce très fortement oxydante et extrêmement réactive. Ces radicaux sont capables de minéraliser n'importe quel composé organique et organométallique.

Les POA incluent des procédés d'oxydation chimiques en phase homogène: $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ (réactif de Fenton), O_3/OH^- (ozonation), $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ (peroxonation), etc.; des procédés photochimiques: $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ (photolyse de H_2O_2), O_3/UV , $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}/\text{UV}$ (photo-Fenton ou photocatalyse homogène), TiO_2/UV (photocatalyse hétérogène); des procédés électrochimiques directs et indirects (oxydation anodique, électro Fenton); des procédés électriques (sonolyse, faisceau d'électron, etc.) et des procédés de décharge électrique (décharge couronne, plasma d'air humide).

Mot clé: Procédés d'oxydation avancée, polluants organiques, dégradation, radicaux hydroxyles

الملخص:

يستخدم الماء على نطاق واسع في البيئة الصناعية للعديد من التطبيقات المتنوعة. أثناء استخدامه في مختلف مراحل العمليات أو أثناء تنظيف هذه المنشآت الصناعية ، يكون الماء مسؤولاً عن الملوثات. هذه المركبات ذات أصول كيميائية متنوعة للغاية ، وهي أكثر أو أقل تلوثاً و / أو سامة ، ثم يتم تصريفها ، بشكل مباشر أو غير مباشر ، في البيئات المائية الطبيعية. ويهدف هذا البحث إلى دراسة جدوى القضاء على الملوثات وتدهورها عن طريق عملية الأكسدة في المحلول. من بين جميع تقنيات المعالجة الممكنة للنفايات السائلة المائية الملوثة بالمركبات العضوية ، يبدو أن عمليات الأكسدة المتقدمة (POAs) هي العمليات المفضلة لأنها

جعل من الممكن الحصول على التحلل الكلي للملوثات بالاقتران مع انخفاض في السمية الكلية للنفايات السائلة تعتمد خطة العمل على الإنتاج في الموقع لجذور الهيدروكسيل ($\bullet\text{OH}$)، وهي من الأنواع شديدة التأكسد والتفاعلية للغاية. هذه الجذور قادرة على تمعدن أي مركب عضوي أو عضوي معدني.

تشتمل طلبات الشراء على عمليات أكسدة كيميائية متجانسة في الطور: $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{Fe}^{2+}$ (كاشف فنتون) ، OH^- / O_3 (الأوزون) ، $\text{O}_3 / \text{H}_2\text{O}_2$ (بيروكسونات) ، إلخ ؛ العمليات الكيميائية الضوئية: $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{UV}$ (التحلل الضوئي لـ H_2O_2) ، O_3 / UV ، $\text{H}_2\text{O}_2 / \text{UV}$ (فنتون ضوئي أو تحفيز ضوئي متجانس) ، TiO_2 / UV (تحفيز ضوئي غير متجانس) ؛ العمليات الكهروكيميائية المباشرة وغير المباشرة (أكسدة أنوديك ، إلكتروليت فينتون) ؛ العمليات الكهربائية (تحليل الموجات الصوتية ، شعاع الإلكترون ، إلخ) وعمليات التفريغ الكهربائي (تفريغ الهالة ، بلازما الهواء الرطب).

الكلمات المفتاحية:

عمليات أكسدة متقدمة، ملوثات عضوية، تحلل، جذور الهيدروكسيل

Liste des Figures

Figure 1: Transport global des polluants organiques persistants (d'après Wania & Mackay)	6
Figure 2: Caractéristiques du radical hydroxyle $\text{OH}\cdot$	19
Figure 3: Mécanisme d'activation du peroxyde d'hydrogène par l'ozone (DORÉ, 1989).	26
Figure 4: schema bilan du procédé GF	31
Figure 5: Evolution de la force électromotrice en fonction du temps	32
Figure 6: Evolution de l'absorbance du BM en fonction du temps à $\lambda_{\text{max}} = 650 \text{ nm}$	33
Figure 7: Evolution de la force électromotrice en fonction du temps	34
Figure 8: Evolution de l'absorbance du BM en fonction du temps à $\lambda_{\text{max}} = 650 \text{ nm}$	35

Liste des tableaux

Tableau 1: Liste nominative des polluants organiques non biodégradables (Convention de Stockholm Mai 2001 et 2009).....	7
Tableau 2. Les risques de la pollution de l'eau (VILAGINES, 2003).	11
Tableau 3. Comparaison des potentiels normaux d'oxydoréduction des principaux oxydants utilisés dans le domaine du traitement des eaux (Doré, 1989).	20
Tableau 4: Mode d'action du radical *OH sur les composés organiques et minéraux (étapes initiales).	21
Tableau 5: Comparaison des constantes de vitesse cinétique pour la production Comparaison des constantes de vitesse cinétique pour la production d'ozone et de radicaux hydroxyles enregistrés lors de l'oxydation de certains composés organiques moléculaires (PARSONS, 2004).	22
Tableau 6. Constantes cinétiques de réaction des radicaux hydroxyles en milieu aqueux sur les composés aliphatiques.	23
Tableau 7. Composés aromatiques monosubstitués (BUXTON et al., 1988) et polysubstitués (HAAG et YAO, 1992).	23
Tableau 8: Evolution du rendement de la dégradation de MB en la concentration de H ₂ O ₂ ...	34

Liste des abréviations

OH :	Groupes hydroxyles.
●OH:	Radicaux hydroxyles
pKa :	L'indication de la « constante d'acidité».
HO ₂ :	Radicaux d' hydroperoxyde.
H ₂ O ₂ :	Peroxyde d'hydrogène.
pH :	Potentiel d'hydrogène.
POA :	Procédés d'oxydation avancés.
l'OMS :	L'Organisation Mondiale de la Sante.
DBO :	Demande biochimique en oxygène
DCO :	Demande chimique en oxygène
CO ₂ :	Dioxyde de carbone
R	Rapport [H ₂ O ₂]/[Fe ²⁺]
Fe ²⁺	Ion ferreux
Fe ³⁺	Ion ferrique
FeSO ₄	Sulfate ferreux
Fe(OH) ₃	Hydroxyde de fer
O ₃	Ozone
tr/min	Tour par minute
T	Température (°C)
t	Temps
POP	Polluant Organique Persistant
f.e.m	Force électromotrice (V)
GF	Galvano-Fenton
E°	Potentiel standard

Sommaire

Remercîments	
Résumer	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Sommaire	
Introduction générale	1

Chapitre I : La pollution

1. Les polluants organiques persistants (POPs)	5
2. Propriétés des Polluants Organiques Persistants.....	6
3. Les Propriétés chimiques de l'eau	7
3.1. L'auto-ionisation de l'eau	7
3.2. La solvatation	8
4. Pollution de l'eau	8
4.1. Définition	8
4.2. Les types de la pollution de l'eau	9
4.3. Sources de la pollution des eaux	9
4.3.1. Source industrielle.....	9
4.3.2. Source agricole.....	9
4.3.3. Source naturelle.....	9
4.3.4. Source naturelle.....	10
4.4. Techniques de traitement des eaux contaminées	10
4.4.1. Méthodes physiques	10
4.4.2. Méthodes biologiques	10
4.4.3. Méthodes chimiques.....	11
4.5. Impacts de la pollution des eaux	11
5. La pollution industriel	12
5.1. Définition	12
5.2. Sources de pollution industrielle.....	12
5.3. Les différents types de pollution industrielle	12
A. La pollution de l'eau et du sol.....	12
B. La pollution de l'air	12
C. La pollution acoustique ou sonore.....	13

5.4. Les effluents industriels	13
5.4.1. Définition	13
5.4.2. Origine des effluents	13
5.4.3. Paramètres physiques	14
5.4.4. Paramètres chimiques:	14
5.5. L'impact s de pollution industrielle	16

Chapitre II: Le processus d'oxydation avancé

Introduction	18
1- Les procédés d'oxydation avancée	19
1-1-Définition.....	19
1-2- Caractéristiques Le radical hydroxyle OH	19
1.3 Espèces radicalaires	20
1.4. Réactivité du radical hydroxyle	20
1.5. La cinétique de réaction des radicaux HO•	21
2. Les types des procédés d'oxydation avancés	24
2.1. Procédés d'oxydation chimique en phase homogène	24
2.1.1. Procédé Fenton, ($H_2O_2/Fe + 2$).....	24
2.1.2. Facteurs influençant l'efficacité du procédé Fenton.....	25
2.2. La présence de consommateurs des radicaux hydroxyles :.....	25
2.2.1. Procédé de peroxonation H_2O_2/O_3	25
2.2.2. Photolyse de H_2O_2 (UV/ H_2O_2):	26
2.3. Procédés d'oxydation sonochimique.....	26
Conclusion	28

Chapitre III: Élimination des polluants par les procédés d'oxydation avancée

Introduction	30
1- Etude de la production de l'énergie à partir de la dégradation du bleu de méthylène.....	30
2-1-Fonctionnement d'une pile :	31
1-Etude de l'influence de la concentration de peroxyde d'hydrogène	32
2-Etude de l'influence de la concentration du bleu de méthylène.....	34
02- La décoloration de Violet de gentiane par le Procédé de Fenton et photo fenton	36
Conclusion.....	44
Références bibliographiques	46

Introduction générale

Le traitement des effluents de l'industrie qui, de par la nature de leurs productions, sont de grandes consommatrices d'eau. Ces effluents sont caractérisés par la présence de substances toxiques et leur rejet dans les milieux naturels peut provoquer des problèmes de santé et d'environnement. Le traitement idéal, serait celui qui consomme le moins d'énergie et qui ne rejeterait rien de nocif dans le milieu récepteur.

Les polluants issus de différentes industries, chimiques, pharmaceutiques, cosmétiques, pétrolières, agroalimentaires, etc., sont à l'origine de nombreuses perturbations de la vie aquatique et constituent un risque pour la santé humaine. Certains de ces polluants sont stables et par conséquent difficiles à se dégrader. D'autres parviennent à se dégrader partiellement mais en produisant des composés intermédiaires pouvant avoir un effet plus toxique que le polluant initial.

De nouveaux procédés de traitement ont émergé au cours des 30 dernières années parmi lesquels les Procédés d'Oxydation Avancée (POA), très intéressantes pour la dégradation de molécules organiques récalcitrantes. Ces techniques sont complémentaires aux méthodes habituelles de floculation, précipitation, adsorption sur charbon actif ou procédés membranaires. L'oxydation avancée a pour but la minéralisation complète des polluants aqueux en CO_2 et autres composés minéraux.

Tout procédé d'oxydation avancé nécessite, outre les produits nécessaires au traitement, une source d'énergie. L'énergie solaire disponible tout au long de l'année avec des intensités variables peut constituer une source alternative utilisable surtout dans les pays en voie de développement. En effet, cette source d'énergie renouvelable est gratuite et inépuisable, elle est de loin l'énergie la plus abondante sur Terre.

Le traitement photocatalytique se présente donc comme une technologie de choix pour la dépollution de ces eaux usées, car il s'agit d'un système performant, simple et économique.

Ces différentes caractéristiques attractives ont engendré un grand intérêt de la part des chercheurs pour la compréhension, l'optimisation et l'application industrielle de ce procédé.

Le présent mémoire est divisé en trois chapitres

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la partie bibliographique, dans laquelle sont introduites toutes les notions et les définitions sur polluants et ses impacts sur l'environnement et la santé

Puis, Le deuxième chapitre nous présentons les procédés avancées (les différents types de POAs sera procédé ainsi que les mécanismes d'oxydation par les radicaux hydroxyles).

Dans le dernier chapitre, montrer l'intérêt des techniques d'oxydation avancée pour l'élimination de polluants issus les eaux et les effluents industriels (papeteries, imprimerie, textiles, savonneries)

Chapitre I : La pollution

La pollution des eaux et sols, accidentellement ou volontairement par certains produits chimiques d'origine industrielle (hydrocarbures, phénols, colorants,...) ou agricole (pesticides, engrais,...) constitue une source de dégradation de l'environnement et suscite à l'heure actuelle un intérêt particulier à l'échelle internationale (Douinat, 2012).

La pollution de l'eau est la détérioration physique, chimique ou bactériologique de ses caractéristiques naturelles par des déchets ou des sous-produits solides ou gazeux. La protection de l'environnement et le problème de la décontamination des eaux et des sols pollués nécessitent une réaction rapide du monde entier. Alors que l'accès à l'eau potable et aux installations de traitement sont des mesures préventives pour diverses maladies d'origine hydrique selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS), Si la pollution domestique des ressources est relativement constante, les rejets industriels sont, au contraire, caractérisés par leur très grande diversité, suivant l'utilisation qui est faite de l'eau au cours du process industriel .

Selon l'activité industrielle, on va donc retrouver des pollutions aussi diverses que:

- Des matières organiques et des graisses provenant des abattoirs, industries agroalimentaires
- Des hydrocarbures issues des industries pétrolières, transports
- Des métaux provenant des traitements de surface, métallurgie Parmi les industries considérées traditionnellement comme rejetant des matières particulièrement polluantes pour l'eau, on citera les industries agro-alimentaires, papetières, la chimie, les traitements de surface, l'industrie du cuir
- Des eaux chaudes issues des circuits de refroidissement des centrales thermiques[1]

1. Les polluants organiques persistants (POPs)

Les polluants organiques persistants sont un groupe de polluants qui ont été collectés, car ils sont considérés comme des polluants très dangereux car ils menacent l'environnement et la santé humaine. Ces polluants sont les pesticides et les produits chimiques industriels. Les pops se retrouvent en faible concentration dans les cours d'eau et les nappes sous terraines, ils sont souvent chimiquement très stables et difficiles à minéraliser de manière complète. Les POPs [2]font aujourd'hui l'objet d'une préoccupation mondiale (UNEP, 2001) .Au niveau réglementaire, la convention de Stockholm (Mai 2001 puis 2009), traité.

2. Propriétés des Polluants Organiques Persistants

Les polluants organiques persistants sont des polluants toxiques qui présentent un danger ayant des effets nocifs sur la santé et l'environnement[3]. Dès 1962, dans son livre "Silent Spring", Rachel Carson décrit comment les pesticides détériorent l'environnement et notamment la santé des oiseaux. L'homme peut quant à lui être exposé aux POPs par inhalation ou ingestion d'aliments.

Les polluants organiques persistants sont des polluants persistants dans l'environnement en raison de leur grande résistance aux transformations dues à leurs propriétés chimiques. La persistance d'un polluant dans un milieu est décrite par son temps de demi-vie dans ce milieu, ce qui correspond au temps nécessaire pour que la moitié du polluant disparaisse. Selon la Convention de Stockholm. [3]

Les POPs sont lipophiles : ils ont tendance à se fixer sur les tissus adipeux et s'accumulent dans les organismes vivants. Ainsi, la concentration augmente le long de la chaîne alimentaire. Par exemple, comme illustré sur la figure 1, on peut trouver de fortes concentrations de PCBs dans les mammifères marins malgré une contamination initiale de l'eau de mer relativement faible. On comprend aisément la menace pour la santé humaine du fait de l'alimentation très variée de l'homme. Ils sont semi-volatiles. Ils peuvent ainsi être transportés sur de longues distances grâce à un processus appelé « l'effet sauterelle ou distillation planétaire » (Wania & Mackay, 1993 et 1995[4])



Figure 1: Transport global des polluants organiques persistants (d'après Wania & Mackay)

Tableau 1: Liste nominative des polluants organiques non biodégradables (Convention de Stockholm Mai 2001 et 2009)

Catégorie	Nom
Pesticides	Aldrine
	Chlordane
	Chlordécone
	Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT)
	Dieldrine
	Endrine
	Heptachlore
	Hexachlorobenzene
	α -, β - et γ - Hexachlorocyclohexan (HCH)
	Pentachlorobenzene
	Mirex
	Toxaphene
Produits chimiques industriels	Hexachlorobenzene (HCB)
	Hexabromobiphenyle
	Pentachlorobenzene
	Polybromodiphenyles Ethers (PBDES)
	Polychlorobiphényles (PCBs)
Produits non intentionnelle	Dioxines (PCDD)
	Furan (PCDF)
	Hexachlorobenzene (HCB)
	Acide perfluorooctane sulfonique, fluorure d
	perfluorooctane sulfonye
	Pentachlorobenzene

3. Les Propriétés chimiques de l'eau

3.1. L'auto-ionisation de l'eau

Regardons la molécule d'eau dans sa représentation la plus simple : elle est un équilibre entre toutes les grandes fonctions chimiques de la nature : acide – base , oxydation - réduction (Durend , 2001) [5] .L'eau liquide pure est très faiblement dissociée en H_3O^+ et OH^- par l'auto ionisation ; par conséquent tout les composés qui augmentent la concentration des ions positives H_3O^+ sont acides et les composés augmentant la

concentration des ions négatifs OH^- sont basiques (Martin et Hine, 2008) de ce fait l'eau porte en elle la fameuse notion du pH (grandeur sans unité) par la relation [6].

$$\text{pH} = -\lg [\text{H}_3\text{O}^+] = 7$$

Ou, ce qui est équivalent par la relation :

$$[\text{K}_\text{B}\text{O}_\text{an}^*] = 10^{-7}$$

(Boeglin, 2001)

3.2. La solvation

L'eau est, par ses propriétés électriques et sa constitution moléculaire, particulièrement apte à la mise en solution de nombreux corps gazeux, liquides polaires, et surtout solides. (Société Degremont, 1989) (coll, 1992).

En effet à cause de sa structure angulaire, la molécule d'eau à un moment dipolaire permanente, en outre l'hydrogène est fortement collé et possède une haute constante diélectrique. Ces propriétés combinées rendent l'eau un solvant puissant pour les composés polaires et ioniques[7]. (Daintith, 2008).

La solvation (l'action hydratante de l'eau) est le résultat d'une destruction complète ou partielle des divers liens électrostatiques entre les atomes et les molécules du corps à dissoudre, pour les remplacer par de nouveaux liens avec les molécules d'eau, et forger ainsi de nouvelles structures :

Il se produit une véritable réaction chimique. (Boeglin, 2001). L'eau s'organise autour des substances en trois couches :

- L'eau liée se fixe solidement sur le soluté
- L'eau structurée engendrée par la précédente s'organise en seconde couche : c'est l'image énergétique du soluté
- L'eau libre a l'extérieur des deux couches précédentes (Durend. 2001)

4. Pollution de l'eau

4.1. Définition

La pollution de l'eau est une dégradation physique, chimique, biologique ou bactériologique de ses qualités naturelles, provoquée par l'homme et ses activités. (dépollution par charbon actif pollution de l'eau). La pollution de l'eau décrit généralement l'introduction ou la présence des substances nocives ou inacceptables dans l'ampleur suffisante pour modifier les indices de qualité de l'eau naturelle (Nsikak, 2008) [8]. La pollution de l'eau douce (par exemple par le biais de l'eutrophisation, l'acidification, et la pollution des eaux souterraines) est celle qui diminue sa pureté (Park, 2007).

4.2. Les types de la pollution de l'eau

- a. Pollution accidentelle : est une pollution ponctuelle, souvent de grande envergure, comme une marée noire (Bertrand, 2011) .[9]
- b. pollution chronique : correspond quant à elle au rejet de matières permanentes de faibles doses de polluants dans un écosystème (émissions urbaines, activités agricoles, rejets industriels) (Bertrand, 2011).

4.3. Sources de la pollution des eaux

4.3.1. Source industrielle

Lors de l'utilisation de produits chimiques pour la fabrication de produits industriels, cette fabrication se traduit par des résidus d'eau polluée appelés effluents industriels. Ces déchets liquides peuvent être à l'origine de pollutions organiques (industries agro-alimentaires), chimiques ou physiques (chauffage des centrales thermiques). Par conséquent, ces déchets liquides doivent être traités obligatoirement car la pollution qu'ils contiennent peut avoir des effets toxiques. (dépollution par charbon actif[10].

4.3.2. Source agricole

Ce type de pollution s'est intensifié depuis la domination de l'industrialisation avancée sur l'agriculture, où la pollution provient d'origine agricole des engrais et des pesticides. L'exploitation massive des élevages par exemple, entraîne un excédent de déjections animales qui finissent par enrichir les cours d'eau et les nappes souterraines en dérivés azotés, engageant ainsi une prolifération bactérienne. L'utilisation massive des engrais chimiques (phosphates et nitrates) altèrent aussi la qualité des nappes souterraines à travers lesquelles ils sont entraînés[11] .

4.3.3. Source naturelle

Ce phénomène se produit lorsque l'eau est en contact avec l'atmosphère car elle contient du dioxyde de carbone CO_2 qui est soluble dans l'eau pour donner de l'acide carbonique H_2CO_3 .

La concentration de CO_2 dans l'atmosphère conduit à une acidification de l'eau à son contact.

4.3.4. Source naturelle

L'eau revenant des zones urbaines à travers toutes les installations, y compris les écoles, les magasins et les hôpitaux, ainsi que l'eau de ruissellement dans les parcs, les voies publiques et les toits, contient des pesticides, des germes, des matières organiques et de l'azote. [12]

4.4. Techniques de traitement des eaux contaminées

4.4.1. Méthodes physiques

a. Filtration sur membrane

La filtration membranaire est une technologie de filtration basée sur l'application d'une différence de pression (ou potentiel électrique) de part et d'autre de la membrane. La filtration membranaire pilotée par pression hydraulique est disponible en microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration et osmose inverse. Parmi ces procédés, la nanofiltration et l'osmose inverse sont les procédés les plus adaptés pour l'élimination des molécules organiques. [13]

b. Adsorption

L'adsorption est un procédé de séparation simple et très efficace. La technique est basée sur la propriété de certains matériaux adsorbants de fixer des molécules de la phase liquide. Il s'agit donc d'un transfert de masse de la phase liquide vers la phase solide à laquelle le composé organique a tendance à se lier en raison d'interactions préférentielles [14]

c. Coagulation-floculation:

Ce procédé est appliqué pour traiter les eaux usées qui contiennent des polluants, car il permet la collecte d'ions, de particules ou de colloïdes par des phénomènes chimiques et des phénomènes physiques afin de réduire la demande chimique en oxygène avant le traitement biologique. Il peut également réduire considérablement la coagulation/floculation des matières organiques, générant de grandes quantités de boues en fin de traitement [15].

4.4.2. Méthodes biologiques

Sous l'action d'organismes vivants, la biodégradation a lieu. Cette technologie est stable, économique et très efficace pour le traitement des effluents industriels. Les procédés biologiques diffèrent en fonction de la présence (aérobie) ou de l'absence (anaérobie) de l'oxygène. Le procédé le plus courant utilise les boues activées. Ce procédé est limité par le coût élevé de traitement de boue et son inefficacité vis-à-vis des effluents concentrés ou contenant des substances bio-résistantes [16]

4.4.3. Méthodes chimiques

Le procédé d'oxydation chimique est utilisé pour traiter les eaux usées qui contiennent des polluants insolubles ou toxiques. Cette oxydation chimique utilise des oxydants forts tels que KMnO_4 , l'hypochlorite de sodium (HClO), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), l'ozone (O_3) et le chlore (Cl_2). Ces procédés présentent des inconvénients, notamment que le chlore peut être utilisé comme oxydant chimique pour former des cancérigènes, un coût élevé, une faible minéralisation pour certains du fait d'un faible pouvoir d'oxydation. [17]

4.5. Impacts de la pollution des eaux

Nous pouvons évaluer l'impact des rejets sur notre environnement dans tout ce qui concerne le pH et la consommation d'oxygène dans l'environnement, et nous pouvons également évaluer les effets nécessaires de chaque polluant.

Dans le tableau 2 sont présentées les conséquences de la pollution des eaux.

Tableau 2. Les risques de la pollution de l'eau (VILAGINES, 2003).

Risque pour la santé de l'homme	Maladies hydriques par : contamination bactérienne : salmonelloses, leptospirose. Contamination virale : poliomyelites, hépatite A protozoaires dysenterie amibienne, giardiasis. helminthes : vers parasites intestinaux. Maladies liées à la présence d'élément toxique pour l'homme : Par micropolluants organiques (détergents, pesticides, composés cycliques d'huiles lourds ou goudron). Par substances minérales de types métaux lourds (plomb, mercure et le chrome).
Risque pour les êtres vivants dans le biotope (milieu de rejet)	Maladies par contamination virales et bactériennes. Atteint par effet toxique d'éléments agissant seuls ou en synergie (micropolluants organique, minéraux substances radio-actives).
Risque de dégradation des écosystèmes aquatiques	Ces risques sont liés à la modification de certains paramètres : physique tel températures, turbidités... physique-chimique tels nutriment (azotes et phosphores) facteurs d'eutrophisation.
Risque d'accroissement des difficultés des coûts pour la correction des eaux prélevées.	Ces difficultés peuvent rencontrées pour corriger les eaux lorsque les contraintes économiques ne permettent pas d'instaurer les développements des techniques d'installation, on peut si l'on ne parvient pas à réduire les flux rejetés, retrouver les risques pour la santé de l'homme.

5. La pollution industrielle

5.1. Définition

La pollution industrielle fait partie de la pollution de l'environnement car elle résulte directement de l'industrie, où cette pollution a des effets significatifs sur les performances et les fonctions du système environnemental, les sites industriels et les sols tels que les terres arides industrielles sont des sources de pollution qui se propagent à l'environnement par diffusion négative[18].

5.2. Sources de pollution industrielle

Fumées : Les usines industrielles sont la principale source de pollution, elles émettent des gaz acides à travers des fumées qui menacent la vie des plantes et des organismes vivants, ainsi que du dioxyde de carbone, qui est une substance hautement toxique.

Air : Souvent, les usines sont utilisées lors des opérations de fabrication pour collecter la poussière, ce qui provoque une pollution, de sorte que l'air doit être purifié après son rejet à l'extérieur.

Eau : Les usines qui utilisent de l'eau ont des usines de traitement, le traitement primaire élimine les solides en suspension, puis le traitement secondaire élimine les solides dissous, mais la plupart des eaux usées ne subissent un traitement primaire qu'en raison du coût du traitement secondaire.

Déchets : L'usine doit jouer pleinement son rôle dans le tri et la valorisation des déchets contenant des éléments nocifs pour l'environnement par le biais de sociétés spécialisées[19]

5.3. Les différents types de pollution industrielle

A. La pollution de l'eau et du sol

La cause principale de l'apparition de cette pollution est le rejet dans le sol qui comprend les eaux usées, les déchets radioactifs et les produits pétroliers. Pour pallier cette pollution, il faut utiliser un anti-absorbant, surtout s'il s'agit d'un absorbant chimique ou un groupe de matériaux absorbant les hydrocarbures.

B. La pollution de l'air

Les fumées émises par les usines contiennent des gaz toxiques, le dioxyde de soufre gazeux étant considéré comme l'un des gaz dangereux qui menacent l'environnement en général, il faut essayer de réduire l'impact des gaz en installant des filtres sur les cheminées d'évacuation. [20]

C. La pollution acoustique ou sonore

Ce type de pollution résulte du bruit des machines utilisées dans les usines, car cette pollution nuit à la population autour de la zone où sont implantées les usines, ainsi qu'aux animaux en voie d'extinction. Cette pollution doit être réduite en installant barrières antibruit

5.4. Les effluents industriels

5.4.1. Définition

Les rejets liquides sont produits par les processus d'extraction ou de transformation des matières premières en vue de fabriquer des produits industriels, où la quantité et la qualité de cette eau de processus utilisée et le domaine industriel sont contrôlés. Elles présentent souvent un large spectre de polluants chimiques composés à l'état solide ou dissous de matières organiques et minérales, métaux, hydrocarbures, solvants, polymères, huiles, graisses et sels, à divers niveaux de toxicité (Cantet, 2007) [21].

5.4.2. Origine des effluents

a. Les effluents généraux de fabrication

La plupart des procédés conduisent à des rejets polluants de diverses natures comme les matières organiques et graisses (industriel agro-alimentaire, équarrissage) (Dégrement, 2005).

b. les effluents particuliers

On distingue

- Les rejets toxiques et les rejets concentrés (Dégrement, 1989).
- Les sels métallique (traitement de surface, métallurgie) ;
- Le bain de décapage génère des déchets d'eau gazeuse

c. Les eaux de circuit de refroidissement

Elles peuvent être recyclées, comme les eaux chaudes (issue des circuits de refroidissement des centrales thermiques).

Principaux paramètres physico-chimiques caractérisant les effluents :

La température est un paramètre très important pour les eaux usées industrielles en particulier. L'émission d'une eau propre mais chaude dans un milieu naturel peut créer une pollution (Moletta, 2009) [22].

5.4.3. Paramètres physiques

a. L'odeur

La présence de toute odeur est un signe de pollution ou de présence de matière organique en décomposition .ces substances sont en générale en quantité si minimales qu'elles ne peuvent être mises en évidence par les méthodes d'analyses ordinaires(Rodier et coll., 2005)..

b. Lacouleur

La coloration a un rôle essentiel et important dans la pollution, et elle a plusieurs sources à citer

- Chimique : colorants, phénols et dérivés, pigments chlorophylliens (industrie agroalimentaire)(Gaujous, 1995).
- Naturel : Dans les eaux riches en minéraux, il y a des substances fortement colorées
- Eutrophisation : la pullulation d'algues ou de bactéries colore l'eau en vert ou en rouge

c. Débit

Le débit Est le volume d'eau passant à travers une section d'un cours d'eau pendant une unité de temps. Le débit total est la valeur annuelle moyenne du débit d'un cours d'eau y inclus les crues même exceptionnelles(Ramade,2008). [23]

d. Matière en suspension

Il est considéré comme une particule solide et très fine, comme on peut le voir à l'œil nu, car il n'est ni dissous ni à l'état colloïdal. .Ces matières sont en relation avec la turbidité, leur mesure donne une première indication sur la teneur en matière colloïdale d'origine minérale ou organique(Abdellatif ,2006).

Les concentrations en matières en suspension dans les eaux sont très variables et sont de l'ordre de 100 à 300 mg/l. Les matières en suspension dans les eaux résiduaires constituent un paramètre important, qui marque généralement bien le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel(Gaid, 1984).

5.4.4. Paramètres chimiques:

a. pH

L'eau peut être acide, neutre ou alcaline car son caractère est représenté par son **PH**. .Par ailleurs, il est souvent difficile d'établir de critères précis en ce qui concerne la vie et la reproduction des poissons (Salghi, 2000).

b. Conductivité

La conductivité est la capacité de tous les matériaux à faire passer un courant électrique, car plusieurs facteurs jouent un rôle important dans la recherche de solutions pour conduire l'électricité.

- La mobilité des ions ; la concentration
- La valence des ions ; la température.

Chaque matériau a un certain degré de conductivité.

Pour les solutions aqueuses, le niveau de la force ionique s'étend des très faibles conductivités pour les eaux ultra pures jusqu'aux très fortes conductivités pour des échantillons chimiques concentrés (DALMAS, 2000).

c. Oxygène dissout

L'abondance d'oxygène pour les organismes vivants est absolument essentielle car dans l'eau la solubilité de l'oxygène varie en fonction de la température de l'eau et de la pression atmosphérique. Ainsi, l'eau froide peut contenir une concentration plus élevée d'oxygène dissous que l'eau chaude, tout comme les lacs situés à basse altitude par rapport aux lacs alpins (HADE, 2002).. demande chimique en oxygène (DCO) La demande chimique en oxygène correspond à la quantité d'oxygène consommée chimiquement pour oxyder toutes les substances présentes dans l'eau. La DCO est particulièrement indiquée pour mesurer la pollution d'un effluent industriel (salghi, 2000).

- **Demande biochimique ou biologique en oxygène (DBO)**

Il existe une relation directe entre la quantité de DBO, qui mesure la teneur en substances chimiquement dégradables, où plus la quantité de composés oxydants est élevée, plus la valeur de DBO est élevée.

Il représente la quantité d'oxygène utilisée par les bactéries et organismes vivants pendant une durée estimée à environ 5 jours pour décomposer un échantillon.

La différence entre la DCO et la DBO vient des substances présentes dans l'eau qui ne peuvent pas être décomposées microbiologiquement. (Beliefert et Perraud, 2001).

- **Rapport DCO/DBO comme indice de biodégradabilité [24]**

Le rapport DCO/DBO détermine la possibilité et le rendement de dégradation que l'on peut espérer par un traitement d'oxydation biologique. Si le rapport DCO/DBO est inférieur à 3 on peut dire que l'effluent est facilement biodégradable, un traitement biologique doit être capable d'éliminer l'essentiel de la pollution (Ramade 1998).

5.5. L'impact s de pollution industrielle

La pollution industrielle menace l'atmosphère, le sous-sol et les océans. Les pluies acides se forment lorsque les oxydes de soufre et d'azote se combinent à l'humidité de l'air pour libérer de l'acide sulfurique et de l'acide nitrique, qui sont ensuite transportés loin de leur source avant d'être déposés par la pluie. Les pluies acides qui en résultent menacent les forêts allemandes. La mer Méditerranée montre également l'explosion de l'usine de Chertopce en Ukraine et les fuites de l'usine de Boyal en Inde. Il y a une zone dans le nord de l'Europe qui a été étudiée pour montrer que les pluies acides affectaient les bâtiments, les cultures et les forêts. 1984 que près de la moitié des arbres ont été endommagés à cause de la pluie. L'acidité, l'origine du problème des pluies acides remonte à la révolution industrielle [25].

Chapitre II: Le processus d'oxydation avancé

Introduction

Le processus d'oxydation avancé est une technologie moderne pour un traitement rapide et efficace. Il utilise un milieu radicalaire hautement réactif. Les radicaux hydroxyles sont des oxydants puissants qui peuvent être utilisés pour contrôler la pollution de l'eau.

Le processus d'oxydation avancée vise à minéraliser les polluants totaux en dioxyde de carbone [26]

Le processus d'oxydation avancé présente de nombreux avantages est:

- Simple à réaliser;
- Élimination rapide des polluants;
- Production in-situ des radicaux réactifs;
- Ne produisent pas de déchets secondaires;
- Efficaces pour le traitement des composés récalcitrants, toxiques et non biodégradables[27].

Le processus d'oxydation présente certains inconvénients sont:

- Consommation élevée de réactifs .
- Cela demande beaucoup de concentration[28]

1- Les procédés d'oxydation avancée

1-1-Définition

Le procédé d'oxydation avancée est considéré comme l'un des procédés modernes de traitement de l'eau depuis une vingtaine d'années.

Ce processus produit un oxyde très fort est le radical hydroxyl.

Les radicaux hydroxyles sont non sélectifs et réagissent rapidement avec les composés organiques .

Les POA peuvent être utilisés à différentes fins sont:

- Oxyder les composés minéraux toxiques (oxydation des cyanures dans les effluents de traitements de surface),
- Oxyder les composés toxiques ou inhibiteurs vis-à-vis des micro-organismes avant un traitement biologique,
- Augmenter la biodégradabilité (le rapport DBO₅/DCO) avant un traitement biologique,
- Minéraliser les polluants organiques dans le cas d'effluents de forte teneur en DCO [28] (plusieurs g/L).

1-2- Caractéristiques Le radical hydroxyle OH

Le radical hydroxyle est constitué d'un atome d'oxygène et d'hydrogène qui a un électron non apparié sur l'orbitale la plus externe.

Les radicaux hydroxyle sont produits au point de rupture symétrique d'une liaison covalente, contrairement aux ions. Cette propriété lui confère une grande interaction avec de nombreux composés et bactéries organiques et inorganiques

Le radical hydroxyle est une espèce très réactive caractérisées par une demi-vie de l'ordre de 10^{-9} sec.

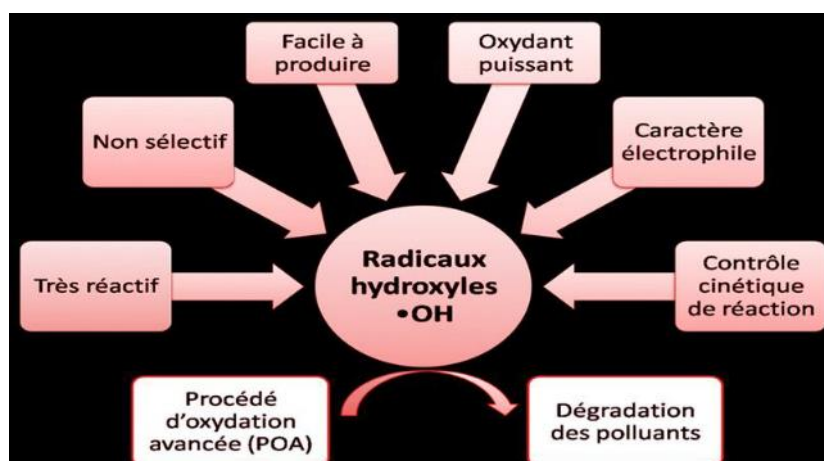


Figure 2: Caractéristiques du radical hydroxyle OH•

1.3 Espèces radicalaires

- Le processus d'oxydation avancé produit des radicaux libres sont $\text{HO}\bullet$, $\text{HO}_2\bullet$ et $\text{O}^{2-}\bullet$.
- Radical hydroxyle est considéré comme plus fort par rapport aux autres radicaux et a un potentiel standard élevé ($E^\circ \text{HO}\bullet/\text{H}_2\text{O} = 2,81 \text{ V/ENH}$) comme en atteste le tableau 3
- Les radicaux superoxydes $\text{O}_2^{\bullet-}$ sont des ions très actifs mais reste toujours moins importants que le premier type ($\text{HO}\bullet$).
- Les radicaux d'hydroperoxyde ($\text{HO}_2\bullet$) ou de $\text{HO}_3\bullet$ proviennent des réactions secondaires de l'association des radicaux hydroxyles avec un atome d'oxygène [28]

Tableau 3. Comparaison des potentiels normaux d'oxydoréduction des principaux oxydants utilisés dans le domaine du traitement des eaux (Doré, 1989).

Couple redox	Réactions	Potentiel, (V/ENH),
Cl_2/Cl^-	$\text{Cl}_2 (g) + 2e \rightarrow 2\text{Cl}^-$	1.36
Br_2/Br^-	$\text{Br}_2 (l) + 2e \rightarrow 2\text{Br}^-$	1.06
I_2/I^-	$\text{I}_2 + 2e \rightarrow 2\text{I}^-$	0.53
$\text{OH}^\circ/\text{H}_2\text{O}$	$\text{OH}^\circ + \text{H}^+ + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	2.81
O_3/O_2	$\text{O}_3 + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	2.07
$\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	1.77
$\text{MnO}_4^-/\text{Mn}^{+2}$	$\text{MnO}_4^- + 8\text{H}^+ + 5e \rightarrow \text{Mn}^{+2} + 4\text{H}_2\text{O}$	1.51
HClO/Cl^-	$\text{HClO} + \text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	1.49
$\text{ClO}_2/\text{ClO}_2^-$	$\text{ClO}_2 + e \rightarrow \text{ClO}_2^-$	0.95
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}/\text{SO}_4^{2-}$	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2e \rightarrow 2\text{SO}_4^{2-}$	2.05

1.4. Réactivité du radical hydroxyle

Les radicaux hydroxyles commencent à attaquer, ce qui conduit à la formation de radicaux organiques $\text{R}\bullet$. Ces radicaux vont ensuite participer à des réactions de propagation pour conduire à la formation d'un certain nombre d'intermédiaires réactionnels avant la minéralisation en CO_2 . Ces radicaux sont de puissants oxydants, leur pouvoir oxydant leur confère la capacité de s'attaquer à tous les substrats organiques et organométalliques.

Ils réagissent sur les composés organiques et minéraux selon trois modes de réaction. (tableau 4):

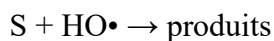
Tableau 4: Mode d'action du radical $\cdot\text{OH}$ sur les composés organiques et minéraux (étapes initiales).

Mode de réaction	Exemple	k (M ⁻¹ s ⁻¹) [17]
Arrachement d'atome d'hydrogène	$\text{RH} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{R}\cdot + \text{H}_2\text{O}$	$10^7\text{-}10^9$
Addition sur liaisons non saturées (éthyléniques et aromatiques)	$\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{C}=\text{C} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{C}-\text{C} \\ \diagup \quad \diagdown \quad \diagup \quad \diagdown \end{array}$ $\text{Fe}^{2+} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^-$ $\text{CO}_3^{2-} + \cdot\text{OH} \rightarrow \text{CO}_3^{\cdot-} + \text{OH}^-$	$10^9\text{-}10^{10}$
Transfert d'électron		$7,5 \cdot 10^9$ $3,9 \cdot 10^8$

1.5. La cinétique de réaction des radicaux $\text{HO}\cdot$

Ces espèces radicalaires sont peu sélectives vis-à-vis de l'oxydation des polluants, comparativement à la réaction d'oxydation de certains oxydants (ex. O_3 et H_2O_2). Ils réagissent sur les composés organiques avec des constantes cinétiques de réaction pouvant atteindre $10^9 \text{ M}^{-1} \text{ sec}^{-1}$ (**KARAM et al., 1991**)

La vitesse de réaction du radical hydroxyle $\text{HO}\cdot$ sur les composés organiques (S) est décrite comme suit :[31]



L'expression cinétique s'écrit:

$$v = -\frac{d[\text{S}]}{dt} = -\frac{d[\text{HO}\cdot]}{dt} = k[\text{S}][\text{HO}\cdot]$$

Avec [S]: concentration en composé organique.

Le tableau 5 compare les constantes cinétiques de l'ozone et des radicaux hydroxyles lors de l'oxydation de quelques molécules organiques

**Tableau 5: Comparaison des constantes de vitesse cinétique pour la production
Comparaison des constantes de vitesse cinétique pour la production d'ozone et de
radicaux hydroxyles enregistrés lors de l'oxydation de certains composés organiques
moléculaires (PARSONS, 2004).**

Composés organiques	Constantes cinétiques ($M^1 \text{ sec}^1$)	
	O ₂	OH°
Benzene	2,0	$7,8 \times 10^9$
Toluène	14	$7,8 \times 10^9$
Chlorobenzene	0,75	$4,0 \times 10^9$
Trichloroéthylène	17	$4,0 \times 10^9$
Tetrachloroéthylène	0,10>	$1,7 \times 10^9$
n-Butanol	0,60	$4,6 \times 10^9$
t-Butanol	0,03	$0,4 \times 10^9$

Les radicaux hydroxyles oxydent les molécules comme le benzène, le toluène, le chlorobenzène, le trichloréthylène et le butanol avec une vitesse de dégradation largement supérieure à celle de l'ozone (109 fois plus élevée par rapport à l'ozone). BUXTON et al. (1988) ont largement étudié la cinétique de réaction de O₂ sur les composés organiques aliphatiques et aromatiques (Tableaux 5 et 6). D'après les valeurs répertoriées, on peut en déduire que les radicaux hydroxyles réagissent plus vite avec les composés monosubstitués qu'avec les composés polysubstitués. En outre, les radicaux hydroxyles réagissent plus rapidement sur les aromatiques porteuses de groupements activants que ceux présentant des groupements désactivants. [29]

Le temps de demi-vie des radicaux HO• est estimé inférieur à 70 ns dans l'eau.

Tableau 6. Constantes cinétiques de réaction des radicaux hydroxyles en milieu aqueux sur les composés aliphatiques.

Composés aliphatiques	Substituants	K_{HO} ($\times 10^{-7} \text{ M}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)	Références
Méthane	$-H$	11	BUXTON et al(1988)
Méthanol	$-OH$	97	BUXTON et al(1988)
Méthylamine	$-NH_2$	420	BUXTON et al(1988)
Ion méthyl ammonium	$-NH_3^+$	3,5	BUXTON et al(1988)
Diméthyl ether	$-OCH_3$	100	BUXTON et al(1988)
Acétone	$-COCH_3$	11	BUXTON et al(1988)
Acétonitrile	$-CN$	2,2	BUXTON et al(1988)
Acétamide	$-CONH_2$	19	BUXTON et al(1988)
Acide acétique	$-COOH$	1,6	BUXTON et al(1988)
Acétaldehyde	$-COH$	73	BUXTON et al(1988)
Dibromométhane	$-Br_2$	9,0	HAAG et YAO(1992)
Trichlorométhane	$-Cl_3$	5,4	HAAG et YAO(1992)

Tableau 7. Composés aromatiques monosubstitués (BUXTON et al., 1988) et polysubstitués (HAAG et YAO, 1992).

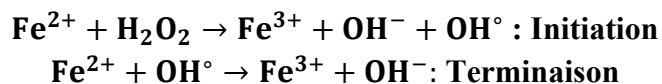
Composés aromatiques monosubstitués	Substituants	K_{HO} ($\times 10^{-9} \text{ M}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)	Composés aromatiques polysubstitués	K_{HO} ($\times 10^{-10} \text{ M}^{-1} \text{ sec}^{-1}$)
Benzène	$-H$	7,8	Phtalates	4,0
Phénol	$-OH$	14	Trichlorobenzene	4,0
Aniline	$-NH_2$	15	Dichlorobenzène	5,0
Anisole	$-OCH_3$	5,4	BPCs	6,0
Toluène	$-CH_3$	3,0	HAPS	1,0
Éthylbenzene	$-CH_2CH_3$	7,5	Lindane	5,2
Acide benzoïque	$-COOH$	4,3	Atrazine	2,6
Ion benzoate	$-COO^-$	5,9	Simazine	2,8
Benzaldehyde	$-CHO$	4,4	Alschor	4,0
Acétophenone	$-C(O)CH_3$	5,9	Carbofurane	7,0
Nitrobenzène	$-NO_2$	3,9	Pentachlorophénol	4,0
Benzamide	$-CONH_2$	3,4	Dinoseb	4,0
Chlorobenzene	$-Cl$	5,5		
Fluorobenzene	$-F$	10		

2. Les types des procédés d'oxydation avancés

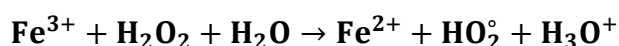
2.1. Procédés d'oxydation chimique en phase homogène

2.1.1. Procédé Fenton, (H_2O_2/Fe^{+2})

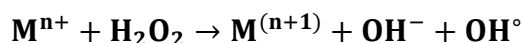
Le réactif de Fenton est le meilleur système d'oxydation radicalaire. A la fin du 19^e siècle à Cambridge, H. Fenton, observa pour la première fois qu'en ajoutant une petite quantité de H_2O_2 à une solution de contenant le H_2O_2 , le mélange résultant, principalement les radicaux $HO^\bullet$ produits (Fenton, 1894 ; Fenton and Jones, 1900), pourrait oxyder en milieu acide un nombre considérable de composés organiques en peu de temps (Haber and Weiss, 1934) Pour de faibles rapports (H_2O_2/Fe^{+2}) et en milieu suffisamment acide ($0 < pH < 3$), les réactions d'initiation () et de terminaison sont prédominantes. Néanmoins, il est reconnu que l'excès de H_2O_2 ou Fe^{II} est préjudiciable, car ces espèces peuvent réagir avec des intermédiaires tels que les radicaux $HO^\bullet$ responsable de l'oxydation directe du composé cible (Pérez et al., 2002). L'augmentation du rapport (H_2O_2/Fe^{+2}).favorise, par contre, la réaction de propagation (8) et la formation de radical hydroperoxyde $HO_2^\bullet$ capable de réduire ensuite le Fe^{+3} en Fe^{+2} et de propager le cycle de décomposition[29] (DENG et ENGLEHARDT, 2006).



La décomposition du peroxyde d'hydrogène peut être également réalisée par les ions ferriques suivant la réaction:



Deux voies de mécanismes ont été avancées : une voie radicalaire qui considère la production des radicaux $HO^\bullet$ et une voie non radicalaire impliquant la production des ions ferryls FeO^{2+} (Barbusinski, 2009). La décomposition de H_2O_2 par les ions ferreux a été initialement proposée par HABER et WEISS (1934). Plusieurs métaux sont susceptibles d'initier des réactions de décomposition du peroxyde d'hydrogène (COLOBERT et al., 1962; MAESTRE, 1991).



Dans cette équation, (n) représente le degré d'oxydation du métal (M). Les métaux susceptibles de favoriser la décomposition radicalaire du peroxyde d'hydrogène sont Fe, Cr (VI), Ti, Cu, Mn, Co(I), Al, etc. Les catalyseurs les plus utilisés restent le cuivre et l'aluminium (BARB et al., 1951). [30]

2.1.2. Facteurs influençant l'efficacité du procédé Fenton

Trois paramètres influencent principalement la réaction de Fenton: le pH, la température, les concentrations de Fe^{2+} et de H_2O_2 et la concentration initiale des polluants (Martinez et al., 2003 ; Bautista et al., 2007).

Le pH : Le procédé Fenton est un procédé qui fonctionne à une valeur de pH de 3. Cette valeur est idéale pour la réaction de Fenton, elle doit donc être contrôlée lors de l'application du procédé car elle affecte la formation de fer. [31].

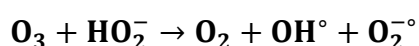
Le rapport $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$: La concentration du réactif joue un rôle important car elle détermine l'efficacité du processus de minéralisation des composés organiques dans la réaction de Fenton. De fortes doses de réactifs agissent comme un facteur limitant car Fe^{2+} et H_2O_2 peuvent devenir des pièges pour les radicaux hydroxyles et ainsi provoquer une diminution de la dégradation de la matière organique par inhibition de la réaction de Fenton.

2.2. La présence de consommateurs des radicaux hydroxyles :

Consommation d'agents oxydants, empêchant ainsi la dissolution de la matière à décomposer.

2.2.1. Procédé de peroxonation $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$

Les radicaux hydroxyle sont produits lorsque l'ozone et le peroxyde d'hydrogène sont combinés. Le peroxyde d'hydrogène réagit très rapidement sous sa forme ionisée (HO^{2-} ; $\text{pK}_a = 11,6$) sur l'ozone pour former des radicaux libres ($\text{OH}^\bullet$, $\text{HO}_2^\bullet$) selon la réaction suivante (PAILLARD et al., 1988) : [31].



Ce processus est limité par la vitesse de réaction lente et la faible solubilité d' O_3 et - Forte consommation d'énergie. Ce système est affecté par les mêmes contraintes que l'ozonation à savoir la faible solubilité de O_3 , la forte consommation énergétique et dépend de nombreux paramètres tels que le pH, la température, les réactions parasites consommant les $\text{HO}^\bullet$ et le type de polluant (Hernandez et al., 2002).

Lors de l'interaction de HO^{2-} avec l'ozone, une fois que les radicaux carboxyle sont libérés, ces radicaux déclenchent d'autres mécanismes radicalaires pour décomposer le peroxyde d'hydrogène (Figure. Ces réactions ont été mises en œuvre de manière optimale par PAILLARD et al. (1988).

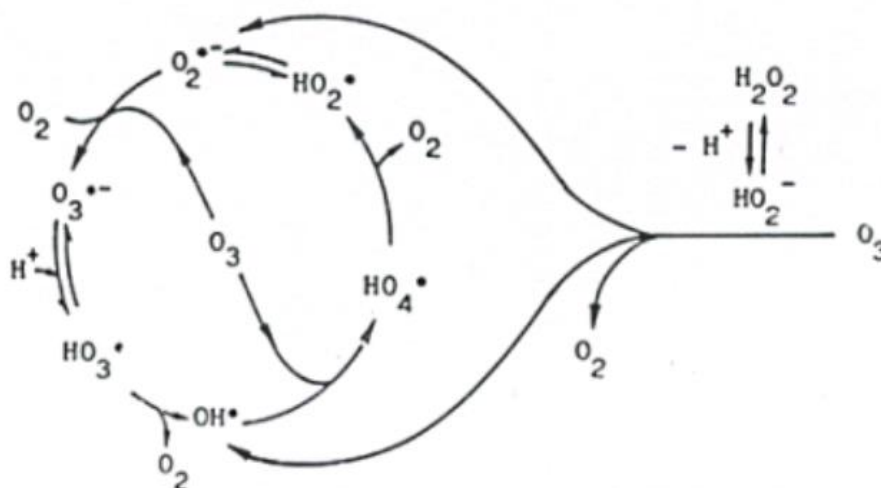


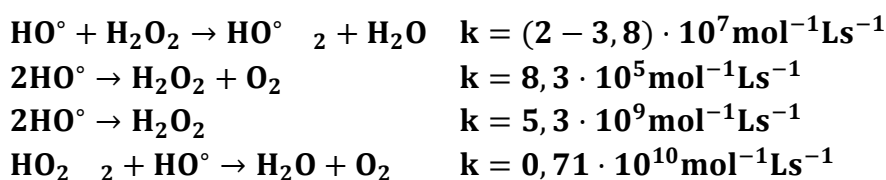
Figure 3: Mécanisme d'activation du peroxyde d'hydrogène par l'ozone (DORÉ, 1989).

2.2.2. Photolyse de H_2O_2 (UV/ H_2O_2):

La photo décomposition du peroxyde d'hydrogène génère des radicaux hydroxyles par simple irradiation $\text{UV} \leq 300 \text{ nm}$ (Eq[32]. Dégradation d'un polluant organique par des procédés d'oxydation avancée



La photolyse de H_2O_2 est plus avantageuse que l'ozonation et son application moins complexe, mais son efficacité est moindre due au faible coefficient d'extinction UV de H_2O_2 . Dans un système à réacteur fermé, le gain en efficacité pour des eaux de forte absorption UV, sera limité malgré une hausse de la concentration en peroxyde. De plus, ce réactif est extrêmement instable lorsqu'il est concentré et sa décomposition en eau et en oxygène est fortement exothermique (98,6 kJ/mol). Cette production efficace et rapide de radicaux OH° permet d'initier des mécanismes radicalaires. Les principales réactions qui s'ensuivent sont les suivantes[35]:



2.3. Procédés d'oxydation sonochimique

Une grande étude a été faite sur la réaction d'hydrolyse de l'eau, où les ultrasons sont de plus en plus utilisés en énergie pour accélérer ou activer le mécanisme de réaction. Le principal avantage de ces ondes réside dans leur aspect non contaminé et leur facilité d'automatisation en milieu aqueux. Il existe deux modes de fonctionnement des ondes sonores Soit par action chimique (indirecte), soit par action physique (directe) [32].

L'action indirecte, souvent obtenue à haute fréquence, conduit à la génération de radicaux libres ($\text{HO}\cdot$, $\text{HO}_2\cdot$ et $\text{O}\cdot$) induite par rupture homolytique de la molécule d'eau ou d'oxygène (LORIMER et MASON 1987; RIEZ et al., 1985; TRABELSI et al., 1996).

La procédure directe induite par ultrasons présente également un intérêt pour le traitement des effluents industriels. Aussi, à haute fréquence, les ultrasons peuvent provoquer la formation de peroxydes dans l'eau. Ainsi, les ultrasons peuvent s'appliquer à l'éradication des pathogènes et à l'élimination des composés responsables des odeurs malodorantes présents dans les boues d'épuration (NAFFRECHOUX et al., 2003) .

Les ondes ultrasonores génèrent des bulles de cavitation, et la formation et l'évolution de ces bulles est un événement essentiel pour l'action des ultrasons sur l'environnement. Quand la vapeur d'eau, les gaz dissous et les substances organiques sont exposés aux conditions extrêmes de la bulle de cavitation, la rupture de liaisons a lieu instantanément (Adewuyi, 2001) [33].

Aussi, les ultrasons peuvent avoir dans l'eau des effets biocides induits par ces phénomènes de cavitation qui brisent les cellules bactériennes (HUA et HOFFMANN, 1997). Lorsqu'une bulle de cavitation s'effondre (implosion), cela entraîne une élévation locale de température de plusieurs milliers de degrés (2 000 à 5 000 °C) et une pression de plusieurs centaines d'atmosphère (500 atm). Dans ces conditions extrêmes, des radicaux issus de la sonolyse de l'eau sont alors éjectés dans le milieu où ils vont réagir avec les composés en solution. Les bulles de cavitation agissent alors comme des microréacteurs.

L'oxydation des polluants au niveau de la cavité est détruite de deux manières, par attaque par les radicaux libres ou par pyrolyse. Le processus de cavitation utilisé en traitement des eaux est réalisé en utilisant des ondes sonores de fréquences variantes entre 16 kHz et 3 MHz.

Conclusion

Certains produits organiques aux propriétés rebelles et toxiques ne peuvent être traités par les procédés conventionnels. Le processus d'oxydation avancée répond à ces critères grâce à l'utilisation de radicaux hydroxyles de manière différente qui agissent comme des oxydants puissants sur la décomposition des matières organiques, car ces radicaux sont produits par des processus capables de décomposer la quasi-totalité des polluants organiques persistants. Il est principalement produit par le réactif de Fenton, qui est un mélange de peroxyde d'hydrogène et de fer ferrique. Ils agissent sur les composés organiques par rupture d'un atome d'hydrogène (déshydrogénation), ajout d'une liaison éthylène ou conversion d'électrons (oxydation).

Ces radicaux interagissent également avec les minéraux organiques et certains composés métalliques.

Cependant, malgré sa forte réactivité sur la matière organique en solution, la dégradation des composés organiques est fortement influencée par les paramètres comme le pH du milieu, la température, la concentration du catalyseur, la nature du milieu réactionnel, l'intensité du courant appliqué, le rapport $[H_2O_2]/[Fe^{3+}]$ mais aussi par les réactions parasites qui peuvent participer à la consommation de ces radicaux.

***Chapitre III: Élimination des
polluants par les procédés
d'oxydation avancée***

Introduction

Parmi les techniques de dépollution, on dénote les procédés d'oxydation avancée (POA). Ces technologies ont déjà montré leur potentiel dans le traitement de polluants organiques toxiques. Ces procédés reposent sur la formation in situ des radicaux hydroxyles OH° qui possèdent un pouvoir oxydant supérieur à celui des oxydants traditionnels tel que H_2O_2 , Cl_2 , ClO_2 . Nous proposons trois exemples qui abordent la possibilité d'éliminer les polluants par oxydation avancée :

- Etude de la production de l'énergie à partir de la dégradation du bleu de méthylène
- La décoloration de Violet de gentiane par le Procédé de Fenton et photo fenton
- Traitement d'une eau usée par Le processus d'oxydation avancé

1- Etude de la production de l'énergie à partir de la dégradation du bleu de méthylène

La possibilité de sortir de l'énergie à partir de ce procédé de dépollution a été étudiée, les paramètres opératoires sont à optimiser afin de pouvoir tirer des conclusions.

Le procédé Fenton est procédé efficace pour le traitement des colorants synthétiques. Les radicaux hydroxyles réagissent très rapidement sur les composés organiques pour conduire à la minéralisation de la matière organique. [34]

Les radicaux hydroxyles pouvaient être efficacement employés en milieu aqueux pour le traitement des composés organiques. Ces radicaux constituent des oxydants puissants et très réactifs pour la plupart des espèces chimiques. On peut les générer par plusieurs procédés, le plus simple et le plus efficace est celui connu sous le nom de procédé Fenton [35].

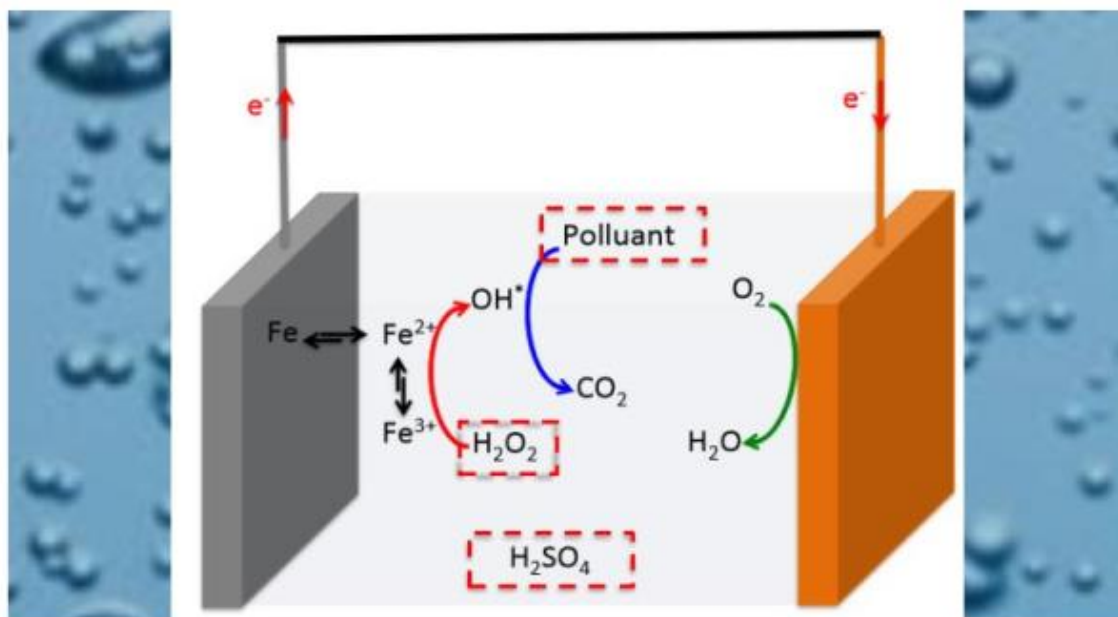


Figure 4: schéma bilan du procédé GF

2-1-Fonctionnement d'une pile :

Une pile est le siège d'une réaction électrochimique entre deux substances dont l'une peut céder facilement des électrons (matériau réducteur), et l'autre qui les accepte (matériau oxydant). Chacune de ces réactions électrochimiques est dite « demiréaction électrochimique ». Lorsqu'elles sont proprement combinées, elles forment une réaction d'oxydoréduction. Chaque demi-réaction survient dans une solution où se produit un échange d'électrons.

Ce sont ces électrons qui sont échangés entre les deux substances.

Chaque élément du couple oxydant/réducteur est relié à une électrode.

Ces électrodes, lorsqu'elles sont reliées à un consommateur électrique, provoquent la circulation d'un courant électrique ; la réaction chimique provoque une circulation de charges (électrons, ions). Une pile fournit donc un courant continu. La borne (-) d'une pile correspond à l'anode où se produit la réaction d'oxydation qui va fournir les électrons.

La borne (+) d'une pile correspond à la cathode où se produit la réaction de réduction c'est-à-dire la consommation des électrons[36]

Le travail de **CHOUIKRET Lamis** et **LAIFA Hazar** (2020) avait pour objectif, l'étude de l'élimination du bleu de méthylène (MB), qui est un colorant synthétique présent dans les effluents d'industrie du textile par l'un des procédés d'oxydation avancée (POA) connu sous le nom de Galvano- Fenton. La dégradation des colorants est effectuée par l'action oxydante des radicaux hydroxyles produits dans le milieu à traiter. Ces radicaux sont capables

de dégrader la quasi-totalité des polluants organiques persistants à cause de leur pouvoir oxydant très élevé et de leur réactivité. Ils sont générés dans le milieu réactionnel par l'action conjuguée de peroxyde d'hydrogène et du fer ferreux (réactif Fenton).

Les résultats obtenus par **CHOUIKRET Lamis** et **LAIFA Hazar** (2020) révèlent la faisabilité d'élimination du bleu de méthylène et de la récupération de l'énergie par procédé Galvano- Fenton

- L'étude de l'influence de la concentration du peroxyde d'hydrogène et du BM révèle que le procédé étudié est largement influencé par ces paramètres opératoires.

- Cette étude mérite d'être poursuivie pour pouvoir tirer des conclusions conte à la dépollution du BM et tant à la génération du courant . Comme explication supplémentaire de ces résultats, nous avons mis les exemples suivants:

1-Etude de l'influence de la concentration de peroxyde d'hydrogène

L'influence de la concentration de peroxyde d'hydrogène a été étudiée en variant ce paramètre de $8,53.10^{-4}$ mol/L à $3,41.10^{-3}$ mol/L dans un volume réactionnel de 500 mL, sous les conditions opératoires suivantes :

[BM] = $1,337.10^{-4}$ mol/L, - La masse du FeSO_4 ajouté au mélange réactionnel est $m_{\text{FeSO}_4} = 0,01\text{g}$; - Vitesse d'agitation : 60 tr/min. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 5 et 6

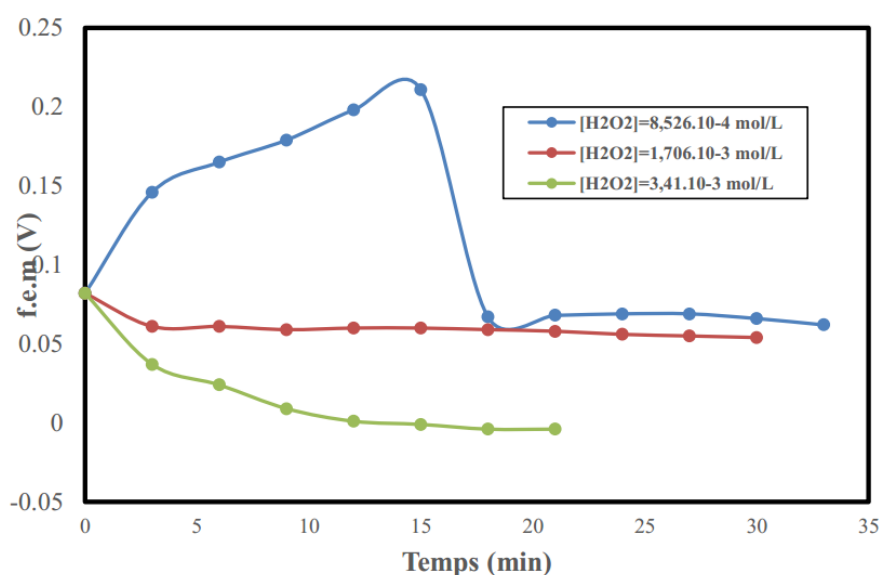


Figure 5: Evolution de la force électromotrice en fonction du temps

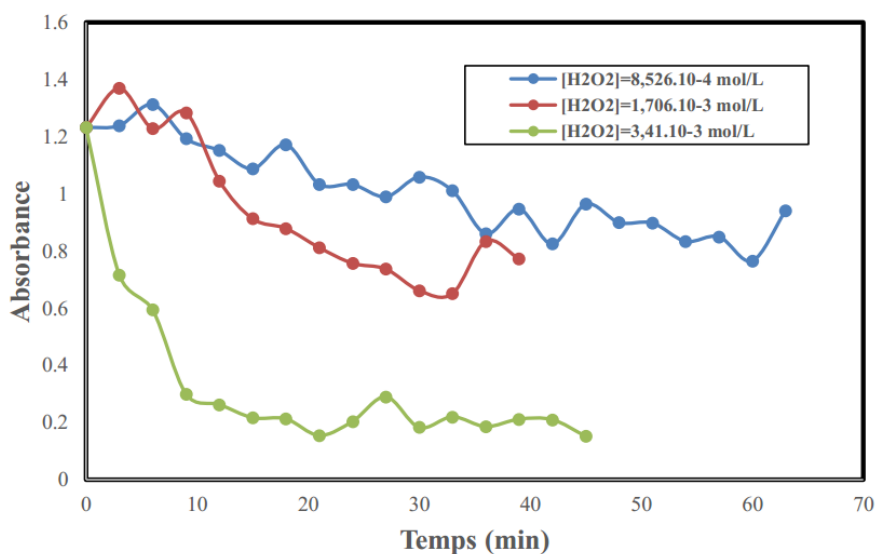


Figure 6: Evolution de l'absorbance du BM en fonction du temps à $\lambda_{\text{max}} = 650 \text{ nm}$

La figure 5 représente l'évolution de la force électromotrice de la pile en fonction du temps. A partir de cette figure on remarque que :

- Pour $[\text{H}_2\text{O}_2] = 8.53 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L}$, on observe une augmentation de la force électromotrice jusqu'à une valeur de f.e.m égale à 0,211 V. Cette augmentation traduit le passage du courant entre la cathode (électrode de cuivre) et l'anode (électrode de fer). Ce courant est généré à partir de l'échange d'électrons dû à l'oxydation du colorant et la réduction de H_2O_2 . Ensuite il se produit une chute de potentiel attribué à la consommation des électrons libéré et ceci traduit la dégradation du colorant cible.
- Lorsque la concentration de H_2O_2 augmente, la cinétique réactionnelle est rapide et la courbe croissante n'apparaisse pas dans ce cas, on remarque une diminution du potentiel en fonction du temps qui reflète la diminution de la concentration du bleu de méthylène en solution.

La figure 6 représente l'évolution de l'absorbance de BM en fonction du temps, on remarque que :

- L'absorbance diminue au cours du temps, ceci traduit la diminution de la concentration du MB, car cette dernière est proportionnelle à l'absorbance (loi de Beer Lambert).
- Plus la concentration de peroxyde d'hydrogène est élevée, plus la cinétique réactionnelle est rapide. Ceci est illustré dans le tableau 8, qui représente la l'évolution du rendement de la dégradation de MB en la concentration de H_2O_2

Tableau 8: Evolution du rendement de la dégradation de MB en la concentration de H_2O_2

Rdt	28,25 %	46,19 %	81,79 %
$[H_2O_2] 10^3$	0,853	1,71	3,41

2-Etude de l'influence de la concentration du bleu de méthylène

L'influence de la concentration du bleu de méthylène a été étudiée en variant ce paramètre de $1.34 \cdot 10^{-4}$ à $6.69 \cdot 10^{-4}$ mol/L dans un volume réactionnel de 500 mL, sous les conditions opératoires suivantes :

- La concentration du H_2O_2 dans le mélange réactionnel est de $3.41 \cdot 10^{-3}$ mol/L,
- La masse de $FeSO_4$ ajoutée est de 0,01 g,
- La vitesse d'agitation est de 60 tr/min. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 7 et 8.

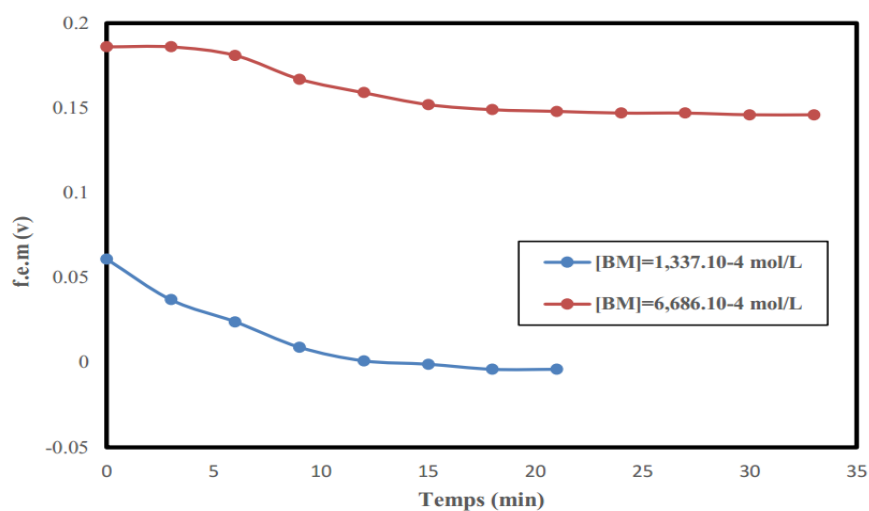


Figure 7: Evolution de la force électromotrice en fonction du temps

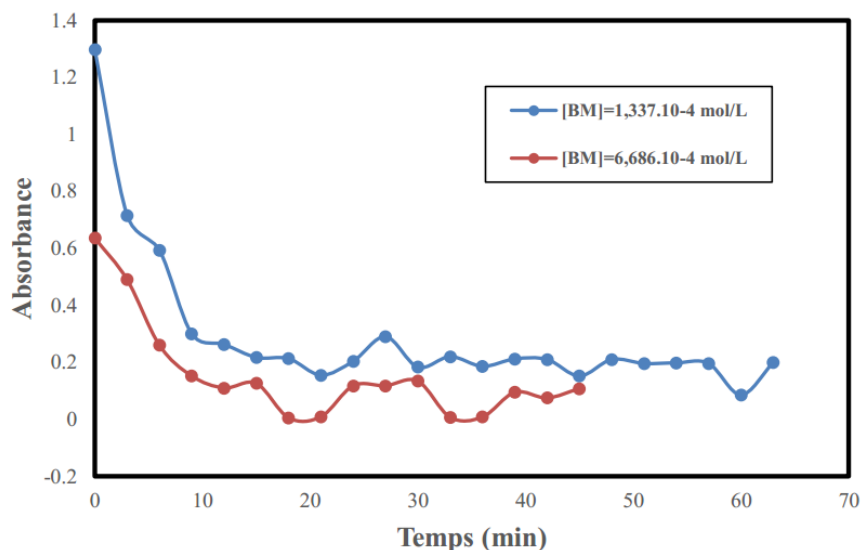


Figure 8: Evolution de l'absorbance du BM en fonction du temps à $\lambda_{\text{max}} = 650 \text{ nm}$

La figure 7 représente l'évolution de la f.e.m en fonction du temps, on remarque que la f.e.m diminue en fonction du temps c'est-à-dire avec la diminution de la concentration du colorant (voir figure 7). **CHOUIKRET Lamis** et **LAIFA Hazar** (2020) remarque également que l'énergie obtenue est proportionnelle à la concentration initiale du colorant. Ceci est expliqué par la disponibilité de la matière organique dans le milieu réactionnel qui joue le rôle de réducteur

La figure 8 représente l'évolution de l'absorbance de BM en fonction du temps, on remarque que l'absorbance diminue au cours du temps, traduisant la dégradation de la matière organique présente dans le milieu réactionnel. Les rendements des réactions sont de l'ordre de 98,84 et 77,49 % pour les concentrations initiales respectives en MB égales à $1,74 \cdot 10^{-4}$ et $6,69 \cdot 10^{-4} \text{ mol/L}$.

CHOUIKRET Lamis et **LAIFA Hazar** (2020) enregistre également que la valeur d'absorbance se stabilise à partir d'un certains temps, ce temps est appelé temps d'équilibre et la concentration correspondant à ce temps s'appelle concentration d'équilibre.

Le temps d'équilibres pour les concentrations étudiées est estimé à 15 min, ceci traduit une cinétique rapide d'élimination de BM par le procédé Galvano-Fenton.

02- La décoloration de Violet de gentiane par le Procédé de Fenton et photo fenton

SELLAMI ESSAIAH Amelle et RENAK Wassilia 2018 On a fait l'étude des effets de certains paramètres sur l'efficacité de ces deux procédés, les résultats obtenus montrent que :
Dégradation du Triphénylméthane par les

- La dégradation du Violet de gentiane par ces procédés augmente avec l'augmentation de la concentration de H_2O_2 jusqu'à l'obtention de la valeur optimale,
- Les meilleures dégradations ont été réalisées à $pH = 3$.
- La dégradation de colorant et leur cinétique est très rapide selon un temps très court, lorsque le pH de la solution augmente une grande partie du fer précipite sous forme d'hydroxydes ferriques,
- Le procédé photo-Fenton se révèle très efficace pour la dégradation de la matière organique comme les colorants en solution aqueuse,
- La photo fenton est préférée parmi les POA, parce que au bout de quelques seconds la décoloration a été faite à cause de la présence de la lumière qui joue le rôle de catalyseur,

Les résultats montrent la possibilité d'éliminer les polluants difficiles à détruire par les procédés classiques, En vue de favoriser le développement à grande échelle des POA, cette synthèse sur les applications des POA suggère les solutions suivantes :

- Les radicaux peuvent être générés par le biais de l'ozonation, photochimie, par ultrasons, mais c'est par la réaction de Fenton entre le peroxyde d'hydrogène et le fer ferreux que leur formation est la plus simple et la plus efficace, adapter davantage les POA aux usines existantes de traitement des eaux afin d'accroître leur efficacité épuratoire sans procéder nécessairement à la construction majeure de nouvelles infrastructures;
- Développer des stratégies d'opération afin de réduire autant que possible les quantités de réactifs tout en assurant une efficacité épuratoire permettant d'atteindre les normes de rejet ou de potabilisation qui évoluent vers une sévérité croissante;

Les POA peuvent avantageusement être couplés à des procédés biologiques lors du traitement des effluents contenant des composés organiques réfractaires. Comme explication supplémentaire de ces résultats, nous avons mis les exemples suivants

▪

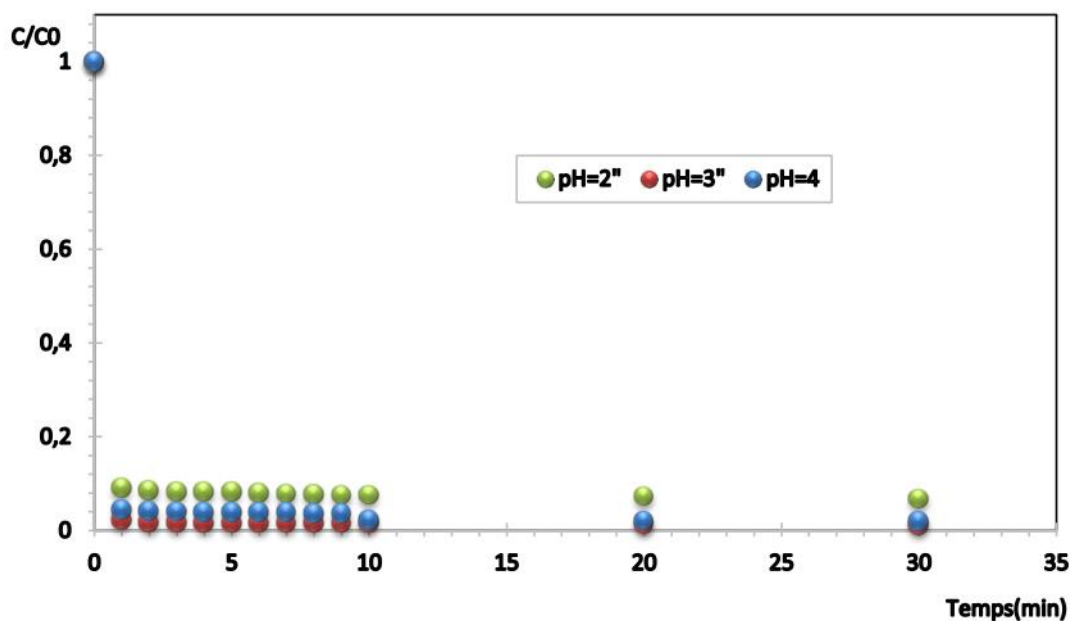


Figure (IV.16) : Evolution temporelle de la teneur résiduelle en colorant Violet de gentiane à des différentes valeurs de pH appliqué lors de traitement par procédé Photo-Fenton

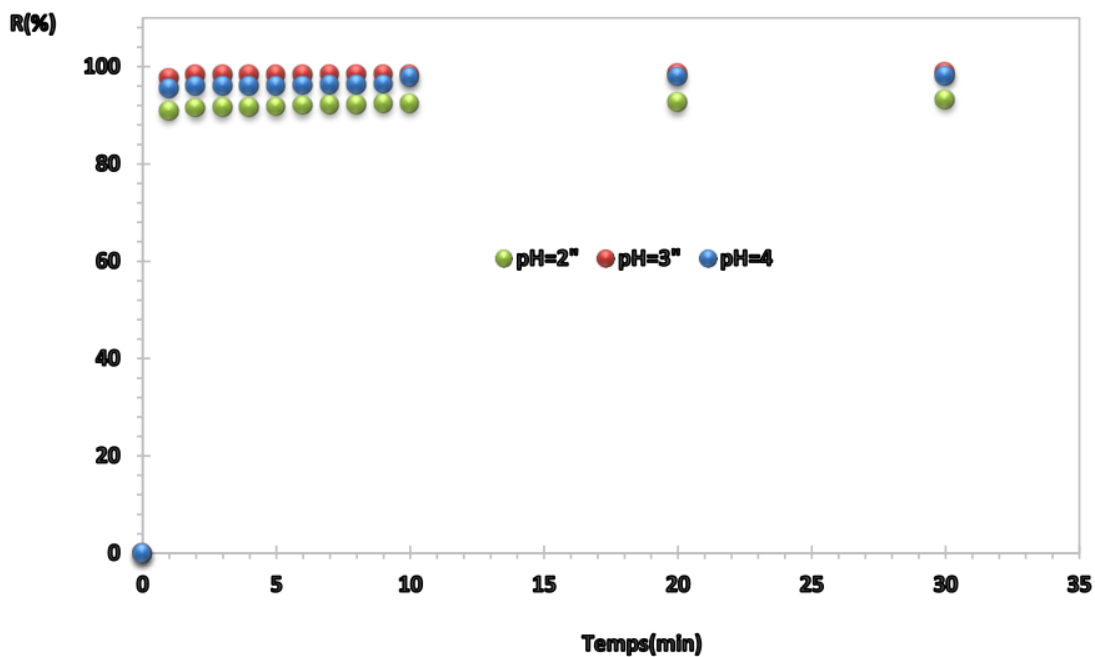


Figure (IV. 17) : Evolution temporelle des rendements de dégradation du Violet de gentiane à différentes valeurs de pH appliqué par le procédé de Photo- Fenton

pH	Rendement(%)
2	93,88
3	99,34
4	98,88

Tableau (IV. 7) : les rendements de dégradation du Violet de gentiane par le procédé de photo-Fenton en fonction de pH

- le rendement de dégradation de Violet de gentiane est eleveé pour un pH=3 parceque au bout de quelques minute la decoloration a eté faite de 99, 34 % et de 99,88 % à pH=4 donc la présence de la lumiere UV stimule la formation des radicaux hydroxyle et accélér la réaction de décolorétion

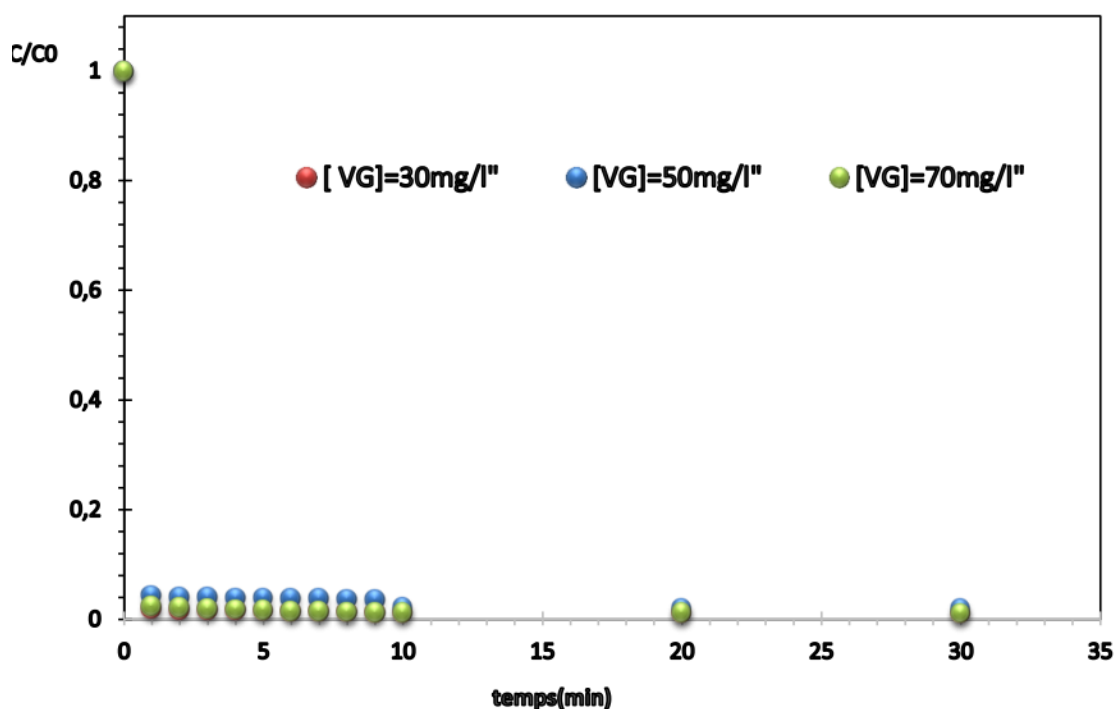


Figure (IV.18) : Evolution temporelle de la dégradation du Violet de gentiane pour de différentes concentrations en fonction de temps lors traitement par procédé Photo- Fenton

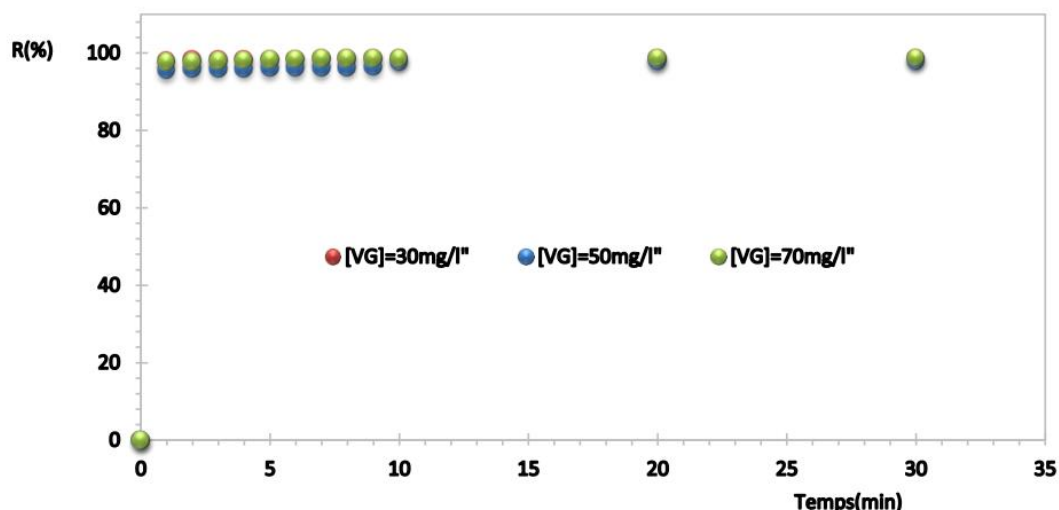


Figure (IV.19) : Evolution temporelle du rendement de la dégradation de Violet de gentiane à différentes concentrations lors traitement par procédé Photo-Fenton

[VG] en (mg/l)	Rendement(%)
30	99,34
50	99,19
70	99,03

Tableau (IV.8) : Rendement de dégradation du Violet de gentiane par procédé Photo-Fenton à différentes concentrations

- le rendement de dégradation de Violet de gentiane diminue lorsque sa concentration augmente dans la solution, qui implique pour une augmentation du nombre de molécules de matière organiques comparativement aux des radicaux hydroxyles

3- Traitement d'une eau usée par Le processus d'oxydation avancé:

La caractérisation des eaux usées brutes a révélé que ce rejet liquide est chargé en matière organique en terme moyenne de DCO (600 mg/l), en DBO₅ (300 mg/l), en conductivité ionique (2240 μ S/cm) et avec un pH assez alcalin de 7,63. Le rapport DCO/DBO₅ (2) montre que ces eaux usées sont de type industrielles, elles présentent une charge organique élevée et non biodégradable.

Le travail de **HAMMOUCHE Charaf eddine** et , **KETFI Mohammed Redha** .Dans la photocatalyse nous avons utilisé le Ag²MnO₂ comme matériau photocatayseur, ce produit a

été synthétisé au niveau de notre laboratoire, les résultats obtenus sont très encourageants puisque :

- La teneur en DCO a été diminuée de 600 mg/l jusqu'à 60 mg/l, ce qui représente un rendement d'abattement de DCO de 90 %. La DBO₅ a diminué de 300 mg/l jusqu' à 26 mg/l ce qui représente un rendement de dépollution de 91%.
- le Ag²MnO₂ est un très bon matériau photocatalyseur et qui possède des propriétés très importantes puisqu'il est photoactif dans le visible, biologiquement et chimiquement inerte, il est photostable et non toxique.

-pour une caractérisation complète des eaux de la STEP d'Ain Taghrout

(Azote total, nitrate, nitrite, phosphore total,), et faire des études complémentaires, portant sur certains paramètres de pollution chimique comme les métaux lourds et hygiéniques tel que les parasites et les virus. Comme explication supplémentaire des résultats susmentionnés, nous proposons les exemples suivants:

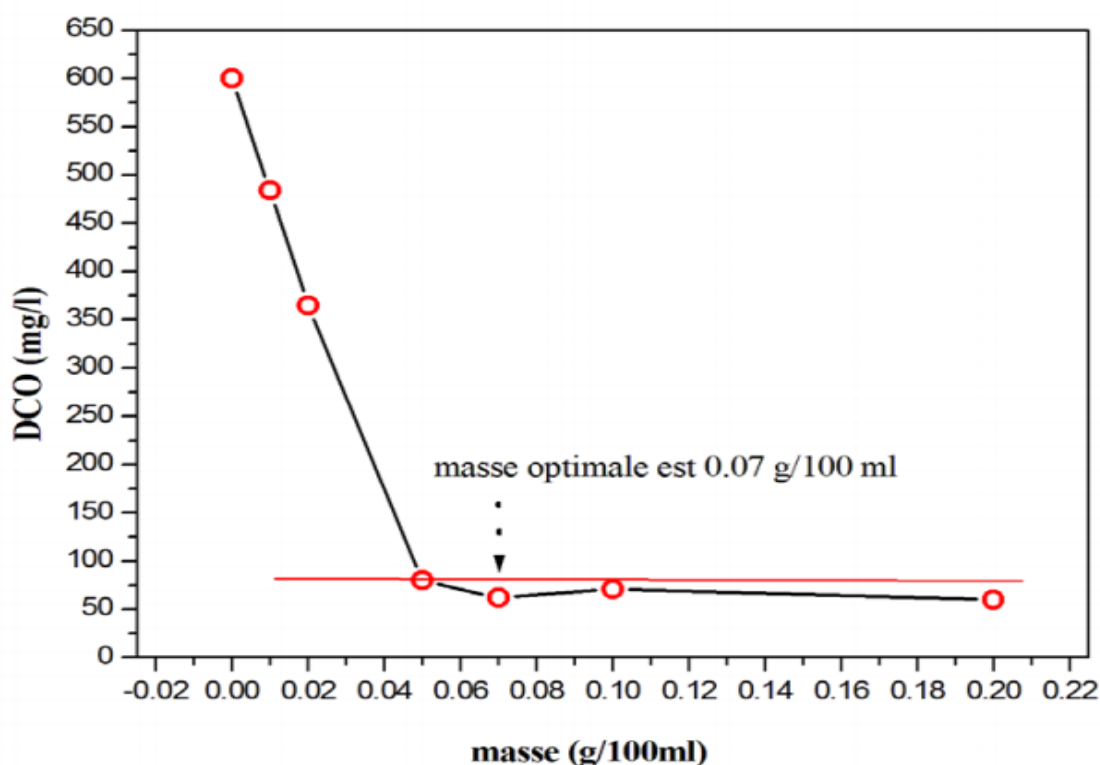


Figure 21: Courbe d'évolution de la DCO en fonction de la masse de Ag₂MnO₂.

La figure 21 montre l'évolution de la DCO en présence de différentes masses de Ag^2MnO_2 (0 - 0,01 - 0,02 - 0,05 - 0,07 - 0,1 et 0,2 g) pour 1 litre d'une eau usée traitée. Nous remarquons clairement que la DCO est diminuée significativement en fonction de la masse du matériau photocatalyseur ajoutée, de 600 mg/l jusqu'à 62 mg/l, pour une masse optimale elle est déterminée en extrapolant la courbe dans l'axe des masses, nous avons obtenu une masse de 0,07 g de Ag^2MnO_2 pour 100 ml de cette eau usée, ce qui donne une masse 700 g du matériau pour 1000 Litres. La diminution de la DCO est expliquée par la dégradation des polluants organiques contenus dans l'échantillon initial, ce qui confirme la bonne activité photocatalytique du matériau synthétisé.

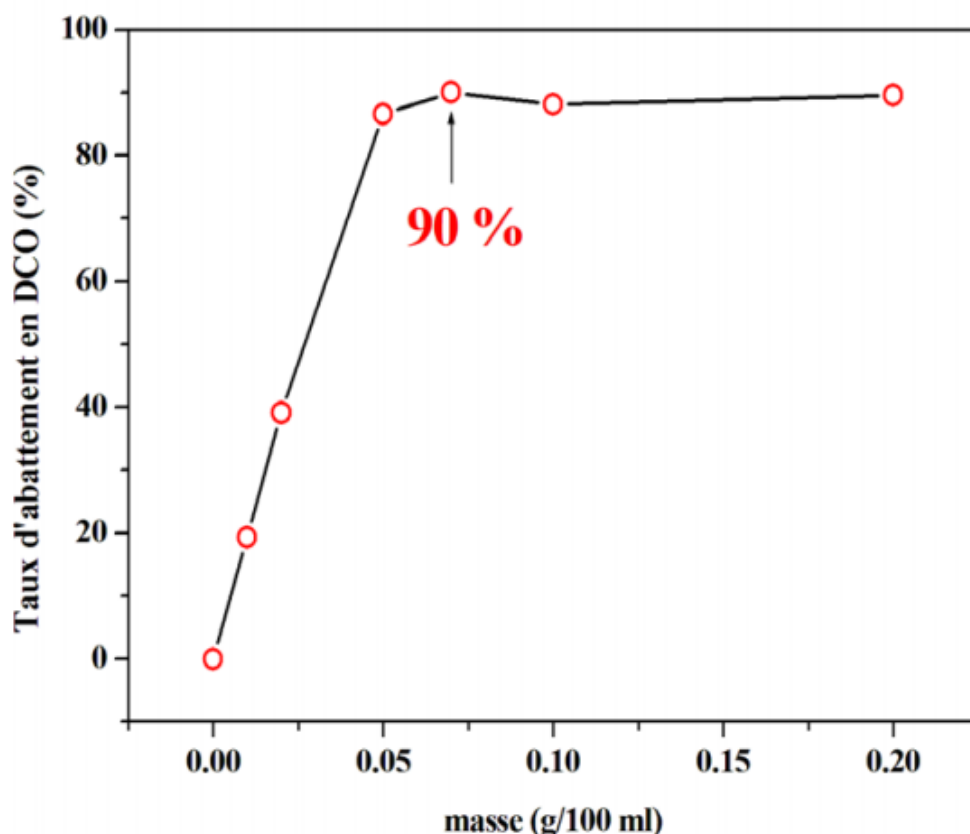


Figure 22: Rendement de la photo dégradation (taux d'abattement en DCO) sous une illumination visible et en présence de différentes masses de Ag^2MnO_2 .

La figure 22 montre l'évolution du rendement de la photo dégradation à différentes masses de Ag^2MnO_2 . Le calcul du taux d'élimination a été effectué par l'équation (1) suivante :

$$\text{Taux d'abattement en DCO} = \frac{\text{DCO initiale} - \text{DCO finale}}{\text{DCO initiale}} * 100\%$$

Avec :

DCO initiale : la DCO initiale

DCO finale : la DCO à l'équilibre.

On observe un important taux d'abattement en DCO est obtenu à une masse optimale de 0,07 g, et qui atteint un pourcentage de 90 %. Nous observons que cette valeur de DCO est presque dans la norme selon les règlements algériens des rejets (<120 mg/l)

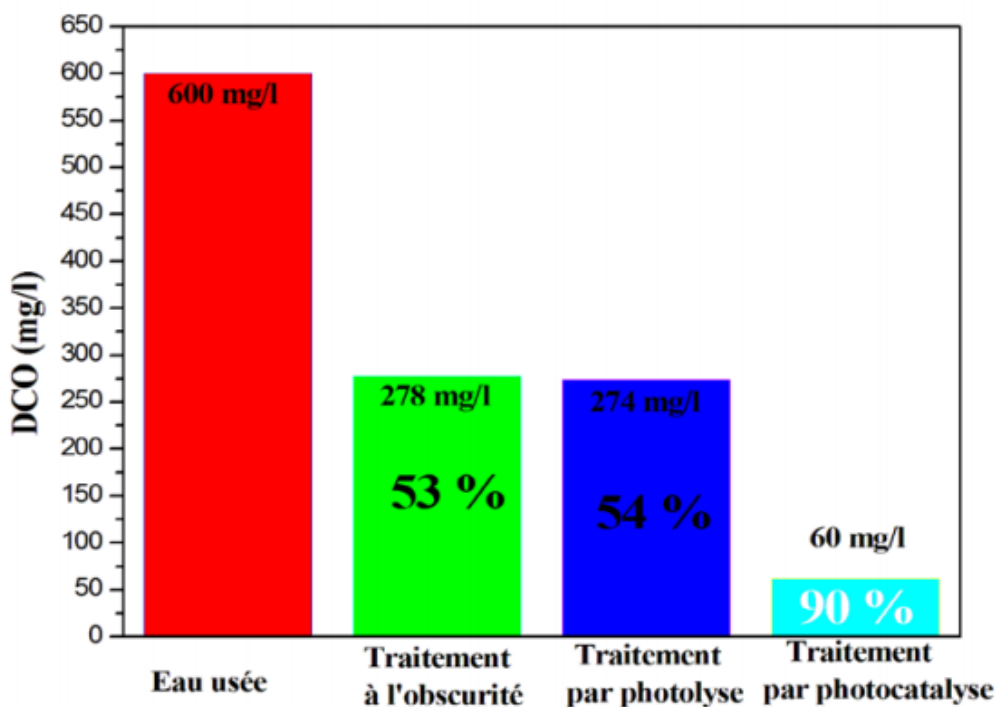


Figure 24: Evolution de la DCO et le pourcentage d'élimination des polluants selon les différents procédés.

-La figure 24 montre que la DCO a été diminuée de 600 mg/l jusqu'à 60 mg/l, ce qui représente un rendement d'abattement de DCO de 90 % supérieur à celui obtenu par photolyse (54%) ou par adsorption (53%)

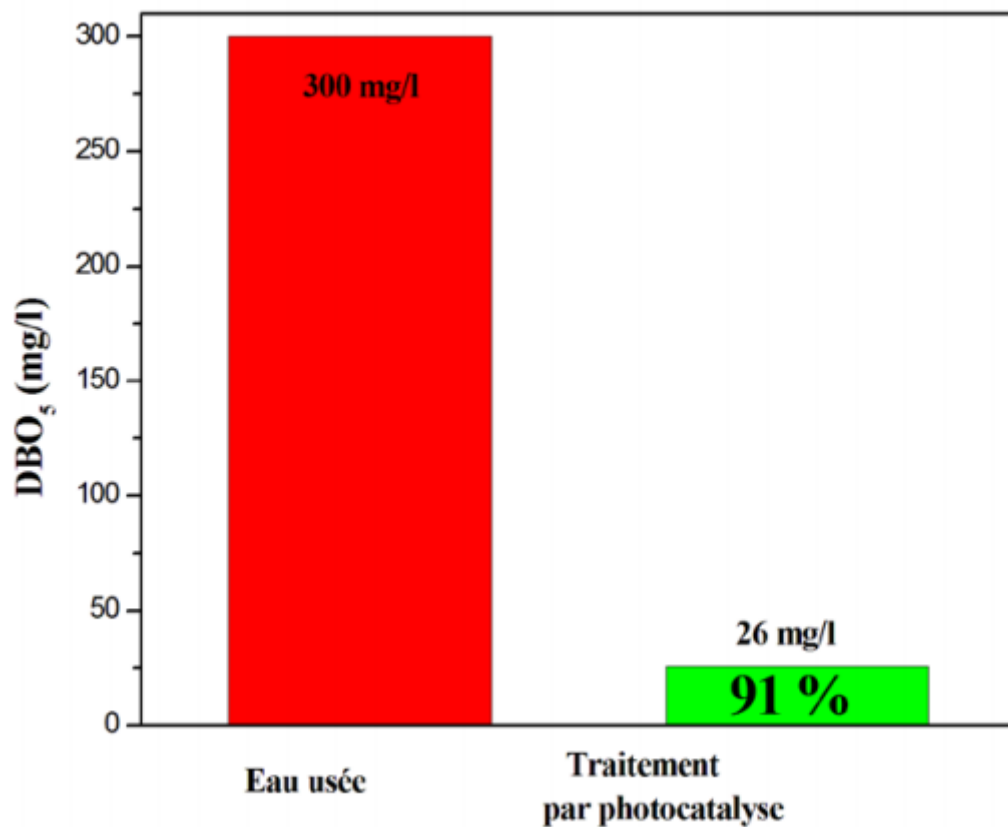


Figure 25: Evolution de la DBO5 et le pourcentage d'élimination des polluants par photocatalyse.

La figure 25 montre une diminution importante de la matière organique biodégradable de 300 mg/l dans l'eau usée de la STEP jusqu'à 26 mg/l pour l'eau traitée par le procédé de la photocatalyse, ce qui représente un taux d'abattement 91%

Conclusion

Conclusion

Cette recherche fait partie d'un cadre général pour le contrôle de la pollution de l'eau, afin d'étudier divers procédés d'oxydation avancée (POA) pour le traitement des polluants organiques persistants présents dans les eaux usées. Les POA sont des techniques efficaces pour la dégradation d'une variété de micropolluants par la formation de radicaux libres hautement réactifs tels que les radicaux hydroxyles.

Ce travail avait montré que la faisabilité d'élimination des polluants par les procédés d'oxydation avancée situés dans effluents industriels et des eaux

Références bibliographiques

- [1] **ALIOUCHE S.**, (2017). Etude de l'élimination d'un colorant par différentes méthodes photochimique en milieu aquatique. Mémoire de Magister Chimie analytique, Université Mentouri, Constantine, p, 110.
- [2] **C.MANOLE CREANGĂ**, Procédé AD-OX d'élimination de polluants organiques non biodégradables (par adsorption puis oxydation catalytique) Thèse de Doctorat, 2007.
- [3]. **Jack Weinberg**, Un guide pour les ONG sur les Polluants Organiques Persistants : Un Cadre d'Action pour Protéger la Santé Humaine et l'Environnement des Polluants Organiques Persistants (POP).
- [4]. **Wania, F. & Mackay, D**, Global fractionation and cold condensation of low volatility organochlorine compounds in polar regions. *Ambio* 22, 10-18.1993.
- [5]. **K.C. Jones, P. de Voogt**, Persistent organic pollutants (POPs) : state of the science, *Environmental Pollution* 100, 209-221, 2003
- [6] **Anonyme. (2007)**. Dictionary of Public Health. Oxford University Press. Ed. John M. Last. Oxford Reference Online
- [7]. **Anonyme. (2008)**. A Dictionary of Chemistry. Ed John Daintith , Oxford University Press. Reference Online.
- [8]. **Baldi F., Minacci A. , Pepi M . et Scozzafava A. (2001)**. Gel sequestration of heavy metals by *Klebsiella oxytoca* isolated from iron mat. *FEMS Microbiol. Ecol.* **36**: 169–174
- [9]. **Barbier Olivier ., Grégory ,Jacquillet. , Michel, Tauc. , Marc ,Cougnon . , Philippe, Poujeol. (2004)**. Nephron physiology effect of heavy metals on, and handling by, the kidney. *Nephron Physiol* **99**: 105–110
- [10]. **Barranguet Christiane. , Veuger Bart. , Sebastien, A.M. , Beusekom Van. , Marvan Peter Sinke Jan J. et Win Admiraali. (2005)**. Divergent composition of algal-bacterial biofilms developing under various external factors . *British Phycological Society.* **40**: 1–8.
- [10] : **Gérard, G.**; usages et polluants. © INRA, ISSN: **1250,5218** – ISBN : 1250- 5218 – ISBN : 2-7380-0854-2 **Tome 2 2,7380-0864-X**, Paris .**1999**.
- [11] : **Gérard, G. ;** L'eau, Volume 1, éditions Quae , ISBN : **9782759211975. 1999**.
- [12] : **Meinck, F., Stooff, H., Kohlschutter, H.**; Les eaux résiduelles industrielles , 2ème édition **MASSON .1977**.
- [13] : **Olivier, A.**; Chimie et pollution des eaux souterraines, Tec et Doc Lavoisier. **2005**

- [14] : Beccari, M.; Carucci, G.; Majone, M.; Torrisi, L.; Role of lipids and phenolic compounds in the anaerobic treatment of olive oil mill effluents, *Environmental Technology*. **1999** , **20**:105-110.
- [15] : Walker, G.M.; Weatherley, L. R.; Adsorption of acid dyes on to granular activated carbon in fixed beds, *Water Research* .**1997**, **31**: 2093–2101.
- [16] : Snyder, S.; Adham, A.; Redding, F.S.; Cannon, J.; De Carolis, J.; Oppenheimer, E.C.; Wert, Y.; Yoon, Role of membranes and activated carbon in the removal of endocrine disruptors and pharmaceuticals, *Desalination* .**2007**, **202**:156-181.
- [17] : Deegan, B.; Shaik, K.; Nolan, K.; Urell, M.; Oelgemöller, J.; Tobin, A.; Morrissey, Treatment options for wastewater effluents from pharmaceutical companies, *International Journal of Environmental Science Technology* .**2011**, **8**: 649-666.
- [18] : Robinson, T.; McMullan, G.; Marchant, R.; Nigam, P .; Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative, *Bioresource Technology* .**2001**,**77**.
- [19] Lecloux, Mem.Soc.Roy.Sci.,Bel., Serie 1 (1971) 169.
- [20] Ali. Rachini, Nanocomposites argiles – photopolymères : préparation, caractérisation et applications. Thèse de doctorat en Chimie des Matériaux. Université de Haute Alsace, (2007).
- [21] F. Gomri, Synthèses et caractérisations d'argiles cationiques et anioniques organophiles. Elimination des chlorophénols. Université de Ferhat Abbas Sétif, (2010).
- [22] S. Sahnoun, Synthèses, caractérisations et application des argiles organophiles. Université de Ferhat Abbas Sétif, (2011)
- [23] FEPS : Fondation de l'eau potable sûre [www.safewater.org]
- [24] Baxendale, J.H., Wilson, J.A., Photolysis of hydrogen peroxide at high light intensities. *Transaction Faraday Society* 53 (1957) 344-356.
- [25] Bigda R.J., Consider Fenton's chemistry for wastewater treatment. *Chemical Engineering Progress* 91 (1995) 62-66.
- [26] Bilski P., Holt R.N., Chignell C.F., Premicellar aggregates of Rose Bengal with cationic and zwitterionic surfactants *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 110 (1997) 67-74.
- [27] Bizani E., Fytianos K., Poullos I., Tsiridis V. ,Photocatalytic decolorization and degradation of dye solutions and wastewaters in the presence of TiO₂, *Journal of Hazardous Materials*, 136 (2006) 85-94.

- [28] Bolton J. R. and Carter S. R. Homogeneous photodegradation of pollutants in contaminated water: an introduction. In *Aquatic and Surface Photochemistry*. eds G. R. Helz, R. G. Zeep and D. G. Crosby, Lewis Publishers, Boca Raton, USA, (1994) 467-490. Braun A. M., Maurette M. T., Oliveros E., Sources lumineuses. *Photochimie* 94, supplément *de l'actualité chimique*, 7 (1994) 42-48.
- [29] Brigden K., Santillo D., Johnston P., Nonylphenol ethoxylates (NPEs) in textile products, and their release through laundering. Greenpeace Research Laboratories Technical Report (2012). [7] Briquard P., *Les Ultrasons*, Presses Universitaires de France, Paris, 1983 Brown M.A., De Vito S.C., Predicting azo dye toxicity,
- [30]-Etude de l'élimination de deux colorants (cristal violet et jaune d'alizarine), ALIOUCHE SIHEM, 2017.
- [31]-Élimination des polluants organiques contenus dans les eaux usées par électroFenton, Guergour Saida, 2014.
- [32] Mémoire de la licence professionnelle présenté par FGHIRE R., ELBOUHALI H., ESSHAIMI M., KHOUHADDO : Caractérisation d'un Colorant Naturel; Université Cadi Ayyad ; Marrakech, Maroc (2006)
- [33] Announ, F. Chaou, K. *Modélisation par les plans d'expériences d'un procédé d'oxydation électrochimique du méthylorange sur une électrode de MnO₂/Ti*, Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2018, 68 p
- [34] KURBUS T., SLOKAR Y.M., LE MARECHAL A.M. The study of the effect of the variables on H₂O₂/UV decoloration of vinylsulphonedye : part II. *Dyes Pigments.*, 2002, 54, 67-78.
- [35] OTURAN M.A. An ecologically effective water treatment technique using electrochemically generated hydroxyl radicals for in situ destruction of organic /Spollutant : application to herbicide 2,4D. *J. Appl. Electrochem.*, 2000, 30, 475-482.
- [36] principe de fonctionnement de la pile consulter le 06/09/2020 disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A9lectrique#Principe_de_fonctionnement