



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique

Laboratoire de recherche en Hydraulique appliquée et environnement

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

Mlle : **GASMI Kahina**

Épouse **TIGHIDET**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique

Option : **Ouvrage et Aménagement Hydraulique**

INTITULÉ:

Essai d'élimination des pesticides par électro oxydation en utilisant des électrodes en acier inoxydable.

Soutenu le **29/09/ 2022** Devant le jury composé de :

- Président : **M^r BEDJOU Abdlhamid**
- Promoteur: **M^r KADJI Belaid**
- Examineur : **M^r SAOU Abdlamid**

Remerciements

*Au terme de ce travail, mes vifs remerciements à mon promoteur monsieur
KADJI Belaid qui ma été toujours à la disposition, pour m'écouter et
m'orienter pour trouver issue pour chaque difficulté et ces discussions motivante
qui donne des perspectives très lointaines.*

*Je saisis l'occasion aussi de remercier les membres de jury qui ont accepté
d'examiner ce travail.*



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cœur et m'on âme, ma lune dans les nuits sombre, mon bonheur, mon amour et ma joie celle qui s'est sacrifiée pour me donner l'espoir dans la vie, a celle qui m'a donnée un amour sans limite, à toi ma chère maman, je t'aime.

*A la mémoire de mon père « **Mustapha** » qui à fait naitre en moi la curiosité envers tous ce qu'on voit difficile et gardée foi pour avancée.*

*A mon chère époux, **Nassim**, l'homme qui partage ma vie, pour son amour, son soutien indéfectible et sa patience tout au long de cette année d'étude et son soutiens a mes cotés au cours de mes expériences, merci pour tous.*

*A mes anges, mes chères sœurs que je vous aime, **Sarah, Yasmine et Lyla, Klilya.***

*A mon Roi mon pilier dans ce monde mon unique frère **Mickael Belkacem.***

*A mes cousines et cousins, **Mernissa, Nabila, Keltoume, Melyna, Lydia, Daoud, Juba, Rayane, Ouahcen et sa femme, Lara, Dylane, Ilyas et Racime.***

*A mes grand parents et mes tantes, **saleha et Hassiba, fatiha et Baya** (que dieu vous accueille dans son vaste paradis) et **Faroudja, Yamina, Fazia et saliha.***

*A ma belle famille, maman **Tassadit**, mes belles sœurs et beaux frères.*

A mes amis (e).

A toutes âmes que j'ai perdues cette année, vous seriez toujours dans mon cœur.

A toutes personnes qui ma soutenus durant mon parcours a Bejaïa et qui mon aider de près ou de loin.

***Thenna-yas tejra ith qabachth th'dhourredh-iyi,
tenna-yas afous s gem id yekka***

Kahina

Liste des symboles

A

A : Unité d'un ampèremètre ampère

C

Cm² : centimètre carré

°C : degré Celsius

K

K : Constante de vitesse d'oxydation ($2,4 \cdot 10^{-12}$ M)

M

mg/l : milligramme par litre

Min : minute

N

Nm : nanomètre

Q

Q_{air} : débit d'air

R

rmp : tour par minute

V

V : volte

λ Longueur d'onde

XIX ème : 19 ème siècle.

XX ème : 20 ème siècle.

Liste des abréviations

A

ABS : Absorbance

C

C : Concentration

CO₂: Le dioxyde de carbone

D

DCO: Demande chimique en oxygène.

DDD: dichlorodiphényldichloroethane.

DDT: dichlorodiphényltrichloroéthane.

DDB : Diamant dopé au bord

E

EUI : Eaux usées industrielles.

EO: Electroxydation.

ERO : espèces réactif d'oxygène

F

Fe : Fer

FeO : Oxyde ferreux

Fe₂O₃ : Oxyde ferrique

Fe₃O₄ : Oxyde magnétique

I

I : intensité du courant.

IR : Infrarouge

H

HCH: hexachlorocyclohexane substance phytosanitaire.

H₂O₂ : Peroxyde d'hydrogène

K

K: Constante de vitesse d'oxydation.

N

NaCl : chlorure de sodium.

O

OH•: Radical hydroxyle.

OEC : Oxydation électrochimique

OPP: Organophosphorés.

P

PH: Potentiel hydrogène

POA: Procéder d'oxydation avancée.

PVA : Alcool polyvinylique

T

T: Transmittance

U

UASB : Upflow Anaerobic Sludge Blanket

US: Ultrasons.

UV : Ultraviolet

V

V : Volte

Chiffres

λ : Longueur d'onde

XIX ème : 19 ème siècle

XX ème : 20 ème siècle

Sommaire

Table des matières

Remercîment

Dédicaces

Liste des symboles

Acronyme

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Étude bibliographique

I.1. Généralité sur les pesticides 3

1.1.1 Définition 3

1.1.2 Historiques 4

1.1.3 Propriétés physico-chimiques des pesticides 4

1.1.4 Nature chimique des pesticides organiques 5

1.1.5 Classification des pesticides selon leur mode d'action 7

1.1.6 Classification des pesticides 8

1.1.6.1 Première classification 8

1.1.6.2 Deuxième classification 10

1.1.7 Impacte des pesticides 11

1.1.7.1 Sur l'environnement	11
1.1.7.2 Sur la santé humaine	13
1.1.8 Procédés de traitement	14
1.1.8.1 Traitement physique	14
1.1.8.2 Traitement Physico-chimique	15
1.1.8.3 Traitement biologique	15
1.1.8.4 Traitement thermique (incinération)	17
1.1.8.5 Traitement d'oxydation avancée (POA)	19
1.1.8.5.1. Procédé d'électro-oxydation (EO)	21
1.1.8.6 Traitement combinaison	26
1.2 Matériaux d'électrodes	26
1.3 Choix du matériau	26

Chapitre II : Matériels et méthodes

II.1 Introduction	27
2.2 Matériels	27
2.2.1 Unité de traitement	27
A. Géométrie et dimensions du réacteur électrochimique	27
B. Forme et dimensions des électrodes	28
C. Alimentation en courant électrique	29
D. Dispositif d'aération	29
2.2.2 Les produits utilisés	30

2.2.2.1 Linuron	30
2.2.2.2 Matériaux des électrodes utilisées	31
2.2.2.3 Salinité	32
2.3 Méthodologie	33
2.4 Les techniques analytiques	33
2.4.1 La spectrophotométrie UV-Visible	33
2.4.2 La loi de Beer-Lambert	34
2.4.3 Principe de la spectrophotométrie UV-Visible	35
2.5 Courbe d'étalonnage de Linuron	35

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction	37
III.2 Choix du type d'anode	37
III.3 Étude de l'influence de certains paramètres sur l'efficacité d'élimination de Linuron par électro-Fenton.....	40
III.3.1 Influence de l'intensité de courant	40
III.3.2 Influence de la concentration de l'électrolyte	44
III.3.3 Influence du débit d'aire ajouté	46
Conclusion	49
Conclusion générale	50
Bibliographie	52

Résumé

Liste des Figure

Figure I-1 : Cycle des Pesticides	3
Figure I-2 : Les pesticides systémiques se déplacent de l'endroit où ils sont appliqués vers d'autres parties de la plante pour atteindre leur cible	7
Figure I-3: Les pesticides de contact doivent atteindre directement leur cible pour être efficaces	8
Figure I-4 : Historique d'évolution des trois plus grande classe des pesticides des années 1999 à nos jours	9
Figure I-5: devenir des pesticides dans l'environnement	13
Figure I-6 : Schéma de principe d'une électro-oxydation	21
Figure II-1: Schéma d'une cellule d'électro Fenton	25
Figure II-2 : Cellule électrochimique de forme cylindrique	26
Figure II-3 : Paire d'électrodes	27
Figure II-4 : Dispositif d'aération	27
Figure II.5: trajet optique	32
Figure II.6: Schéma de principe d'un spectrophotomètre à mono-faisceau	33
Figure II.7: Spectre d'absorption UV-visible de Linuron	34
Figure III.1 : La cinétique de dégradation de Linuron dans le milieu aqueux	35
Figure III.2 : évolution du rendement en fonction du temps pour les différents matériaux d'électrodes	36
Figure III.3 : influence de l'intensité du courant et $[NaCl]$ sur la dégradation de Linuron dans un milieu aqueux par procédé électro fenton, $Q_{air} = 3 \text{ L/min}$	39
Figure III.4 : effet de la concentration de $NaCl$ en fonction de temps	42
Figure III.5 : effet du débit d'aire sur le rendement $[NaCl] = 2 \text{ g/l}$, $I = 3 \text{ A}$	45

Liste des Tableau

Tableau I-1: Quelques structures chimiques caractéristiques de certaines familles de pesticide	6
Tableau I-2: Avantages et inconvénients des différentes méthodes utilisées pour l'élimination des polluants organiques.....	17
Tableau I-3: Avantages et inconvénients des différents POA utilisées pour l'élimination des polluants organiques.....	19
Tableau I I-1: Identification de la substance Linuron.....	28
Tableau I I-2: Propriété de NaCl	30
Tableau III -1: Étude de l'effet des types d'anodes sur la dégradation de Linuron	35
Tableau III-2: Étude de l'influence de l'intensité du courant sur la dégradation de Linuron.....	39
Tableau III.3 : Étude de l'influence de la concentration de NaCl sur la dégradation de Linuron	42
Tableau III.4 : Effet de la variance du débit d'aire sur le rendement	45

Introduction Générale

La recherche sur les ressources en eau est devenu un impératif pour nos société moderne en effet le développement des activités humaines s'accompagne en évitable avec une utilisation croissante des produits chimiques dans l'agriculture et alors une production croissante des rejets polluants.

La pollution de l'eau est un problème qui touche la plus part des continent du monde entier et l'origine de cette pollution est divers dans la qu'elles ont peu cites les produits chimiques (pesticides), qu'on considère comme une menace sur la biodiversité.

Les pesticides, encore appelés produits phytosanitaires, sont des substances chimiques utilisées pour la croissance, la protection et la conservation des végétaux. L'utilisation des pesticides chimiques est de plus en plus fréquente dans les pays en voie de développement.

Ces dernières années, plusieurs techniques classiques d'épuration ont été utilisées comme les traitements biologiques et l'incinération (thermique) permettent la dégradation des polluants organiques présents dans l'eau, mais ces procédés classiques sont coûteux et inefficaces devant une charge polluante bio-réfractaire et certains composés persistants tels que les pesticides, et pour cela on ce tourne vers les procédés d'oxydation avances (P.O.A) aux qu'elles on obtient des résultats plus acceptables.

L'Algérie est un grand utilisateur de pesticides avec plus de 432 pesticides vendus dans le commerce, dont les plus fréquemment utilisés sont les organophosphorés, les carbamates et les urées substituées. [1]

Selon une étude réalisée en France, une réduction de 25% des quantités d'herbicides utilisées sur les cultures de céréales n'entraînerait pas de diminution des rendements. [2]

De nombreux travaux ont démontré la préséance et la persistance des pesticides dans les eaux, les sols, l'air mais aussi dans les produits alimentaire. Certains pesticides sont désormais considérés comme des polluants organiques persistants ou encore des perturbateurs endocrâniens.

Pour faire face à cette problématique, de nombreux procédés P.O.A tels que l'électrochimie permettent d'améliorer l'épuration des eaux souterraines et les eaux usées industrielles (EUI). En termes de méthodes rentables permettant le traitement d'une large

gamme de polluants, l'électro oxydation (OE) a prouvé son efficacité dans le traitement des particules colloïdales.

En effet, l'oxydation électrochimique (OEC) des polluants organiques peut avoir lieu à travers deux différents mécanismes : l'oxydation anodique directe où le polluant est détruit à la surface de l'anode et l'oxydation indirecte où des espèces oxygénées (HClO, HOBr, H₂S₂O₈, H₂O₂, etc.) oxydent le polluant organique en solution [3].

Dans ce contexte, et afin de répondre à cet objectif, le présent mémoire se décomposera en plusieurs chapitres. Le premier chapitre présente une généralité sur les pesticides et les différents procédés de traitement. Le second chapitre traite les matériaux utilisés et les méthodes employées par voie procédés d'oxydation avancée (P.O.A) comme aussi sur les objectifs, hypothèses et démarche expérimentale de l'étude. Le troisième chapitre présente les résultats et les interprétations qui en découlent.

I. 1. Généralité sur les pesticides

1.1.1. Définition :

Le terme pesticide dérivé du mot anglais est (« ravageurs »), désigne les substances utilisées dans la lutte contre les organismes jugés indésirables par l'homme (plantes, champignons, bactéries, animaux). Il est généralement associé à un usage agricole or il englobe également les usages non agricoles (entretien des voiries, des espaces verts, jardins des particuliers...).

Les pesticides sont des substances ou préparations permettant de lutter contre les ennemis des cultures et des produits récoltés.

Leur composition élémentaire et leur structure chimique très variées sont à la base de propriétés physico-chimiques et biologiques très diverses. Ces propriétés, en particulier chimiques, conditionnent leur comportement dans l'environnement. Selon la nature chimique, il existe trois catégories de pesticides à savoir :

- Les pesticides inorganiques ;
- Les pesticides organométalliques ;
- Les pesticides organiques.

Ces derniers constituent, de loin, le groupe le plus important et représentent l'essentiel des pesticides utilisés en agriculture.

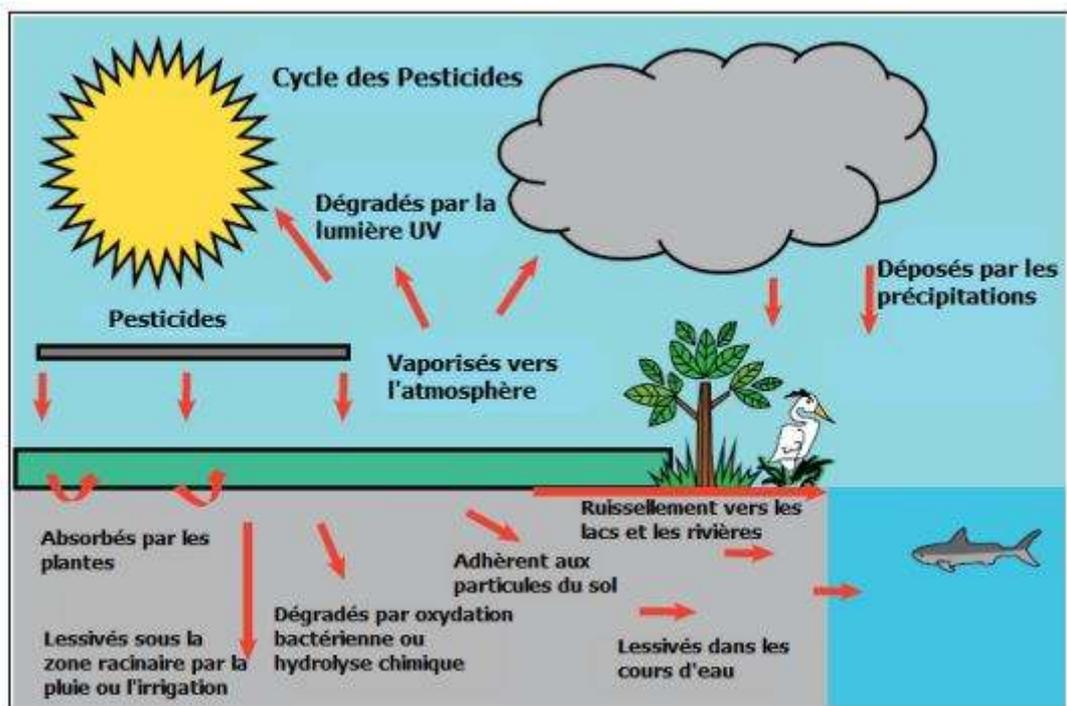


Figure I-1 : Cycle des Pesticides [4]

1.1.2. Historique des pesticides :

Le XIXème siècle connaît le développement de la chimie minérale en découvrant plusieurs types de pesticides minéraux à base de sel de cuivre. Dans les années 50, des insecticides comme le dichlorodiphényldichloroéthane (DDD) et le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) sont utilisés en grandes quantités en médecine préventive (pour détruire le moustique responsable de la malaria) et en agriculture (élimination du doryphore). Ces composés sont aujourd'hui interdits en raison de leur faible biodégradabilité et de leur bioaccumulation dans la chaîne alimentaire.

Au cours du XXème siècle, l'emploi des pesticides a été très fréquent par rapport au siècle précédent par conséquent un succès quant au rendement et aux productions est bien remarqué, d'où leur indispensabilité dans la plupart des activités. En effet, le désir d'augmenter les rendements dans l'agriculture a suscité l'utilisation de plus en plus de produits chimiques.

Les traitements des pesticides apparaissent à la fin du vingtième siècle en raison de leur impact négatif sur l'environnement [5]. Actuellement, la réduction de l'utilisation de pesticides devient une préoccupation majeure aux Etats-Unis, au Canada et en Europe [6].

1.1.3. Propriétés physico-chimiques des pesticides :

Les pesticides sont caractérisés par plusieurs propriétés, qui sont :

- ✓ Poudre blanche ou jaunâtre plus au moins cristalline ;
- ✓ Sans odeur sauf « HCH » ;
- ✓ Tension de vapeur basse mais suffisante pour créer une concentration atmosphérique toxique pour l'insecte ;
- ✓ Insoluble dans l'eau : Résistance et persistance dans le sol pendant des années ;
- ✓ Soluble dans les corps gras et les solvants organiques (très Liposolubles) ;
- ✓ Très grande stabilité chimique (non biodégradable), entraînant une grande rémanence dans les denrées alimentaires traitées et une longue durée d'action.

1.1.4. Nature chimique des pesticides organiques :

Les pesticides organiques appartiennent à diverses familles chimiques, regroupant chacune un ensemble de molécules dérivées d'un groupe d'atomes qui constituent une structure de base. Il existe actuellement plus de 80 familles chimiques constituées par un nombre de substances très variable dont certaines représentées par un seul pesticide [7].

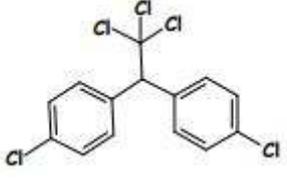
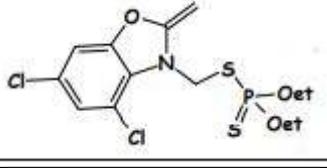
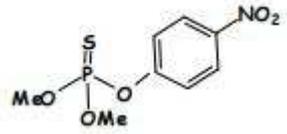
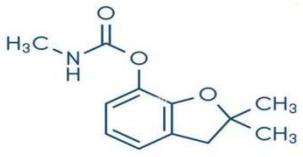
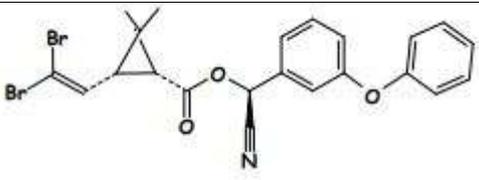
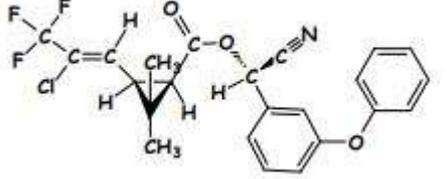
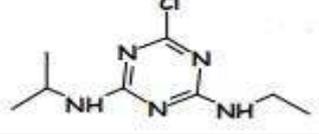
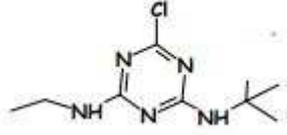
Cependant, il faut noter qu'il n'existe pas de relations univoques simples entre une famille chimique et les propriétés des molécules, qui ne dépendent pas seulement de l'existence d'un groupe fonctionnel caractéristique, mais aussi de celle de motifs moléculaires particuliers. Ceci explique les difficultés liées à la réalisation d'une typologie des familles regroupant tous les pesticides.

Les principaux groupes chimiques sont :

- ✚ Les Organochlorés;
- ✚ Les Carbamates, des esters de l'acide N-méthylcarbamique ;
- ✚ Les Pyréthriinoïdes de synthèse ;
- ✚ Les dérivés de l'urée ;
- ✚ Les Triazines;
- ✚ Les Dicarboximides tels que le vinchlozoline, l'iprodione et le procymidone;
- ✚ Les Diazines ;
- ✚ Et enfin, les Organophosphorés(OPP) : esters obtenus par réaction de divers alcools avec l'acide orthophosphorique ou l'acide thiophosphorique. Ils ont remplacé les organochlorés car ils sont plus sélectifs et ont une persistance plus faible. Peu solubles dans l'eau, ils sont moins stockés dans les organismes. Cependant ils agissent, de façon irréversible, au niveau des terminaisons nerveuses.

CHAPITRE I Revue bibliographique

Tableau I-1 : quelques structures chimiques caractéristiques de certaines familles de pesticide.

Famille Chimique	Nom	Formule développée
Organochloré	DDT	
Organophosphorés	Phosan	
	Mathyl Parathion	
Carbomates	carbofuran	
Pyréthrinoides	Deltaméthrine	
	Lambdacyhalothrine	
Triazines	Atrazine	
	Terbutylazine	

1.1.5. Classification des pesticides selon leur mode d'action :

Un pesticide est sensée prévenir, contrôler ou détruire et leur action peut ce faire par :

- Le contacte
- Ingestion
- Autres sorts d'exposition effective pendant les phases de croissance [8].

❖ *Pesticides systémiques :*



Figure I-2 : Les pesticides systémiques se déplacent de l'endroit où ils sont appliqués vers d'autres parties de la plante pour atteindre leur cible.

❖ *Pesticides de contact :*

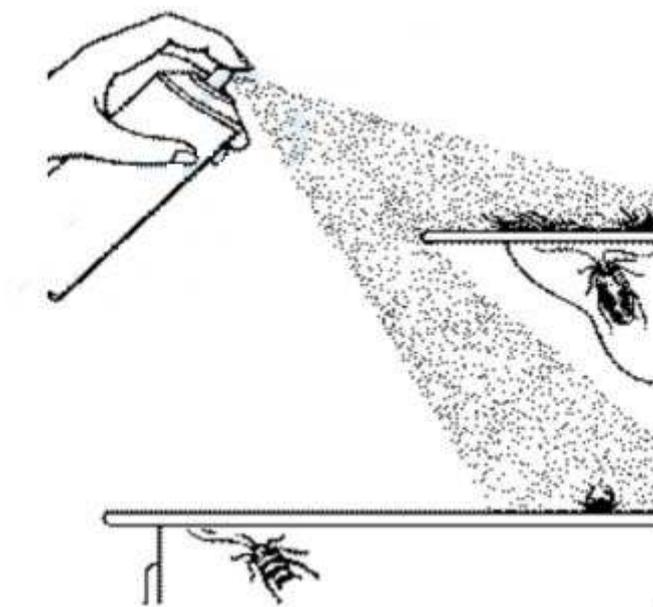


Figure I-3 : Les pesticides de contact doivent atteindre directement leur cible pour être efficaces.

1.1.6. Classification des pesticides :

1.1.6.1. Première classification :

Les pesticides sont classés selon la nature de l'espèce nuisible. [9]

✓ **Les Herbicides :**

Sont destinés à lutter contre certains végétaux (les « mauvaises herbes ») les plus utilisés en tonnages et en surfaces traitées.

✓ **Les Insecticides :**

Sont destinés à lutter contre les insectes en les tuant, ou en empêchant leur reproduction pour la protection des cultures. Produits ciblés à détruire les insectes nuisibles.

CHAPITRE I Revue bibliographique

✓ Les Fongicides :

Sont destinés à lutter contre les maladies des plantes provoquées par des champignons ou des mycoplasmes qui causent de graves problèmes à l'agriculture telle que le mildiou de la pomme de terre [10].

Comme on peut citer d'autre en exemple en outre ces trois grandes familles :

- Les taupicides ;
- Les acaricides ;
- Les rodenticides ;
- Les nématocides ;
- Les molluscicides ;
- Les corvicides.

	HERBICIDES	FONGICIDES	INSECTICIDES
Avant 1900	Sulfate de cuivre Sulfate de fer	Soufre Sels de cuivre	Nicotine
1900 - 1920	Acide sulfurique		Sels d'arsenic
1920 - 1940	Colorants nitrés		
1940 - 1950	Phytohormones...		Organochlorés Organophosphorés
1950 - 1960	Triazines, urées substituées carbamates	Dithiocarbamates phtalimides	carbamates
1960 - 1970	Dipyridyles, toluidines...	benzimidazoles	
1970 - 1980	Amino-phosphonates Propionates...	Triazoles Dicarboximides Amides, phosphites morholines	Pyréthroïdes Benzoyl-urées (régulateurs de croissance)
1980 - 1990	Sulfonyl urées...		
1990 - 2000		Phenylpyrroles strobilurines	

Figure I-4 : Historique d'évolution des trois plus grande classe des pesticides des années 1999 à nos jours [11]

1.1.6.2. Deuxième classification :

Le classement se fait en fonction de la nature chimique de la substance active.

On distingue :

a) Pesticides Organiques :

- Organochlorés ;
- Organophosphorés ;
- Carbomates ;
- Triazines ;
- Urées substituées ;
- Pyréthrénoïdes.

b) Pesticides Inorganiques :

En général ce sont des éléments chimiques qui ne se dégradent pas. Leur utilisation entraîne souvent de graves effets toxicologiques sur l'environnement par accumulation dans les sols.

Le plomb, l'arsenic et le Mercure sont fort toxiques [8].

c) Bio pesticides :

Ce sont des substances dérivées de plantes ou d'animaux.

Elles peuvent être constituées d'organismes tels que les :

- Moisissures ;
- Bactéries ;
- Virus ;
- Nématodes ;
- Composés chimiques dérivés de plantes ;
- Pheromones d'insectes.

La présence de certains groupements fonctionnels et/ou atomes confère aux pesticides certaines propriétés physico-chimiques (ionisabilité, hydrophobie, solubilité, persistance).

Par exemple :

- ✚ Le groupement donneur ou accepteur de proton d'un pesticide est susceptible de s'ioniser ;
- ✚ Un pesticide comprenant des atomes de chlore est généralement récalcitrant à la dégradation.

Toutefois, il est important de souligner que la connaissance de la famille chimique à laquelle un pesticide appartient ne suffit pas à elle seule à la définition de ses propriétés ni à la prédiction de son comportement dans l'environnement [12].

1.1.7. Impacte des pesticides :

Les pesticides validés sont composés d'un ingrédient actif et d'adjuvants, soient inactifs qui vont servir essentiellement à augmenter la quantité et la rapidité de pénétration du pesticide dans les feuilles, donc à augmenter sa rapidité d'action, à élargir ses fonctions et à lui offrir une meilleure adhérence. Le problème c'est que le ministère de l'Environnement ignore sa composition, malgré la toxicité des substances qui sont parfois mises en cause. Seule l'Agence de réglementation sur la lutte antiparasitaire et l'organisme fédéral d'homologation, en connaissent la composition. Le problème est que sa composition est protégée par le secret industriel. L'efficacité de ces pesticides homologués n'est pas tout à fait sécuritaire, car même si un adjuvant est considéré comme inactif, il peut devenir toxique selon la façon qu'il sera appliqué [9].

Donc qu'en est-t-il de leur toxicité sur l'être humain et sur l'environnement ?

A. Sur L'environnement :

Le Ministère de l'environnement a échantillonné une trentaine de rivières et environ 300 puits situés dans des bassins versants agricole au Québec.

Le suivi des pesticides est surtout orienté selon le type de cultures. Les plus ciblées sont celles qui utilisent un plus grand nombre de pesticides, soit la culture du maïs, du soya, les vergers, les cultures maraîchères et la pomme de terre. Les données recueillies dans quelques rivières ont montré une présence de pesticides plus régulière durant l'été. Les plus souvent utilisés sont les herbicides. Le problème c'est que l'on retrouve plusieurs pesticides présents

CHAPITRE I Revue bibliographique

en même temps dans l'eau des rivières, allant jusqu'à vingt dans certain cas dans un même échantillon. Dans les cours d'eau qui drainent des zones de vergers on détecte régulièrement des fongicides et ceux les plus souvent identifiés sont les insecticides. Leurs concentrations dépassent parfois les critères de la qualité de l'eau essentielle à la protection des espèces aquatiques. Les données recueillies dans les rivières et ruisseaux qui drainent les terres en cultures maraîchères révèlent la présence de plusieurs insecticides ainsi que du fongicide chlorothalonil.

Les pesticides sont un facteur majeur d'incidence sur la diversité biologique, de même que la perte d'habitat et le changement climatique. En effet, les conséquences de l'utilisation des pesticides se caractérisent tout d'abord à court terme par une intoxication directe ou indirecte des organismes, une réduction de l'offre de nourriture (insectes, graines d'adventices), des effets non mortels sur la reproduction et le comportement... Ils peuvent être ainsi à l'origine de déséquilibres sur les écosystèmes en affectant par exemple :

- les populations d'abeilles : 3 néonicotinoïdes (insecticides neurotoxiques) ont été suspendus par la Commission européenne en 2013 ;
- les insectes auxiliaires (dont les prédateurs de certains nuisibles) ;
- les rongeurs ;
- les oiseaux ;
- les poissons...

Des effets négatifs sur les espèces aquatiques, la présence de pesticide dans l'eau des rivières a également un impact direct sur la qualité des sources d'approvisionnement en eau potable. Les petits cours d'eau agricole échantillonnés se jettent dans des rivières plus grandes.

Une autre problématique ciblée est celle de la présence de pesticides dans les eaux souterraines, causée par leur fort potentiel de lessivage. Ces pesticides vont se retrouver dans les eaux souterraines et représentent une menace de la qualité de ces eaux par leur taux de solubilité [10].

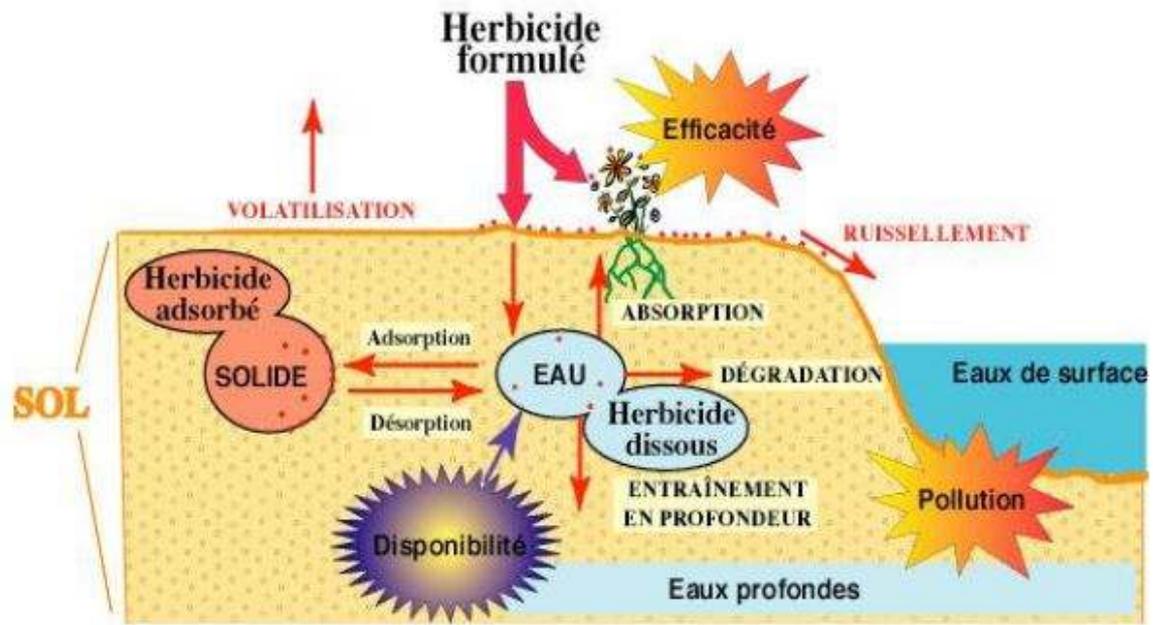


Figure I-5 : devenir des pesticides dans l'environnement [14]

B. Sur la santé humaine :

De nombreux pesticides sont des **perturbateurs endocriniens**. Leur toxicité, ne se limite pas aux seules espèces que l'on souhaite éliminer. De manière générale, dans la littérature scientifique, il a été montré que les résidus de pesticides peuvent entraîner des désagréments pour la santé comme des troubles de la reproduction, du développement et du système nerveux [15]. Les substances et/ou les molécules issues de leur dégradation sont susceptibles de se retrouver dans l'air, le sol, les eaux, les sédiments... ainsi que dans les aliments. Elles présentent, par leur migration entre ces compartiments de l'environnement, des dangers plus ou moins importants pour l'homme et les écosystèmes, avec un impact à court ou à long terme.

- **L'intoxication aiguë** : liée à une très forte exposition sur un temps court, elle peut provoquer l'empoisonnement, des risques cutanés ou oculaires.
- **L'intoxication chronique** : liée à une plus faible exposition sur un temps plus long, elle peut provoquer de nombreuses maladies.

Dans les effets d'ordre dermatologiques et respiratoires, on observe l'irritation, de l'érythème, de l'œdème, de l'urticaire, des éruptions cutanées, des dermatites, des allergies, la toux chronique, l'asthme, la dyspnée, la rhinite ainsi qu'une baisse de capacité ventilatoire observée chez les agriculteurs exposés aux pesticides pour ce qui est de la toxicité aigüe.

L'exposition aux pesticides peut aussi être la cause du développement de cancer [16] ; les types de cancer sont les lymphomes, la leucémie ainsi que le cancer des tissus conjonctifs, du cerveau et de la prostate.

On observe également que les pesticides pourraient être responsables de malformations chez les nouveau-nés de parents agriculteurs exposés aux pesticides. Bien d'autres études montrent un grand nombre d'effets néfastes sur la santé.

A travers ces différentes études, il semble clair que les pesticides constituent un danger sanitaire réel et peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine.

1.1.8. Procédés de traitement :

La dépollution des eaux usées nécessite très souvent une succession d'étapes et pour cela on fait appel au procédés de traitement qui peuvent être classés suivant les méthodes de type : physiques, physico-chimiques, thermique (incinération), biologiques, P.O.A (procéder d'oxydation avancée), et combinées (dans le cas où plusieurs méthodes sont utilisées conjointement).

1.1.8.1. Traitement physique :

Le traitement physique est généralement utilisé comme étape de prétraitement pour l'élimination des polluants [17] solides les plus grossiers (dégrillage, dégraissage, dessablage et déshuilage).

Les solides en suspension, en fonction de la taille et de la densité, sont piégés par les grilles, les tamis, les chambres à sable, les fosses septiques, les pièges à graisse, les clarificateurs, les filtres, etc.

Le traitement mécanique permet d'éliminer environ 60% à 75% des impuretés insolubles des eaux usées municipales, jusqu'à 95% des eaux usées industrielles [18].

1.1.8.2. Traitement physico-chimique des pesticides :

Ce type de procédés regroupe les technologies membranaires, les techniques d'adsorption, d'échange d'ions et des procédés de séparation solide-liquide (précipitation, coagulation, floculation et décantation) [19-20]

Ces procédés permettent une élimination importante des matières en suspension et des matières colloïdales par une adsorption sur des particules grossières. Permettent d'avoir une réduction remarquable de la DCO.

Il peut être utilisé en prétraitement, en traitement primaire ou en traitement secondaire.

Les méthodes physico-chimiques de traitement de l'eau des eaux usées éliminent les impuretés inorganiques dispersées et dissoutes, décomposent la matière organique et les composés récalcitrants, récupèrent les métaux, etc.

Les méthodes les plus répandues :

- La coagulation chimique : se base sur l'ajout d'un réactif chimique (coagulant) permettant de neutraliser le potentiel répulsif de la double couche qui englobe les particules colloïdales.
- La floculation : est un processus qui assure l'agglomération des microflocs formés suite à la déstabilisation des particules colloïdales.
- La cristallisation, Le traitement électrochimique, La sorption, L'extraction, Les ultrasons
- L'échange d'ions.

1.1.8.3. Traitement biologique :

Les procédés d'épuration par voie biologique sont communément utilisés pour le traitement des eaux polluées [21-22] comme elle représente un faible impact environnemental et rentrent donc bien dans la liste des méthodes les plus utilisées.

Cette technique est très répandue dans le domaine du traitement des eaux usées. Cela peut être due au fait qu'elle est peu coûteuse et simple à réaliser [23].

Le processus biologique élimine la matière dissoute d'une manière similaire à l'autoépuration mais d'une manière plus efficace que la clarifloculation. L'efficacité de l'élimination dépend sur le rapport entre la charge organique et la masse biologique présente dans le réservoir d'oxydation, sa température et la concentration d'oxygène.

Les méthodes de traitement biologique peuvent être divisées en deux traitements (aérobie, anaérobie). En raison de sa grande efficacité et de sa large application, le traitement biologique aérobie devient naturellement le courant dominant du traitement biologique [24].

a) **Traitement biologique aérobie :**

La biodégradation aérobie dépend de l'agent microbiologique utilisé, de la durée du test, du type de nutriments disponibles et de la méthode de biodégradation utilisée [25].

Les systèmes fonctionnant en mode aérobie sont des systèmes très connus dans l'ingénierie environnementale car ils sont très robustes et efficaces dans la conversion des produits toxiques en produits non toxiques. Cependant, ils présentent quelques inconvénients vis-à-vis de leur consommation énergétique élevée ainsi que leur production élevée de boues qui doivent être traitées avant tout rejet [26].

➤ *Procédé à boues activé :*

Le traitement par boues activées est la méthode la plus utilisée dans le domaine de traitements biologiques des eaux usées. En effet, les boues activées, qui sont une agrégation de microbes, utilisent leurs métabolismes pour l'élimination des composés organiques [23].

Comme il est très connu, le traitement par boues activées est un processus de métabolisation et d'exploitation de micro-organismes présents dans les boues.

Ce procédé peut être divisé en deux étapes :

La première étape est la phase d'adsorption du composé organique

La deuxième est la phase de la dégradation de ce dernier par la communauté microbienne [27-23].

➤ *Procédé à bio-Film :*

Les systèmes de bio filtration sont très compacts et résistants ce qui les rend plus appropriés pour le traitement des polluants organiques industriels [28].

Le processus du bio-Film est une sorte de traitement biologique qui fait que les nombreux micros organiques se fixent sur une surface d'objet fixé, tout en laissant l'eau usée couler à sa surface pour la purifier par contact. Les principaux types de processus de bio-Film sont d'oxydation biologique par contact, les contacteurs biologiques rotatifs et le lit fluidisé biologique [29].

b) Traitement biologique anaérobie :

En effet, les systèmes fonctionnant en mode aérobie sont des systèmes très connus dans l'ingénierie environnementale car ils sont très robustes et efficaces dans la conversion des produits toxiques en produits non toxiques. Cependant, ils présentent quelques inconvénients vis-à-vis de leur consommation énergétique élevée ainsi que leur production élevée de boues qui doivent être traitées avant tout rejet [26].

1.1.8.4. Traitement thermique (incinération) :

L'incinération est une combustion complète des polluants organiques [30-31] l'incinération est couramment utilisée pour des effluents contenant une grande fraction de composé non biodégradable.

Elle se fait, en général, dans un four où la chaleur dégagée par les matériaux au cours de la combustion est suffisante pour enflammer les matériaux ajoutés. Ce procédé est très efficace, mais présente un coût élevé. Cette technique est très pratique dans le cas de petits volumes présentant une forte concentration. Cependant, elle est soumise à une réglementation de plus en plus stricte à cause de la possibilité de production de dioxines provenant des fumées d'incinération

La charge polluante (pesticides et métaux lourds) représente une menace réelle pour les ressources en eau. Cette pollution affecte en priorité les eaux de surface, où l'on observe une présence de contamination. De plus, les procédés classiques de traitement de ces eaux se trouvent très souvent limités. Pour remédier à ce problème, des procédés d'oxydation avancée (POA) ont été développés et sont de plus en plus utilisés [32].

CHAPITRE I Revue bibliographique

Le tableau 1 recense tous les avantages et inconvénients des divers procédés.

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients des différentes méthodes utilisées pour l'élimination des polluants organiques [33]

Méthodes de Traitement		Avantages	Inconvénients
Traitement Biologique		<ul style="list-style-type: none"> • Répandue actuellement • Économique • Volumes brutes peuvent être importants • Haut rendement du traitement aérobie • Possibilité de recycler les boues anaérobies 	<ul style="list-style-type: none"> • Composés bio réfractaires • Grands espaces de travail • L'ajout de nutriments est requis • L'efficacité dépend de la température • Recyclage impossible
Traitement Incinération		<ul style="list-style-type: none"> • Très efficace 	<ul style="list-style-type: none"> • Très coûteuse énergétiquement • Charge importante > 50(g/ L)
Traitement Physique	Adsorption	<ul style="list-style-type: none"> • L'élimination complète des polluants est réalisable. • Facilite la mise en œuvre • Systèmes répandus pour différents débits et concentrations. • Faibles coûts d'exploitation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Régénération des saturés et utilisation des adsorbants usés • Dépendance de l'efficacité sur la température et le pH • Le traitement du retentât est souvent requis
	Nano filtration	<ul style="list-style-type: none"> • -Adoucissement simultané de l'eau • Des systèmes sont disponibles pour différents débits • Faibles coûts d'investissement 	<ul style="list-style-type: none"> • Colmatage de la membrane • Polarisation de concentration • Courte durée de vie des membranes • Le traitement de retentât et de membranes usées est requis
Traitement Physico-chimique	Coagulation Floculation	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation Facile • Haute performance dans l'élimination des MES 	<ul style="list-style-type: none"> • Production des boues • Traitement associé à l'élimination des boues

	Flottation	<ul style="list-style-type: none">• Peu coûteux• Temps de rétention hydraulique plus court	<ul style="list-style-type: none">• Moins d'efficacité car des opérations successives doivent être effectuées pour de meilleurs résultats.
	Echange d'ions	<ul style="list-style-type: none">• Ecologique• Rapide	<ul style="list-style-type: none">• Cher• Ne convient pas à tous les ions métalliques

1.1.8.5. Traitement d'oxydation avancée (POA) :

Les POA sont des méthodes modernes utilisant des radicaux réactifs (principalement des radicaux hydroxyles) pour l'oxydation de polluants organiques.

Ces POA ont été appliqués dans plusieurs domaines, pour le traitement des eaux souterraines et de surface, le traitement des sols, les eaux usées municipales, la production d'eau ultra-pure, le traitement et le contrôle des odeurs des composés organiques volatils [34], le traitement des eaux usées des usines des pâtes et papiers [35], la décoloration des effluents textiles [36], l'élimination des polluants retrouvés dans les eaux de rinçage industrielles [37], etc.

Pour produire ces radicaux il existe plusieurs méthodes de traitement : l'oxydation électrochimique (EO), les ultrasons (US), le procédé de Fenton, la photocatalyse et la photodégradation, l'ozonation, l'oxydation de persulfate et la radiolyse.

Les avantages et les inconvénients des POA sont décrits dans le tableau I.3 [33-38].

CHAPITRE I Revue bibliographique

Tableau I-3 : Avantages et inconvénients des différents POA utilisées pour l'élimination des polluants organiques

POA	Avantages	Inconvénients
Electrocatalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Une décomposition complète et une minéralisation élevée sont réalisables • Facilité de mise en œuvre et d'automatisation • aucun produit chimique requis dans les applications d'eaux usées industrielles 	<ul style="list-style-type: none"> • Procédé énergivore • Désactivation possible des électrodes • Corrosion des électrodes • Coût élevé des électrodes
Ultrasons	<ul style="list-style-type: none"> • Réactions de décomposition rapides • Aucun produit chimique requis • Facilité de mise en œuvre et d'automatisation • Mécanisme de dégradation à plusieurs composants par les radicaux OH•, réactions pyrolytiques, effet physique de l'effondrement des bulles 	<ul style="list-style-type: none"> • faible taux de minéralisation et de dégradation • Procédé énergivore • Forte dépendance de la reproductibilité aux types de réacteurs • Le refroidissement est requis • La formation de sous-produits toxiques est possible
Fenton	<ul style="list-style-type: none"> • La minéralisation complète est réalisable • Réactions de décomposition rapides • Aucun apport d'énergie requis 	<ul style="list-style-type: none"> • L'ajout de produits chimiques est requis • Dégradation liée au pH • Les boues d'hydroxyde ferrique doivent être utilisées
photodégradation et Photocatalyse	<ul style="list-style-type: none"> • La minéralisation complète est réalisable 	<ul style="list-style-type: none"> • Non applicable aux eaux usées troubles et colorées • La séparation du photocatalyseur est requise • Dégradation liée au pH
Radiolyse	<ul style="list-style-type: none"> • Réactions de décomposition rapides • Processus non sélectif 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement élevé • Risques d'exposition aux radiations

CHAPITRE I Revue bibliographique

		<ul style="list-style-type: none">• Des matériaux très résistants sont nécessaires
Ozonation	<ul style="list-style-type: none">• Des rendements de dégradation élevés sont réalisables• Réactions de décomposition rapides• Aucun produit chimique requis• Aucun changement de pH pendant le traitement• Effet désinfectant simultané	<ul style="list-style-type: none">• Procédé énergivore• Toxicité de l'ozone et risques d'incendie• Formation de sous produits toxiques

Parmi les POA, les procédés d'oxydation électrochimique se caractérisent par l'utilisation de l'électricité pour traiter les eaux. L'électrochimie est essentiellement basée sur un transfert d'électron qui s'opère lors de l'application d'un courant électrique au cours de l'électrolyse.

Le processus électrochimique a la capacité de traiter une large gamme de composés organiques réfractaires aux traitements biologiques [39].

1.1.8.6. Procédé d'électro-oxydation (EO) :

Depuis quelques décennies, le procédé d'électro-oxydation a été étudié à l'échelle laboratoire et pilote pour traiter les effluents industriels et les eaux usées municipales.

L'oxydation électrochimique, basée sur le transfert d'électrons, est susceptible de s'appliquer à un nombre important de polluants dans un contexte de respect total de l'environnement.

L'électro-oxydation des composés organiques peut viser deux objectifs distincts.

D'une part, la conversion électrochimique où les composés organiques non biocompatibles sont convertis en composés biocompatibles, dans le but de subir un traitement biologique.

D'autre part, la combustion électrochimique conduit à l'oxydation complète des composés organiques sous forme de CO₂ et H₂O grâce à des électrodes.

CHAPITRE I Revue bibliographique

Dans un processus électrochimique, les composés organiques peuvent être oxydés à l'anode mais aussi dans le compartiment cathodique de la cellule via la production à la cathode d'un agent oxydant puissant, ce qui présente un intérêt économique évident. Le réactif d'oxydoréduction, agissant comme un intermédiaire transporteur d'électron entre l'électrode et le polluant à oxyder, peut être généré électro-chimiquement par un processus réversible ou irréversible.

La figure 1 schématise ces différents mécanismes [40].

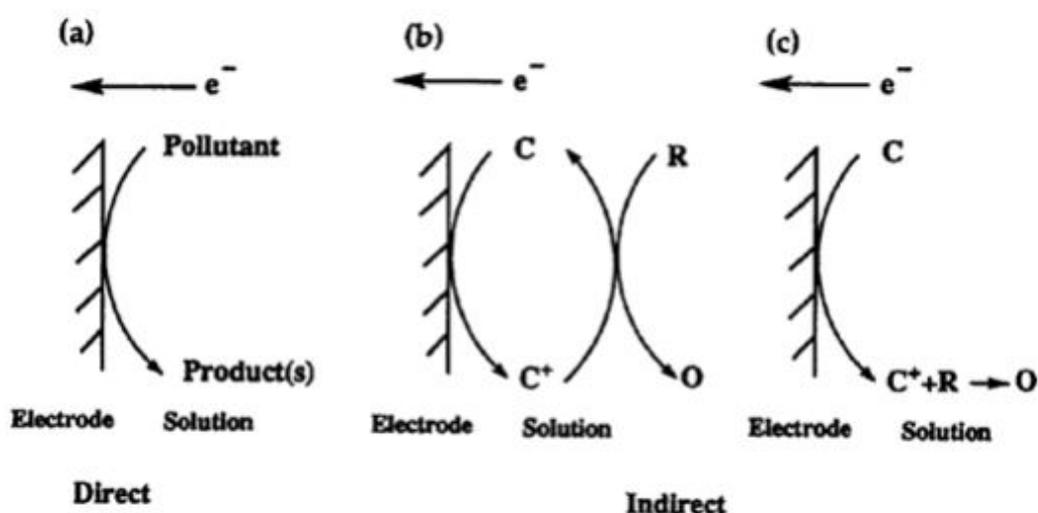


Figure I-6 : Schéma de principe d'une électro-oxydation.

- électro oxydation directe
- électro oxydation indirecte avec processus d'électro génération réversible de l'intermédiaire réactionnel,
-) indirecte avec processus d'électro génération irréversible de l'intermédiaire réactionnel.

Avec :

C+ : espèce électro-active intermédiaire ;

R : polluant à oxyder ;

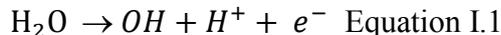
O : produit de l'oxydation de R.

L'oxydation électrochimique OE des composés organiques dans l'eau peut être effectuée par voie directe ou indirecte [41].

❖ *Oxydation directe :*

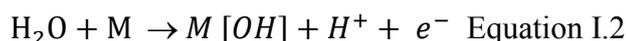
L'OEC débute toujours par l'oxydation directe. Ce phénomène correspond à l'oxydation de la molécule d'eau à la surface de l'anode pour former des radicaux hydroxyles connus aussi sous le nom d'« oxygènes adsorbés » [42].

L'oxydation anodique est la méthode usuelle pour atteindre la minéralisation des contaminants. Cette méthode est basée sur la génération du radical hydroxyle adsorbé (HO·) sur la surface de l'électrode par oxydation de l'eau sur une électrode à grande surtension d'oxygène selon la réaction (Équation I.1) :



L'oxydation se déroule en trois étapes :

- Première étape : production de radicaux hydroxydes sur l'électrode (M); (Équation I.2)



L'effet direct sur une espèce en solution se produit à la surface de l'anode grâce aux radicaux formés par échange d'électron.

- Deuxième étape : oxydation des composés organiques R par les radicaux hydroxydes (Equation I.3)

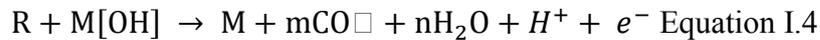


- Troisième étape : dégradation complète des composés organiques (Équation I.4)

Pendant l'oxydation directe, les composés organiques peuvent être oxydés soit par conversion électrochimique ou par combustion électrochimique. Ces deux réactions peuvent se dérouler successivement ou parallèlement.

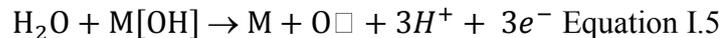
CHAPITRE I Revue bibliographique

La conversion électrochimique résulte en une oxydation partielle des composés organiques difficilement biodégradables tandis que lors de la combustion électrochimique, il se produit une minéralisation complète d'un grand nombre des molécules organiques en CO_2 et H_2O suivant l'équation I.4.



Toutefois des réactions parasites telles que la production d'oxygène peuvent survenir lors de la dégradation des polluants organiques réduisant ainsi l'efficacité du procédé [43].

Il est recommandé d'utiliser des électrodes à forte surtension en oxygène afin de limiter ces réactions parasites (Équation I.5).



❖ *Oxydation indirecte :*

Les méthodes indirectes d'électro-oxydation destinées aux traitements des eaux polluées impliquant l'électro-génération de H_2O_2 . [44]

L'oxydation indirecte quant à elle implique la présence d'ions ou l'ajout d'électrolytes dans la solution à traiter. Au cours de l'oxydation électrochimique indirecte, les agents oxydants sont électro-générés à la surface de l'anode et ensuite ils détruisent les polluants présents dans la solution [45].

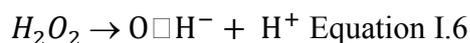
En fonction des composants et de leurs concentrations, les oxydants peuvent être :

- le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2),
- l'acide peroxydisulfurique ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$),
- l'ozone (O_3),
- l'acide hypochloreux (HOCl),
- l'acide hypobromeux (HOBr), etc capables de dégrader les composés organiques [46].

➤ *Oxydation indirecte à la cathode :*

CHAPITRE I Revue bibliographique

L'électro-oxydation des polluants organiques via des mécanismes cathodiques indirects se base sur la production de peroxyde d'hydrogène à la cathode. Ce procédé possède en effet un certain nombre d'avantages tel que l' H_2O_2 est un oxydant puissant pouvant être produit à la cathode dans des conditions douces par réduction de l'oxygène, injecté dans le compartiment cathodique sous forme d'air. Par ailleurs, la réaction d'oxydation par le peroxyde d'hydrogène conduit à la production d'eau, ce qui n'entraîne aucune pollution de l'effluent. Sa forme active majoritaire sera ou H_2O_2 selon que le pH est acide ou basique. L'équilibre de la dissociation du peroxyde est exprimé par la relation (Equation I.6) [47].



Avec : $K=2,4 \cdot 10^{-12} \text{ M}$

K: Constante de vitesse d'oxydation

➤ *Oxydation indirecte à l'anode :*

La principale réaction se produisant à l'anode, dans le cas d'oxydation anodique indirecte est l'oxydation d'intermédiaire des réactifs redox qui se réduiront ensuite dans la solution en oxydant les polluants organiques.

Pour que les processus d'oxydation anodique indirects présentent une efficacité maximale [48], il est nécessaire que:

- le potentiel auquel l'intermédiaire redox oxydant est produit ne soit pas proche de celui correspondant au dégagement d'oxygène, car une grande proportion du courant ne serait pas employée pour la réaction désirée.
- la vitesse d'électro-génération de l'intermédiaire redox oxydant soit élevée.
- la vitesse d'oxydation des polluants organiques par l'intermédiaire redox oxydant soit plus élevée que toute réaction compétitive.
- l'adsorption à la surface de l'anode des polluants soit minimale sous peine d'avoir une vitesse d'électro-génération de l'intermédiaire redox oxydant fortement ralentie.

1.1.8.7. Traitement combinaison :

Ces dernières années, avec l'application des nouvelles technologies dans l'industrie textile et de la teinture, un grand nombre de matières organiques difficilement biodégradables, telles que les boues de PVA, les agents tensioactifs et les nouveaux additifs, entrent dans les eaux usées de la teinture, ce qui entraîne une forte concentration de la matière organique, une composition complexe et changeante et une réduction évidente de la biodégradabilité. Le taux d'élimination de DCO du simple procédé aérobie à boues activées qui a été utilisé pour traiter les eaux usées de la teinture textile a diminué de 70 à 50%, et l'effluent ne peut pas répondre aux normes de rejet. Plus grave encore, un grand nombre d'installations de traitement des eaux usées ne peuvent normalement pas fonctionner, même à l'arrêt. Par conséquent, les processus de combinaison biochimique et physico-chimique ont été progressivement développés. Et son application est de plus en plus répandue [49].

Les types de processus de combinaison sont variés, et les principales adoptions actuelles sont les suivantes :

- Acidification par hydrolyse +Oxydation biologique par contact + Flottation ;
- Anaérobie+Aérobie+Contacteur biologique de charbon ;
- Coagulation+ABR+Fossé d'oxydation ;
- Physico-chimique+Aérobie+UASB.

1.2. Matériaux d'électrodes :

D'après la thermodynamique, les composés organiques réfractaires s'oxydent à des potentiels très élevés, il est donc nécessaire d'utiliser des anodes électrocatalytiques ayant une surtension élevée de dégagement d'oxygène.

1.3. Choix du matériau :

La première idée est de choisir un matériau qui ne se corrode pas ou du moins qui se corrode moins vite dans l'environnement considéré. On peut utiliser des aciers dits inoxydables, des aluminiums, des céramiques, des polymères (plastiques), mais le choix du matériau doit aussi prendre en compte les contraintes de l'application (résistance mécanique, esthétique, etc.). Dans l'absolu, il n'existe pas de matériau réellement inoxydable.

II.1. Introduction

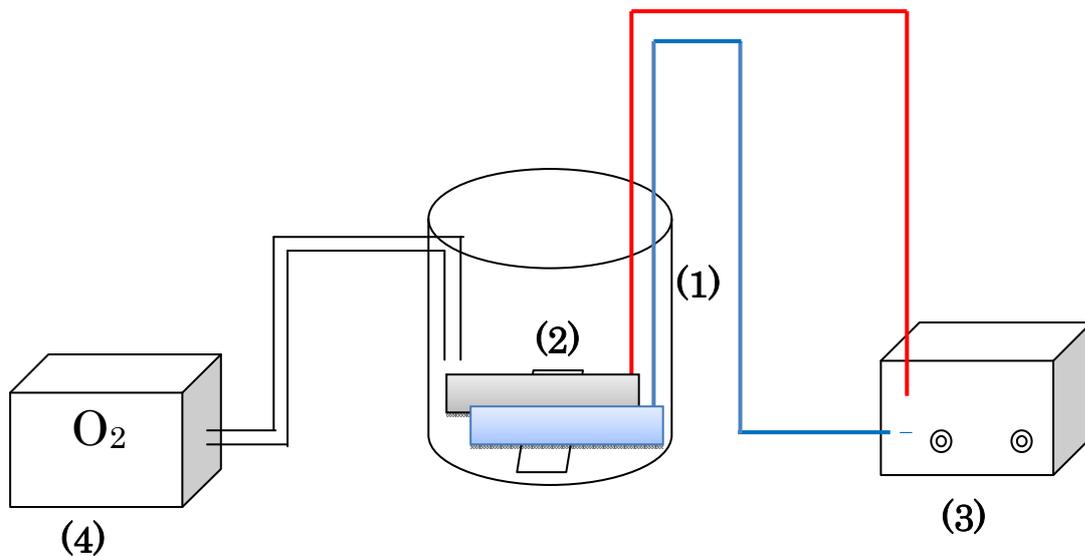
Les essais de traitements faisant l'objectif essentiel de ce travail, se résument en l'application de l'électro Fenton pour la dégradation d'un pesticide « Linuron » dans un réacteur cylindrique à électrodes rectangulaires. Ce travail se focalise aussi sur l'étude de l'effet de certains paramètres sur le procédé étudié.

La méthodologie suivie et l'ensemble de matériels utilisés **Figure II.1**.

II.2. Matériels

II.2.1. Unité de traitement

Dans ce travail, les essais de traitement sont réalisées dans un réacteur électrochimique en statique (**Figure II.1**), ce dernier se compose d'une cellule électrochimique ; un générateur de courant électrique ; un dispositif d'aération; des électrodes.



(1) Cellule d'électro Fenton, (2) les électrodes, (3) générateur, (4) Aérateur.

Figure II.1 Schéma d'une cellule d'électro Fenton.

A. Géométrie et dimensions du réacteur électrochimique

La forme de la cellule électrochimique est généralement de conception cylindrique ou parallélépipédique rectangulaire [50].

Les essais ont été réalisés dans un prototype comportant une cellule électrochimique de forme cylindrique (**Figure II.2**). Cette unité est constituée d'un Bicher en verre de volume de 1L.



Figure II.2. Cellule électrochimique de forme cylindrique.

B. Forme et dimensions des électrodes

Cette unité est munie d'une paire d'électrodes sous formes rectangulaires (**Figure II.3**), de surface égale à $28,5\text{cm}^2$ chacune, elles sont installées horizontalement au milieu et au fond de la cellule électrochimique sur un support en téflon, comportant des encoches qui permettent de varier la distance inter-électrodes.

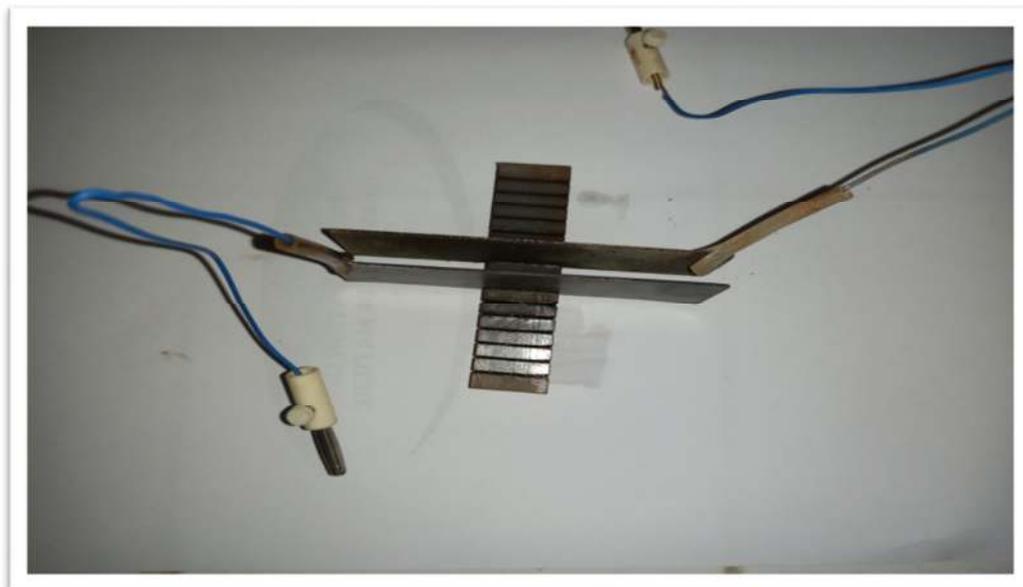


Figure III.3. Paire d'électrodes.

C. Alimentation en courant électrique

L'alimentation en courant est assurée par un générateur à courant continu, fournissant une tension variable entre 0 et 30V et une tension de 0 à 3A. Des fils électriques de diamètre 1 mm assure le transfert du courant de ce dernier vers les électrodes

D. Dispositif d'aération

L'enrichissement du milieu réactionnel en oxygène est assuré par un aérateur à débit d'air variable (**Figure II.4**).



Figure II.4. Dispositif d'aération.

II.2.2. Les produits utilisés

Différents produits chimiques ont été utilisés, leurs caractéristiques et propriétés sont décrites ci-dessous.

II.2.2.1. Linuron

Le linuron est un herbicide agricole de 50% de pureté substitué sélectif hydrophobe, un herbicide systémique utilisé de pré et employé sur une grande variété de cultures vivrières pour commander beaucoup de mauvaises herbes annuelles feuillues et d'herbe.

⇒ Caractéristiques

- solide cristallin incolore avec une solubilité dans l'eau de 75 (mg.l)⁻¹ à 25° C.
- très soluble dans les hydrocarbures.
- modérément soluble dans la plupart des solvants aromatiques.
- soluble dans l'acétone.

En fait, dans des conditions environnementales et en fonction de la température et le pH, les phényles urées peuvent persister au niveau de (mg/l) dans les eaux souterraines pour un certain jour ou semaines. [51]

Tableau II-1 : Identification de la substance Linuron.

Famille chimique	Urées substituées
Nom chimique	Dichloro 3,4 phényle 3 methoxy1-N methyl-1-urée
Formule chimique	C ₉ H ₁₀ C ₁₂ N ₂ O ₂
Masse molaire	249,091g/mol pur
Densité	1,14
Temps de demi-vie	de 30 a 150 jours.

⇒ Toxicité

Le Linuron est considéré comme un composé toxique qui fait partie des substances pour lesquelles des effets endocriniens ont été mis en évidence [52].

Ainsi qu'il agit comme une substance chimique anti androgénique en modifiant la différenciation sexuelle chez les rats mâles [53].

Par conséquent, l'élimination du Linuron des échantillons environnementaux est conseillée. Cependant, le traitement de l'eau contaminée est généralement compliqué, long, coûteux et souvent impossible.

II.2.2.2. Matériaux des électrodes utilisées

Le choix des électrodes utilisées dans ce présent travail, est basé sur la disponibilité et l'efficacité du matériau constituant. Différents matériaux d'électrodes ont été testés pour choisir ceux qui sont adéquats pour l'élimination du polluant en question.

Les différents tests réalisés pour le choix des matériaux sont :

- Anodes en Acier Inoxydable et cathodes de même matériau ;
- Anodes en Acier Inoxydable et cathodes en Aluminium ;
- Anodes en Fer et cathodes en Acier Inoxydable.

Les différents essais ont révélés l'efficacité des électrodes en Fer en anodes et de l'Acier Inoxydable en cathodes.

❖ L'acier inoxydable (inox) :

L'acier inoxydable est devenu indispensable dans de nombreux domaines : ustensiles de cuisine, objets usuels, médecine, chirurgie, bâtiment et travaux publics, construction navale, automobile, aéronautique, outillage, industries mécaniques, agroalimentaires, chimiques, transports, etc. Il est entièrement recyclable. Il est à l'origine de toutes révolutions scientifiques et industrielles grâce à leurs propriétés [54].

Le terme « acier inoxydable » est impropre pour 2 raisons : ce type d'acier contient des éléments d'alliage (chrome, nickel) qui s'oxyde (c'est cette couche d'oxyde qui protège l'acier), et d'autre part, il n'est protégé que pour certains types d'environnement et sera corrodé dans d'autres environnements.

Les aciers inoxydables sont des aciers contenant au minimum 10,5 % de chrome et au maximum 1,2 % de carbone. On distingue les aciers inoxydables qui contiennent moins de 2,5 % de nickel de ceux qui contiennent au moins 2,5 % de nickel. Font partie de cette catégorie :

- ✓ Les aciers résistant à la corrosion;
- ✓ Les aciers résistant à l'oxydation à chaud;
- ✓ Certains aciers résistant au fluage [55].

❖ Le Fer (Acier) :

Le fer est l'élément chimique de numéro atomique 26, de symbole Fe.

Le fer joue un rôle majeur en tant qu'oligoélément. Le fer, combiné à l'oxygène, s'oxyde, suivant les conditions en trois oxydes de fer :

- l'oxyde de fer(II) FeO (« oxyde ferreux ») ;
- l'oxyde de fer(III) Fe₂O₃ (« oxyde ferrique ») ;
- l'oxyde de fer (II, III) Fe₃O₄ (« oxyde magnétique »).

Lorsque le fer est utilisé comme anode, il y a production d'hydroxyde de fer, Fe(OH)_n où n=2 ou 3. Deux mécanismes pour la production d'hydroxyde de fer ont été proposés [56].

Le fer restant le plus utilisé grâce à son prix abordable et à sa forme ionique qui présente une valence élevée.

III.2.2.3. Salinité

La salinité désigne la quantité de sels dissous dans un liquide, notamment l'eau qui est un puissant solvant pour de nombreux minéraux.

Dans nos expériences l'effet de cette dernière est mis en évidence en utilisant du NaCl à différentes concentrations : 1, 1,5 et 2 g/l.

Le chlorure de sodium : composé chimique ionique de formule NaCl. On l'appelle plus communément « Sel de table ».

Cette roche évaporite a l'aspect d'une matière cristalline, sèche et solide.

Tableau II-2 : Propriété de NaCl

Nom	Chlorure de Sodium
Formule	NaCl
Couleur	Cristaux blancs
Masse molaire	58,443 (g/mol)
Masse volumique	2,163 (g/mol)
Densité	8,02
Température de fusion	801 °C
Température d'ébullition	1465°C

II.3. Méthodologie :

Notre objectif consiste en la dégradation d'un pesticide « Linuron » par électro-Fenton avec des électrodes en Fer et en Acier Inoxydable.

Une étude de l'influence de certains paramètres sur le procédé fût entamée.

- ❖ Influence de l'intensité du courant ;
- ❖ Influence de la conductivité (concentration en NaCl);
- ❖ Influence du débit d'air.

Pour ce faire nous avons procédé comme suit :

- Les solutions ont été préparées par dissolution du polluant (Linuron) à une concentration de 50 mg/l et de NaCl à différentes concentrations dans de l'eau déminéralisée;
- Les solutions préparées sont alors agitées magnétiquement pendant 20 mn à une vitesse de 500 rpm.
- Une fois le courant est appliqué, des prélèvements à intervalles de temps égaux (10mn) sont réalisés à l'aide d'une pipette pour l'analyse de l'absorbance.

II.4. Les techniques analytiques :

Parmi les nombreuses méthodes instrumentales utilisées pour déterminer la concentration d'une espèce chimique en solution, les méthodes les plus courantes sont celles basées sur la mesure de l'intensité d'absorption ou d'émission d'un rayonnement électromagnétique par les espèces à doser. Les rayonnements les plus souvent utilisés sont l'ultraviolet (UV), la lumière visible et l'infrarouge (IR). Le domaine du visible et de l'UV a été abondamment étudié depuis longtemps.

Au cours de la réalisation de ce travail, une technique analytique utilisée pour le suivi de la concentration du colorant, cette technique est décrite ci-dessous.

II.4.1. La spectrophotométrie UV-Visible :

La spectrophotométrie est une méthode analytique qui repose sur l'absorption de la lumière par les substances à analyser. En effet, la lumière étant une onde correspondant à la vibration d'un champ électromagnétique et émettant des particules d'énergie lumineuses appelées photons. Le principe de cette méthode est basé sur la loi de Beer-Lambert.

II.4.2. La loi de Beer-Lambert :

L'atténuation d'un faisceau lumineux monochromatique s'exprime par sa transmittance T (ou pourcentage de transmission), définie comme le rapport entre l'intensité lumineuse transmise (I) et l'intensité incidente (I_0) :

$$T = \frac{I}{I_0}$$

On définit également l'absorbance A par :

$$A = -\log T = \log \frac{I_0}{I}$$

Pour un rayonnement monochromatique de longueur d'onde λ , la loi de Beer-Lambert établit une proportionnalité entre la concentration C d'une entité chimique en solution, sa nature chimique (caractérisée par son coefficient d'extinction molaire ϵ), son absorbance A et la longueur du trajet parcouru par la lumière dans la solution (trajet optique l):

$$A = \log \frac{I_0}{I} = \epsilon_{\lambda} l C$$

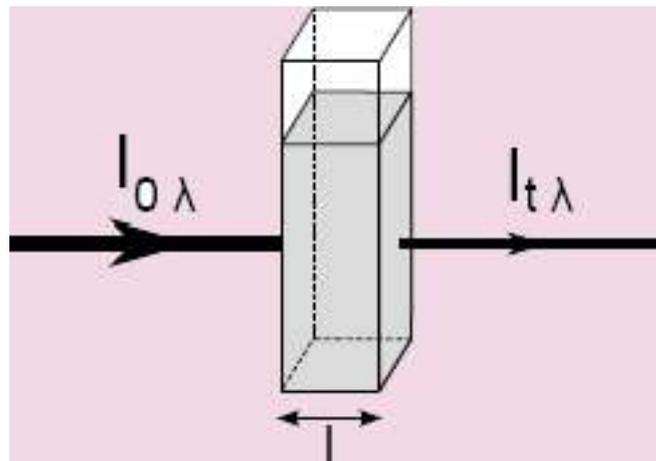


Figure II.5: trajet optique.

D'où :

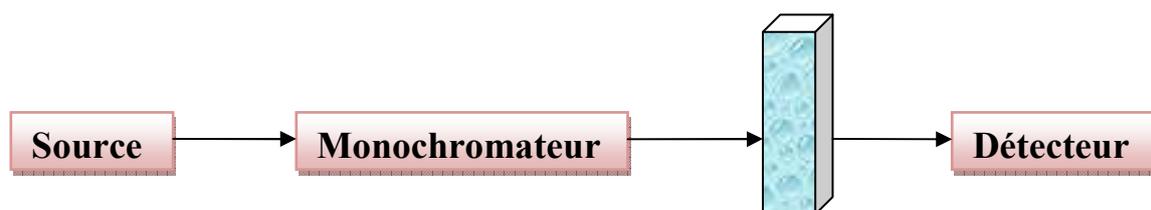
- ✚ A : Absorbance à une longueur d'onde λ ;
- ✚ I_0 : Intensité du faisceau lumineux monochromatique incident ;
- ✚ I : Intensité du faisceau lumineux émergent ;
- ✚ l : Longueur du trajet optique qui correspond à l'épaisseur de la cuve de mesure en cm ;
- ✚ C : Concentration molaire de l'entité absorbante dans la solution en mol.L^{-1} ;
- ✚ ϵ_{λ} : Coefficient d'absorption molaire de la substance en solution à la longueur d'onde λ considérée en $\text{L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$.

La loi de Beer-Lambert n'est vérifiée que si les conditions suivantes sont respectées :

- ❖ Lumière monochromatique ;
- ❖ Solutions très diluées ;
- ❖ Pas de réflexion, diffusion ou fluorescence du faisceau incident.

II.4.3. Principe de la spectrophotométrie UV-Visible :

Le spectrophotomètre est un appareil permettant de mesurer l'absorbance d'une solution, pour différentes longueurs d'ondes. Pour cela, il fait passer un rayon d'une longueur d'onde choisie à travers une cuve contenant la solution à étudier présenté dans la figure IV.6. Les molécules de la solution absorbent plus ou moins le rayon lumineux, on définit alors l'absorbance pour cette longueur d'onde. Le schéma ci-dessous illustre la configuration d'un spectromètre monocanal à optique mono-faisceau.



Cuve contenant l'échantillon à analyser.

Figure II.6 : Schéma de principe d'un spectrophotomètre à mono-faisceau.

II.5. Courbe d'étalonnage de Linuron :

Afin de mesurer les concentrations du Linuron dans des solutions aqueuses, nous avons d'abord effectué un balayage dans le domaine UV-visible pour déterminer la longueur d'onde d'absorption maximale.

Les spectres d'absorption sont représentés sur les figures suivantes :

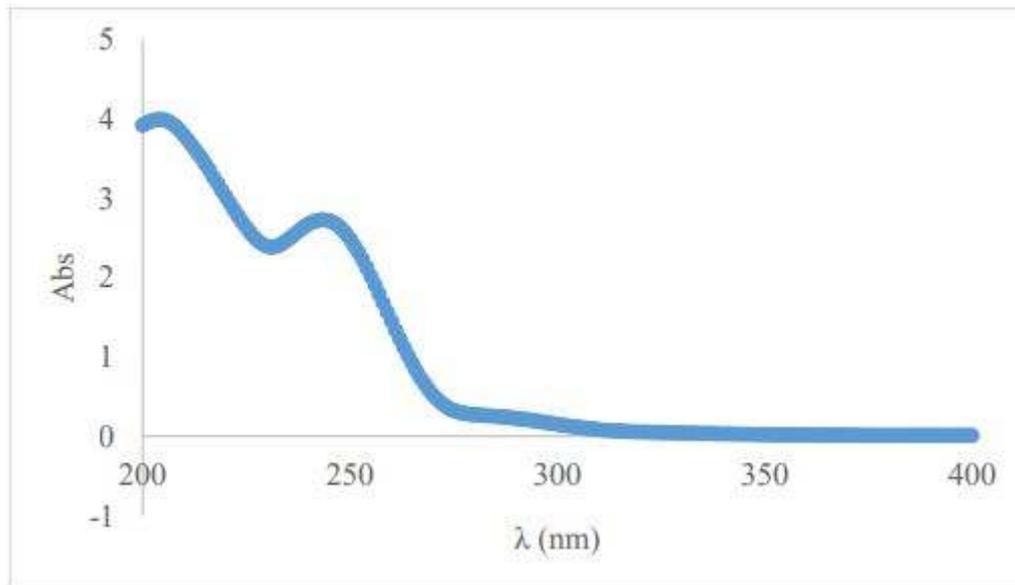


Figure II.7 : Spectre d'absorption UV-visible de Linuron.

On remarque sur la figure (III.1) une bande maximale caractéristique correspondant à une transition de type $\pi \rightarrow \pi^*$ avec un maximum d'absorption se situé à 246 nm, et une autre bande d'absorption à 211 nm avec une transition de type $n \rightarrow \delta^*$.

III.1. Introduction

Diverses techniques électrochimiques permettent de réduire la quantité de composés organiques indésirables en solution comme l'oxydation par le réactif de fenton électro généré [57].

L'électrochimie, par oxydation anodique indirecte sur un matériau d'électrode destinée aux traitements des eaux polluées impliquant l'électro génération de H_2O_2 ont été développées [58].

Ces méthodes sont basées sur la production continue de H_2O_2 en solution par réduction de deux électrons de l'oxygène moléculaire sur des cathodes telles que le graphite, le carbone vitreux réticulé, l'inox ou la cathode à diffusion d'oxygène, selon la réaction III.10.

Dans le but de choisir un procédé électrochimique adéquat pour l'élimination d'un pesticide (Linuron), différents essais ont été réalisés en utilisant différents matériaux d'électrodes, à savoir l'Acier Inoxydable ; l'Aluminium, le Fer.

Après avoir retenu le Fer comme matériau d'anode le plus approprié pour l'élimination de l'herbicide en question, l'électro Fenton s'avère le procédé le plus adéquat pour la dégradation de ce dernier.

Dans le but de tester la performance du procédé « électro Fenton » pour l'élimination de ce polluant, différents paramètres opératoires tels que : l'intensité du courant, la concentration en électrolyte, la concentration en oxygène ont été étudiés. Les résultats obtenus seront discutés dans les sections suivantes.

III.2. Choix du type d'anode :

Plusieurs études ont démontré que le type d'anode influence fortement l'efficacité d'un procédé d'électro-oxydation [59].

Le choix de l'électrode dans un procédé électrochimique est crucial car il influence considérablement la sélectivité et l'efficacité du procédé. Une électrode doit avoir les critères suivants :(1) une stabilité physique et chimique élevée et donc une forte résistance à la corrosion, (2) une conductivité électrique élevée, (3) la présence d'une activité catalytique et (4) un faible rapport entre le coût et la durée de vie [60].

Chapitre III Résultats et discussions

Il faut noter aussi qu'une anode doit avoir un potentiel d'évolution d'oxygène assez élevé (forte surtension en oxygène) afin de produire une concentration de radicaux hydroxyles relativement élevée [61].

Le but principal de ces séries d'essais visait à identifier l'anode la plus appropriée pour l'élimination du pesticide, ce qui nous conduira au choix du procédé d'oxydation électrochimique à appliquer.

Pour ce faire, trois types d'anodes ont été testés : l'acier inoxydable (inox), l'aluminium (Al) et le fer (Fe). Tous les essais ont été réalisés avec l'inox en tant que cathode.

Une intensité de courant de 3 A a été imposée pendant un temps de traitement de 60 min en présence de 1 g/L de NaCl.

Dans ces séries d'essais, l'efficacité de traitement sera évaluée en suivant la cinétique de dégradation par la mesure de l'absorbances et le calcul du rendement d'élimination de Linuron.

Le Tableau III.1 présente les paramètres expérimentaux appliqués lors des essais, ainsi que les principaux résultats correspondants pour chaque type d'anode.

Tableau III.1 : Étude de l'effet des types d'anodes sur la dégradation de Linuron.

<i>NaCl = 1 g/L</i>						
<i>Q air = 1 L/min</i>						
<i>I = 3 A</i>						
	<i>Inox/Inox</i>		<i>Alum/Inox</i>		<i>Fer/Inox</i>	
<i>T</i>	<i>ABS (1)</i>	<i>RND 1</i>	<i>ABS (2)</i>	<i>RND 2</i>	<i>ABS (3)</i>	<i>RND 3</i>
<i>0</i>	<i>0.3507</i>	<i>0</i>	<i>0.3623</i>	<i>0</i>	<i>0.2415</i>	<i>0</i>
<i>10</i>	<i>0.3621</i>	<i>-3.250642</i>	<i>0.4628</i>	<i>-27.73944</i>	<i>0.2473</i>	<i>-2.401656</i>
<i>20</i>	<i>0.3651</i>	<i>-4.106074</i>	<i>0.4465</i>	<i>-23.24041</i>	<i>0.1743</i>	<i>27.826087</i>
<i>30</i>	<i>0.3387</i>	<i>3.421728</i>	<i>0.3844</i>	<i>-6.099917</i>	<i>0.1564</i>	<i>35.238095</i>
<i>40</i>	<i>0.3396</i>	<i>3.1650984</i>	<i>0.4173</i>	<i>-15.18079</i>	<i>0.1554</i>	<i>35.652174</i>
<i>50</i>	<i>0.3435</i>	<i>2.0530368</i>	<i>0.2249</i>	<i>37.924372</i>	<i>0.155</i>	<i>35.817805</i>
<i>60</i>	<i>0.328</i>	<i>6.4727687</i>	<i>0.2915</i>	<i>19.541816</i>	<i>0.1423</i>	<i>41.076605</i>

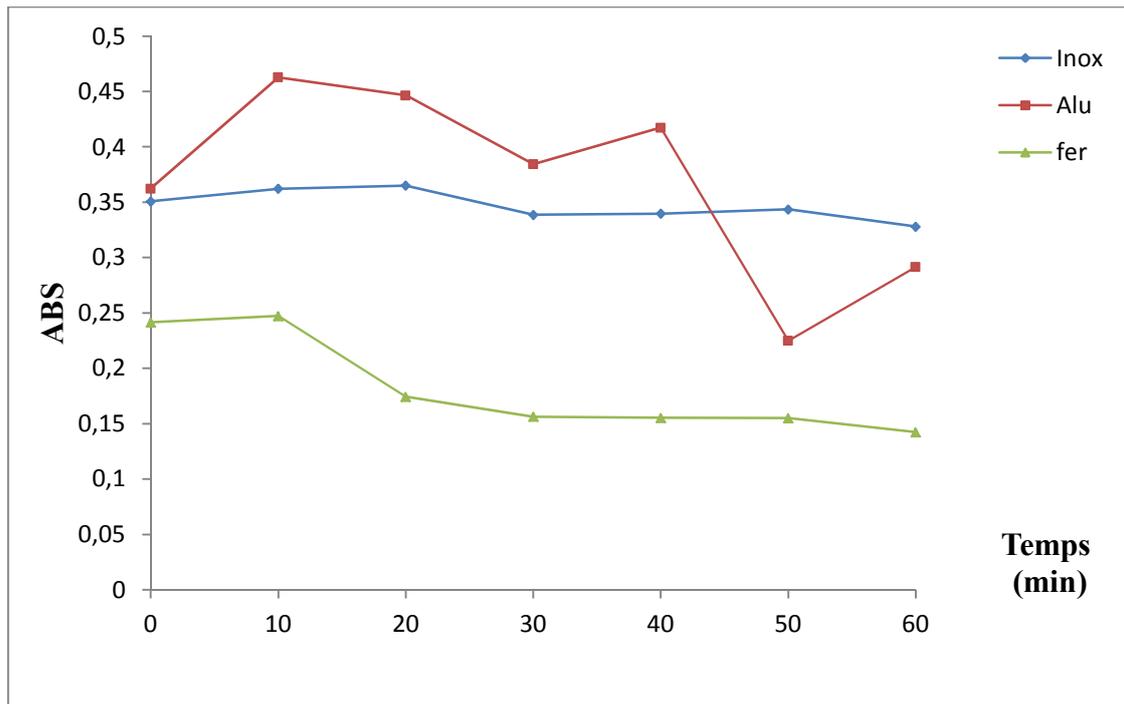


Figure III.1 : La cinétique de dégradation de Linuron dans le milieu aqueux pour les différents matériaux d'anode utilisés.

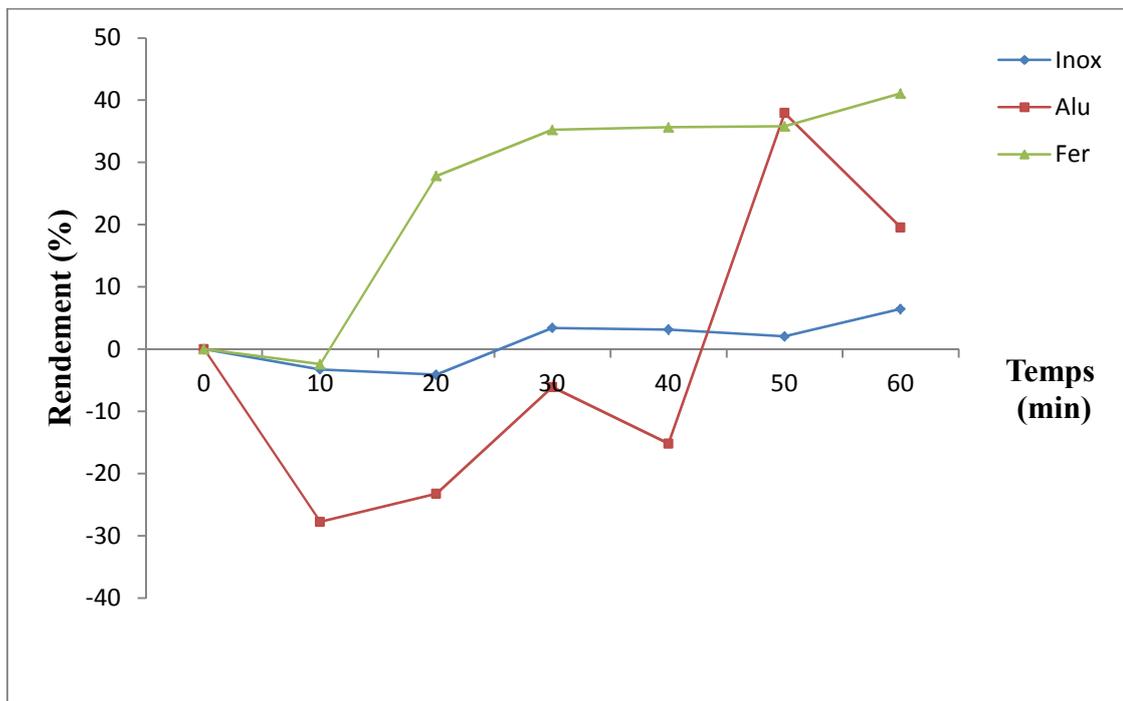


Figure III.2 : Évolution du rendement d'élimination de Linuron en fonction du temps pour les différents matériaux d'électrodes.

D'après la figure III.1 on remarque que la cinétique de dégradation en utilisant des électrodes en aluminium est instable et présente des fluctuations dans le temps avec une augmentation des absorbance jusqu'à 40 min de traitement.

Pour l'électrode en Inox on remarque que la cinétique de dégradation suit une allure pseudo linéaire indiquant une légère stabilité de l'absorbance avoisinant la valeur initiale

L'utilisation des électrodes en Fer révèle une cinétique de dégradation qui suit une allure potentielle descendante, ce qui nous amène à choisir le fer comme matériau constituant l'anode pour la suite de l'étude.

Le procédé d'oxydation électrochimique faisant appel à ce type de matériau est l'électro-Fenton.

III.3. Étude de l'influence de certains paramètres sur l'efficacité d'élimination de Linuron par électro-Fenton :

Après avoir choisi le type d'anode et le procédé d'oxydation électrochimique le plus adéquat pour la dégradation de Linuron, l'étude de l'influence de certains paramètres sur l'efficacité d'élimination de ce dernier par électro-Fenton est étudiée.

Les paramètres étudiés sont l'intensité du courant électrique ; la concentration en électrolyte (NaCl) et la concentration en oxygène. Les résultats obtenus sont présentés comme suit.

III.3.1. Influence de l'intensité de courant :

L'intensité du courant est un paramètre important pour l'efficacité du procédé électro-Fenton car il contrôle la vitesse de production du peroxyde d'hydrogène et le taux de régénération du Fe^{2+} [62]. Ainsi, l'augmentation de l'intensité du courant permet d'accroître la formation du peroxyde d'hydrogène et l'électro-régénération du fer ferrique (Fe^{3+}) en fer ferreux (Fe^{2+}), augmentant ainsi la production des radicaux hydroxyles qui dégradent et minéralisent les composés organiques [63].

En effet, plusieurs travaux ont indiqué que l'augmentation de la densité du courant entraîne une augmentation du taux d'élimination de la turbidité et des polluants présents dans l'effluent et réduit le temps de traitement [64]. L'intensité de courant appliqué influence à la

Chapitre III Résultats et discussions

fois le taux d'enlèvement des polluants, la dissolution des anodes sacrificielles utilisées, la consommation énergétique et par conséquent le coût du procédé [65].

Afin de mettre en évidence l'influence de l'intensité du courant sur l'efficacité d'élimination de Linuron par électro-Fenton, trois intensités ont été testées ($I=1 ; 2 ; 3$ A) et cela pour une concentration de 1 g/l en NaCl et une concentration d'oxygène variante (1 ; 2 ; 3 l/min). Les résultats sont présentés dans le tableau et les figures suivantes.

Tableau III.2 : Rendements d'élimination de Linuron par électro-Fenton pour les différentes intensités.

<i>NaCl = 1 G/l</i>									
	<i>Q air = 1 l/min</i>			<i>Q air = 2 l/min</i>			<i>Q air = 3 l/min</i>		
<i>T</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	-25.852	-15.115	-2.4017	-15.568	-7.2637	16.2908	-23.783	-30.174	14.3582
20	1.03582	12.247	27.8261	-2.0451	23.2338	20.9357	-2.0599	24.7517	33.9056
30	7.33707	15.6883	35.2381	14.0651	42.5871	55.0656	14.4663	41.846	57.5107
40	20.7164	19.6019	35.6522	32.1786	45.5721	59.4076	24.3446	56.5397	78.3847
50	23.565	22.2672	35.8178	45.8264	57.4129	61.5954	36.5169	62.4586	79.126
60	32.9305	23.6842	41.0766	47.7462	57.5622	66.6106	41.0112	69.1225	80.3355

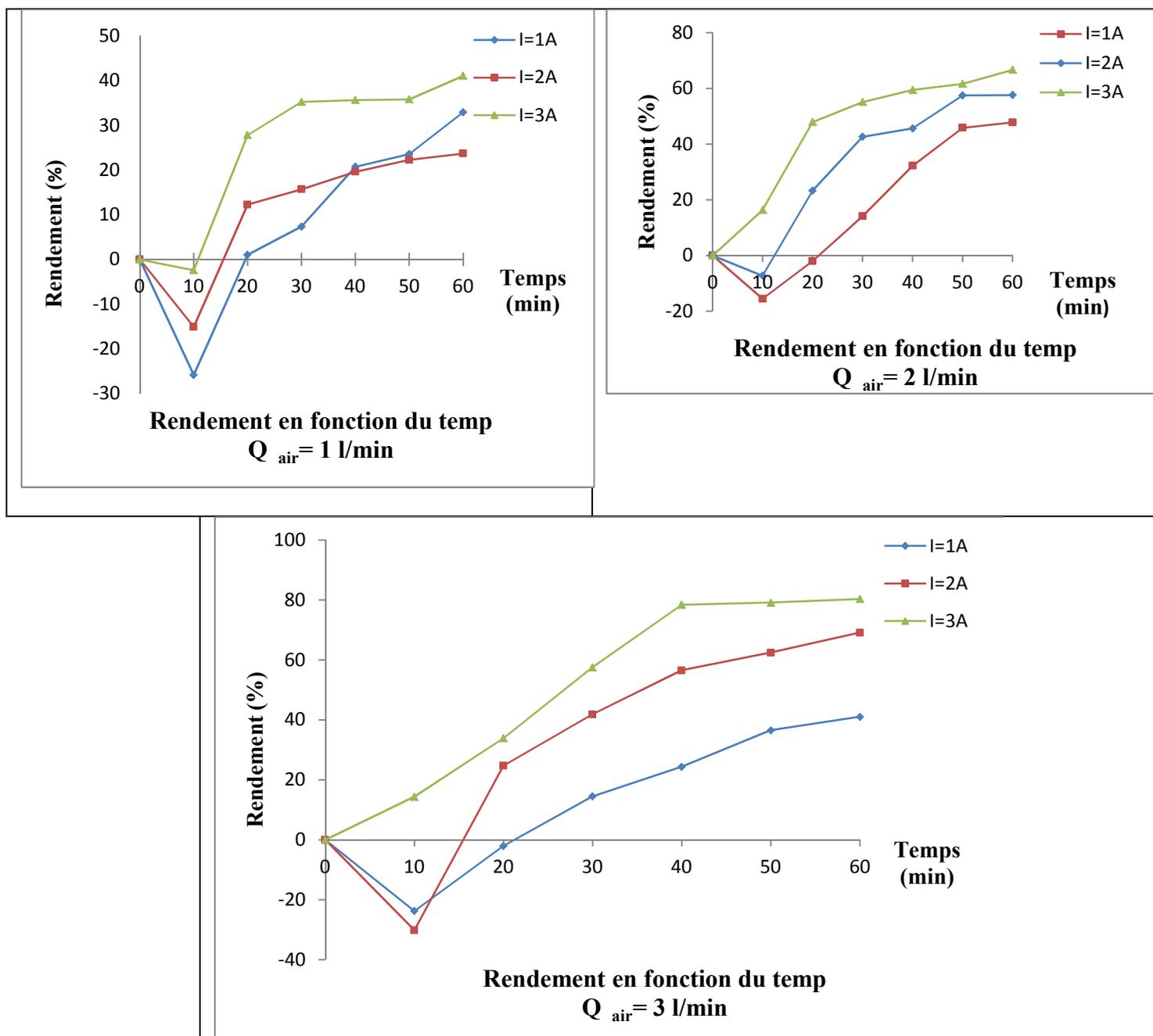


Figure III.3 : Influence de l'intensité du courant sur la dégradation de Linuron dans un milieu aqueux par procédé électro-Fenton, [NaCl]=1 g/l ; Q_{air} = 1-3 L/min.

À partir des résultats enregistrés lors de cette série d'expériences (Tableau III.2), représentés sur les trois (3) graphes dans la figure III.3, on constate un abaissement de l'efficacité de traitement, se traduisant par un rendement négatif durant les dix (10min) premières minutes de traitement. Cela peut être expliqué par la production d'une convection secondaire durant le passage du flux de courant

Chapitre III Résultats et discussions

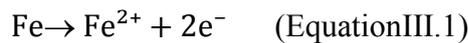
électrique, ce qui entraîne le fer dissous de l'anode horizontalement dans le milieu réactionnel augmentant de ce fait la turbidité.

Par la suite, on remarque que l'efficacité d'élimination du pesticide augmente linéairement avec l'augmentation de l'intensité du courant. Un taux d'élimination de 80% est atteint au bout de 60 min en appliquant une intensité de 3 A.

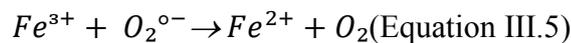
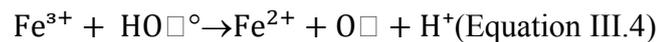
D'une façon générale, la quantité de matière organique dégradée au cours d'un traitement électrochimique est influencée par la densité du courant et la quantité d'électricité appliquée [66].

Cela peut être expliqué par, le fait d'augmenter l'intensité du courant, engendre une accélération de l'oxydation électrolytique de l'anode conduisant ainsi au dégagement d'une quantité plus importante en ions ferreux (Fe^{2+}) (Équation III.1) qui vont à leur tour former un plus grand nombre de radicaux hydroxyles (OH^\bullet) (Équation III.2) responsables de la dégradation du polluant (Équation I.3).

Réaction anodique :



L'ion Ferrique Fe^{3+} produit peut être réduit par l'excès de peroxyde d'hydrogène pour reformer l'ion ferreux selon la réaction suivante :



Il est à noter aussi que l'utilisation d'un courant très élevé entraîne une production de dioxygène très importante qui augmente le coefficient de transfert de matière [67].

Ainsi, l'intensité optimale qui sera retenue pour l'élimination de Linuron sera de 3 A pour un temps de traitement de 60 min.

III.3.2. Influence de la concentration de l'électrolyte:

La conductivité électrique de l'eau est un facteur qui influence la qualité de traitement électrolytique de l'eau à traiter puisqu'il facilite le passage du courant électrique et assure un bon transfert des ions à travers la solution [68].

En effet, l'efficacité du courant électrique ainsi que la tension aux bornes des électrodes et la consommation énergétique dépendent de la conductivité électrique de la solution à traiter. Afin d'améliorer la conductivité d'un effluent, l'ajout d'électrolyte s'avère nécessaire [69].

L'efficacité d'un procédé électrochimique dépend fortement du type de l'électrolyte utilisé [70]. Parmi les électrolytes support, les plus communément employés dans les études de dégradation des composés organiques sont les acides tels que l'acide sulfurique et perchlorique [71] ou phosphorique [72]. Le chlorure de sodium « NaCl » est aussi employé dans des travaux en raison de faible pouvoir polarisant et complexant de l'ion hypochlorite [73].

Les électrolytes peuvent affecter l'efficacité d'élimination pendant le processus EF ; à mesure que la concentration d'électrolyte augmente, l'ion et l'électron dans une solution seront plus flexibles ou réduiront la résistance de la solution, ce qui donne aux Fe^{2+} une plus grande chance de réagir avec H_2O_2 [74].

Une attention particulière devrait être accordée aux interactions entre les sels avec des radicaux hydroxyles générés à la surface de l'anode.

Pour évaluer l'influence de la concentration des sels sur l'efficacité du procédé électro-Fenton pour l'élimination de Linuron, différentes concentrations en NaCl (1 ; 1,5 et 2 g/l) ont été testées. Les différents résultats obtenus sont portés dans le Tableau III.2 et la figure III.4.

Chapitre III Résultats et discussions

Tableau III.3 : Rendements d'élimination de Linuron par électro-Fenton pour les différentes concentrations en NaCl.

<i>Q_{air} = 1 L/min</i>									
	<i>NaCl = 1 g/l</i>			<i>NaCl = 1.5 g/l</i>			<i>NaCl = 2 g/l</i>		
<i>T</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>
0	0.2317	0.2964	0.2415	0.3309	0.2389	0.2422	0.2294	0.2627	0.2894
10	0.2916	0.3412	0.2473	0.2404	0.2417	0.2529	0.2874	0.2759	0.2601
20	0.2293	0.2601	0.1743	0.2938	0.2325	0.1938	0.2216	0.204	0.1926
30	0.2147	0.2499	0.1564	0.2828	0.1746	0.1372	0.1681	0.1792	0.1272
40	0.1837	0.2383	0.1554	0.275	0.1605	0.1348	0.1407	0.1774	0.1152
50	0.1771	0.2304	0.155	0.2273	0.1483	0.1301	0.1395	0.1697	0.0974
60	0.1554	0.2262	0.1423	0.2192	0.1432	0.1018	0.1357	0.1462	0.0641

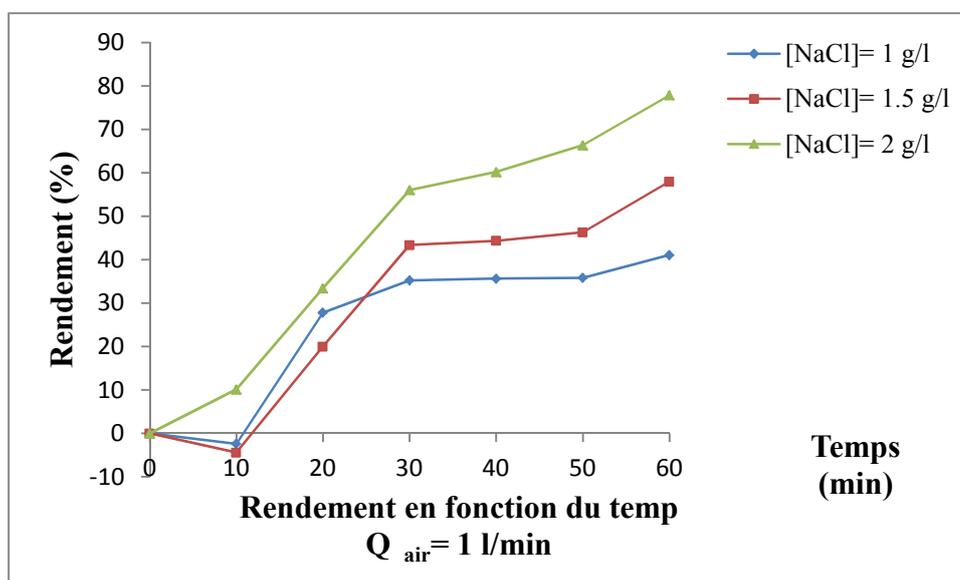


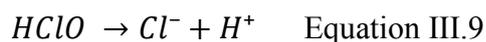
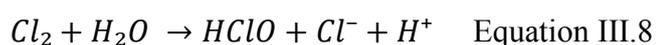
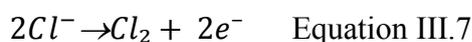
Figure III.4 : Influence de la concentration en NaCl sur l'efficacité d'élimination de Linuron par électro-Fenton, I=1 ; 2 et 3A; Q_{air} = 1/min.

D'après la figure (III.4) et le tableau (III.3), on constate que le taux d'élimination du Linuron croît avec l'augmentation de la concentration en NaCl. En effet un meilleur rendement ($R=77,85\%$) est atteint en ajoutant 2 g/l de NaCl, par contre on remarque que seulement 41,07 % de Linuron a été dégradé pour une concentration de 1,5 g/l.

Les résultats obtenus ont prouvé que l'augmentation de la concentration en NaCl conduit à améliorer l'efficacité de traitement, ce qui est également énoncée dans la littérature.

Cela peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la concentration de NaCl améliore la conductivité, ce qui diminue la tension, qui elle-même favorise la réaction de la production de H_2O_2 à la cathode et cela provoque la dégradation du pesticide par oxydation indirecte via Cl^- et H_2O_2 .

D'autre part, il est à signaler que l'ajout d'une quantité importante de NaCl, favorise l'oxydation anodique des ions de Cl^- qui forme du chlorure gazeux (Équation III.7) et qui est généralement suivie d'une dismutation en solution qui conduit à la formation d'acide hypochloreux ($HClO$)(Équation III.8). Cependant le chlore formé peut agir avec les composés organiques pour former des organochlorés (Équation III.3) [75-76].



À ce stade de l'étude, les meilleures conditions qui peuvent être retenues sont : une intensité de courant de 3 A et une concentration de NaCl = 2 g/l.

III.3.3. Influence du débit d'air ajouté:

Généralement, on peut distinguer deux groupes de procédés électrochimiques pour produire les radicaux hydroxyles, soit directement (oxydation anodique), soit indirectement via le réactif de Fenton (électro-Fenton). Dans le deuxième cas, il s'agit d'un couplage entre la réaction de Fenton et l'électrochimie [77].

Les espèces réactives de l'oxygène (ERO) sont des espèces chimiques réactives contenant de l'oxygène, telles que le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) ou un radical hydroxyle

Chapitre III Résultats et discussions

(•OH). Ces espèces se forment à l'électrode par décharge d'eau ou réduction de l'oxygène. Le rôle des ERO (comprenant •OH, H₂O₂ et •O) est important pour la désinfection.

Principalement, l'électro fenton génère **in situ** les réactif nécessaire à la production des radicaux hydroxyles en utilisent l'énergie électrique. Le peroxyde d'hydrogène est produit par la réduction de l'oxygène dissous dans la solution (Équation III.10). L'oxygène est fourni à la solution par barbotage de l'air comprimé.



Du fait que l'électro fenton est basé sur les radicaux hydroxyles (OH), le plus important réactif non sélectif et responsable de l'oxydation de n'importe quel composée organique.

Une fois le réactif de Fenton produit in situ, la réaction classique de Fenton a lieu dans le milieu homogène pour générer des radicaux (•OH) (Équation III.1).

Pour cela on a opté pour un ajout variable de débit d'air et les résultats sont portés dans le tableau 3.6 suivant.

Tableau III.7 : Rendements d'élimination de Linuron par électro-Fenton pour les différents débits d'air injectés.

<i>NaCl = 2g/l</i>									
	<i>Q air = 1 L/min</i>			<i>Q air = 2 L/min</i>			<i>Q air = 3 L/min</i>		
<i>T</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>	<i>I = 1</i>	<i>I = 2</i>	<i>I = 3</i>
<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>10</i>	<i>-25.283</i>	<i>-5.0247</i>	<i>10.1244</i>	<i>-9.3155</i>	<i>-7.8424</i>	<i>25.1174</i>	<i>-34.244</i>	<i>18.8152</i>	<i>0.13274</i>
<i>20</i>	<i>3.40017</i>	<i>22.3449</i>	<i>33.4485</i>	<i>16.302</i>	<i>22.439</i>	<i>53.89</i>	<i>-0.6935</i>	<i>37.17</i>	<i>51.0177</i>
<i>30</i>	<i>26.7219</i>	<i>31.7853</i>	<i>56.047</i>	<i>20.3246</i>	<i>35.2345</i>	<i>56.3045</i>	<i>33.3767</i>	<i>39.3493</i>	<i>63.2743</i>
<i>40</i>	<i>38.6661</i>	<i>31.7853</i>	<i>56.047</i>	<i>20.3246</i>	<i>35.2345</i>	<i>56.3045</i>	<i>33.3767</i>	<i>39.3493</i>	<i>63.2743</i>
<i>50</i>	<i>39.1892</i>	<i>35.4016</i>	<i>66.3442</i>	<i>48.9414</i>	<i>54.5216</i>	<i>68.3769</i>	<i>61.4218</i>	<i>47.4217</i>	<i>78.8053</i>
<i>60</i>	<i>40.8457</i>	<i>44.3472</i>	<i>77.8507</i>	<i>53.8814</i>	<i>54.6717</i>	<i>79.9463</i>	<i>65.6264</i>	<i>50.8287</i>	<i>82.3009</i>

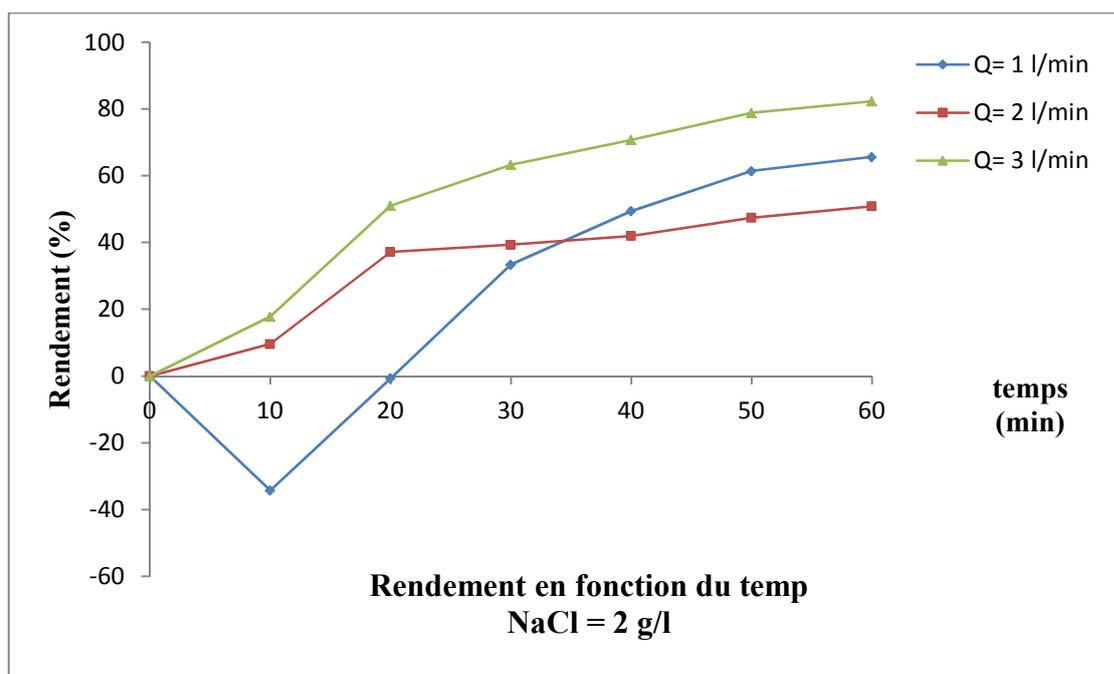
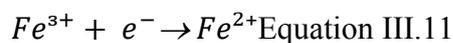


Figure III.5 : Influence du débit d'air sur l'efficacité d'élimination de Linuron par électro-Fenton, $I = 3A$; $[NaCl] = 2 \text{ g/l}$.

L'effet du débit d' O_2 sur le traitement du Linuron a été étudié en faisant varier le débit d'air injecté dans la gamme de 1 ;2 et 3 l/min, comme le montre le Figure III.5. L'augmentation du débit d' O_2 pourrait augmenter la concentration de l'oxygène dissous et favoriser le taux de transfert de masse de ce dernier en solution, qui est propice à l'électro-génération de H_2O_2 [78]. Selon la Figure III.5, une diminution spectaculaire de Linuron a été observé à un débit d' O_2 plus élevé (3 l/min), ce qui peut s'expliquer par la contribution de l'oxygène dissous à l'accélération de la vitesse de formation de H_2O_2 et Fe^{2+} par voie électro-fenton qui sont démontré dans l'équation III.10 et l'équation III.11 suivante :



Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté les résultats des différents essais réalisés dans le but de :

En premier lieu ; Choisir un matériau d'électrode adéquat pour l'élimination du pesticide en question et de ce fixé sur le procédé électrochimique à appliquer.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité des électrodes en fer, d'où le choix de ce dernier comme matériau de l'anode et l'électro-Fenton comme procédé d'oxydation avancée à appliquer.

En second lieu ; Étudier l'influence de certains paramètres sur l'efficacité d'élimination de Linuron par électro-Fenton. Les paramètres choisis et leurs intervalles de variation sont les suivantes :

- Intensité du courant électrique [1 ; 2 et 3 A] ;
- Concentration en électrolyte (NaCl) [1 ; 1.5 et 2 g/l] ;
- Débit d'air (apport en oxygène) [1 ; 2 et 3 l/min].

Les résultats obtenus, ont montré une forte linéarité entre les paramètres étudiés et l'efficacité d'élimination du pesticide par électro-Fenton. Les meilleurs rendements d'abattement ont été enregistrés avec une intensité de 3A ; une concentration en NaCl de 2 g/l et un débit d'air injecté de 3 l/min.

Conclusion générale :

Ces dernières années, les recherches se sont concentrées sur le développement des procédés électrochimiques permettant de traiter des eaux fortement chargées en matières organiques. Ce type de procédé se base principalement sur la production d'oxydants assez puissants capables de dégrader la matière organique.

L'objectif de cette étude était de choisir un procédé d'oxydation électrochimique adéquat pour l'élimination d'un pesticide de classification « herbicide » le Linuron de 50% de pureté. Pour ce faire, une multitude de matériaux constituant l'anode ont été testés, à savoir l'Aluminium ; l'acier Inoxydable et le Fer. Les résultats obtenus ont montré une apparente efficacité des anodes en Fer, d'où le choix de ce dernier comme matériau de l'anode à utiliser. L'électro-Fenton est un procédé électrochimique, qui a prouvé son efficacité dans la dégradation des polluants organiques en général et des pesticides en particulier. Ce dernier dont le réactif le plus important et le Fer (Fe^{2+}) s'avère le procédé le plus adéquat dans notre cas.

Une fois le matériau d'anode et le procédé électrochimique sont choisis, un intérêt a été donné pour l'étude de l'effet de certains paramètres opératoires (intensité de courant ; concentration d'électrolyte et débit d'air) sur l'efficacité de dégradation du pesticide en question.

L'oxydation électro-Fenton de Linuron, a été étudiée à l'aide d'une anode en fer et cathode en inox, il est à noter aussi que les différents essais ont été réalisés dans un système statique et à température ambiante.

D'après les résultats, il est apparu que la dégradation du Linuron par électro-Fenton (Fer/Inox) suit une cinétique potentielle descendante, atteignant 82% en imposant un courant de 3 A ($I = 3 \text{ A}$) pour une concentration en NaCl de 2 g/l ($[\text{NaCl}] = 2 \text{ g/l}$) et pour un débit d'air injecté de 3 l/min ($Q_{\text{air}} = 3 \text{ L/min}$). Ces valeurs maximales, démontrent une certaine proportionnalité entre le taux d'élimination du pesticide en question et les paramètres étudiés.

L'intensité du courant appliqué joue un rôle important sur le taux de la minéralisation. En effet, une intensité plus élevée de courant peut produire un plus grand nombre de radicaux hydroxyles à l'anode.

L'électrolyte utiliser (NaCl) dégage des ions chlorures Cl^- , qui subissent une oxydation anodique conduisant à la formation in situ de HClO capable de modifier la structure des molécules organique et inorganique.

L'apport d'air peut également contribué à l'amélioration de l'efficacité du procédé électro-Fenton. Cela peut s'expliquer par la contribution de l'oxygène dissous à l'accélération de la vitesse de formation de H_2O_2 et Fe^{2+} par vois électro fenton.

Perspectives :

A titre de perspectives, d'autres travaux peuvent être envisagés :

- ✓ Étude de l'influence d'autres paramètres comme :
 - La nature (d'autres matériaux) ; la position ; la dimension ; la connexion ; le nombre et la géométrie des électrodes ;
 - Le pH ;
 - La concentration initiale du polluant ;
 - Le temps de séjour ;
 - La température ;
 - La nature de l'électrolyte ;
 - La géométrie du réacteur ;
 - L'hydrodynamique ;
 - Etc. ...
- ✓ Caractérisation et valorisation de la boue formée lors du traitement;
- ✓ Étude comparative avec d'autres techniques de traitement ;
- ✓ Combinaison avec d'autres procédés ;
- ✓ Etc. ...

Bibliographie

Bibliographie

- [1]: Moussaoui.K, Boussahel.R, Tchoulak.Y, Haouchine.O, Benmami.M., Dalachi.N, Utilisation, évaluation et impacts des pesticides en Algérie. In : Journée Mondiale de l'Environnement. École National Polytechnique, Alger (Algérie).2002.
- [2] : J.P. Butault, N. Delame, F. Jacquet, G. Zardet, « L'utilisation des pesticides en France : état des lieux et perspectives de réduction », Socio-Économiques NESE, no 35, p. 7-26, 2011.
- [3] : Anglada A, Urriaga A & Ortiz I (2009a) Contributions of electrochemical oxidation to waste water treatment: fundamentals and review of applications. J. Chem. Technol. Biotechnol. 84(12):1747-1755.
- [4] : University of Reading. Environmental challenges in farm management – pesticides. Reading, UK. [Consulté le 20 Janvier 2019]. <http://www.ecifm.rdg.ac.uk/pesticides.htm>.
- [5] : R. Fourche, « Contribution à l'histoire de la protection phytosanitaire dans l'agriculture française, 1880-1970 », Rural. Sci. Soc. Mondes Ruraux Contemp., no 15, juill. 2004.
- [6] : J.P. Butault, N. Delame, F. Jacquet, et G. Zardet, « L'utilisation des pesticides en France : état des lieux et perspectives de réduction », Socio-Économiques NESE, no 35, p. 7-26, 2011.
- [7]: P. Manual, Crop Protection Publication, 10e edition éd., London, UK: British Crop Protection Council, The Royal Society of Chemistry, 1995
- [8]: J.BOLAND ; I.KOOMEN ; J.VAN LIDTH ; D.E.JEUDE ; J.OUDEJANS. La pesticide composition, utilisation et risques. Editions Agrodok (2004).
- [9] : Jean-François Bourque, 1999.
- [10] : C.G-B. MARGOUM. Thèse de doctorat Reims champagne-ardenne 2010
- [11] : K.EL MRABET, thèse de doctorat .Paris(2006)
- [12] :
- [13] : Giroux, Isabelle, Contamination de l'eau par les pesticides dans les régions de culture de maïs et de soya au Québec, Résultats des campagnes d'échantillonnage 1999, 2000 et 2001, et évolution temporelle de 1992 à 2001 par Ministère de l'Environnement, Gouvernement du Québec, décembre 2002, pdf.

- [14] : McMurray T.A., Dunlop P.S.M., Byrne J.A., 2006. The photocatalytic degradation of atrazine on nanoparticulate TiO₂ films. *J. Photochem. Photobio. A: Chem.*, 182, 43-51.
- [15] : Ministère de la Santé et de la Solidarité, *Les pesticides dans l'eau potable*.
- [16] : Hercegová A., Dömötöróvá, M.; ans Matisová, E. *J Chromatogr A* 2007, 1153 (1-2), 54-73.
- [17] : K. Kolmetz, A. Sidney Dunn, A.M. Som, C. Phaik Sim and Z. Mustaffa, Benchmarking Waste Water Treatment Systems. <http://www.klmtechgroup.com/PDF/Articles/articles/WWT-Paper-Expanded.pdf>.
- [18]: R. Arntzen, Gravity Separator Revamping, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2001.
- [19]: R. Ayeche, « Treatment by Coagulation-Flocculation of Dairy Wastewater with the Residual Lime of National Algerian Industrial Gases Company (NIGC-Annaba) », *Energy Procedia*, vol. 18, p. 147-156, 2012.
- [20]: T. A. Kurniawan, G. Y. S. Chan, W.-H. Lo, et S. Babel, « Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals », *Chem. Eng. J.*, vol. 118, no 1-2, p. 83-98, mai 2006.
- [21]: J. A. O. Méndez, J. A. H. Melián, J. Araña, J. M. D. Rodríguez, O. G. Díaz, et J. P. Peña, « Detoxification of waters contaminated with phenol, formaldehyde and phenol-formaldehyde mixtures using a combination of biological treatments and advanced oxidation techniques », *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 163, p. 63-73, févr. 2015
- [22]: M. Zhang, G. Liu, K. Song, Z. Wang, Q. Zhao, S. Li, et Z. Ye, « Biological treatment of 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) red water by immobilized anaerobic-aerobic microbial filters », *Chem. Eng. J.*, vol. 259, p. 876-884, janv. 2015.
- [23]: Zhang X, Li X, Zhang Q, Peng Q, Zhang W & Gao F (2014) New insight into the biological treatment by activated sludge: the role of adsorption process. *Bioresour. Technol.* 153:160-164.
- [24]: Sheng, H.L.etMing, L.C.,Treatment of textile wastewater by chemical methods for reuse, *Water research*, vol.31, 1997.

- [25]: Staples CA, Williams JB, Craig GR & Roberts KM (2001) Fate, effects and potential environmental risks of ethylene glycol: a review. *Chemosphere* 43(3):377-383.
- [26]: Switzenbaum MS, veltman S, Mericas D, wagoner b & schoenberg t (2001) Best management practices for airport deicing stormwater *Chemosphere* 43:1051-1062.
- [27]: Fujita Y, Hata T, Nakamaru M, Iyo T, Yoshino T & Shimamura T (2005) A study of boron adsorption onto activated sludge. *Bioresour. Technol.* 96(12):1350-1356.
- [28]: Eldyasti A, Chowdhury N, Nakhla G & Zhu J (2010) Biological nutrient removal from leachate using a pilot liquid–solid circulating fluidized bed bioreactor (LSCFB). *J. Hazard. Mater.* 181(1):289-297.
- [29]: **Sheng, H.L. et Ming, L.C.**, Treatment of textile wastewater by chemical methods for reuse, *Water research*, vol.31, 1997.
- [30]: Y. Han, G. Hwang, D. Kim, S. Park, et H. Kim, « Porous Ca-based bead sorbents for simultaneous removal of SO₂, fine particulate matters, and heavy metals from pilot plant sewage sludge incineration », *J. Hazard. Mater.*, vol. 283, p. 44-52, janv. 2015.
- [31]: H. Takigami, M. Watanabe, et N. Kajiwara, « Destruction behavior of hexabromocyclododecanes during incineration of solid waste containing expanded and extruded polystyrene insulation foams », *Chemosphere*, vol. 116, p. 24-33, déc. 2014.
- [32]: M.A. Oturan, J.J. Aaron, « Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications », *Environmental Science and Technology*, volume 44, pp. 2577-2641, 2014).
- [33]: M. Shestakova, *Ultrasound-assisted Electrochemical Treatment of Wastewaters Containing Organic Pollutants by Using Novel Ti/Ta₂O₅-SnO₂ Electrodes*, Lappeenranta teknillinenyliopisto-Digipaino 2016, Lappeenranta, 2016. (Thesis).
- [34]: Parsons S (2004) *Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment*. IWA publishing,
- [35]: Sevimli MF (2005) Post-Treatment of Pulp and Paper Industry Wastewater by Advanced Oxidation Processes. *Ozone: Science & Engineering* 27(1):37-43.

- [36]: Ledakowicz S et al. (2001) Biodegradation, decolourisation and detoxification of textile wastewater enhanced by advanced oxidation processes. *Journal of biotechnology* 89(2):175-184.
- [37]: Luck F et al. (1997) Destruction of pollutants in industrial rinse waters by advanced oxidation processes. *Water Science and Technology* 35(4):287-292.
- [38]: I. Levchuk, A. Bhatnagar, M. Sillanpaa, Overview of technologies for removal of methyl tert-butyl ether (MTBE) from water, *Science of the Total Environment*. 476-477 (2014) 415-433.
- [39]: Radjenovic J et al. (2015) Challenges and Opportunities for Electrochemical Processes as Next Generation Technologies for the Treatment of Contaminated Water. *Environmental Science & Technology* 49(19):11292-11302.
- [40]: Edelahi M.C, thèse de doctorat, Université de Marne-La-Vallée, (2004)
- [41]: N. A. Salles, F. Fourcade, F. Geneste, D. Floner, A. Amrane, Relevance of an electrochemical process prior to a biological treatment for the removal of an organophosphorous pesticide, phosmet, *Journal of Hazardous Materials*, 181 (2010) 617- 623.
- [42]: Comninellis C (1994) Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochim. Acta* 39(11):1857-1862.
- [43]: Drogui P et al. (2007) Review of electrochemical technologies for environmental applications. *Recent patents on engineering* 1(3):257-272.
- [44]: Brillas et al. 1997
- [45]: Anglada Á et al. (2009) Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 84(12):1747-1755.
- [46]: Canizares P et al. (2002) Electrochemical oxidation of aqueous phenol wastes using active and nonactive electrodes. *Journal of the Electrochemical Society* 149(8):D118-D124.
- [47]: K. Rajeshwar, Ibanez J. G., Swain G. M., *Electrochemistry and the environment*, *Journal of Applied Electrochemistry*, 24, (1994) 1077.

[48]: Rajeshwar K & Ibanez JG (1997) Environmental electrochemistry: Fundamentals and applications in pollution sensors and abatement. Academic Press, Leffrang., 1995

[49] : Sheng-Jie, You., Dyi-Hwa, Tseng. et Jun-Yu, Deng., Using combined membrane processes for textile dyeing wastewater reclamation, Desalination, vol.234, pp.426–432, 2008.

[50]: (BRANDON N.P., KELSALL G.H., LEVINE S. AND SMITH A.L.; 1985. Interfacial electrical properties of electrogenerated bubbles. J. Appl. Electrochem., 18 ; 485-493.)

[51] : D. Chaara, F. Bruna, K. Draoui, M.A. Ulibarri, C. Barriga, I. Pavlovic, Study of key parameters affecting adsorption of the herbicide linuron on organohydrocalcites. 2012.

[52] : Petersen, G., D. Rasmussen, et al. (2007). Study on enhancing the Endocrine Disrupter priority list with a focus on low production volume chemicals, DHI: 252.

[53] : C. Lambright, J. Ostby, K. Bobseine, V. Wilson, A.K. Hotchkiss, P.C. Mann, L.E. Gray, Cellular and molecular mechanisms of action of linuron: an anti-androgenic herbicide that produces reproductive malformations in male rats. Toxicologie. Sci, 56, p.389–399, 2000.

[54] : H. LITEM, « caractérisation avec rayonnement X des Revêtements Durs Sur des Substrats en Acier », Mémoire de Master, Spécialité : Rayonnement, Spectroscopie et Optoélectronique, Univ Kasdi Merbah Ouargla, 2012.

[55] : G. Murry, « Aide-mémoire Métallurgie 2^e édition Métaux • Alliages • Propriétés, Dunod », Paris, 2004, 2010.

[56] : Balcioglu I.A., Arslan I., Sacan M.T., 2001. Homogenous and heterogenous advanced oxidation of two commercial reactive dyes. Environmental Technology 22, 813-822.

[57] : E. Brillas, B. Boye, I. Sirés, J.A. Garrido, R.M. Rodríguez, C. Arias, P.L. Cabot, et C. Cominellis, Electrochemical destruction of chlorophenoxy herbicides by anodic oxidation and electro-Fenton using a boron-doped diamond electrode, Electrochim. Acta. 49, (2004) 4487.

[58] : (Brillas et al. 1997).

[59] : Brillas E et al. (2009) Electro-Fenton Process and Related Electrochemical Technologies Based on Fenton's Reaction Chemistry. Chemical Reviews 109(12):6570-6631.

Komtchou S et al. (2015) Removal of carbamazepine from spiked municipal wastewater using electro-Fenton process. *Environmental Science and Pollution Research* 22(15):11513- 11525.

[60] : Anglada A, Urtiaga A & Ortiz I (2009a) Contributions of electrochemical oxidation to waste water treatment: fundamentals and review of applications. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 84(12):1747-1755.

[61] : Samet Y, Elaoud SC, Ammar S & Abdelhedi R (2006) Electrochemical degradation of 4- chloroguaiacol for wastewater treatment using PbO₂ anodes. *J. Hazard. Mater.* 138(3):614-619.

[62] : Adamovic S et al. (2016) Feasibility of electrocoagulation/flotation treatment of waste offset printing developer based on the response surface analysis. *Arabian Journal of Chemistry* 9(1):152-162., Aoudjehane M et al. (2010) Traitement d'une émulsion d'huile de coupe par electrocoagulation avec des electrodes de fer. *Water Quality Research Journal of Canada (Canadian Association on Water Quality)* 45(4)., Mollah MY et al. (2004) Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of hazardous materials* 114(1):199-210.

[63] : Mohora E et al. (2012) Removal of natural organic matter and arsenic from water by electrocoagulation/flotation continuous flow reactor. *Journal of Hazardous Materials* 235:257-264.

[64] : Daghrrir R, Drogui P, Tshibangu J, Delegan N & El Khakani MA (2014) Electrochemical treatment of domestic wastewater using boron-doped diamond and nanostructured amorphous carbon electrodes. *Environmental Science and Pollution Research* 21(10):6578-6589.

[65] : Nidheesh P & Gandhimathi R (2012) Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: an overview. *Desalination* 299:1-15.

[66]: Daghrrir R, Drogui P, Tshibangu J, Delegan N & El Khakani MA (2014) Electrochemical treatment of domestic wastewater using boron-doped diamond and nanostructured amorphous carbon electrodes. *Environmental Science and Pollution Research* 21(10):6578-6589.

[67]: C. Flox, C. Arias, E. Brillas, A. Savall, K. Groenen-Serrano, Electrochemical incineration of cresols: A comparative study between PbO₂ and boron-doped diamond anodes, *Chemosphere*, (2009), 74 (10) 1340 - 1347.

[68]: Nidheesh P & Gandhimathi R (2012) Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: an overview. *Desalination* 299:1-15

[69]: Jiang C-c & Zhang J-f (2007) Progress and prospect in electro-Fenton process for wastewater treatment. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 8(7):1118-1125.

[70]: F. Hachami, R. Salghi, M. Mihit, L. Bazzi, K. Serrano, A. Hormatallah, M. Hilali, Electrochemical destruction of methidation by anaodic oxidation using a boron-doped diamond electrode electrode. *Solar Energy*, 35, (2008) 4927.).

[71]: D. Gandini, E. Mahé, P.A. Michaud, W. Haenni, A. Perret, et C. Comninellis, Oxydation of carboxylic acids at boron-doped diamond electrodes for wastewater treatment, *J. Appl. Electrochem.*, (2000) 30(12): p. 1345-1350.

[72]: P. Cañizares, J. García-Gómez, J. Lobato et M.A. Rodrigo, Electrochemical Oxidation of Aqueous Carboxylic Acid Wastes Using Diamond Thin-Film Electrodes, *Ind. Eng. Chem. Res.*,(2003). 42: p. 956-962.

[73]: F. Bonfatti, S. Ferro, F. Lavezzo, M. Malacarne, G. Lodi, De Battisti , A Electrochemical incineration of glucose as a model of organic substrat. *J Electrochem Soc*, 147, (2000) 592.; D.Rajkumar et K. Palanivelu. Electrochemical Degradation of Cresols for Wastewater Treatment, *Ind. Eng. Chem. Res*, 42, (2003). 1833-1839 1833.;

[73]: D. Gandini, E. Mahé, P.A. Michaud, W. Haenni, A. Perret, et C. Comninellis, Oxydation of carboxylic acids at boron-doped diamond electrodes for wastewater treatment, *J. Appl. Electrochem.*, (2000) 30(12): p. 1345-1350.

[74]: Zhang C, Yang L, Rong F, Fu D & Gu Z (2012) Boron-doped diamond anodic oxidation of ethidium bromide: Process optimization by response surface methodology. *Electrochim. Acta* 64:100-109.

[75]: Daghrir R, Drogui P, Tshibangu J, Delegan N & El Khakani MA (2014) Electrochemical treatment of domestic wastewater using boron-doped diamond and

nanostructured amorphous carbon electrodes. *Environmental Science and Pollution Research* 21(10):6578-6589.

[76] : Dia O et al. (2016) Utilisation des procédés électrochimiques et leurs combinaisons avec les procédés biologiques pour le traitement des lixiviats de sites d'enfouissement sanitaires revue de littérature. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science* 29(1):63-89.

[77] : Deng Y et al. (2007) Electrochemical oxidation for landfill leachate treatment. *Waste Management* 27(3):380-388.

[78] : Zhou L, Hu Z, Zhang C, Bi Z, Jin T, Zhou M (2013a). Electrogen-eration of hydrogen peroxide for electro-Fenton system by oxygen reduction using chemically modified graphite felt cathode. *Sep Purif Technol* 111:131–136. doi:10.1016/j.seppur.2013.03.038)

Résumé

L'étude effectuée concerne les essais d'éliminations de pesticides, pour cela on a commencé par la détermination du matériel adéquat d'électrode « le Fer ». Puis, on a choisi le procédé approprié qui est l'électro-fenton, en suite, on a étudié quelques différents paramètres qui ont une influence sur le rendement (Intensité de courant, concentration de l'électrolyte, le débit d'air) pour sortir à la fin avec des paramètres optimaux.

Mots clés : Procédé d'oxydation avancée, oxydation électrochimique, électro-Fenton, pesticide, fer, acier inoxydable, intensité de courant, électrolyse, électrolyte, eau distillée.

Abstract

The study to be carried out concerns the elimination tests of pesticides, for this we start with the determination of the appropriate material for the "Iron" electrode. Then, we chose the appropriate process which is the electro-fenton, then we studied some different parameters which have an influence on the performance (current intensity, concentration of the electrolyte, the air flow) to exit at the end with optimal settings.

Keyword: advanced oxidation process, electrochemical oxidation, Fenton electron, pesticide, iron, stainless steel, current intensity, electrolysis, electrolyte, distilled water.

المخلص

لدراسة التي يتم إجراؤها تتعلق باختبارات التخلص من المبيدات الحشرية، لذلك نبدأ بتحديد المادة المناسبة للقطب "الحديد". ثم اخترنا العملية المناسبة وهي الفنون الكهربائي، ثم درسنا بعض المتغيرات المختلفة التي لها تأثير على الأداء (شدة التيار، تركيز المنحل بالكهرباء، تدفق الهواء) للخروج في النهاية بالإعدادات المثلى.

الكلمات المفتاحية: عملية أكسدة، أكسدة الكهروكيميائية، فنون الكهربائية، مبيدات حشرية، حديد، الفولاذ المقاوم لصدأ، التيار، التحليل الكهربائي، الماء، قطر