REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie des procédés
Spécialité : Génie des procédés et environnement

Contribution à l'étude d'un sol pollué:

Traitement chimique et/ ou physique

Présenté par

BEN CHAREF SIHAM

KAIDI AICHA

Proposé et Dirigé par

Mme. R. KHALLADI

Mme. H. CHERIFI

Promotion 2019

REMERCIEMENT

En premier lieu nous remercions **ALLAH**, le tout puissant qui nous a donné la volonté, la patience et le courage pour mener ce travail à son terme.

Pour tous les bienfaits et Les faveurs qu'il nous Attribue,

et sans lesquels Nous ne serons jamais arrivés.

Nous remercions toutes les personnes qui nous ont aidés à réaliser ce travail, surtout notre encadreur **Mme Khaladi Razika** qui nous a aidés à réaliser ce travail et qui a fait beaucoup de chose pour nous, ainsi que **Mme Cherifi Hakima** notre Co-promotrice.

Mme YOUSE et **SAIFI KHADIDJA**

Nous remercions vivement tous les membres du jury qui ont accepté de nous honorer et de juger notre travail.

Et enfin, nous remercions tous les enseignants du département de génie des procédés

Merci à tous



Dédicace

Je dédis ce mémoire à ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études.

A la mémoire de mon père qui nous a quittés voilà 4 ans.

A mon oncle qui sans lequel je n'aurais jamais repris mes études.

A mon frère : **ABD EL KADER.**

Mes sœurs : **HADJER. AMEL. AMINA.RANDA.**

Mes camarades : **HASSNA. MARIEME. IMEN. NADIA.**

Une spéciale dédicace ma chère **SAIFI KHADIDJA.**

Sans oublier Mon binôme **AICHA** *pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

A mes famille et toutes les personnes que j'aime

SIHAM

Dédicaces

C'est avec un très grand honneur que je dédie mon travail :

A mes parents ; mon père et sur tout ma mère qu'elle a beaucoup sacrifie pour moi depuis ma naissance jusqu'à maintenant et qu'elle n'a jamais cessé de m'encourager,

Que dieu les gardes

À mes frères (blkessem et abd lhak)

et mes sœur (louiza, saliha, chahra, amel)

À mes amis et mes collègues (imen ,fatiha ,fethia, soumia, yossra, khawla, maska)

A tous la famille (kaidi) et (Alloune).

Ainsi qu'a tous mes professeurs, enseignantes et tous mes amis du primaire jusqu' l'université.

A la fin je remercier mon binôme Siham qui a contribué pour réaliser ce travail.

Aicha

Chapitre I

Tableau I.1 : Flux des métaux lourds dans l'environnement ……..…13

Tableau. I.2: Utilisations set application des métaux lourds……..…15

Tableau I.3: Effets de certains métaux lourds sur la santé……..……16

Tableau I.4: Propriétés et informations sur le Fer……...……..19

Tableau I.5: Propriétés et informations sur le Cuivre…….….19

Chapitre II

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des modes de traitement…….……21

Tableau II.2: Techniques de dépollution des sols…….……30

Chapitre III

Tableau III.1 : Concentration des solutions de traitement……..34

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Caractéristiques physique-chimique et diamètre moyen du sable…..38

Tableau IV.2 : La langueur d'onde maximale de Fe et Cu…….38

Tableau IV.3 : Résultats d'application des modèles du pseudo premier et deuxième ordre pour le fer……46

Tableau IV.4 : Résultats d'application des modèles du pseudo premier et deuxième ordre pour le cuivre……..…54

Chapitre I

Figure I.1: Exemple des couches constitutives du sol…….....……3

Figure I.2: Classification des sols selon la norme NF EN ISO 14688-1……...…..……4

Figure I.3: Triangle de classification textural du sol ……..…....5

Figure I.4: Schéma de la composition organique du sol……6

Figure I.5: Nature des polluants rencontrés sur les sites pollués…….…...8

Figure I.6: Classification périodique des éléments métalliques……..……9

Figure I.7: Sources des Eléments Traces Métalliques(ETM) dans les sols……...10

Figure I.8: Localisation d'ETM dans le sol……..……10

Figure I.9: Différentes formes du Fe……..17

Figure I.10: Le Cuivre……..18

Chapitre II

Figure II.1 : Confinement par couverture et étanchéifiassions…….……23

Figure II.2: Schéma d'un incinérateur…….….24

Figure II.3 : Schéma principe de pompage…….…….25

Figure II.4 : Désorption thermique……..…….26

Figure II.5 : Domaine d'application du lavage en fonction de l'état physique de la pollution dans la zone non saturée……..…26

Figure II.6 : Schéma de principe de l'oxydation chimique in- situ …….……28

Figure II.7 : Schéma de principe de réduction chimique……..……29

Chapitre III

Figure III.1 : Spectrophotomètre UV-visible (UV-mini 1240SHIMADZU)……...35

Chapitre IV

FigureIV.1 : Concentration du fer éliminé en fonction de temps ; Age 1……39

Figure IV.2 : Concentration du fer éliminé en fonction de temps ; Age 5… ……....39

Figure IV.3 : Concentration du fer éliminé en fonction de temps ; Age 11…….…….40

Figure IV.4 : Concentration du fer éliminé en fonction de temps ; Age 18…….…....40

Figure IV.5 : Rendement de l'élimination du fer pour les différents solvants ; Age1……..41

Figure IV.6 : Rendement de l'élimination du fer pour les différents solvants ; Age 5…….42

Figure IV.7 : Rendement de l'élimination du fer pour les différents solvants ; Age 11……42

Figure IV.8 : Rendement de l'élimination du fer pour les différents solvants ; Age 18……43

Figure IV.9 : Application des modèles du pseudo première et second ordre pour le fer ; Age 1.… …… ……..…….……44

Figure IV.10 : Application des modèles du pseudo première et second ordre pour le fer ;

Age 5……44

Figure IV.11: Application des modèles du pseudo première et second ordre pour le fer ; Age11…….…..…….45

Figure IV.12 : Application des modèles du pseudo première et second ordre pour le fer ;

Age 18……...…45

Figure IV.13 : Concentration de cuivre éliminé en fonction du temps ; Age1…….47

Figure IV.14 : Concentration de cuivre éliminé en fonction du temps ; Age 5……47

Figure IV.15 : Concentration de cuivre éliminé en fonction du temps : Age 11……..…48

Figure IV.16 : Concentration de cuivre éliminé en fonction du temps ; Age 18…….48

Figure IV.17 : Rendement de l'élimination du cuivre pour les différents solvants; Age 1…..49

Figure IV.18 : Rendement de l'élimination du cuivre pour les différents solvants; Age 5…...50

Figure IV.19 : Rendement de l'élimination du cuivre pour les différents solvants ; Age 11…50

Figure IV.20 : Rendement de l'élimination du cuivre pour les différents solvants ;Age18……..51

Figure IV.21 : Application des modèles du pseudo premier et second ordre pour le cuivre ; Age 1……..…52

Figure IV.22 : Application des modèles du pseudo premier et second ordre pour le cuivre ; Age5……..…52

Figure IV.23 : Application des modèles du pseudo premier et second ordre pour le cuivre ; Age 11……..……53

Figure IV.24 : Application des modèles du pseudo premier et second ordre pour le cuivre ; Age 18……..…..53

Figure IV.25 : Isotherme de désorption de fer ; SDS0.5g/l…….….55

Figure IV.26 : Isotherme de désorption de fer ; SDS1g/l……..…...55

Figure IV.27 : Isotherme de désorption de cuivre ; SDS0.5g/l…….……56

Figure IV.28 : Isotherme de désorption de cuivre ; SDS1g/l…….……...…56

FigureIV.29 : Isotherme de désorption de cuivre ; Tw0.5g/l…….……57

Figure IV.30 : Isotherme de désorption de cuivre ; Tw1g/l…….....57

Figure IV.31: Spectre IR du sol avant traitement…….…...59

Figure IV.32 : Spectre IR du sol après traitement par L'eau…….…..59

Figure IV.33 : Spectre IR du sol après traitement par HCl 0.1M……..……...60

Figure IV.34 : Spectre IR du sol après traitement par HCl 0.5M……..……...60

Figure IV.35 : Spectre IR du sol après traitement par SDS 0.5 g/l……..…..61

Figure IV.36 : Spectre IR du sol après traitement par SDS 0.1g/l……...61

INTRODUCTION GENERALE……..1

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA POLLUTION DU SOL

I.1 INTRODUCTION ……..…….. 3

I.2 LE SOL ET SES CARACTERISTIQUES……....…….…….... 3

I.3 COMPOSITION DU SOL ……....4

I.3.1 LA PHASE SOLIDE.....4

I.3.2 LA MATIERE ORGANIQUE……..……5

I.3.3 LA PHASE GAZEUSE …….....6

I.3.4 LA PHASE LIQUIDE …….....7

I.4 CONTAMINATION DU SOL ……7

I.5 POLLUTION PAR LES METAUX LOURDS …….....8

I.5.1 DEFINITION DES METAUX LOURDS……..……....8

I.5.2 ORIGINE DES METAUX PRESENTS DANS LE SOL……...9

I.5.2.1 ORIGINE NATURAL……..……11

I.5.2.2 ORIGINE ANTHROPIQUE ……..……....12

I.5.3 UTILISATION DES METAUX LOURDS ……..….15

I.5.4 TOXICITE DES METAUX LOURDS ……15

I.5.5 EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT ……..……....16

I.5.6 EFFETS SUR LA SANTE…… ……16

I.6. POLLUTION PAR LE FER …….……...17

I.6.1.GENERALITE SUR LE FER…….……17

I.6.2 UTILISATION DE FER ……..……17

I.6.3 EFFET DU FER SUR L'ENVIRONNEMENT ET SUR LA SANTE……..…….17

I.7 POLLUTION PAR LE CUIVRE …….....18

I.7.1 GENERALITE SUR LE CUIVRE …….……18

I.7.2 UTILISATION DE CUIVRE ……..……18

I.7.3 EFFET DU CUIVRE SUR LA SANTE ET L'ENVIRONNEMENT ……20

I.8 CONCLUSION ……..…….. 20

CHAPITRE II : METHODES DE DEPOLLUTION DES SOLS

II.1.INTRODUCTION……..…….21
II.2 .TYPES DE TRAITEMENT DES SOLS POLLUES……...21
II.3. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES PRINCIPAUX MODES DE TRAITEMENT…..……21
II.4. TECHNIQUES DE DEPOLLUTION DES SOLS…….……22
II.4.1 TRAITEMENT PHYSIQUE…….…….. 22
II.4.1.1.. TRAITEMENT PAR CONFINEMENT……..……....22
II.4.1.2.LA STABILISATION ET LA SOLIDIFICATION……..…… .22
II.4.1.3. L'INCINERATION ……..…24
II.4.1.4. POMPAGE ……..……..……..…24
II.4.2. TRAITEMENT THERMIQUE ……..……..……25
II.4.3.TRAITEMENT PAR LAVAGE…….....26
II.4.4..TRAITEMENT PAR DES REACTIONS CHIMIQUES ……..…..27
II.4.4.1 .TRAITEMENT PAR OXYDATION……..…….……....27
II.4.4.2.TRAITEMENT PAR REDUCTION……..…….……..…28
II.5. CONCLUSION ……..……29

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES

III.1. INTRODUCTION……..……..……31
III.1. 1.MATERIELS ET PRODUITS……..……..……31
III.1.1.PRODUITS UTILISES…….....31
III.1.2. APPAREILLAGE……..….31
III.2.PROCEDURE DE TRAVAIL ……....31
III.2.1.CARACTERISATION DE SABLE……...…31
III.2.1.1.TAUX D'HUMIDITE …… ……..……...31
III.2.1.2.MESURE DE PH… ……....32
III.2.1.3.CONDUCTIVITE ELECTRIQUE …… ……32
III.2.1.4.MASSE VOLUMIQUE APPARENTE……..……32
III.2.1.5ANALYSE GRANULOMETRIQUE……32
III.2.1.6.DETERMINATION DU DIAMETRE MOYEN DES PARTICULES……..32
III.2.1.7.SURFACE SPECIFIQUE PAR UNITE DE MASSE DES PARTICULES……..…33
III.2.1.8.DETERMINATION DE LA CLASSE DU SABLE.....……...33
III.2.2.PREPARATION DU SABLE CONTAMINE PAR LE METAL…… ……....33
III.2.3.TRAITEMENT DU SOL……...…34
III.2.4.PREPARATION DES COURBES D'ETALONNAGES……..34

III.2.5.METHODES D'ANALYSE……..……35
III.2.5.1.SPECTROPHOTOMETRIE UV-VISIBLE……..35
III.2.5.2.LOI DE BEER-LAMBERT…….…….35
III.2.5.3.SPECTROPHOTOMETRIE INFRAROUGE…….……...36
III.2.6.METHODES DE CALCUL……36
III.2.6.1.CALCUL DE LA QUANTITE DESORBEE……36
III.2.6.2.CALCUL DU RENDEMENT ……...…36
III.2.7.ETUDE DE LA CINETIQUE DE LA DESORPTION……..…37

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1.CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE ET GRANULOMETRIE 38
IV.2.DOSAGE DES METAUX LOURDS PAR SPECTROPHOTOMETRIE UV-VISIBLE…..…....38
IV.3.LAVAGE DU SOL CONTAMINE PAR LE FER……..……39
IV.3.1.EVOLUTION DE L'ELIMINATION DU FER EN FONCTION DE TEMPS……..……39
IV.3.2.RENDEMENT DE L'ELIMINATION……...40
IV.3.3.CINETIQUE DE LA DESORPTION……42
IV.4.LAVAGE DU SOL CONTAMINE PAR LE CUIVRE……..……47
IV.4.1.EVOLUTION DE D'ELIMINATION DU CUIVRE EN FONCTION DE TEMPS…….……..47
IV.4.2.RENDEMENT DE CUIVRE ……49
IV.4.3.CINETIQUE DE LA DESORPTION……..52
IV.5.EFFET DE TEMPERATURE SUR L'EFFICACITE DES TENSIOACTIFS …….....54
IV.6. EVALUATION QUALITATIVE DU TRAITEMENT ……..……..58
CONCLUSION GENERALE……..62
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
ANNEXE A

تلخيص

في هذا العمل، حاولنا تقييم عملية غسل في نظام مغلق لرمل ملوث يدويا بالحديد والنحاس باستخدام ثلاثة عوامل كيميائية وهي :حمض الهيدروكلوريك، كبريتات دوديسيل الصوديوم SDS وتوين 20 وكذلك الماء المقطر. تمت دراسة تاثير تركيز هذه المواد الثلاثة على إزالة المعدن الثقيل الموجود في الرمل بسبب التلوث ذي الأزمان المختلفة (1 و 5 و 11 و 18 يومًا). تم إجراء جميع التجارب في درجة حرارة الغرفة تحت سرعة التحريك الثابتة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن أفضل مردود إزالة للحديد والنحاس تم الحصول عليها بواسطة محاليل SDS. حيث تم الحصول على أفضل مردود إزالة للحديد والنحاس بواسطة محلول SDS للتركيز 1 غ / لتر (99.97٪) و 0.5 غ / لتر (92.73٪) على التوالي. بالإضافة إلى ذلك ، اظهر الماء كفاءة ملحوظة لإزالة الحديد مقارنة بالحمض.

علاوة على ذلك، فإن النماذج الحركية من الدرجة الأولى و من الدرجة الثانية تنطبق بالتساوي لوصف إزالة النحاس، ونموذج الدرجة الأولى بالنسبة للحديد. تمت دراسة تأثير درجة الحرارة على فعالية الفاعلين السطحيين الاثنين. يعد التخلص من النحاس بواسطة توين20 الأفضل تحت درجة حرارة تصل إلى 50 درجة مئوية ، وتكون فعالية SDS القصوى في درجة حرارة الغرفة

الكلمات المفتاحية: التلوث، التربة، المعادن الثقيلة، الرمل، الغسيل، الحمض، الفاعل بالسطح.

Résumé

Dans ce travail, nous avons essayé d'évaluer le procédé de lavage en batch d’un sable contaminé artificiellement par le Fer et par le Cuivre en utilisant trois agents chimiques à savoir ; l’acide chlorhydrique HCl, Sulfate dodecyle de sodium SDS et le Tween 20 ainsi que l’eau distillée. L’effet de la concentration de ces trois composés sur l’élimination du métal lourd contenu dans le sable a été étudié pour des contaminations ayant différents âges (1, 5, 11 et 18 jours). Toutes les expériences ont été réalisées à une température ambiante et sous une vitesse d’agitation fixe.

Les résultats obtenus montrent que le meilleur rendement d’élimination du fer, et du cuivre est obtenu par les solutions de SDS. Où, le meilleur rendement d’élimination pour le fer et le cuivre est obtenu par une solution de SDS de concentration 1g/l (99.97%) et 0.5g/l (92.73%) respectivement. De plus, L’eau montre une efficacité remarquable pour l’élimination du fer comparée à l'acide.

Par ailleurs, les modèles cinétiques pseudo premier ordre et second ordre s'appliquent équitablement pour décrire la désorption du Cuivre, et celui du premier ordre pour le fer. L’effet de la température sur l’efficacité des deux tensioactifs a été étudié. L’élimination du cuivre par le

Tween20 est meilleure pour une température de 50°C, et celle du SDS est maximale à la température ambiante.

Mots clés : pollution, sol, métaux lourds, sable, lavage, acide, tensioactif.

Abstract

In this work, we tried to evaluate the batch washing process of an artificially contaminated sand with iron and copper using three chemical agents namely; hydrochloric acid HCl, sodium dodecyl sulfate SDS and Tween 20 as well as distilled water. The effect of the concentration of these three agents on the removal of the heavy metal contained in the sand was studied for contaminations having different ages (1 , 5, 11 and 18 days). All experiments were performed at room temperature and under a fixed stirring speed.

The results obtained show that the best removal efficiency of iron and copper was obtained by the SDS solutions. Where, the highest removal efficiency for iron and copper is obtained by SDS solution of concentration 1g / l (99.97%) and 0.5g / l (92.73%) respectively. In addition, water shows remarkable efficiency for the removal of iron compared to acid.

Furthermore, pseudo-first-order and second-order kinetic models apply equally to describe the desorption of copper, and only that of the first order for iron desorption. The effect of temperature on the effectiveness of the two surfactants has been studied. The elimination of copper by Tween20 is better for a temperature of 50 ° C, and that of SDS is maximal at room temperature.

Key words: pollution, soil, heavy metals, sand, washing, acid, surfactant**.**

Abréviation

$FeSO_4$ Sulfate de Fer

$CuSO_4$ Sulfate de Cuivre

AFES Association Française pour l'Etude des sols

As Arsenic

C_6H_5N Pyrimidine

Co Concentration initiale

Cd Cadmium

Cr Chrome

Cu Cuivre

E Rendement de l'élimination

ETM Eléments Traces Métalliques

Fe Fer

FTIR Analyse spectroscopie à Transformée de Fourrier

FeO l'oxyde de Fe

Hg Mercure

HAP Les hydrocarbures aromatiques polycycliques

H Humidité en pourcentage

IR Infra Rouge

L Litre

m_0 masse de sable avant séchage (g)

m_1 masse de sable après séchage (g)

Mn Manganèse

Ni Nickel

Pb Plomb

Se Sélénium

Sn l'étain

SDS sulfate dodecyl de sodium

t temps

T Température (°C)

tr tours

Tw Tween

USD United States of America

W Agitation

Zn Zinc

λ max Longueur d’onde maximale (nm)

Chapitre I

Généralités sur la pollution du sol

I.1.Introduction

La contamination des sols due à l'activité agricole, aux épandages de boues d'épuration et aux déchets d'origine industrielle devient aujourd'hui un problème préoccupant. Cela retraduit par des impacts négatifs sur les activités dépendant directement ou indirectement de la terre, mais aussi sur la santé humaine et les écosystèmes.

I.2.Le sol et ses caractéristiques

Le sol désigne une succession de couche ou strates formées par la dégradation de la roche mère et l'accumulation de matière organique résultant des activités biologiques**[1]**. Selon l'Association Française pour l'Etude des sols (AFES), « Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble peu altérée ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux**. [2]**

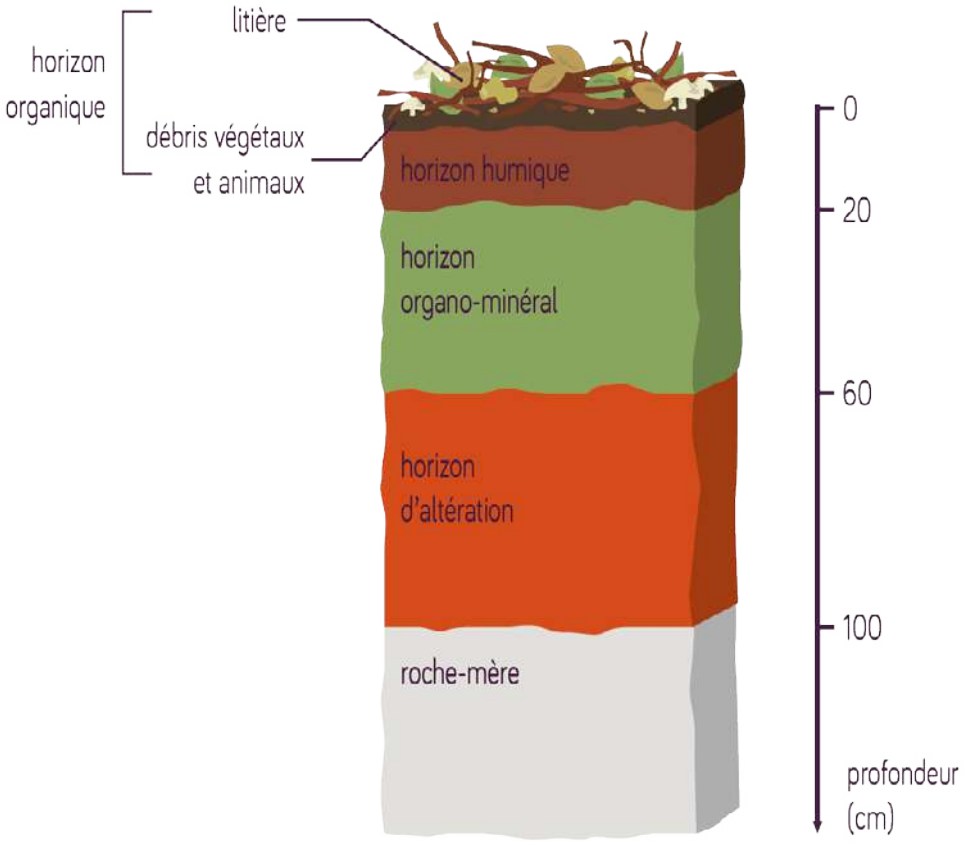


Figure I.1: Exemple des couches constitutives du sol**.[2]**

I.3.Composition du sol

I.3.1.La phase solide

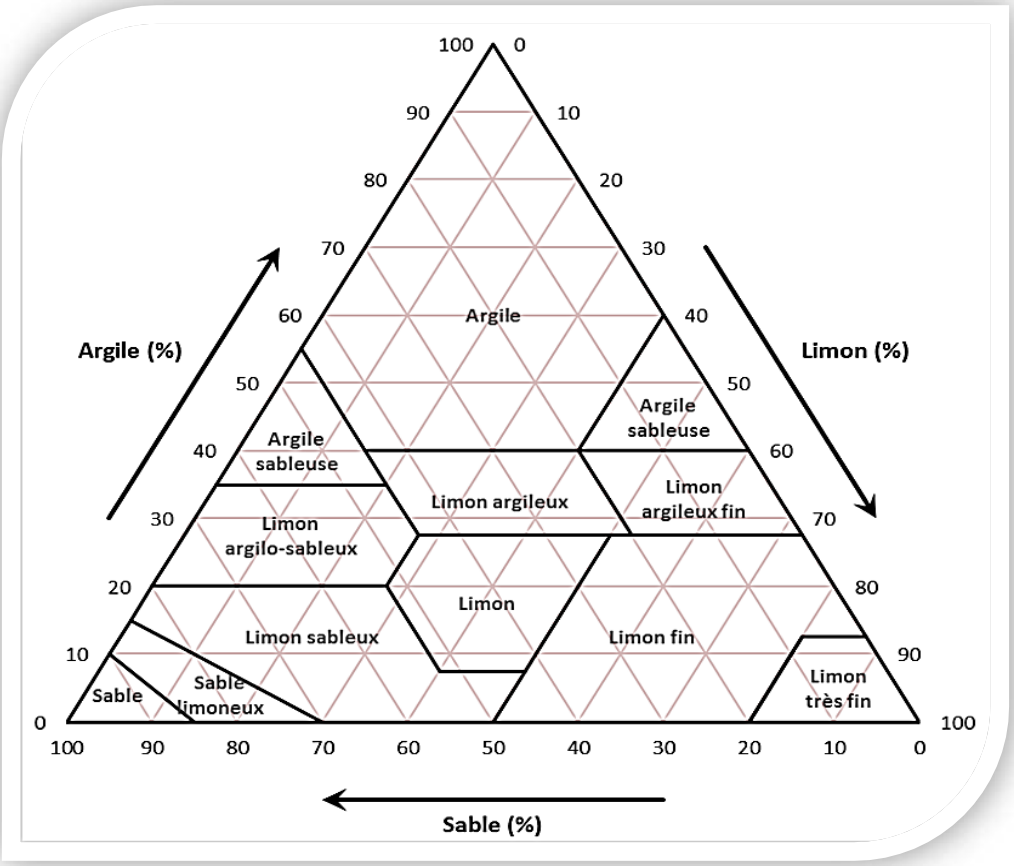
Les constituants inorganiques qui composent la majorité de la masse du sol, sont nombreux et leur nature dépende des roches mères dont ils proviennent par désagrégation. En général, les sols sont classés par la distribution de la taille des particules qu'ils renferment **(Figure I.2*)***.

FigureI.2 : Classification des sols selon la norme NF EN ISO 14688-1**[3]**

Désignation			Diamètre des grains [mm]
Sols Grossiers		Bloc grossier	>630
		Bloc	200 – 630
		Galet	63 – 200
Sols Moyens	Graviers	Graviers Grossiers	20 – 63
		Graviers Moyens	6,3 – 20
		Graviers Fins	2,0 - 6,3
	Sables	Sables Grossiers	0,63 - 2,0
		Sables Moyens	0,2 - 0,63
		Sables Fins	0,063 - 0,2
Sols fins	Limoneux	Limoneux grossiers	0,02 - 0,063
		Limoneux Moyens	0,0063 - 0,02
		Limoneux Fins	0,002 - 0,0063
	Argiles	-	≤0,002

Les pourcentages relatifs de chaque fraction du sol peuvent être déterminés et un caractère général du sol peut être déduit en utilisant le triangle de texture du sol (**Figure I.2**)

Les caractéristiques les plus importantes du sol sont sa capacité de rétention de l'eau et l'adsorption des composés organiques. Les sols argileux sont connus par leur grande surface spécifique, leur permettant de fortes capacités d'échanges cationiques, donc leur forte capacité d'adsorption**[4]**.Ils sont aussi connus par leurs propriétés colloïdales et leur forte capacité de rétention d'eau par rapport aux sols sableux et sols limoneux qui ont une capacité d'adsorption négligeable.**[5],[6]**



FigureI.3 : Triangle de classification textural du sol **[3]**

I.3.2.La matière organique

La matière organique constitue seulement une petite fraction de l'ensemble des matières dans le sol, mais elle est extrêmement importante. Cette matière organique est constituée d'organismes vivants et des éléments nutritifs qui ont été formés à partir de plantes et d'animaux décomposés.

La matière organique représente environ 0,5% à 10% de la masse du sol et est plus concentrée en surface qu'en profondeur (**Figure I.4**). La teneur en matière organique joue un rôle très important sur l'aptitude du sol à retenir ou à fixer les polluants. L'adsorption des composés organiques dans un sol est principalement liée à la fraction en matière organique du sol.**[7],[8]**

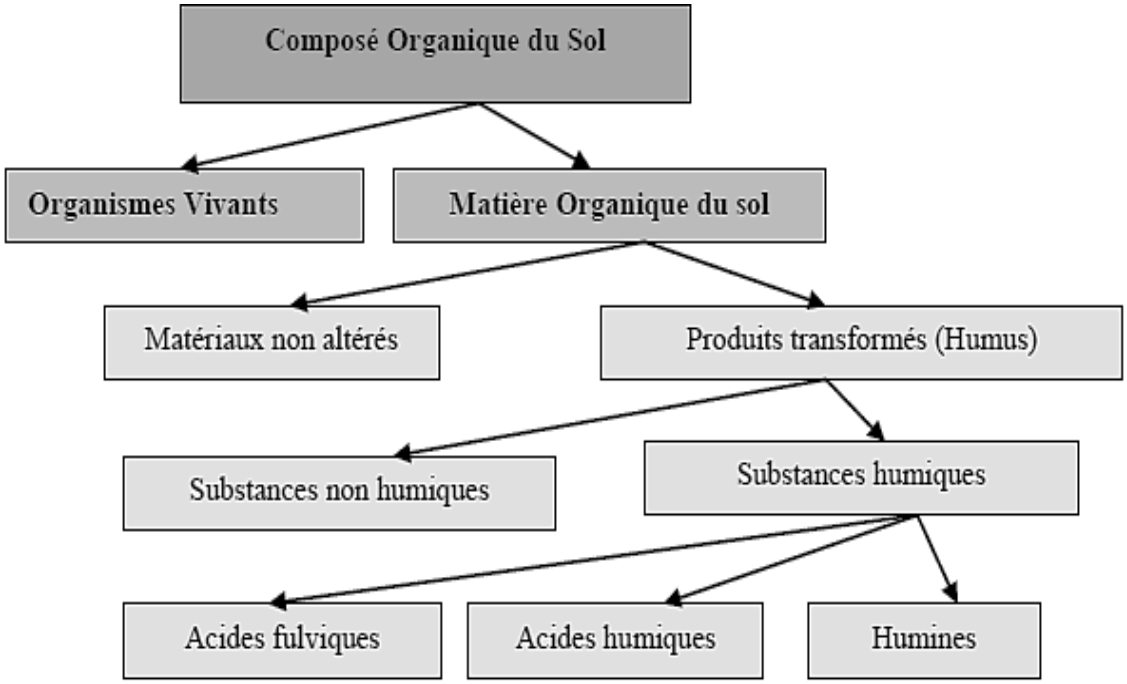


Figure I.4 : Schéma de la composition organique du sol.**[9]**

I.3.3.La phase gazeuse

La phase gazeuse du sol est encore appelée l'atmosphère du sol ; sa composition est souvent voisine de celle de l'air mais peut être très variable dans l'espace et dans le temps elle dépend principalement de plusieurs facteurs : la proximité de l'atmosphère, c'est-à-dire la profondeur dans le sol, l'activité biologique et la teneur du sol en eau et en polluant. Ceci est plus important quand les polluants sont instables dans leur phase, c'est-à-dire la dissolution et la volatilisation du polluant comme les composants organiques volatils ou semi volatils retenus dans le sol.

La composition de cette phase est déterminée par :

- Les échanges avec l'atmosphère par diffusion moléculaire couplée à la volatilisation et à la dissolution ;
- La respiration des organismes vivants ;
- Les échanges avec la solution contenue dans le sol ;
- Les apports de diverses substances organiques volatiles**. [10]**

I.3.4.La phase liquide

L'eau joue un rôle très important dans tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent dans le sol. A partir du degré de liaison de l'eau aux particules solides du milieu poreux et de sa mobilité, l'eau dans le sol non saturé est différenciée en quatre catégories :

- Eau de constitution : ce sont les molécules d'eau qui forment la partie de la composition chimique des grains du milieu poreux ;
- Eau adsorbée ou «hygroscopique» : ce sont les molécules adsorbées à la surface des minéraux. Cette eau est mobilisable par évaporation ou par absorption par les plantes mais ne se déplace pas par l'effet de la gravité (la force gravitationnelle est trop faible par rapport aux forces capillaires) ;
- Eau gravitaire : ce sont les molécules d'eau qui se trouvent en dehors du champ d'attraction des particules. Cette eau remplit les macroporosités du sol. Elle est capable de s'infiltrer et de percoler dans le milieu poreux sous l'effet de la gravité**.[11] ,[12]**

I.4.Contamination du sol

La dégradation des sols est définie comme étant une réduction de la qualité des solscausée par l'utilisation humaine**[13],[14].** En Algérie, la dégradation des sols constitue une problématique grave, touchant une partie importante des terres agricoles et des parcours steppiques. Elle comprend la dégradation chimique, physique et biologique comme la réduction de la fertilité, le déclin de la stabilité des agrégats, la salinité. La dégradation des sols est largement utilisée comme indicateur de non-durabilité et comme évidence visuelle de la détérioration de l'environnement et de la diminution de la diversité biologique.**[15],[16]**

Pendant longtemps, le sol joue un rôle éminent dans les grands cycles biogéochimiques et le devenir des substances polluantes. Il accumule et met à la disposition des plantes et des animaux la plupart des éléments indispensables à la vie (air, eau, éléments nutritifs, etc.). A côté de sa fonction alimentaire, le sol peut également constituer un filtre environnemental efficace en épurant l'eau qui le traverse de divers polluants pouvant contaminer la chaîne alimentaire et les nappes d'eau souterraine. Dans un tel système, d'importantes questions se posent concernant la capacité du sol à conserver et à stocker les éléments tels que les métaux lourds (**Figure I.5)**. En effet, il n'y avait pas un régime juridique bénéfique pour la protection des sols, mais on considérait que la terre absorbait et « digérait » tout. Heureusement, cette croyance naïve est aujourd'hui révolue**[17] , [18].**

La contamination des sols se distingue par :

✓ Soit la charge critique est dépassée et le sol ne joue plus son rôle tampon, de sorte que les polluants pénètrent jusqu'à la nappe phréatique et les fleuves ;

✓ soit les polluants s'accumulent dans le sol jusqu'au point où un changement dans les conditions physiques et/ou chimiques, et/ou biologiques, entraîne un transfert des polluants.

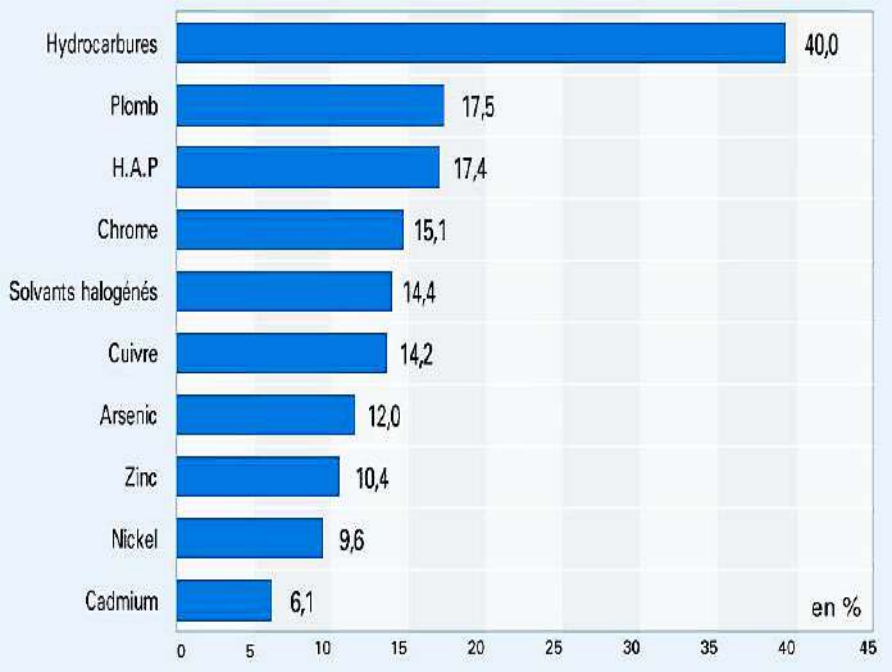


Figure I.5 : Nature des polluants rencontrés sur les sites pollués.**[19]**

I.5.Pollution par les métaux lourds

I.5.1.Définition des métaux lourds

D'un point de vue scientifique et technique, les métaux lourds peuvent être définis comme :

- ✓ Tout métal ayant une densité supérieure à celle du fer 5g/cm^3.
- ✓ Tout métal ayant un numéro atomique élevé, en général supérieure à celui du sodium (**Figure I.6**).

Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn), le nickel (Ni), le plomb (Pb), l'étain (Sn), et le zinc (Zn). **[20]**

Les métaux lourds sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en de très faibles quantités. Certain de ces éléments comme le cuivre, le zinc et le sélénium, sont essentiels à l'ensemble des organismes vivant ou à de grands groupes d'organismes. D'autres ont des fonctions plus ou moins importantes comme le nickel, mais aussi l'arsenic et le chrome dans certains constituants. Enfin, certains n'ont pas de fonctions biologiques reconnues (oligo-élément), mais ils peuvent pour des teneurs élevées et sous forme chimique bio-disponible devenir toxique**[21].** Par ordre décroissant de toxicité, les métaux sont classés comme suit **[22]**: Hg > Cr > Ti > Mo > Cu > Ni > Pb > Zn

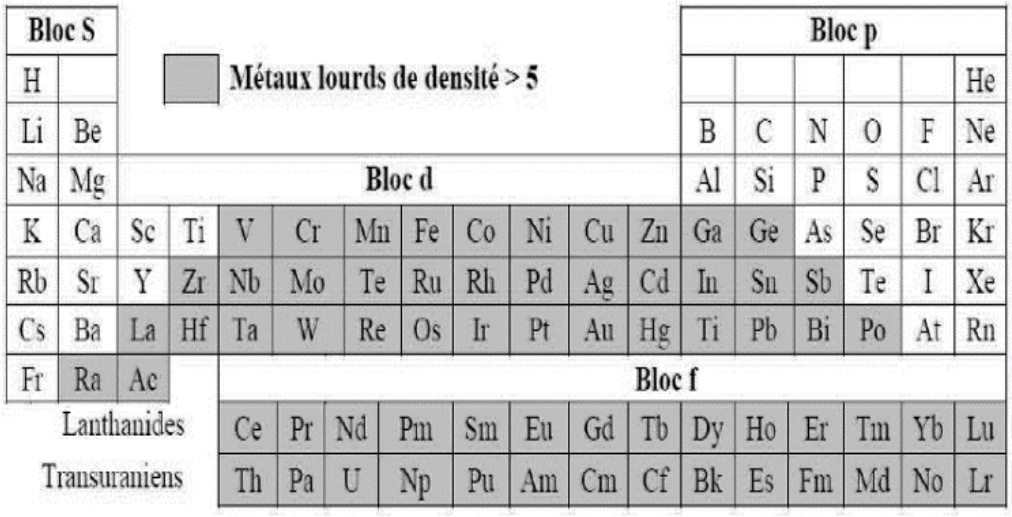


Figure I.6 : Classification périodique des éléments métalliques**[23]**

I.5.2.Origine des métaux présents dans le sol

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre, le mercure et d'autres est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique **(Figure I.7).**

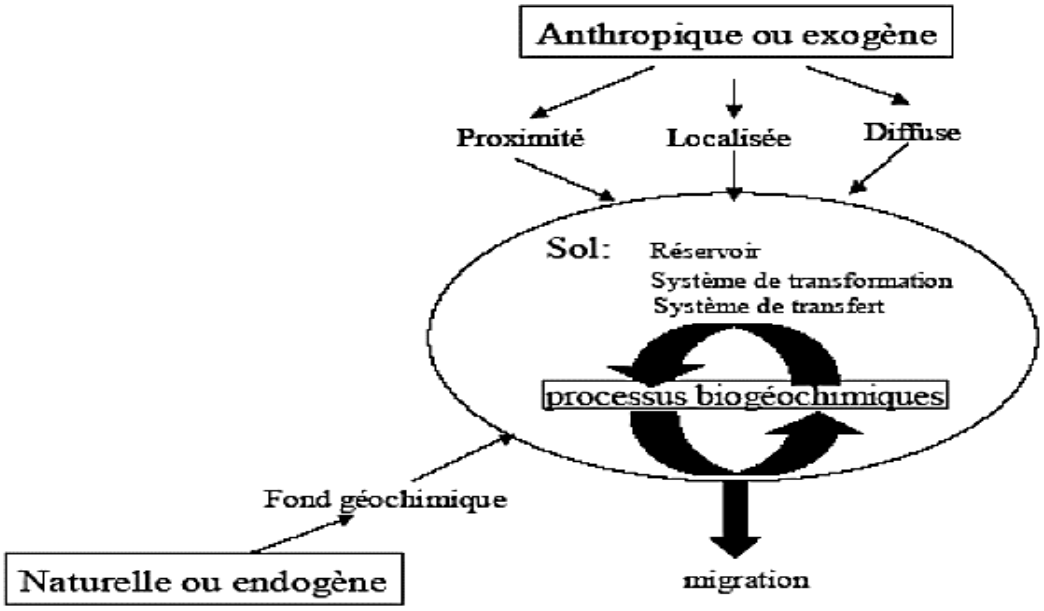


Figure I.7: Sources des Eléments Traces Métalliques(ETM) dans les sols**.[24]**

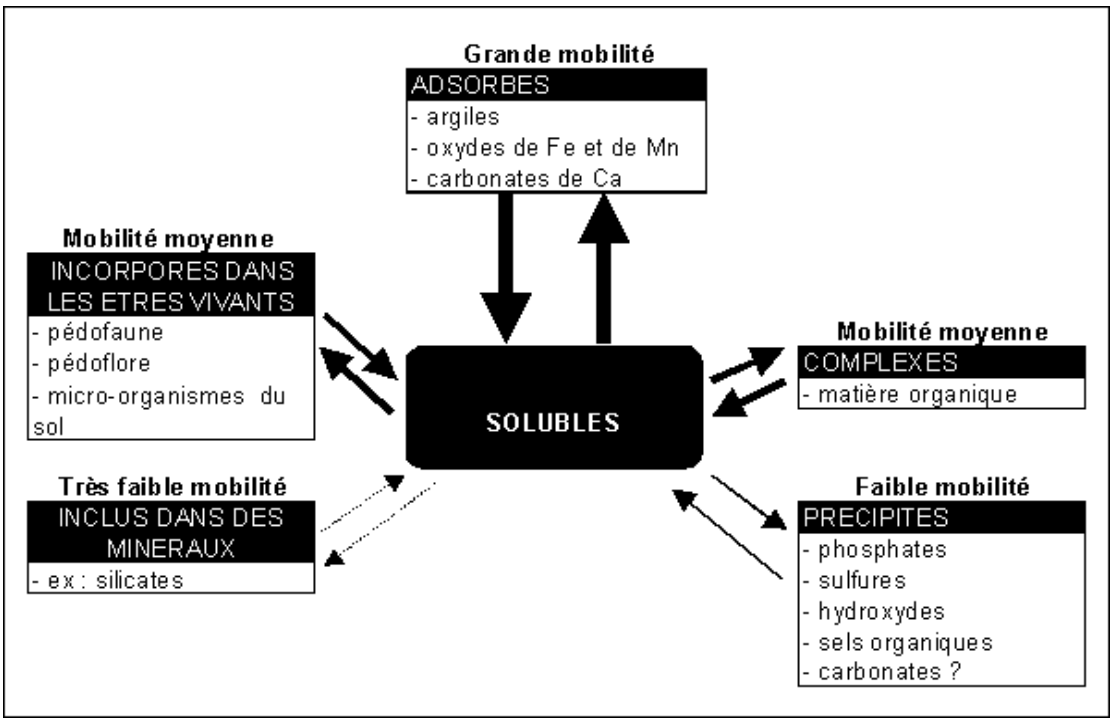


Figure I.8 : Localisation d'ETM dans le sol. **[25]**

I.5.2.1.Origine naturelle

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique. La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge (**Figure.8**).

A. Les roches primaires

Sont désignées ainsi les roches indemnes de toute oxydation ou altération ultérieure, notamment celles des agents météorologiques**.**

- **Roches ignées (magmatique)**

L'incorporation des éléments en traces dans les roches ignées est largement contrôlée par leur état de valence et leur rayon ionique. Les similitudes de ces paramètres avec ceux des ions majeurs vont déterminer l'affinité des éléments traces à se substituer dans les minerais des roches. Cependant d'autres paramètres comme l'électronégativité et le type de coordination sont également importants. Ainsi les éléments de transition de la première rangée sont principalement incorporés dans les minéraux ferromagnésiens des roches ultrabasiques (Cr, Ni) ou basiques (Co, V). Les roches plutoniques (granites, diorites) ou effusives (andésites, basaltes), les plus riches en métaux de transition du groupe du Fer (V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn,) sont précisément les roches contenant beaucoup de Fer. Le plombe (pb^{2+}) se substitue préférentiellement au potassium et plus abondant dans les roches potassiques (syénites, granites**).[26]**

- **Roches sédimentaires et métamorphiques**

Au cours de la diagenèse, les circulations de fluides dans les séries sédimentaires peuvent également permettre des concentrations élevées en Zn, Cu, Pb, U, V, Mo, Se, etc. Dans des sites pièges pouvant conduire à la formation de gisements. Si les roches contiennent du soufre, beaucoup de métaux lourds vont s'associer à ce dernier plutôt qu'aux silicates ou oxydes, les métaux ayant une affinité particulière pour le soufre sont dits chalcophiles par opposition aux éléments lithophile qui se lient aux silicates, même en présence de soufre.

Cette distinction est importante non seulement au plan fondamental, mais aussi pour les problèmes d'environnement : parmi les chalcophiles se trouvent la quasi-totalité des éléments toxiques, Hg, Cu, Pb, Mo, Ni, Zn, Cb, Sb, etc. le chrome est l'un des rares éléments toxiques à ne être associé à la géochimie du soufre**.[26]**

B. Les roches de la zone d'oxydation

On désigne ainsi les roches situées à peu de distance de la surface du sol, une à quelques dizaines de mettre au maximum, et qui sont le siège de circulation d'eaux météorologiques chargées en oxygène. Cette zone d'oxydation correspond à la partie supérieure des nappes phréatique, ainsi qu'à la couche comprise entre le niveau de l'eau et le sol (zone dite non saturée).

C. Les sols

Les sols se développent au sommet de la zone d'oxydation des substratums rocheux et doivent aux roches bonne part de leur composition minéralogique et géochimique. Deux cas se présentent :

- Les roches primaires sont dépourvues de sulfures
- Il y a des sulfures dans les roches primaires : dans ce cas, on peut rencontrer dans les sols des minéraux très riches en métaux lourd, et les sols eux-mêmes sont plus ou moins fortement enrichis : ce sont les zones d'anomalies géochimiques**.[27]**

I.5.2.2 Origine anthropique

L'activité humaine n'a apporté aucun changement dans les volumes de métaux lourds. Il n'y a ni création, ni suppression. Elle a surtout changé la répartition des métaux, les formes chimiques (ou spéciation) et les concentrations par l'introduction de nouveaux modes de dispersion (fumées, égouts, voitures, etc.).

Si une partie des métaux lourds part directement dans le sol et les eaux, l'essentiel est d'abord émis dans le sol et les eaux, ou émis dans l'atmosphère avant de rejoindre les deux autres compartiments. Les origines anthropiques des métaux lourds sont diverses, le tableau I.2 nous renseigne sur les flux naturels (altération des roches,..) et anthropogénique lié aux activités humaines. **[27]**

Le tableau ci-dessous nous renseigne sur les flux des ETM dans l'environnement et compare les flux naturel (altération des roches,…) et anthropogénique (lié aux activités humaines) en tonnes/an :

Tableau I.1 : Flux des métaux lourds en tonnes/an dans l'environnement.**[28],[29]**

Eléments	Anthropogéniq ue (1)	Flux naturel (2)	Rapport (1)/(2)
As	150	90	1.7
Cd	43	4.5	9.6
Cr	7810	810	9.6
Cu	9162	375	24.4
Pb	3665	180	20.4
Hg	17.8	0.9	19.8
Ni	1134	255	4.4
Zn	7467	540	13.8

On constate que les rapports **(flux anthropogénique/ flux naturel)** sont tous supérieurs à un, c'est-à-dire que le risque de contamination des cycles biogéochimiques par les activités humaines est très grand. L'influence de celles-ci est marquée par une augmentation de la concentration en métaux dans les sédiments des rivières et des lacs, à cause de leur faible solubilité aux pH habituels des eaux (5 à 9). Dans le sol, la pollution est plus sournoise puisque ce compartiment à la propriété de fixer les métaux, on risque donc d'observer des effets de bioaccumulation.

A. Les moyens de transports

On observe, sur les routes, des dépôts de métaux agglutinés ou dispersés (usure des moteurs et carrosses) ainsi que des dépôts provenant de l'usure des pneus ; on peut observer une contamination en Pb et Cd sur une bande de 10 à 20 m le longe de l'axe routier les eaux de ruissellement des chaussées urbaine et autres peuvent être assez chargées en polluants. En milieu urbain, les eaux de pluie peuvent également emporter les toitures (Pb, Zn, Cu). **[30]**

B. L'agriculture

L'épandage d'engrais peut amener des métaux (Sr, Ba, Mn, F, Zn, Cd) provenant des craies phosphatées, phospho-gypse. Les effluents d'élevage peuvent également apporter du Cu, Zn, et Mn. En effet, les rations alimentaires des animaux tels les volailles et les bovins sont enrichies en Cu (35 à 175 ppm) et en Zn (150 à 250 ppm) qui se retrouvent intégralement dans les lisiers et fumiers.

Les produits phytosanitaires peuvent également apporter du cuivre (cas bien connu de la bouillie bordelaise : sulfate de cuivre additionné de chaux). Ce composé est utilisé comme fongicide (pomme de terre, vigne,….), et l'étain et l'arsenic peuvent également entrer dans la formulation de certains pesticides**. [31]**

C. Les décharges de déchets ménagers

Les métaux lourds sont régulièrement présents dans les décharges. Des études ont montré qu'il restait 99,9% du stock des métaux dans la décharge au bout de 30 ans**.[32].** On a déterminé un ordre de «mobilité» ou facilité de transfert des métaux dans la phase aqueuse comme suit: Ni> Zn >Cd >Cr >Pb> Cu.

Le pH, le potentiel redox, la présence de sulfures, la complexassions sont des facteurs qui influencent grandement la possibilité de retrouver ces métaux dans les milieux aquatiques**.[33]**

D. Les exploitations minières

Les éléments métalliques sont en concentration très importante sur les sites miniers. Lorsque les métaux sont inclus dans les minerais, ils sont peu altérables donc peu mobiles. Les risques résultent de l'érosion des sulfures qui, par oxydation à l'air, forment de l'acide sulfurique qui solubilise ainsi le métal**.[34]**

E. Corrosion des canalisations

Il s'agit ici des canalisations qui amènent l'eau potable vers le robinet. Certaines canalisations en cuivre se recouvrent intérieurement de $Cu(OH)_2$ et de $CuCO_3$. Les soudures (Pb-Sn) peuvent s'oxyder en carbonate de plomb. **[35]**

I.5.3.Utilisation des métaux lourds

Le tableau ci-dessous nous renseigne sur les utilisations et les applications majeures des métaux lourds.

TableauI.2 : Utilisation set applications des métaux lourds**[36]**

Utilisation	**Métaux**
Batteries et appareils électriques	Cd, Hg, Pb, Zn, Mn, Ni,
Pigments et peintures	Ti, **Fe**, Hg, Pb, Zn, Mn, Sn, **Cu** , Al, As, Cu
Alliages et soudures	Cd, As, Pb, Zn, Mn, Sn, Ni, **Cu**
Biocides (pesticides, herbicides)	As, Hg, Pb, **Cu**, Sn, Zn, Mn
Agents de catalyse	Ni, Hg, Pb, **Cu**, Sn
Verre	As, Sn, Mn
Engrais	Cd, Hg, Pb, Al, As, Cr, **Cu**, Mn, Ni, Zn
Matières plastiques	Cd, Sn, Pb
Produits dentaires et cosmétiques	Sn, Hg
Textiles	Cr, **Fe**, Al
Raffineries	Ni, V, Pb, **Fe**, Mn, Zn
Carburants	Ni, Hg, **Cu, Fe**, Mn, Pb, Cd

I.5.4.Toxicité des métaux lourds

La plupart du temps ces métaux sont ingérés sous forme ionique. Il existe aussi des risques sous forme cutanée ou par inhalation. Par exemple ; le Nickel est toxique par contact cutané, par ingestion et inhalation, il est considéré comme cancérigène. Et le Zinc est relativement soluble, notamment dans les sols légers et acides. C'est un oligo-élément pour les plantes, les animaux et les hommes, il est peu toxique dans l'environnement..**[37]**

I.5.5.Effets sur l'environnement

Les métaux lourds ont des effets néfastes sur tous les compartiments environnementaux. Les écosystèmes sont constitués de deux secteurs étroitement imbriqués qui déterminent leur structure, leur fonctionnement et leur évolution. L'identification des dangers de métaux lourds s'appuie sur les tests éco-toxicologiques terrestres et aquatiques qui couvrent des populations de niveaux trophiques différents. Les essais réalisés sur des insectes pollinisateurs, des oiseaux ou des mammifères estiment l'inhibition de la germination, de la croissance des plantes ou de la reproduction des animaux. Ces effets atteignent l'homme à travers la chaine alimentaire.**[38]**

I.5.6.Effets sur la santé

L'effet de certains métaux lourds sur la santé est présenté sur le tableau I.4.

Tableau I.3 : Effets de certains métaux lourds sur la santé**.[39]**

Métaux	Effet sur la santé
Arsenic	• Cancérigène et atteinte de différents organes (foie, system nerveux, peau…) • Pas d'organes ciblent pour les expositions de longues durées.
Cadmium	• Potentiel toxique élevé. • Dommages rénaux pour des expositions chroniques à faible dose • Oxydes, chlorures, sulfates et le cadmium sont classés cancérigènes.
Cuivre	• Effet irritant par inhalation, allergie par contact. • Lésion du foie par voie orale sur période longue
Plomb	• entraine l'anémie fort dose ; • Perturbe le système nerveux et du phosphate de plomb (expérience animale**).**
Zinc	• Pas d'effet cancérigène du zinc par voie orale ou par inhalation. • Mais, le chromate de zinc est cancérigène.

I.6.Pollution par le Fer

I.6.1.Généralité sur le Fer

Métal gris, présent sous plusieurs formes allotropiques selon la pression et la température (**Figure I.9 et Tableau I.4**). Ce métal ferromagnétique possède une dureté entre 4 et 5 sur l'échelle de Mohs. On lui connait trois oxydes : l'oxyde de Fer (II) FeO (oxyde ferreux), l'oxyde de Fer (III) Fe_2O_3 (oxyde ferrique) et l'oxyde de Fer (II, III) Fe_3O_4**.[40]**

I.6.2.Utilisation de Fer

Le Fer est le principal ingrédient de l'acier et de la fonte. Celle-ci contient de 2.1% à 6.67% de carbone. L'acier, lui, contient de 0.025% à 2.1% de carbone. Quand on se situe à moins de 0.025% de carbone, les produits entrent dans la catégorie des fers industriels. On a longtemps employé le fer métallique et ses oxydes dans les supports d'enregistrement de données, comme les disquettes ou les bandes magnétique.



Figure I.9 : Différentes forme du Fe

I.6.3.Effet du Fer sur l'environnement et sur la santé

Le Fer (III)-O-arsénite, penta hydraté peut être dangereux pour l'environnement. Une attention particulière devrait être portée aux plantes, à l'air et l'eau. Il est fortement conseillé de ne pas laisser entrer le produit chimique dans l'environnement parce qu'il persiste dans l'environnement**. [41]**

Le Fer entre dans la composition de l'hémoglobine, l'agent qui transporte l'oxygène dans le corps humain. Le contact du fer peut provoquer des problèmes oculaires s'il demeure dans les tissus. En outre, l'inhalation excessive de vapeurs d'oxyde de Fer est un facteur de risque du poumon. Une carence en fer provoque une anémie et peut entraver le développement cognitif et socio-émotionnel du cerveau de l'enfant. On sait en outre que la carence en Fer peut renforcer les effets de certaines intoxications comme le saturnisme**.[42]**

I.7.Pollution par le Cuivre

I.7.1.Généralité sur le Cuivre

Métal de couleur rouge ou orangée, le Cuivre est ductile et malléable (**Figure I.10 etTableau I.5**). Il possède une très grande conductivité électrique et présente une certaine résistance à la corrosion. Le Cuivre présente aussi des propriétés antisalissure**.[42]**



FigureI.10 : Le Cuivre

I.7.2.Utilisation du Cuivre

Le Cuivre est présent dans de nombreux alliages, notamment dans les radiateurs et les échangeurs de chaleur. Sa bonne conductivité électrique (la meilleure parmi les métaux non précieux) et thermique en fait de lui un matériau de choix en télécommunications, dans le bâtiment, les transports ou encore le domaine de l'énergie. Les circuits intégrés et les circuits imprimés contiennent de plus en plus de cuivre. On utilise aussi le cuivre dans les tubes à vide et les guides d'onde.

Tableau I.4 : Propriétés et informations sur le Fer

Symbole	***Fe***
Numéro atomique	26
Masse atomique	5.845 u
Isotopes les plus stables	$_{56}$Fe stable avec 30 neutrons (91.72%), demi-vie de 3.1 x 10^{22} années (5.845%), $_{57}$Fe stable avec 31 neutrons (2.2%), $_{58}$Fe stable avec 32 neutrons (0.28%),
Densité	7.874
Point de fusion	1.538°C
Point d'ébullition	2.861°C

En architecture, le cuivre peut servir comme matériau de couverture étanche, sur les toits par exemple. Dans les alliages avec le nickel, le cuivre est employé en construction navale pour sa bonne tenue à la corrosion. Les composés cuivrés, minoritaires servent notamment dans les fongicides.**[42]**

Tableau I.5: Propriétés et informations sur leCuivre

Symbole	***Cu***
Numéro atomique	29
Masse atomique	63.546 u
Isotopes les plus stables	^{63}Cu stable avec 34 neutrons (69,17 %) ^{65}Cu stable avec 36 neutrons (30,83 %)
Densité	8.96
Point de fusion	1084.62°C
Point d'ébullition	2.562°C

I.7.3.Effet du Cuivre sur l'environnement et sur la santé

Le cuivre il est relativement peu toxique, et est considéré comme un oligo-élément à faible dose. Il existe une nocivité pour l'homme à très haute doses en cuivre consommé sous ses formes oxydées. Par ailleurs, le Cuivre est un oligoélément essentiel pour la spermatogénèse, tout en étant capable d'affecter la motilité des spermatozoïdes**. [42]**

Le Cuivre est un produit non biodégradable et quand il se retrouve dans le sol, il se lie fortement aux matières organiques et aux minéraux. Il ne voyage donc pas très loin et il ne pénètre presque jamais dans les eaux souterraines. Dans les eaux de surface, une fois les sols lessivés par les pluies, il peut parcourir de longues distances et s'accumuler dans les eaux de rivière et les sédiments. Il peut également se concentrer dans les plantes et les animaux quand il est présent dans le sol. Ce phénomène n'est pas à négliger sachant que la production de cuivre a augmenté lors des dernières décennies et, par conséquent, les rejets dans la nature**. [42]**

I.8.Conclusion

Les métaux lourds sont des polluants engendrés majoritairement par l'activité humaine et ont un fort impact toxicologique sur les végétaux, les produits de consommation courante et sur l'homme. Il été nécessaire de réglementer les teneurs en métaux lourd des eaux destinées à la consommation mais aussi des rejets industriel la problématique des métaux lourds repose sur le fait qu'ils peuvent se déplacer du sol vers les eaux souterraines ou superficielle et engendrer de gros problèmes. Dans cette optique, ce travail s'intéresse à l'étude de la dépollution d'un sol contaminé par un métal lourd. Les deux métaux choisis sont le fer et le cuivre.

.

Chapitre II

Méthodes de dépollution des sols

II.1.Introduction

La décision de dépolluer un sol contaminé repose sur différents critères, incluant le risque sanitaire, la localisation du site, l'usage ultérieur envisagé ainsi que le coût et les délais.

II.2.Types de traitement des sols pollués

Il y a quatre types de remédiation qui peuvent être utilisés pour traiter la pollution d'un site :

- **Traitement hors-site** : Consistant à excaver puis à transporter le sol souillé vers un site de traitement ;
- **Traitement sur site** : Consistant à excaver le sol souillé et à les traiter dans une unité de traitement placée sur le site ;
- **Traitement in situ** : Permettant de traiter le sol sans excavation.

II.3.Avantages et inconvénients des principales modes de traitement

À chaque type de pollution correspond un mode de traitement particulier, qui peut présenter des avantages et des inconvénients (Tableau II.1).**[1]**

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des modes de traitement**.[1]**

	Avantage	**Inconvénients**
Hors site	Rapidité d'exécution. Terrain réutilisable	Capacité des unités de traitement, de transfert et de transport limitées
Sur site	Pas de transfert de de la pollution flexibilité dans les traitements	Obtention d'autorisation Durée de traitement
In situ	Peu de contraintes sur site Coût attractif	Difficultés de fixer des objectifs de dépollution Obligation d'assurer un suivi, et durée de traitement longue
Confinement	Manutention du déchet limitée	Garanties à long terme

II.4.Techniques de dépollution des sols

Aujourd'hui, plusieurs technologies de dépollution des sols sont industriellement utilisées ; parmi ces techniques, certaines visent à immobiliser la pollution, d'autres à l'extraire ou à la détruire. On les classe généralement en trois familles : les traitements physiques, chimiques et biologiques.

II.4.1.Traitements physiques

Consistent soit à immobiliser les polluants, soit à apporter de l'énergie par voie thermique, mécanique ou électrique pour les dégrader ou les extraire. Ils comprennent notamment : le confinement, la stabilisation, l'incinération, la désorption thermique, le pompage, la volatilisation.

II.4.1.1.Traitements par confinement

Le confinement permet de laisser les terres à dépolluer sur le site en empêchant la propagation des polluants grâce à une barrière étanche : géo-membrane, couverture imperméable, paroi moulée…etc. Après l'érosion des sols, la percolation de l'eau vers la nappe et le ruissellement sur les terres polluées sont ainsi évités**. [2]**

II.4.1.2.La stabilisation et la solidification

Les méthodes de stabilisation et de solidification sont des techniques très proches dans leurs objectifs et leur application. La première consiste à transformer un produit relativement soluble en composé non soluble, en lui faisant subir une réaction chimique ou en l'absorbant sur une matrice neutre. La seconde consiste à mélanger le produit polluant à différents adjuvants pour en faire un matériau composite solide, peu perméable et non réactif. Aux USA, ces techniques représentent 25% des opérations de décontamination des sites traités**.[3]**

La méthode la plus usuelle consiste à mélanger du ciment et de l'eau au produit pollué (terre, déchet….), afin d'obtenir un matériau dur, non lessivable et stable dans le temps, au sein duquel le polluant sera piégé (figure II.1).Ainsi, la solidification par cimentation convient aux terres soulées par des métaux lourds. Des teneurs infimes sont obtenues par rapport aux lixiviats sur sols non traités : pour des éléments comme le zinc, l'arsenic, le plomb, le cadmium ou le cuivre, on passe de plusieurs dizaines ou centaines de mg /l dans un l'ixiviat de sol non traité, à moins de à 0,1 mg/l dans un lixiviat d'un sol solidifié, avec des pourcentages de réduction de plus de 95%.**[3]**

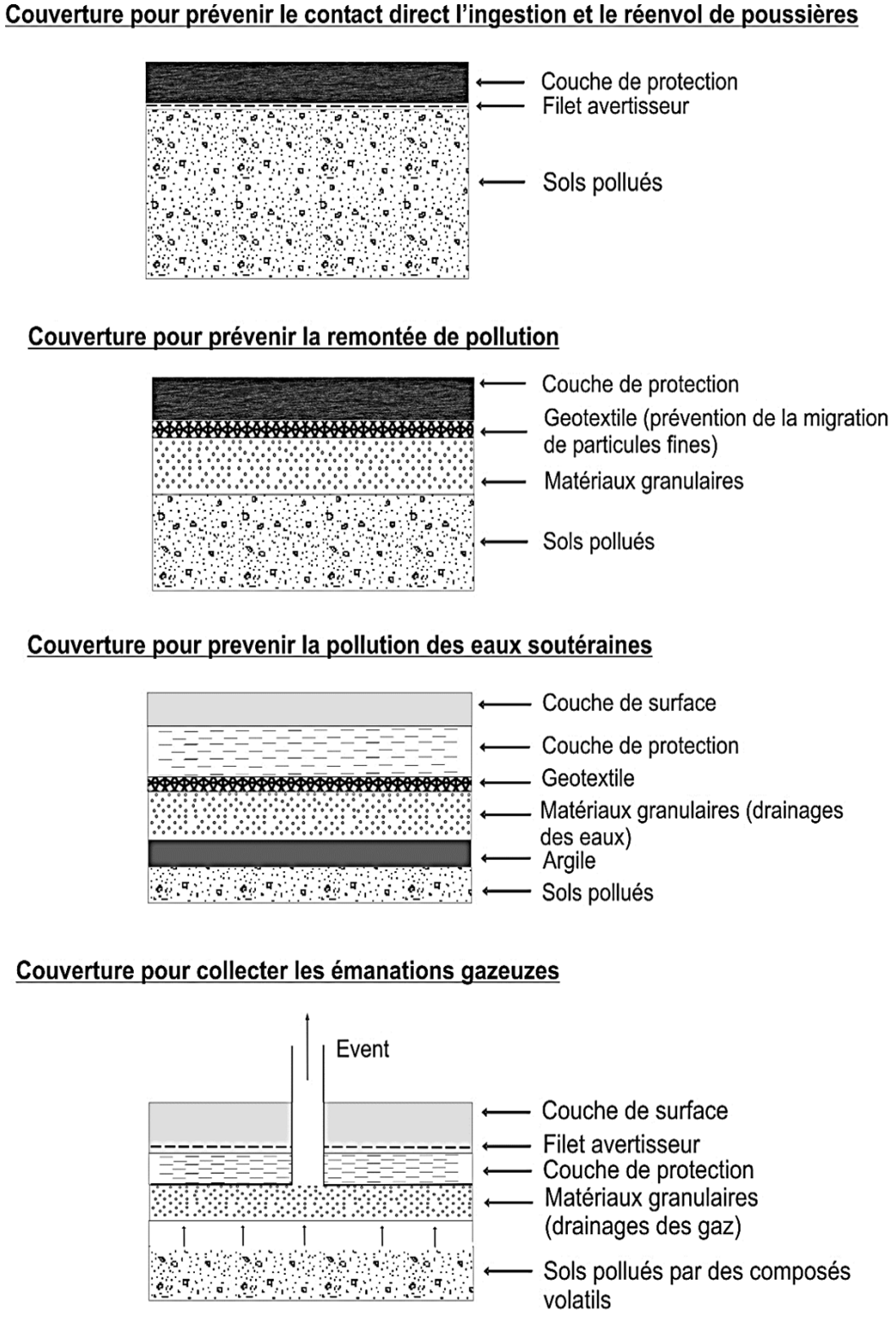


Figure II.1 : Confinement par couverture et étanchéifiassions**.[4]**

II.4.1.3.L'incinération

L'incinération est une technique très ancienne, elle consiste à utiliser les hautes températures pour détruire les produits polluants, qui sont convertis en gaz carbonique et en vapeur d'eau, plus d'autres résidus. Elle est efficace pour plusieurs produits, mais elle ne détruit pas les métaux. Techniquement, il existe plusieurs systèmes, tels les dispositifs à lit fluidisé ou à circulation, la technique infrarouge ou le four rotatif.

L'incinération est habituellement réalisée en deux étapes : la volatilisation et la destruction. La volatilisation est réalisée dans le four rotatif à une température d'environ 400°C, la destruction à plus de 1000°C.

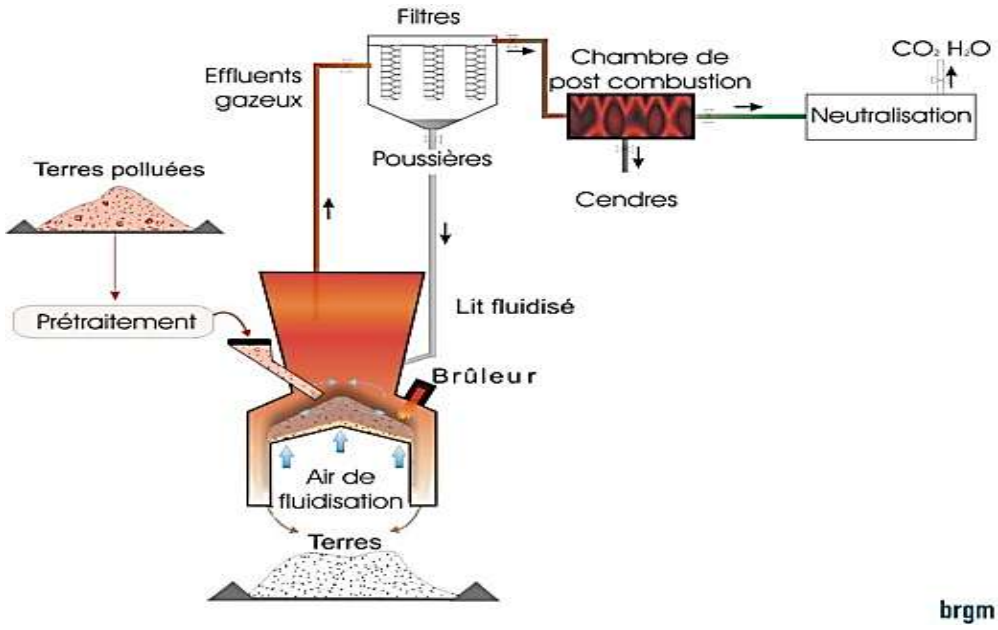


Figure II.2 : Schéma d'un incinérateur.**[2]**

II.4.1.4.Pompage

Le pompage permet d'extraire les polluants organiques ou minéraux en phase dissoute dans la zone saturée et de les diriger vers des points d'extraction. Un rabattement en un ou plusieurs points de la nappe d'eau est alors crée (augmentation du gradient hydraulique).Cette technique traite le panache plutôt que la source de pollution. Il est donc judicieux de traiter au préalable, si possible la source de pollution. Car, l'eau en passant dans une zone pollué va se charger en polluants.

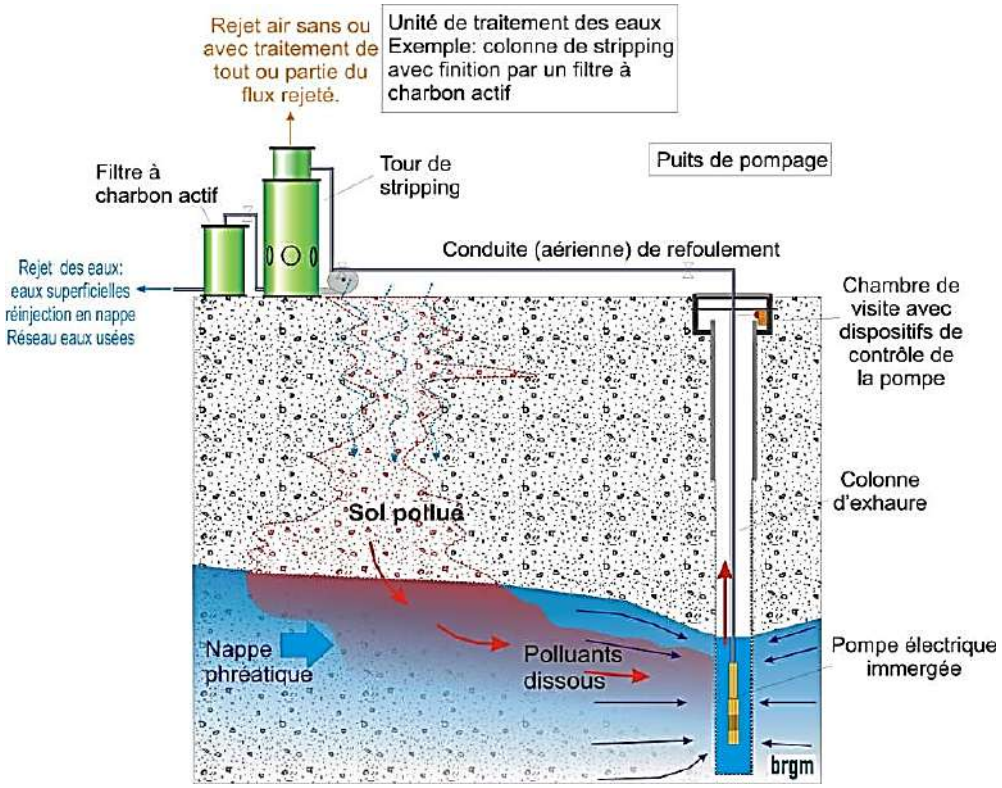


Figure II.3 : Schéma principe de pompage.**[2]**

II.4.2.Traitement thermique

Dans le cadre de ces techniques physiques existent aussi des traitements thermiques qui peuvent être réalisés sur le site même «on-site» ou sur des sites appropriés «hors-site» comme une usine d'incinération. Cette technique est adaptée aux sols contaminés par des composés organiques facilement oxydables et convertibles en CO_2 et H_2O. Il est nécessaire de procéder à une excavation des sols, un broyage et un tamisage avant le traitement thermique. **[5]**

Il existe deux méthodes de chauffage. Le chauffage direct où le sol est chauffé à 1000°C directement en introduisant de l'oxygène. Et le chauffage indirect où le sol est met dans un four étanche et n'est pas en contact avec la source de chaleur. La température avoisine les 800 °C et est suffisante pour extraire les polluants par l'intermédiaire des vapeurs se dégageant ces deux méthodes sont très efficaces mais très coûteuses en énergie. **[6] ,[7]**

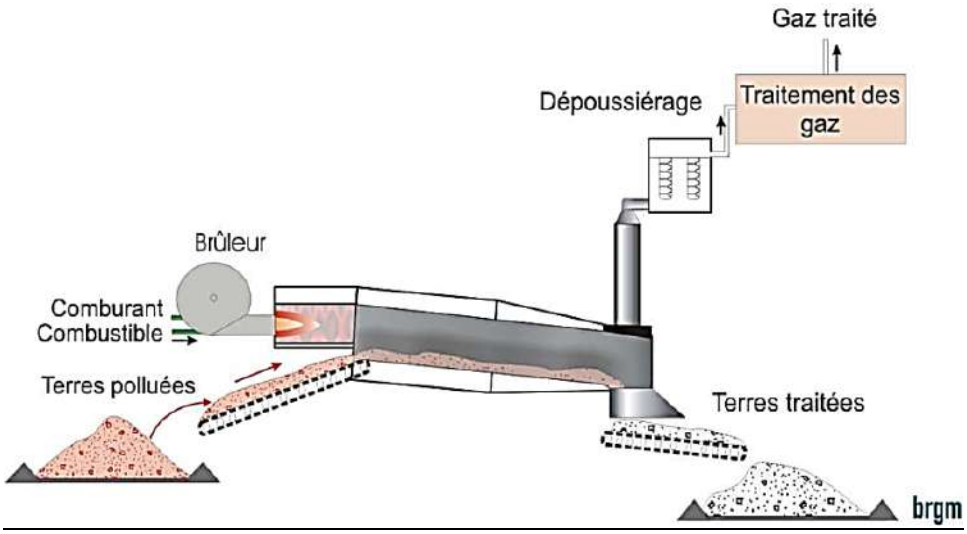


Figure II.4 : Désorption thermique **[2]**

II.4.3. Traitement par lavage

Le lavage des sols consiste en une extraction par une phase aqueuse des contaminants éludables. Cette extraction à l'eau peut être favorisée par l'emploi de tensioactifs ou par des corrections de pH en fonction des éléments à extraire et de leur état dans le milieu. **[8]**

Les polluants sont :	principalement présents dans la phase solide du sol	en équilibre entre les phases solide et dissoute du sol	principalement présents dans la phase dissoute	principalement présents dans la phase liquide non aqueuse du sol	dans un état physique insuffisamment définit
Lavage par agents chimiques ou tensio-actifs	☺	☺	☺	☺	😐

☺ Technique typiquement adaptée au traitement 😐 Technique pouvant être adaptée au traitement ☹ Technique typiquement inadaptée

Figure II.5 : Domaine d'application du lavage en fonction de l'état physique de la pollution dans la zone non saturée**.[9]**

Les techniques de lavages sont mises en œuvre de diverse façons :

- **In situ :** L'intervention consiste à faire percoler de l'eau depuis la surface vers la nappe ou un horizon imperméable et à mettre en œuvre des techniques de récupération des eaux souillées (cône de rabattement et pompage /traitement pompage périphérique).L'eau peut être recyclée dans le procédé ou éliminée après traitement ou envoyée vers une station d'épuration.

- **Sur site :** Le lavage implique l'implantation d'installations de traitement qui sont souvent assez importantes. Cette technique implique de pouvoir disposer d'une filière de déshydratation des sols traités avant réemploi.

- **Hors site :** De très grandes installations de lavage ont été réalisées dans le cadre de la décontamination des terres et sables souillées lors de marées noires. Ces techniques restent en pratique applicables à de nombreux polluants.

II.4.4.Traitement par des réactions chimiques

Le traitement chimique des sols ou des eaux consiste à provoquer la réaction des polluants avec certains réactifs qui généreront des composés moins toxiques et ayant éventuellement une mobilité différente de celle du polluant de départ. Habituellement, ce traitement est appliqué sur le site ; dans certains cas, on rencontre des applications in situ.

On peut distinguer trois types de réactions principales :

II.4.4.1.Traitement par oxydation

Dans le cas d'un traitement de décontamination, l'oxydation sera provoquée par un oxydant puissant, ajouté au matériau à traiter. Le traitement par Oxydation chimique in situ consiste à introduire un oxydant dans la zone à traiter afin de minéraliser les polluants ou de les rendre plus biodégradables.

Les principaux oxydants couramment utilisés pour traiter les sols et les eaux contaminées sont le permanganate, le peroxyde d'hydrogène avec un catalyseur de fenton et l'ozone**[9].** De nouveaux oxydants comme le persulfate et le peroxyde de calcium sont apparus ces dernières années, ils ont pour avantage de réagir de manière contrôlée**.[10]**

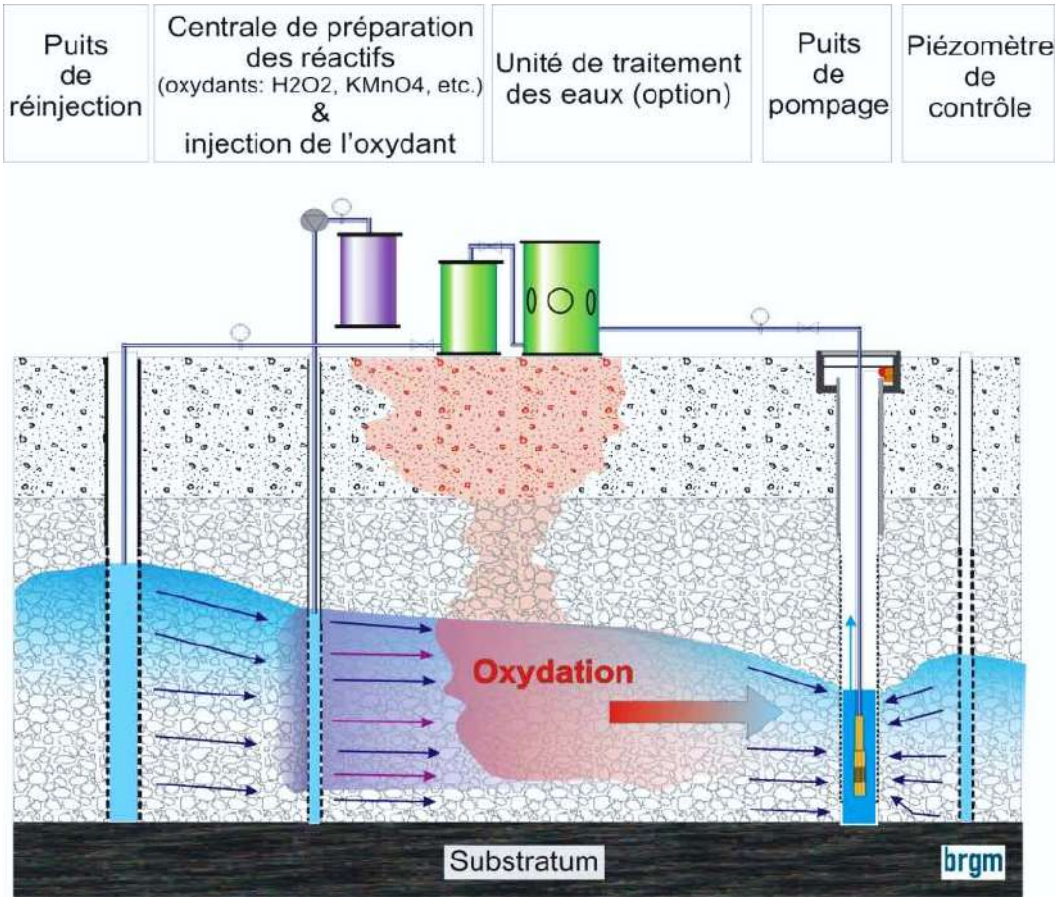


Figure II.6 : Schéma de principe de l'oxydation chimique in-situ **[11]**

II.4.4.2.Traitement par réduction

Correspond par définition à la réaction inverse de l'oxydation, c'est –à-dire qu'on va s'efforcer de diminuer l'état d'oxydation d'un produit, en ajoutant un agent réducteur ou donneur d'électrons. Il s'agit là aussi d'un phénomène naturel bien connu en physico-chimie des sols et l'ajout d'un agent réducteur ne va faire qu'accélérer le processus ; ce type de réaction concerne plus particulièrement certains produits organiques (aromatique, pesticides...), et quelques métaux (chrome et sélénium).

Pour dégrader les composés organiques par réduction, les principaux agents utilisés sont les métaux, ajoutés en poudre et intervenant comme catalyseurs. Le plus employé d'entre eux est sans conteste le fer, en raison de sa grande disponibilité et de son coût peu élevé.

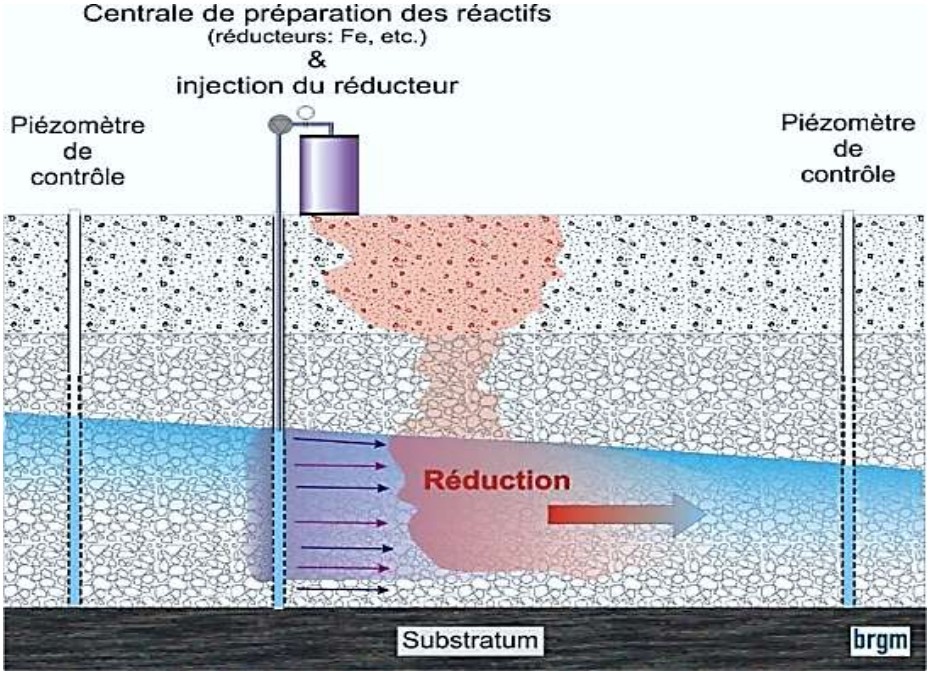


Figure II.7 : Schéma de principe de réduction chimique**. [12]**

II.5.Conclusion

Dans notre payé, la pollution des sols demeure moins préoccupante que celle des eaux, ceci est reflété par l'absence de mesures obligatoires de contrôler et d'analyser les sites avoisinants une activité source d'une probable pollution, telles : les stations de services, usine ou activité de métallurgie ou autres…. Contrairement aux payés développés, le sol figure à égalité avec l'eau quand il s'agit de pollution. Plusieurs sociétés et personnes activent dans le volet de remédiation des sols pollués par le billet des études d'impacts, proposition de solutions de dépollution ou même par une action directe de traitement.

Dans le tableau II.2 nous donnons un résumé comparatif sur les différentes techniques utilisées pour la dépollution des sols.

Tableau II.2 : Techniques de dépollution des sols**[13]**

Techniques	Lieu	Milieu	Surface	Nature du Polluant	Durée
Lavage et Entraînement	SS IS	Sol perméable	Faible à grande	Organiques et certains métaux	Variable
Confinement par encapsulation et mises-en alvéole	HS IS	Indifférent	Variable	Indifférent	Rapide
Stabilisation	HS	Sol perméable et phase liquide	Variable	Tout polluant non volatil	Rapide
Incinération	HS	Indifférent au sol	variable	Tous Polluants déchets	Rapide
Oxydation	SS, IS	Sol Permeable , eau	Variable	Organiques, peu volatile	plusieurs mois
Reduction	SS, IS	Sol Permeable , eau	Variable	Organiques, peu Volatil et certains métaux	plusieurs mois

HS : Hors site, SS : Sur site, IS : In situ

[1] VANESSA ZELMAR, CELINE THOMASSET, JULIE. S, YAËL S. : La pollution des sols par les activités, EV 03 : écologie urbaine et environnement », UTC université technologique de Compiègne, dossier EV 03. p 11.

[2] Recherches Google.http://jentreprendsenbourgognefranchecomte.fr/themes/environnement/protection-des-sols/les-techniques-de-traitement-de-la-pollution-des-sols.Le 29 mai 2019, à21 :38.

[3] EPA,.Superfund Innovative Technology Evaluation Program .Technology Profiles 6 th edition . 1993, Rapport EPA, P424.

[4] Nathanail J., Bardos P. et Nathanail P. (2002) **,** Contaminated Land Management, Land Quality Press and EPP Publications, Londres, p 467.

[5] Recherché Google ,http://www.selecdepol.fr/fiches-techniques/pompage-et-traitement/description , Le 29 mai 2019, a 21 :38.

[6] Sama Ksaman .U ;T.H.Peng,J.H.Kvo,C.H.LU,M.Y.Wey.Applied Thermal Enginneering, 2016,93, p 131-138.

[7] G.T.Perchet. Institut National Polytechniques de Toulouse, Thèse (2008).

[5] Recherché Google, http://www.selecdepol.fr/fiches-techniques/pompage-et-traitement/description, Le 29 mai 2019, a 21 :38.

[6] U.Sama Ksaman;T.H.Peng,J.H.Kvo,C.H.LU,M.Y.Wey.Applied Thermal Enginneering, 2016,93, p 131-138.

[8] M.W.Lim, E.V.Lam,P.E.Poh.Marine Pollution Bulletin, inpress,(2016)

[9] Paul Lecomte ; les sites pollues ; traitement des sols et des eaux souterraines.

[10] E S C T P, 1999; Brown, 2003; Osgerby, 2006.

[11] Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph. avec la collaboration

De Darmendrail D., Conil P., Bodénan F., Fauconnier D., Hubé D., Colombano S. Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes, Document du BRGM 300, Nouvelle édition 2008, p 99.

[12] Association française de normalisation (AFNOR) (2003) – Norme NF X 31-620 -Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués (études, ingénierie,

réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution). Septembre 2003, p 40.

[13] Davide. H. sites et sole pollues, master CAD. 2008-2008.

[8] M.W.Lim, E.V.Lam,P.E.Poh.Marine Pollution Bulletin, inpress,(2016)

[9] Paul Lecomte ; les sites pollues ; traitement des sols et des eaux souterraines.

[10] E S C T P, 1999; Brown, 2003; Osgerby, 2006.

[11] Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph. avec la collaboration

De Darmendrail D., Conil P., Bodénan F., Fauconnier D., Hubé D., Colombano S. Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes, Document du BRGM 300, Nouvelle édition 2008, p 99.

[12] Association française de normalisation (AFNOR) (2003) – Norme NF X 31-620 -Qualité du sol - Prestations de services relatives aux sites et sols pollués (études, ingénierie, réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution). Septembre 2003, p 40.

[13] Davide. H. sites et sole pollues, master CAD. 2008-2008.

Chapitre III

Matériels et Méthodes

III.1.Matériels et produits

III.1.1.Produits utilisés

- $FeSO_4$ (98%)et $CuSO_4$ (99%)
- HCl (36%)
- Tensioactif: SDS(SIGMA), Concentration micellaire critique est 2.3g/l
- Tensioactif : Tween20 (SIGMA-ALDRICH); Concentration micellaire critique est 0.07g/l
- Eau distillé

III.1.2.Appareillage

- Agitateur (HEIDOLPH de type MR3001K (100-1400tr/min))
- Balance de précision (METTLER)
- Conductimètre (HANNA instruments)
- Etuve (MEMMERT) 105°C
- spectrophotomètre infrarouge a transformé de fourrierFTIR(SHIMADZU)
- Spectrophotomètre UV-VISIBLE (UV-mini 1240 SHIMADZU)
- pH mètre (HANNA instruments HI8519N)
- Tamis

III.2.Procédure de travail

III.2.1.Caractérisation de sable

III.2.1.1.Taux d'humidité

Peser 10 ± 0.01g de sable puis sécher à l'étuve à poids constant pendant 3h à une température de 105°C, peser l'échantillon séché teneur en eau exprimé en pourcentage massique est donnée par la formule suivante **:**

$$\mathbf{H}(\%) = \frac{(\mathbf{m_0 - m_1})}{\mathbf{m_0}} . \mathbf{100} \qquad \textbf{(III.1)}$$

Avec H% : Taux d'humidité

m_0 : masse de sable avant séchage (g)

m_1 : masse de sable après séchage (g)

III.2.1.2. Mesure de pH

On mélange 10g de sable avec 100ml d'eau distillée. Après agitation pendant 3h, on mesure le pH de la solution par le pH-mètre .

III.2.1.3.Conductivité électrique

On mélange 10g de sable avec 100ml d'eau distillée. Après agitation pendant 3hon mesure la conductivité de la solution grâce à un conductimètre.

III.2.1.4.Masse volumique apparente

La détermination de la masse volumique apparente consiste à introduire une masse m de sable séché dans une éprouvette de volume V_0 égale à 10 ml. La masse volumique apparente est calculée par la relation s de sable uivant **:[1]**

$$\rho_{app}=\frac{m}{V_0} \qquad \textbf{(III.2)}$$

Avec

ρ_{app}: Masse volumique apparente ($g/cm^{3)}$

m : Masse de sable (g)

V_0 : Volume de sable dans l'éprouvette (cm^3)

III.2.1.5.Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du sable a été effectuée par tamisage ; cette méthode consiste à faire passer une masse bien définie (2Kg) de sol à travers une série de tamis imbriqués l'un sur l'autre. L'objectif de cette méthode est de déterminer les dimensions des grains par tamisage à sec, et de connaitre la classe du sable utilisé.

III.2.1.6.Détermination du diamètre moyen des particules

Le diamètre moyen (dm) des particules de sable est déterminé à partir de la courbe de distribution granulométrique au point d'intersection entre les courbes refus cumulé et tamisa cumulé exprimés en pourcentage.

III.2.1.7.Surface spécifique par unité de masse des particules

La connaissance de la surface spécifique est d'une grande importance dans la caractérisation d'une poudre ou d'un ou d'un solide. La surface spécifique représente la surface totale par unité de masse du produit solide. Elle est calculée à partir de l'expression suivante : **[2]**

$$\mathbf{S = \frac{6}{\rho_{app}.dm}} \qquad \textbf{(III.3)}$$

Avec :

dm: Diamètre moyen du grain du sable (mm),

P_{app}: Masse volumique apparente du sable (g/cm^3),

S : Surface spécifique de sable ($m^{2}.g^{-1}$),

III.2.1.8.Détermination de la classe du sable

Pour déterminer la classe d'un sol quelconque on doit calculer le module de finesse noté MF dont la formule est donnée ci-après**:[3]**

$$\mathbf{MF = \frac{1}{100}\sum refus\ cumulé\ en\%\ des\ tamis\ de\ diamètre(5; 1.25; 0.315; 0.63; 0.16)} \qquad \textbf{(III.4)}$$

Selon la valeur de ce paramètre, on distingue les classes suivantes :

- Si 1.8<MF< 2.2 : le sable est à majorité de grains fins,
- Si 2.2 < MF <2.8 : c'est un sable mélangé
- Si 2.8< MF <3.3 : le sable est un peu grossier

III.2.2.Préparation du sable contaminé par le métal

- ❖ Préparer 50 ml de solution métallique $FeSO_4$ de concentration 400 mg /l
- ❖ Agiter jusqu'à dissolution complète
- ❖ Ajouter 100 g de sol à la solution métallique préparée, mélanger très bien
- ❖ Couvrir le bécher avec papier aluminium. Laisser dans le congélateur : la contamination est prête
- ❖ Nommer cette préparation selon l'âge de contamination ; âge1 = 1jour ; âge5= 5jours, âge11 = 11jours, âge18 = 18jours.

III.2.3.Traitement du sol

- Sécher le sable contaminé en mettant le bécher de sable dans l'étuve à T=105C° pendant 3h ;

- Un échantillon de 2 g du sable contaminé subit un lavage sous les conditions : température T= 25C° ; vitesse d'agitation w= 200 tr/min ; temps t= 2h.

- Les solutions utilisées pour le traitement sont : l'eau distillée, solution de tensioactif SDS, solution de tensioactif Tween20 noté Tw et le HCl. Les concentrations utilisées de chaque solvant sont présentées dans le tableau III.1 ;

Tableau III.1 : Concentrations des solutions de traitement

Solution de traitement	HCl (mol/l)		SDS (g/l)		Tw(g/l)	
Concentration	0.1	0.5	0.5	1	0.5	1

❖ Les échantillons liquides ont été analysés par la spectroscopie UV-VISIBLE ;

❖ A la fin du traitement les échantillons du sol traité sont récupérés et analysées par la spectroscopie infrarouge.

III.2.4.Préparation des courbes d'étalonnages

Afin d'obtenir la courbe d'étalonnage du fer et du cuivre on a préparé plusieurs solutions de concentrations différentes ; qui ont été analysées par la spectroscopie UV-VISIBLE. Les courbes d'étalonnage du fer et du cuivre obtenues sont données dans **l'annexe A.**

III.2.5.Méthodes d'analyse

III.2.5.1.Spectrophotométrie UV-VISIBLE

Spectrophotométrie d'absorption dans UV- visible est une méthode d'analyse qui permet de déterminer l'absorption d'une solution àune longueur d'onde judicieusement choisie. Le domaine spectral est divisé en trois plages de longueurs d'onde appelées :

- Proche UV (185-400 nm)
- VISIBLE (400-700 nm)
- Très proche infrarouge (700-1100)

La plupart des spectromètres vont de 185 à 900 nm



Figure III.1 : Spectrophotomètre UV-VISIBLE (UV-mini 1240 SHIMADZU)

III.2.5.2.Loi de Béer- Lambert

Laloi de Béer- Lambert indique que l'absorbance d'une solution à une longueur d'onde donnée est proportionnelle à sa concentration et la distance parcouru par la lumière dans celle-ci. La spectroscopie UV-visible peut donc être utilisée pour déterminer cette concentration. Cette détermination se fait dans la pratique soit à partir d'une courbe d'étalonnage qui donne l'absorbance en fonction de la concentration.

La loi de Béer -Lambert est la suivante **:[3]**

$$\mathbf{A = \varepsilon . L . C} \qquad \mathbf{(III.5)}$$

A : désigne l'absorbance (paramètre optique sans dimension)

Ɛ : coefficient d'absorption moléculaire (l. Mole -1.cm-1)

L : l'épaisseur de la solution traversé ou trajet optique (cm)

C : la concentration molaire de l'échantillon dans la solution (mol/l)

III.2.5.3.Spectrophotométrie Infrarouge

La spectrophotométrie infrarouge est une technique d'analyse qui consiste à soumettre un échantillon à un rayonnement infrarouge. Les molécules organiques soumises à ce

rayonnement absorbent ces radiations en modifiant leurs énergies de vibration. Suivant les types de liaisons et de fonctions chimiques présentes dans le milieu, un spectre infrarouge caractéristique de l'échantillon ou de sa surface analysée est obtenu.

Les spectres IR sont caractérisés par des longueurs d'ondes de vibrations caractéristiques, soit de déformation ou d'élongation.

III.2.6.Méthodes de calcul

III.2.6 .1.Calcul de la quantité désorbée q_t

La quantité du métal désorbée du sol est calculée comme suit :

$$\mathbf{q_{t=\frac{m_t}{2}}} \qquad \textbf{(III.6)}$$

q_t : Quantité désorbée de polluant à l'instant t (mg/g)
m_t : Masse de polluant dans la solution à l'instant t
2 : Masse de sable contaminé (2g)

III.2.6.2.Calcul du rendement

Le rendement est donné par la relation suivante **:**

$$\mathbf{E = 100 * \frac{mt}{m_i}} \qquad \textbf{(III.7)}$$

Avec

E : Rendementd'élimination (%)
m_i= Masse initiale de polluant (mg)
m_t= Masse de polluant dans la solution à l'instant t (mg)

III.2.7.Etude de la cinétique de la désorption

Dans cette partie la cinétique du traitement du sol pollué par un métal, à savoir le fer et le cuivre a été modélisée selon les modèles pseudo premier ordre et pseudo second ordre. Les

constantes de vitesse de désorption des métaux lourds pour les deux modèles sont déterminées graphiquement par la linéarisation des équations de chaque modèle.

❖ **Modèle cinétique pseudo premier ordre**

Il a été supposé que dans ce modèle la vitesse de désorption à l'instant t est proportionnelle à la différence entre la quantité désorbée à l'équilibre (q_e), et la quantité (q_t) désorbée à cette instant. La constante de vitesse de désorption du premier ordre est déduite à partir du modèle établi par Laguerre.**[4]**

La loi de vitesse s'écrit :

$$\frac{dq_t}{dt} = K_1(qe - q_t) \qquad \textbf{(III.8)}$$

Avec

t= Le temps de contact (min)

K_1= Constante de vitesse de désorption (min^{-1})

L'intégration de l'équation **(III.8)** donne:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - K_1 . t \qquad \textbf{(III.9)}$$

❖ **Modèle cinétique du pseudo-second ordre**

Dans ce modèle, il a été supposé que la quantité désorbée (q_e)et la constante du pseudo-second ordre K_2peuvent être déterminées expérimentalement à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de(t/q_t)en fonction de t. **[5]**

La loi de vitesse s'écrit :

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \qquad \textbf{(III.10)}$$

Avec

K_2: Constante de vitesse pour le pseudo second ordre

q_e: Quantité désorbée à l'équilibre (mg/g)

q_t : Quantité désorbée à l'instant t (mg/g)

L'intégration de l'équation **(III.10)** donne la formule suivante :

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 * q_e^2} + \frac{1}{q_e} \qquad \textbf{(III.11)}$$

---

[1]Tiffreau C., Sorption du mercure II à interface eau/solide, Etude experimental etmodélisation, Thèse de doctorat, Université louis pasteur, Strasbourg, 1996.

[2]Duchaufour. Ph., Introduction à la science du sol : Végétation, environnement,6ième édition, abrégé de pédologie, Dunod, Paris, 1999.

[3]SPIN, méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation (les métaux lourds), Axe " Génie des Procédés", Ecole des Mines de Saint-Étienne, 1997.*

[4]Raoul CALVET, Le sol propriétés et fonction -tome 1 : Constitution, Structure Phénomènes

aux interfaces, Edition France Agricole, (2003).

[5]Travis, C.C. Etnier, E.L, 'A survey of sorption Relationship for réactive solutés'. Journal of

EnvironmentalQuality,(1981).10,3-17.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1.Caractérisation physico-chimique et granulométrie

Les propriétés physico-chimiques obtenues pour le sable utilisé dans ce travail sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau IV.1 : Caractéristiques physico-chimique et diamètre moyen du sable

Paramètre	Résultat	Unité
Humidité	1.3	%
pH	8	/
Conductivité électrique	1229	µS/cm
Masse volumique apparente	10	g/cm^3
Diamètre moyen des particules	8	mm
Surface spécifique	0.075	m^2/g

Les résultats présentés dans le tableau IV.1montrent :

- Un pH alcalin du sable, qui se présente favorable pour l'adhésion et l'adsorption des deux métaux sur sa surface.
- Conductivité électrique élevée par rapport à celle de l'eau distillée. Ceci s'explique par le relargage de quelques ions qui se trouvent dans le sol.
- Le diamètre moyen des particules calculé à partir de la courbe de distribution granulométrique du sable présentée dans l'annexe A est égale à 8mm.
- La classe du sol utilisé est entre [1.8 ; 2.2] donc, le sable est à majorité de grains fins

IV.2.Dosage des métaux lourds par spectrophotométrie UV-visible

L'analyse des solutions métalliques a été réalisée par spectrophotométrie UV-visible. Le Tableau**VI.2** montre les longueurs d'ondes maximales de Fe et Cu obtenues après l'essai scan.

Tableau VI.2 : Les longueurs d'ondes maximales de Fe et Cu

Absorbât	Fe	Cu
λmax(nm)	288	402

Nous avons établi une courbe d'étalonnage pour chaque métal qui nous a permis de déterminer le domaine de concentration pour lequel la loi de Beer Lambert est respectée. Dans ce but, nous avons mesuré les absorbances de différentes solutions qui correspondent à λmax du fer et du cuivre. Les courbes d'étalonnages du Fer et du Cuivre sont présentées dans **l'annexe A.**

IV.3.Lavage du sol contaminé par le Fer

IV.3.1.Evolution de l'élimination du Fer en fonction du temps

Les résultats du traitement du sol contaminé par le Fer sont présentés dans les figures **(IV.1** ; **IV.2** ; **IV.3**et**IV.4).**

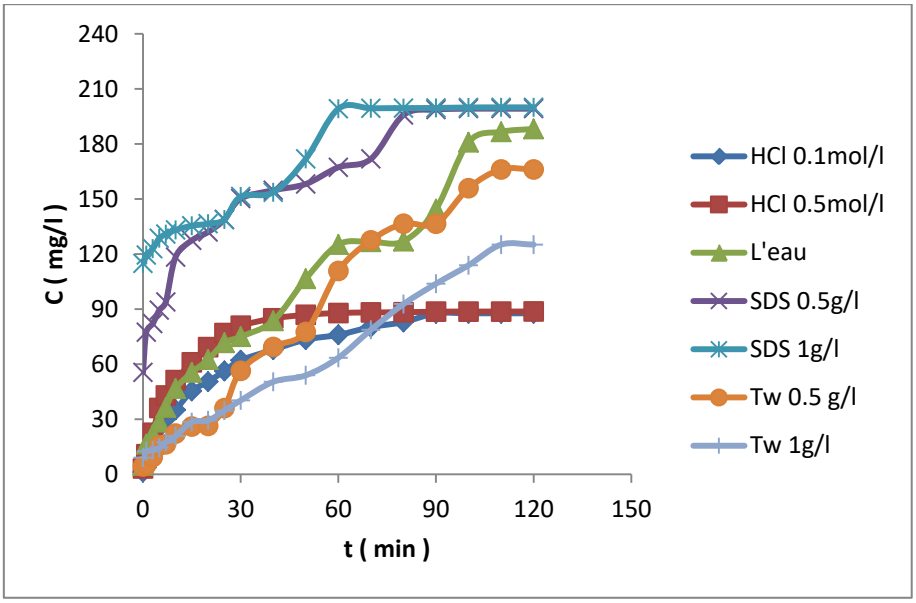


Figure IV.1: Concentration du Fer éliminé en fonction du temps, Age1 ; CFe=400mg/l; T=25°C; W=200tr/min

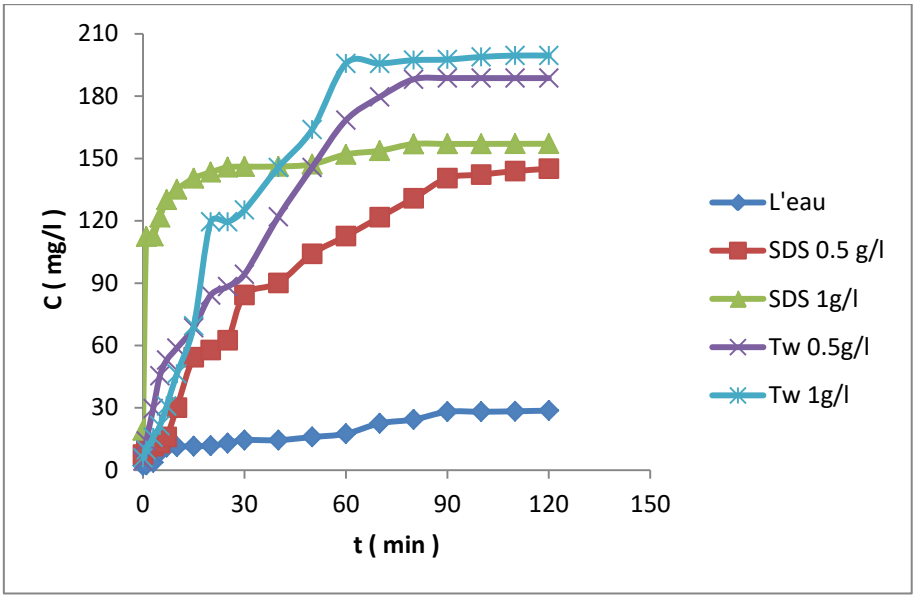


Figure IV.2: Concentration du Fer éliminé en fonction du temps, Age5;C_{Fe}=400mg/l; T=25°C; W=200tr/min

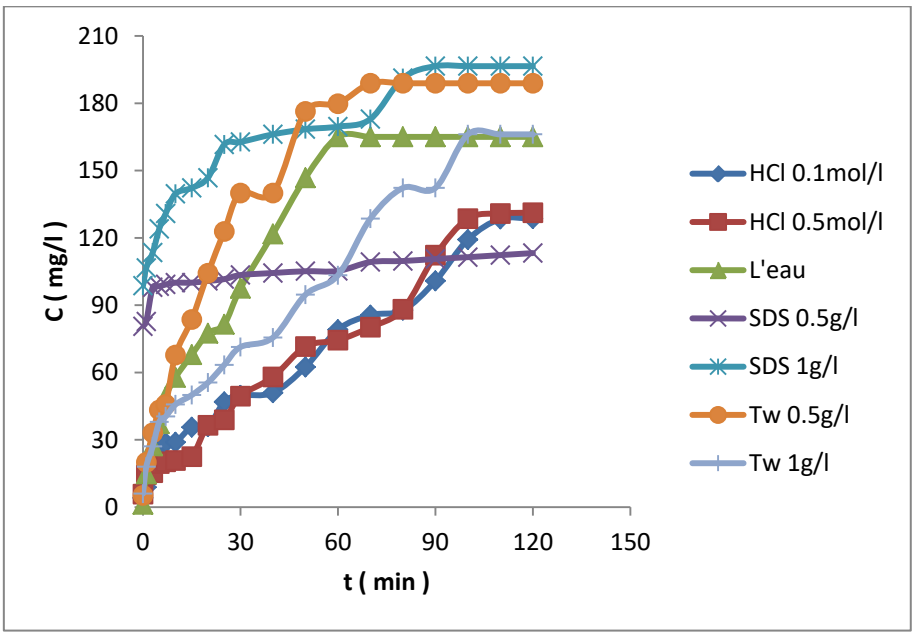


Figure IV.3: Concentration du Fer éliminé en fonction du temps, Age11;C_{Fe}=400mg/l; T=25°C; W=200tr/min

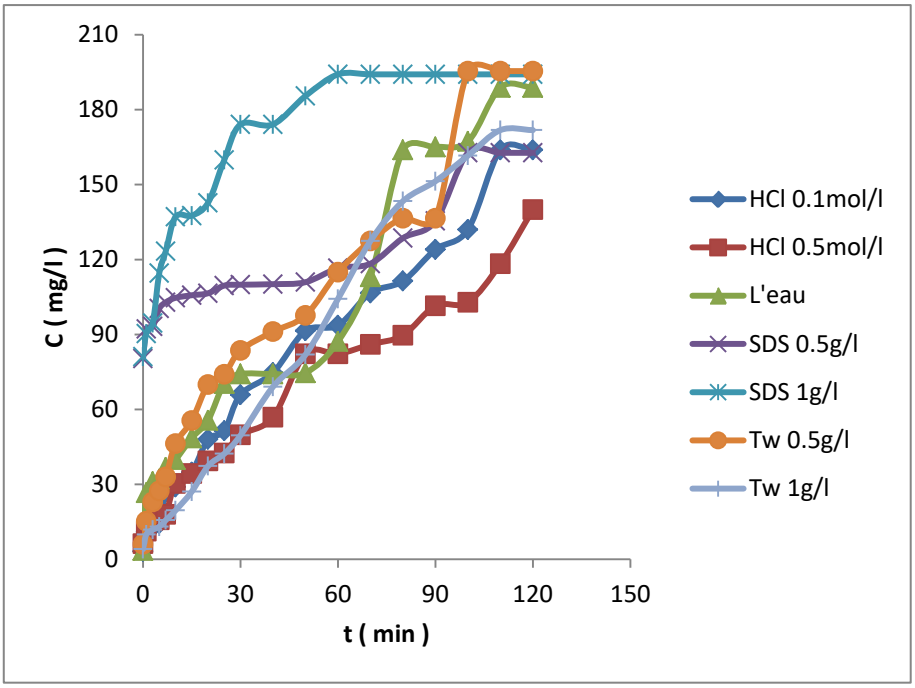


Figure IV.4: Concentration du Fer éliminé en fonction du temps, Age18;C_{Fe}=400mg/l; T=25°C; W=200tr/min

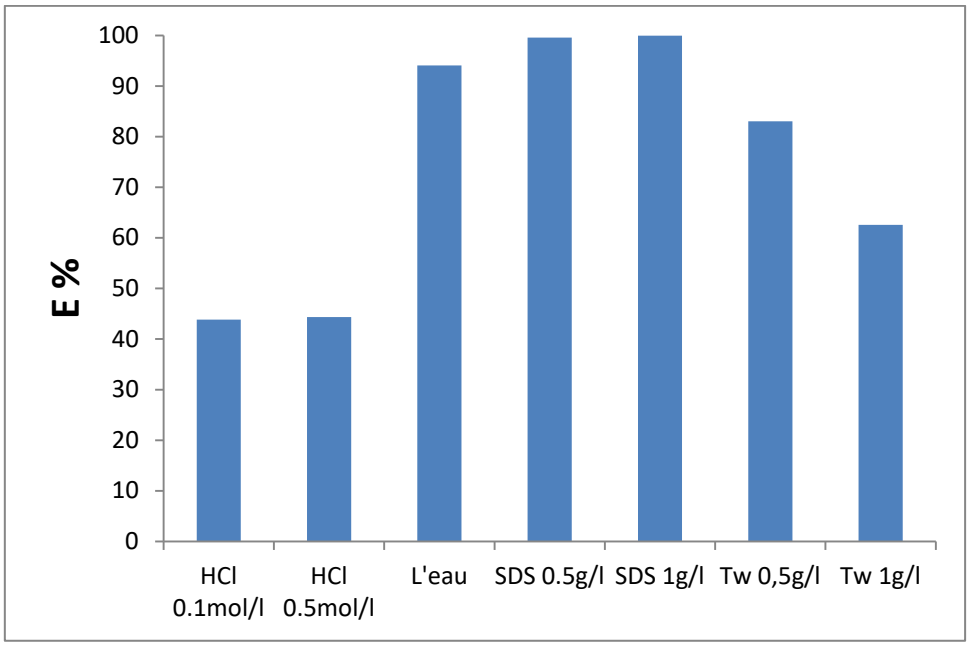
Les résultats obtenus à l'issue de ces expériences ont montré que pour les différents solvants; le traitement se fait globalement en deux ou trois parties:

- 0-20min: nous remarquons une augmentation rapide de la concentration du fer éliminé.
- 20-60min: la cinétique devient lente, et l'augmentation de la concentration se ralentis
- >60min: la concentration du Fer devient constante, donc l'équilibre est atteint.

Pendant la première étape la concentration élevée peut être expliquée par l'élimination du fer présent sur la surface du sable accessibles aux solutions de lavage. Tandis que, dans la deuxième étape la concentration du métal dans le liquide augmente lentement ; par ce que les molécules de traitement ne peuvent pas accéder facilement au métal. Cependant, on constate que la troisième étape qui est la plus lente signifiant que l'équilibre de désorption est atteint ce qui se traduit par la saturation des pores.

IV.3.2.Rendement de l'élimination

En utilisant la formule présentée dans le chapitre précédent, nous avons calculé le rendement de l'élimination du Fer présent dans le sable. Les valeurs sont présentées sous forme des



FigureIV.5: Rendement de l'élimination du Fer pour les différents solvants, Age 1;$C_{Fe=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min

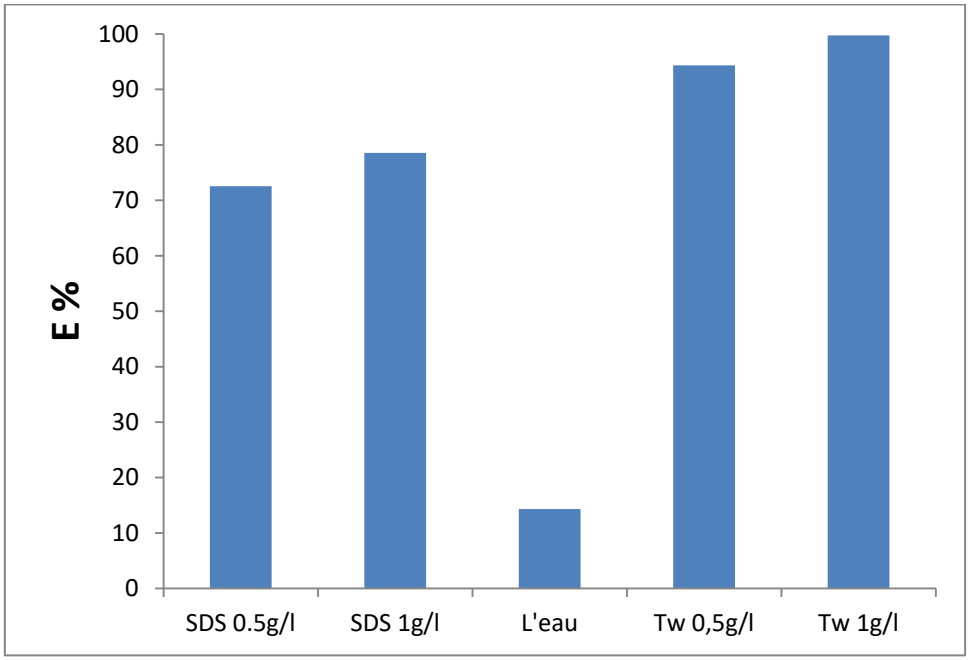


Figure IV.6: Rendement de l'élimination du Fer pour les différents solvants, Age 5;$C_{Fe=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min

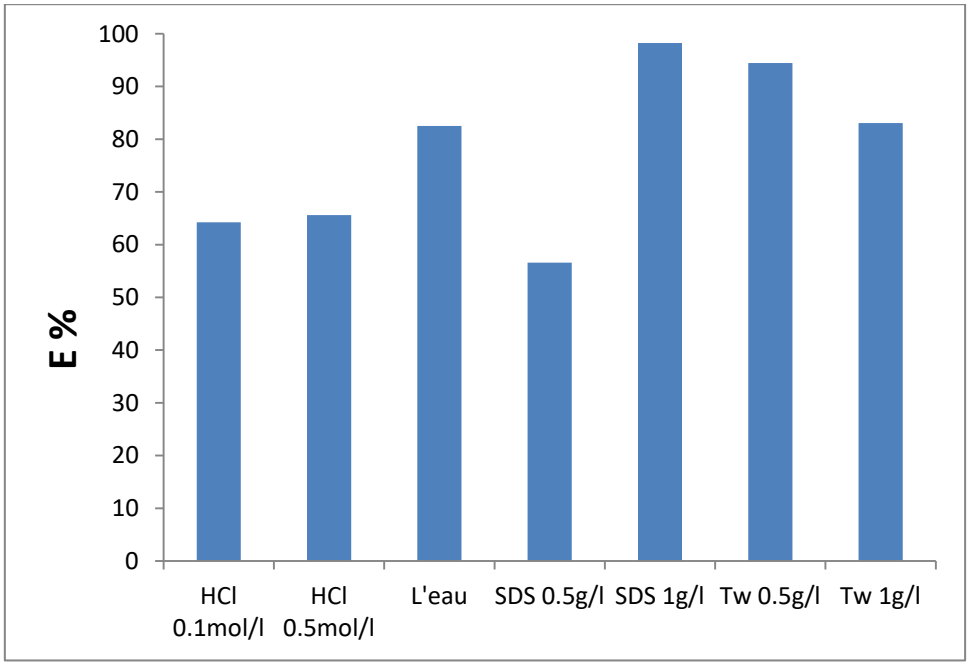


Figure IV.7: Rendement de l'élimination du Fer pour les différents solvants, Age 11;$C_{Fe=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min

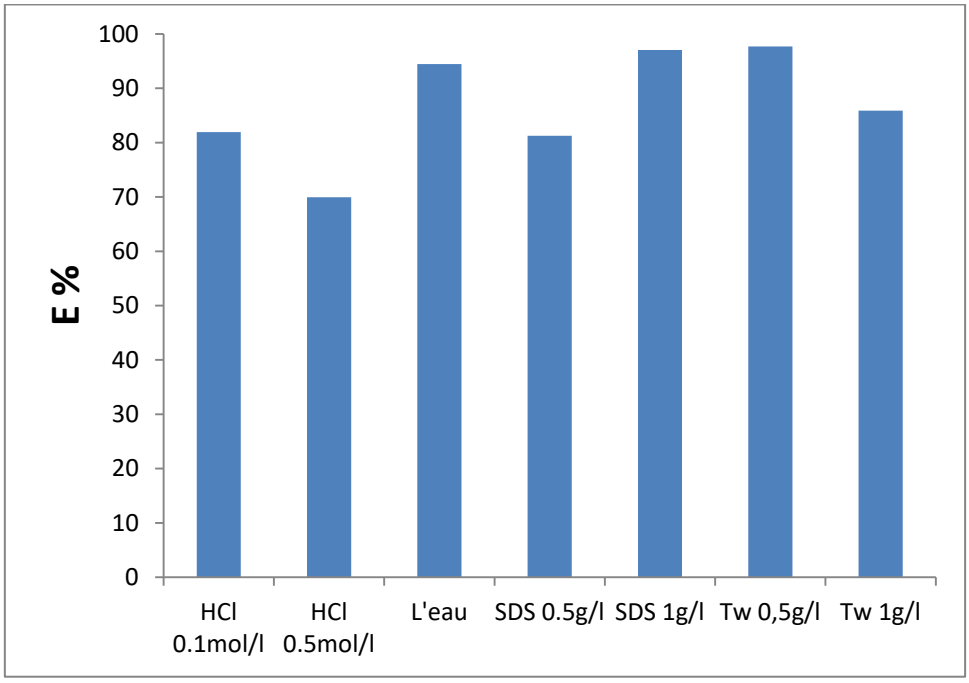


Figure IV.8: Rendement de l'élimination du Fer pour les différents Solvant, Age 18;$C_{Fe=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min

D'après les figures (IV. 5; IV.6; IV.7; IV.8) on constate que:

- Pour toutes les contaminations, le meilleur rendement est obtenu par les solutions de **SDS ;**
- Pour une contamination d'Age 1, le meilleur rendement est obtenu par la solution de SDS de concentration 1g/l
- L'eau montre une efficacité remarquable (figure IV.7) comparée à l'acide.
- Pour la majorité des contaminations les deux tensioactifs sont comparables en termes d'efficacité.

Ces résultats peuvent être interprétés par l'effet détergent des tensioactifs qui facilite la mobilisation du métal de la surface du sable. Ceci a été trouvé dans d'autres travaux .Concernant le tensioactif SDS, son efficacité plus intense que celle du Tween 20 (tensioactif non ionique) est due à son caractère anionique qui facilite l'attraction et la dissolution des cations métalliques au sein des micelles de SDS.

IV.3.3.Cinétique de la désorption

Les résultats de l'étude cinétique sont présentées sur les figures (**IV.9 ; IV.10; IV.11 et IV.12.)**Présentées ci-après. Les deux modèles cinétiques pseudos premiers, et pseudo second ordre ont été testés pour modéliser l'élimination du Fer à partir des différentes contaminations

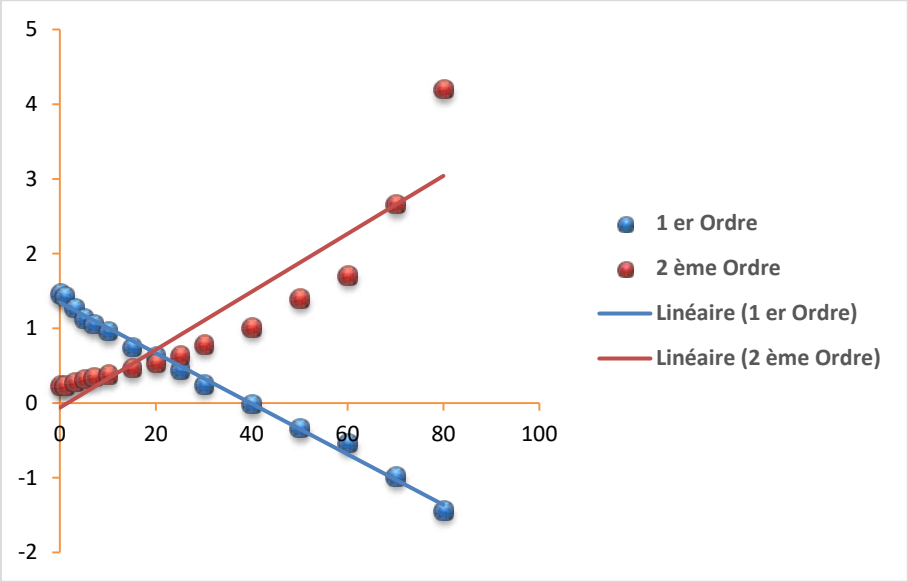


Figure IV.9: Application des modèles du pseudo premier et pseudo second ordre pour le Fer Age 1;HCl 0.1 mol/l

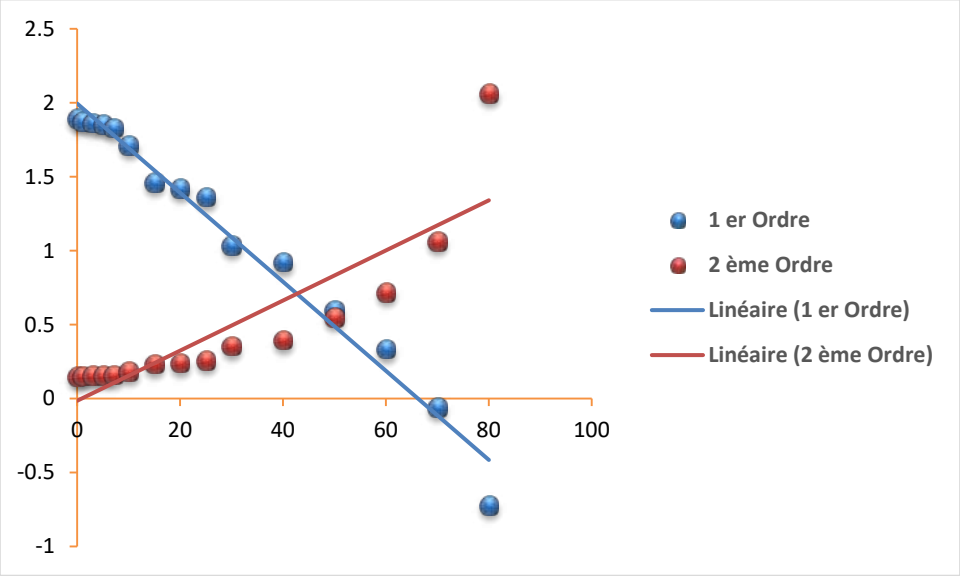


Figure IV.10 : Application des modèles du pseudo premier et pseudo second ordre pour le Fer Age5 ; l'eau

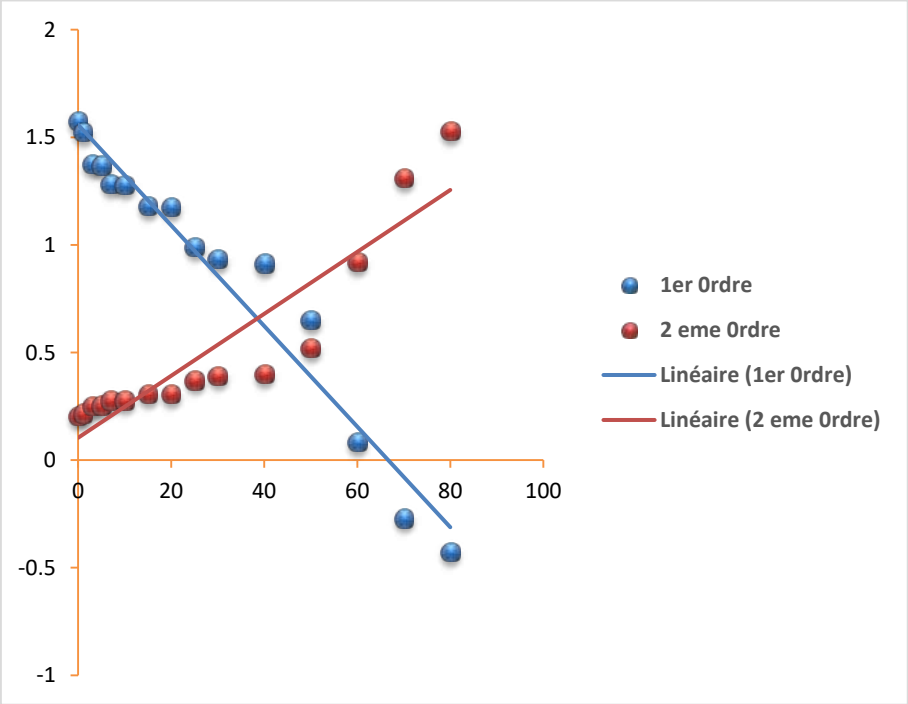


Figure IV.11 : Application des modèles du pseudo premier et pseudo second ordre pour le Fer Age 11 ; HCl 0.1 mol/l

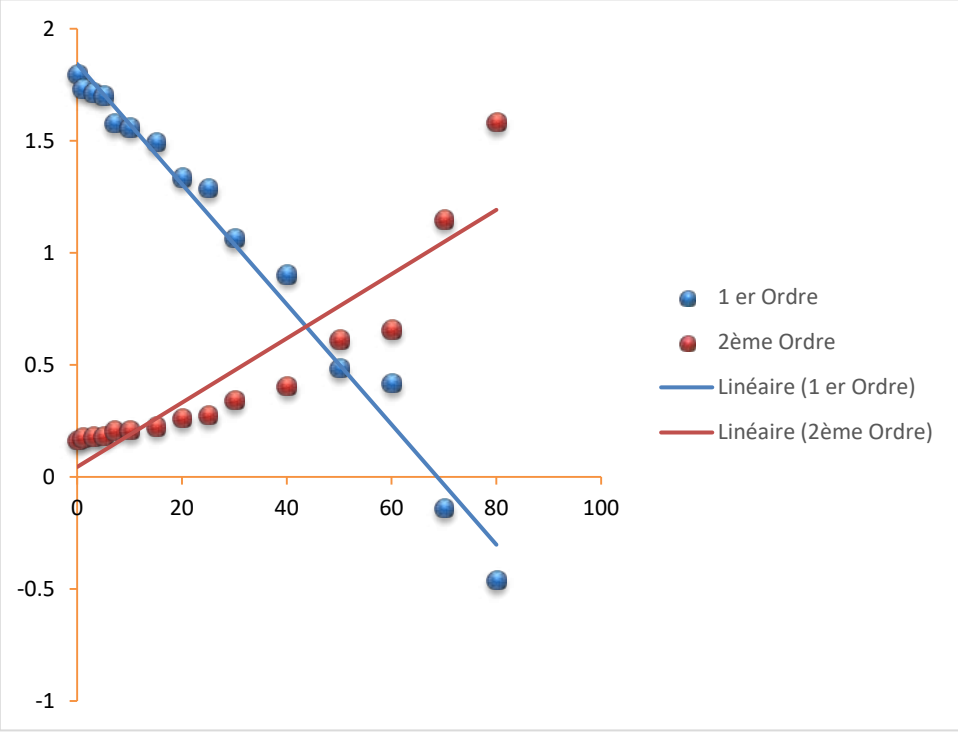


Figure IV.12 : Application des modèles du pseudo premier et pseudo second ordre pour le Fer Age 18;HCl 0.5 mol/l

Les différentes figures montrent que les points tracés selon le modèle cinétique premier ordre sont bien alignés par rapport à ceux du second ordre. Pour confirmer ou vérifier cette constatation, nous avons réalisé la linéarisation de ces résultats. Les valeurs obtenues des paramètres cinétiques sont regroupés dans le tableau **(IV.3).**

Tableau IV.3 : Résultats d'application des modèles du pseudo premier et pseudo deuxième ordre pour le Fer

		1^{er}Ordre		$2^{ème}$Ordre	
	Age	K_1	R^2	k_2	R^2
Fer	1	0.033	0.992	0.038	0.850
	5	0.023	0.978	0.014	0.759
	11	0.030	0.954	0.016	0.846
	18	0.026	0.982	0.014	0.842

A partir de ces résultats on constate que :

- Le modèle cinétique du premier ordre s'applique bien dans le cas de la désorption du fer sous les conditions étudiées. Ceci est déduit vu les valeurs obtenues des coefficients de détermination R^2 qui sont très proches de l'unité.
- Les vitesses d'adsorption restent comparables pour les contaminations étudiées.
- Les valeurs de la constante de vitesse obtenues pour les différents âges sont très proches 0.02-0.03. ceci peut être traduit par le fait que que l'élimination du métal fer se fait de la même manière pour une contamination jeune (1jour) ou une autre plus âgée (18 jours).
- Les valeurs des constantes de vitesse obtenues s sont assez élevées. Ainsi, on peut dire que la désorption des métaux lourds présents dans le sable se fait avec une vitesse plus ou moins rapide.

IV.4. Lavage du sol contaminé par le Cuivre

IV.4.1. Evolution de l'élimination du Cuivre en fonction du temps

Les résultats du traitement du sol contaminé par le Cuivre sont présentés dans les figures **IV.13** ; **IV.14 ; IV.15 ;IV.16 ;**

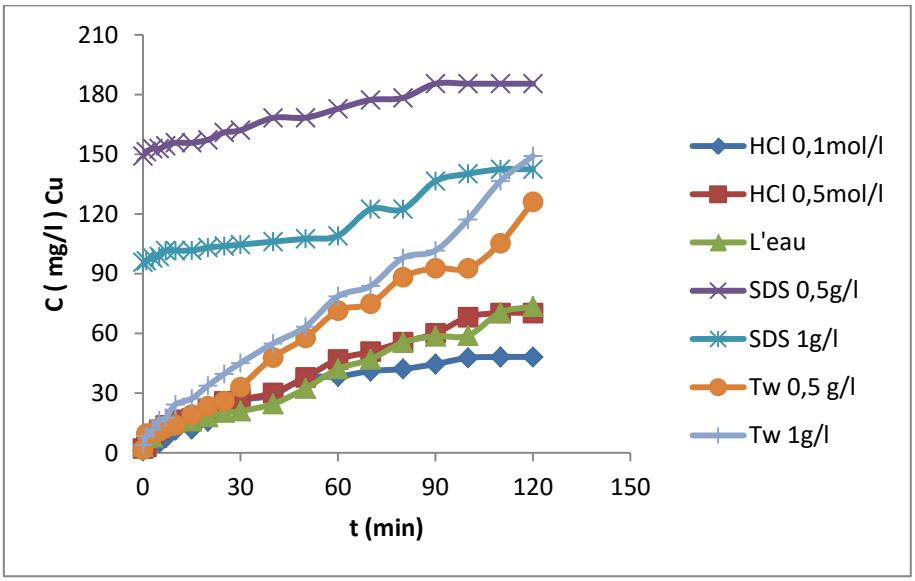


Figure IV.13: Concentration du Cuivre éliminé en fonction du temps, Age1;C_{Fe}=400mg/l; T=25°C; W=200tr/min

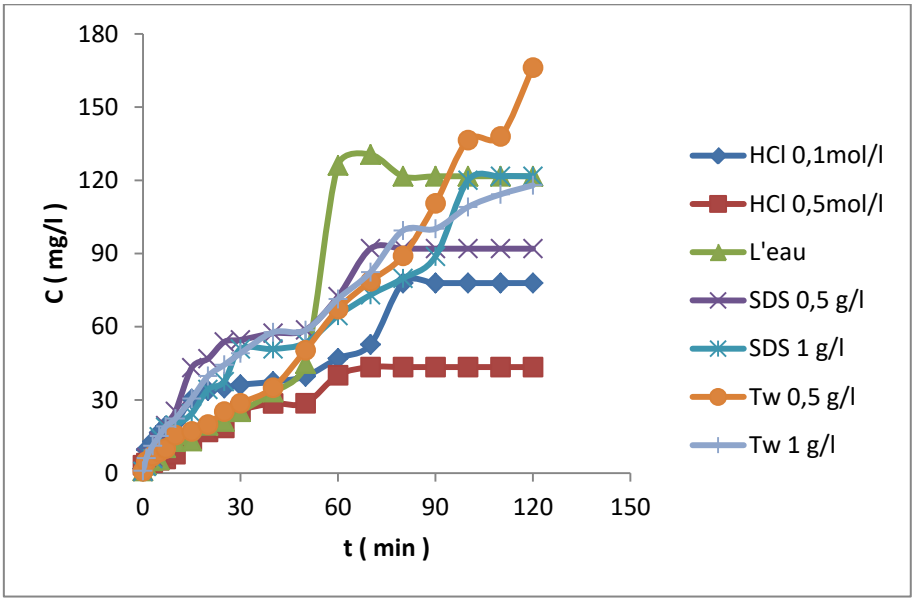


Figure IV.14: Concentration du Cuivre éliminé en fonction du temps, Age5;C_{Fe}=400mg/l; T=25°C; W=200tr/min

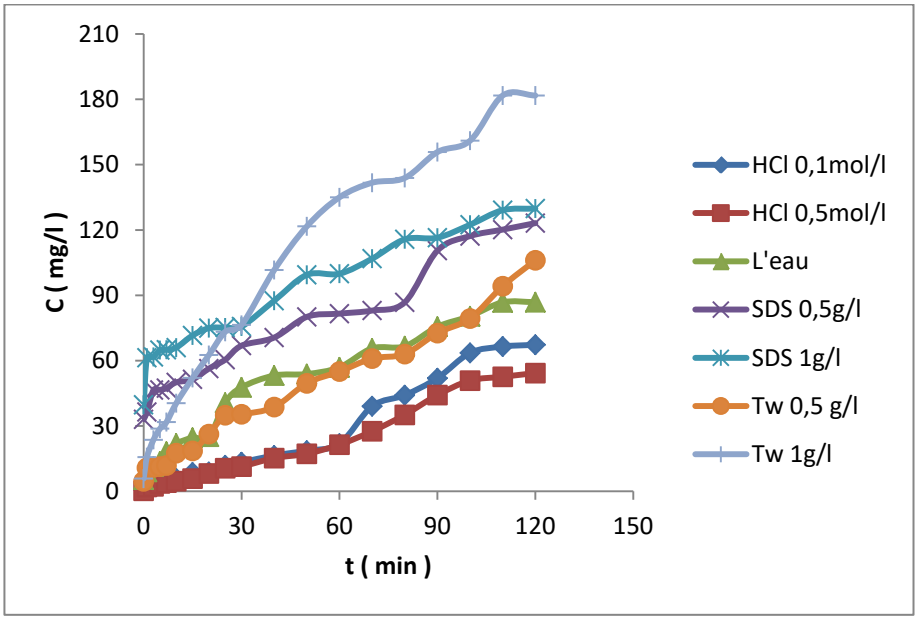


Figure IV.15 : Concentration du Cuivre éliminé en fonction du temps, Age11 ; CFe=400mg/l; T=25°C; W=200tr/min

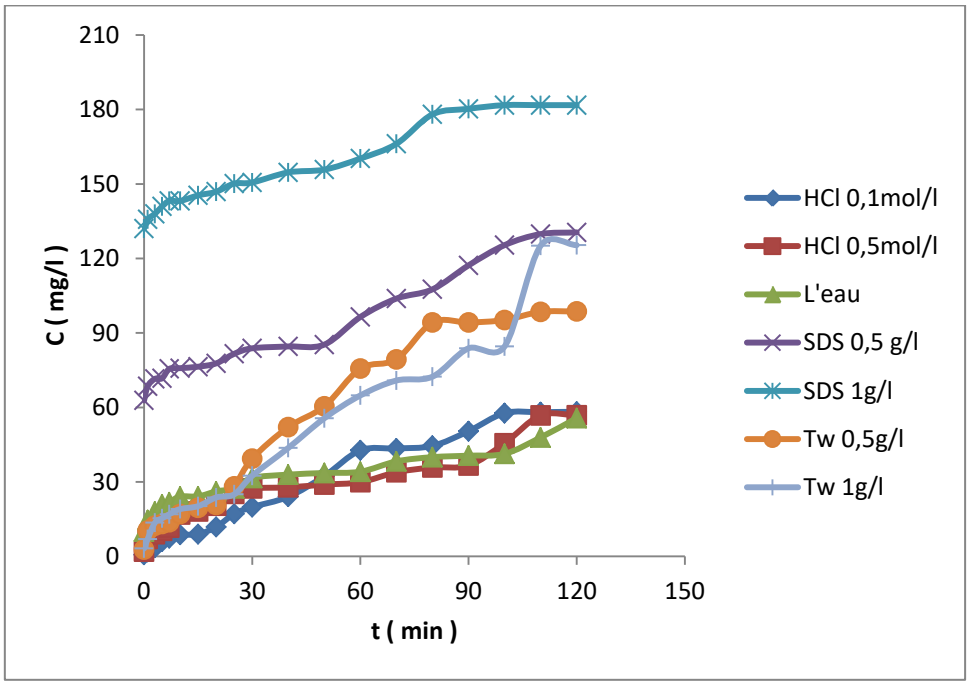


Figure IV.16: Concentration du Cuivre éliminé en fonction du temps, Age18 ; CFe=400mg/l; T=25°C; W=200tr/min

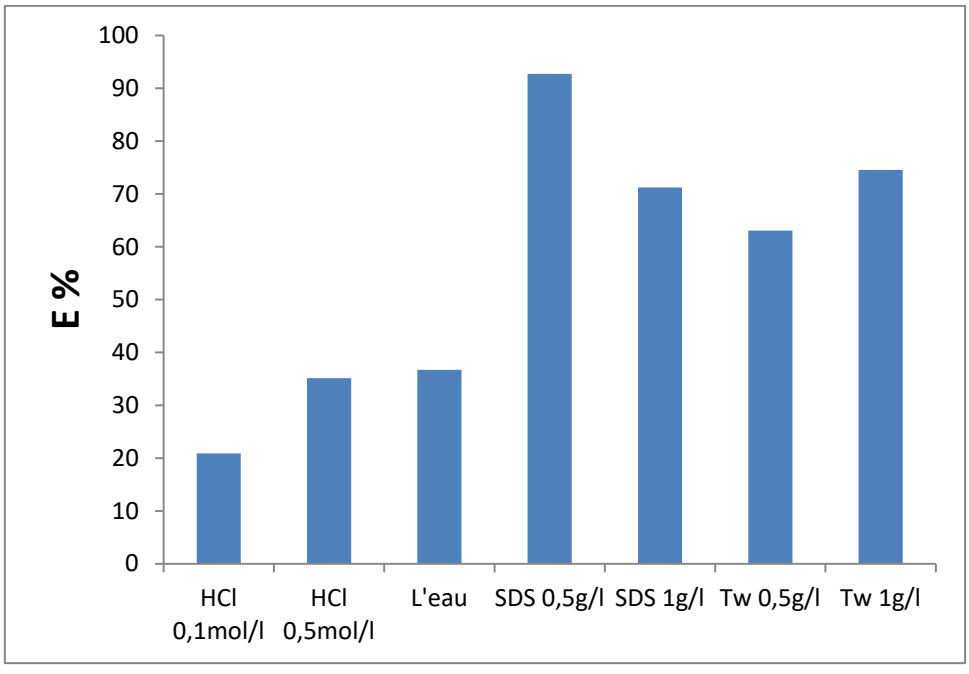
Les résultats obtenus à l'issue de ces expériences ont montré que pour les différents solvants ; la désorption se fait selon l'âge de contamination comme suit :

- lescontaminations1 jour et 18jours montrenttrois comportements différents. Le premier pour le HCl et l'eau, le deuxième pour le tensioactif non ionique Tw et le dernier pour le SDS.
- Pour HCl et l'eau : deux parties constituent la courbe, une montée rapide puis une stationnarité de la concentration à l'équilibre (temps d'équilibre <10min)
- Pour le Tween20 : deux parties constituent la courbe, une montée lente puis une stationnarité de la concentration à l'équilibre (temps d'équilibre > 60min)
- Pour le SDS : trois parties constituent la courbe, une première partie très rapide (instantanée) qui n'est pas visible sur la figure, puis un palier plus au moins constant pour entamer une troisième partie qui aussi stationnaire (équilibre)au alentours de 90minutes.

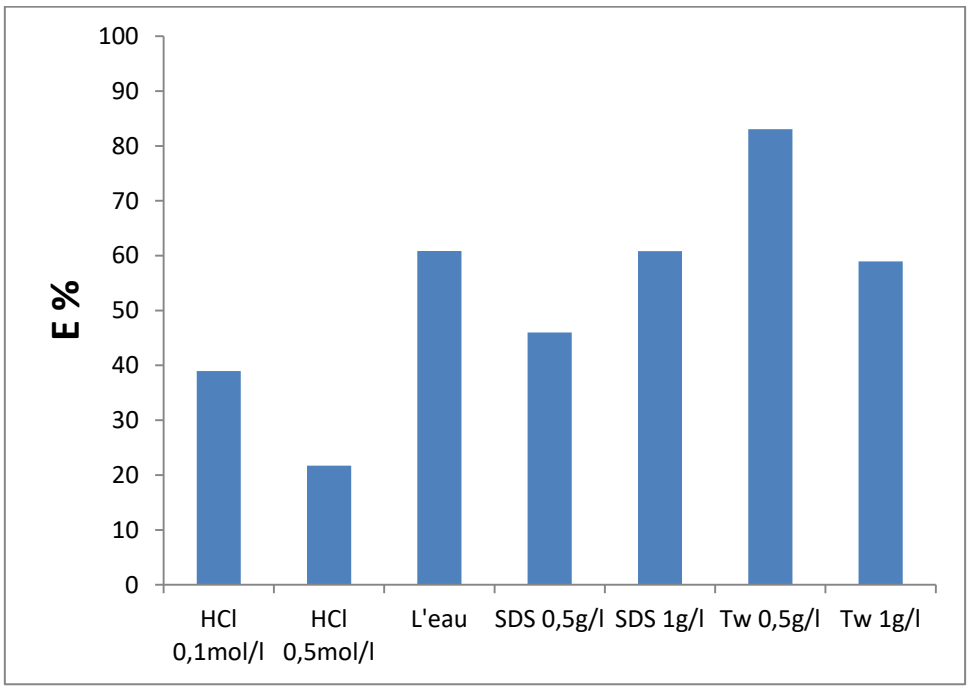
La comparaison de ces courbes avec celles du fer, montre que le traitement se de manières différentes.

IV.4.2. Rendement de Cuivre

L'évaluation du procédé de traitement du sol adopté pour le cuivre a été faite par le calcul du rendement de l'élimination du métal présent dans le sable. Les valeurs obtenues sont présentées sous forme d'histogrammes**VI.17** ; **VI.18 ;VI.19** et**VI.20.**



FigureIV.17 : Rendement de l'élimination du Cuivre pour les différents solvants Âge1;$C_{Fe=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min



FigureIV.18 : Rendement de l'élimination du Cuivre pour les différents solvants, âge5;$C_{Fe=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min

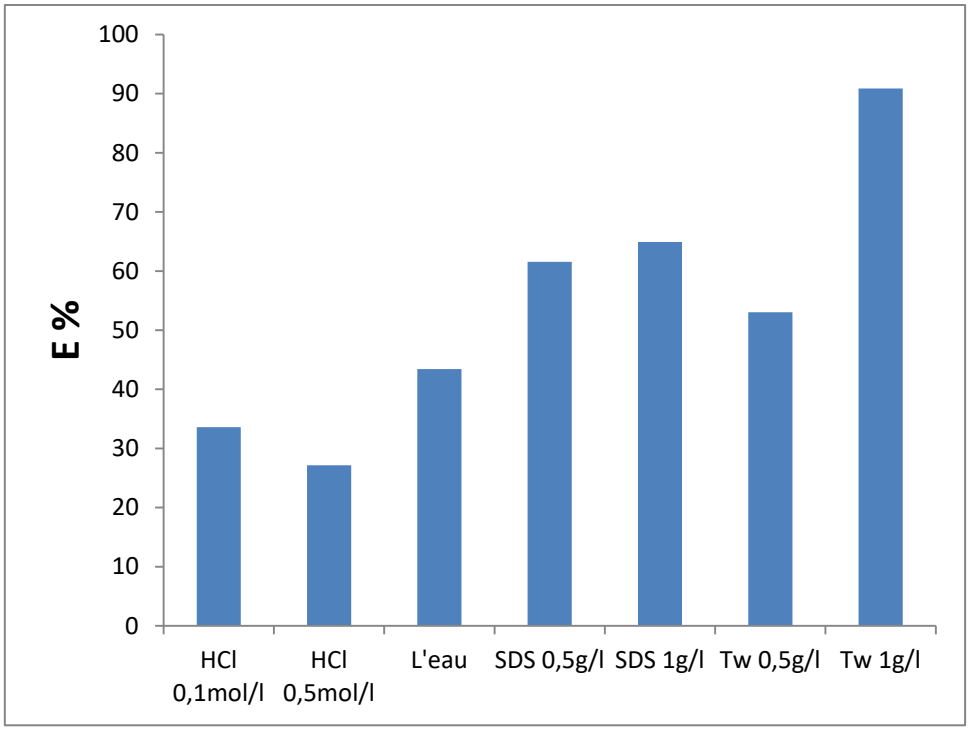


Figure IV.19 : Rendement de l'élimination du Cuivre pour les différents solvants, âge11;$C_{Fe=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min

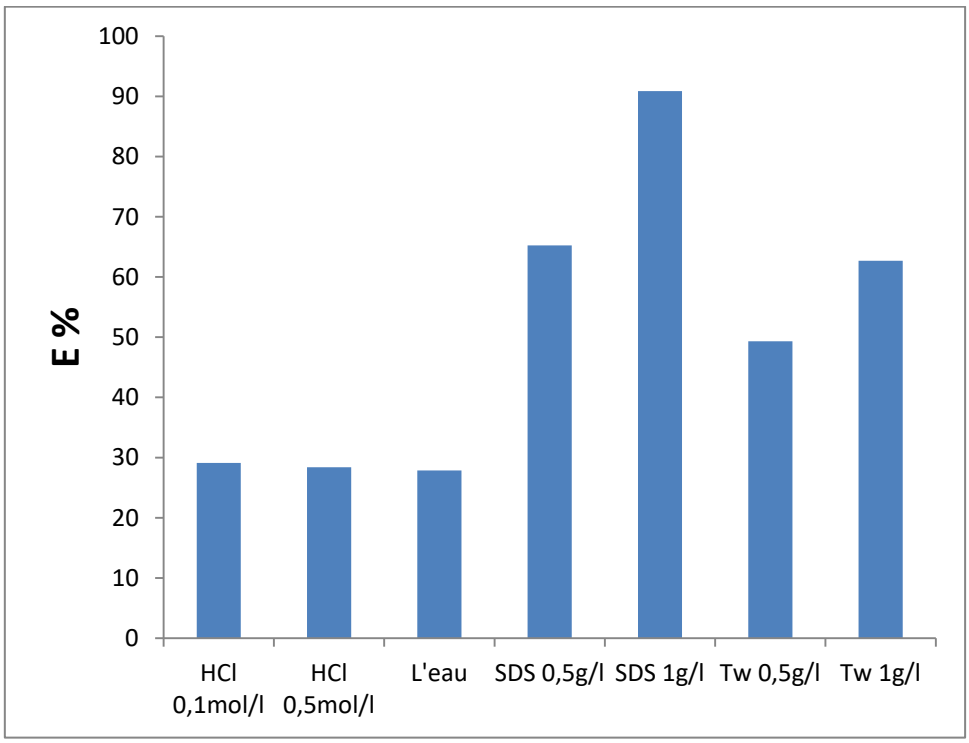


Figure IV.20 : Rendement de l'élimination du Cuivre pour les différents solvants, Age 18;$C_{Fe=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min

L'examination des figures **IV. 17 ; IV.18 ; IV.19** et **IV.20,** qui présentent le rendement d'élimination du cuivre en utilisant les différentes molécules montre que :

- Pour les différents contaminations (âge1;âge 5;âge 11; âge 18), les meilleurs rendements sont obtenus par les tensioactifs.
- Globalement le meilleur rendement est obtenu par la solution de SDS de concentration 0,5g/l s
- Les conditions, âge 1; $C_{Cu=}$ 400 mg/l; T=25°C; w=200tr/min donnent le rendement d'élimination le plus élevé avec le Tween 20.

IV.4.3.Cinétique de la désorption

Les résultats de l'étude cinétique sont présentées sur les figures suivantes **(IV.21** ; **IV.22** ;**IV.23**; **IV.24).**

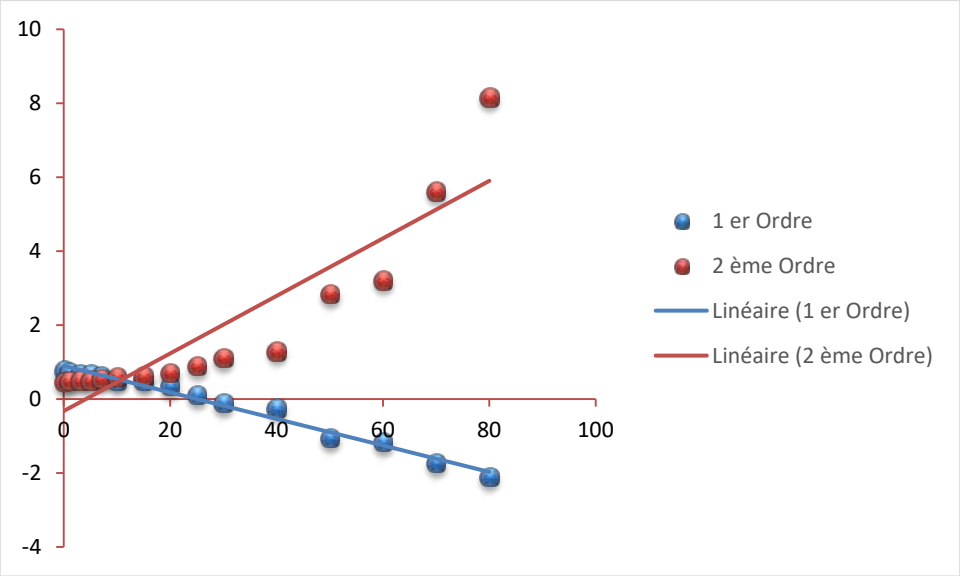


Figure IV.21: Application des modèles du pseudo premier et second ordre pour le Cuivre Age 1;HCl 0.1 mol/l

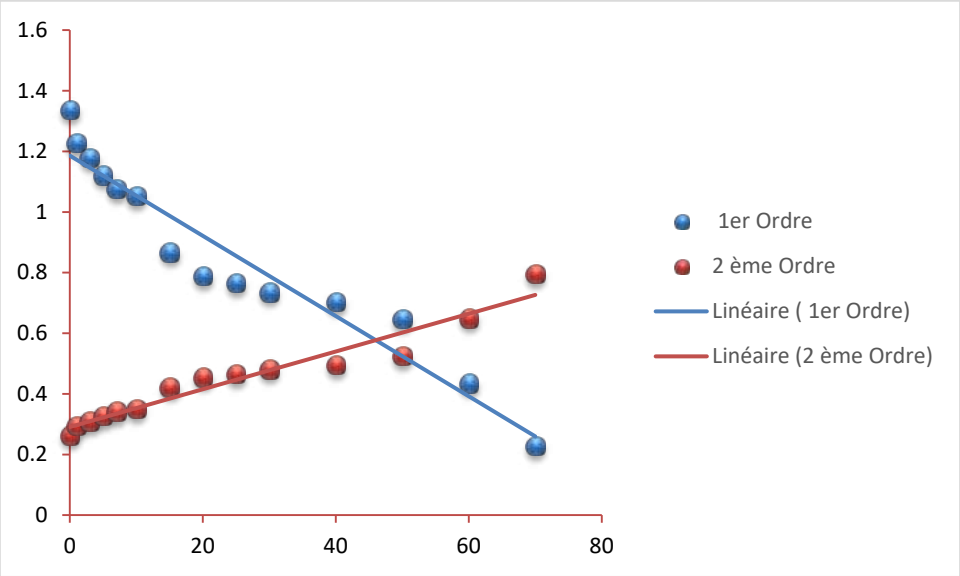


Figure IV.22 : Application des modèles du pseudo premier et second ordre pour le Cuivre Age 5;HCl 0.5 mol/l

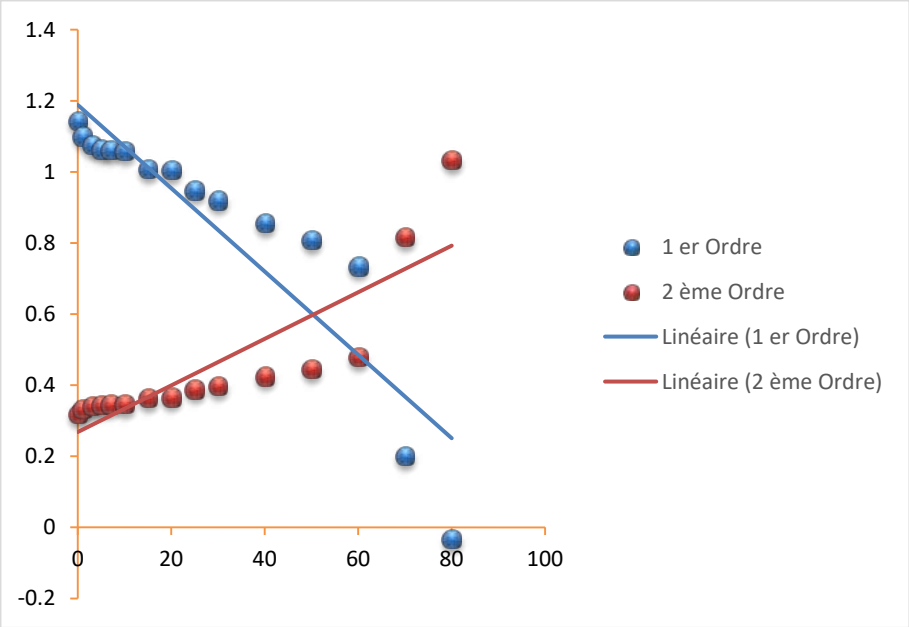


Figure IV.23 : Application des modèles du pseudo premier et second ordre pour le Cuivre Age 11 ; HCl 0.1 mol/l

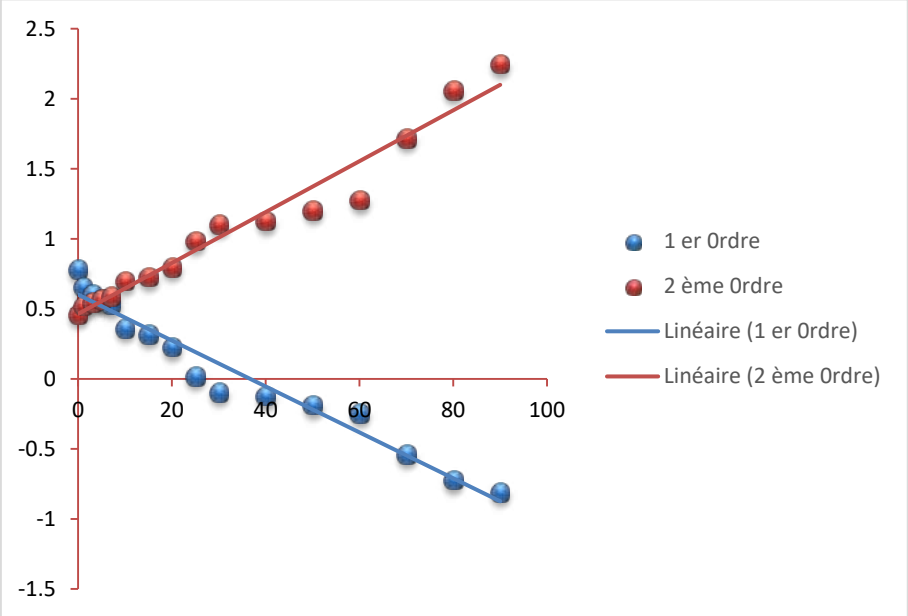


Figure IV.24 : Application des modèles du pseudo premier et second ordre pour le Cuivre Age 18;HCl 0.1 mol/l

Contrairement au fer, les tracés des deux modèles cinétiques en utilisant les concentration désorbées du cuivre sont semblables et tendent tous les deux vers une droite.

De même que pour le fer, La linéarisation des résultats obtenus pour le cuivre a donné les valeurs des paramètres cinétiques regroupés dans le tableau **(IV. 4)**

Tableau IV.4 : Résultats d'application des modèles du pseudo premier et Pseudo deuxième ordre pour le Cuivre

		1er Ordre		2ème Ordre	
	Age	K_1	R^2	K_2	R^2
Cuivre	1	-0.035	0.980	0.077	0.821
	5	-0.013	0.930	0.006	0.939
	11	-0.011	0.836	0.006	0.734
	18	-0.016	0.948	0.017	0.954

A partir de ce tableau on constate que :

- Les deux modèles cinétiques s'appliquent équitablement pour décrire la désorption du Cu sous les conditions étudiées vu les valeurs obtenues des coefficients de détermination R^2 qui sont très proches.
- Les vitesses d'adsorption ne sont plus comparables pour les contaminations 1, 5 et 11 jours.
- Pour l'âge 18, les valeurs de la constante de vitesse obtenues pour les modèles sont très proches 0.016 et 0.017 pour ordre un et deux respectivement.

IV.5.Effet de température sur l'efficacité des tensioactifs

Cette partie s'intéresse à exploiter l'influence du chauffage conventionnel (chauffage classique par plaque chauffante) sur le traitement par les deux tensioactifs, afin de déterminer une température optimale à laquelle le rendement d'élimination sera plus grand que celui obtenu à la température ambiante.

Les résultats expérimentaux de désorption du Fer et du Cuivre obtenus à différentes températures pour l'âge 18 sont représentés dans les figures **(IV.25** ;**IV.26** ;**IV.27** ;**IV.28** ;**IV.29** et**IV.30).**

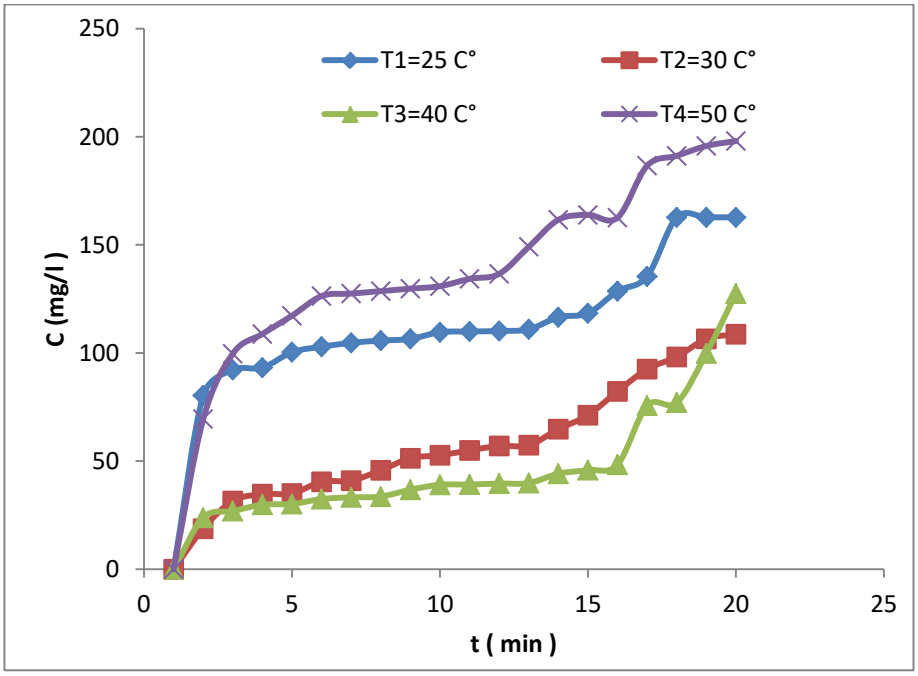


Figure IV.25: Isotherme de désorption de Fer**; SDS 0.5g/l**

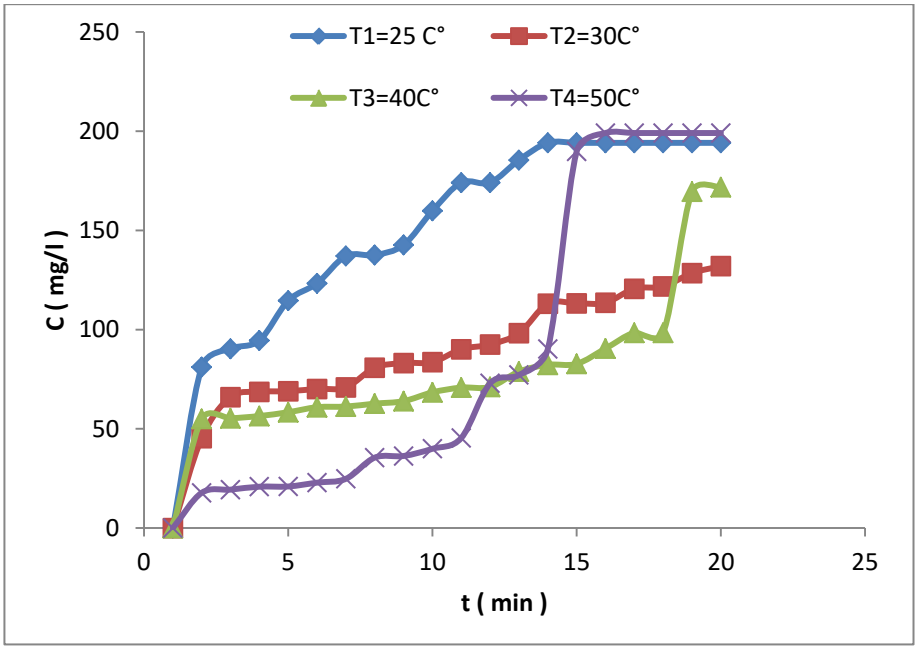


Figure IV.26 : Isotherme de désorption de Fer;**SDS 1g/l**

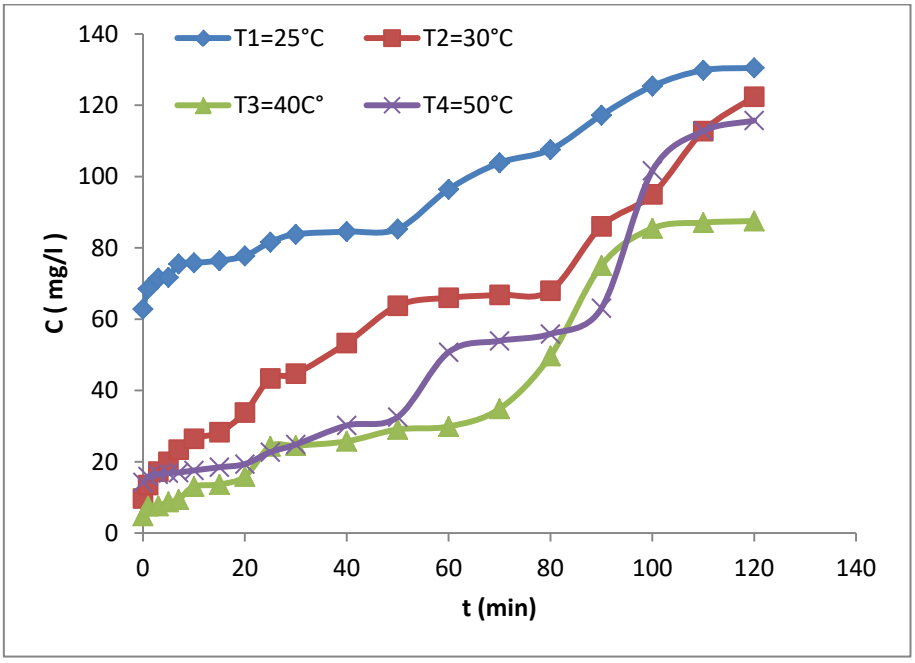


Figure IV.27 : Isotherme de désorption de Cuivre;**SDS 0.5g/l**

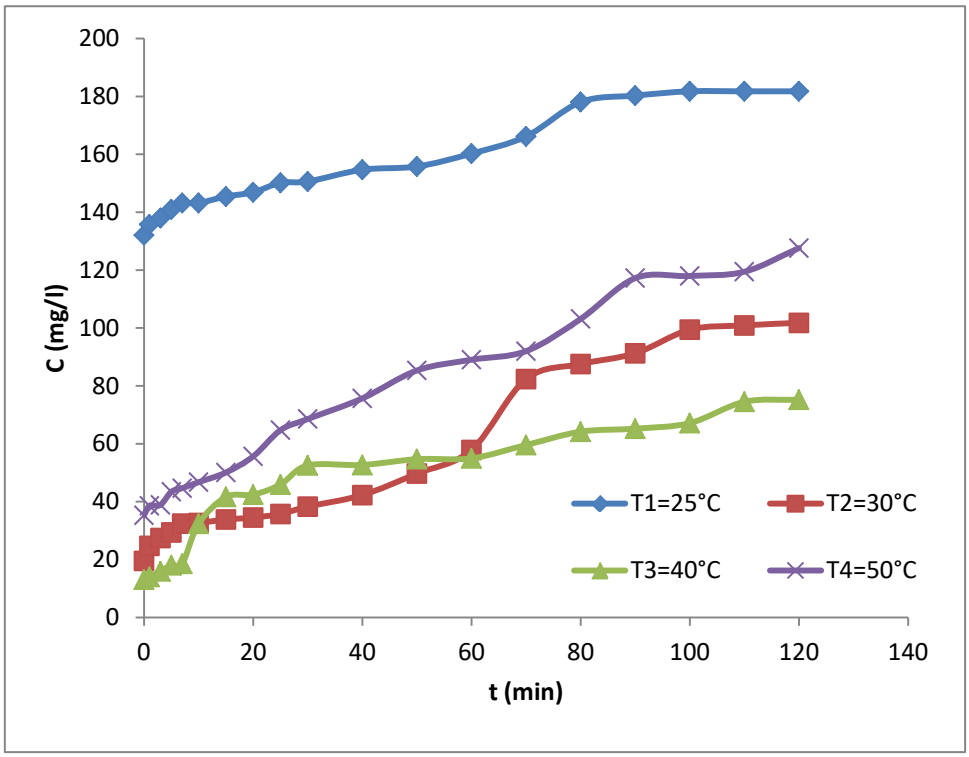


Figure IV.28 : Isotherme de désorption de Cuivre;**SDS 1g/l**

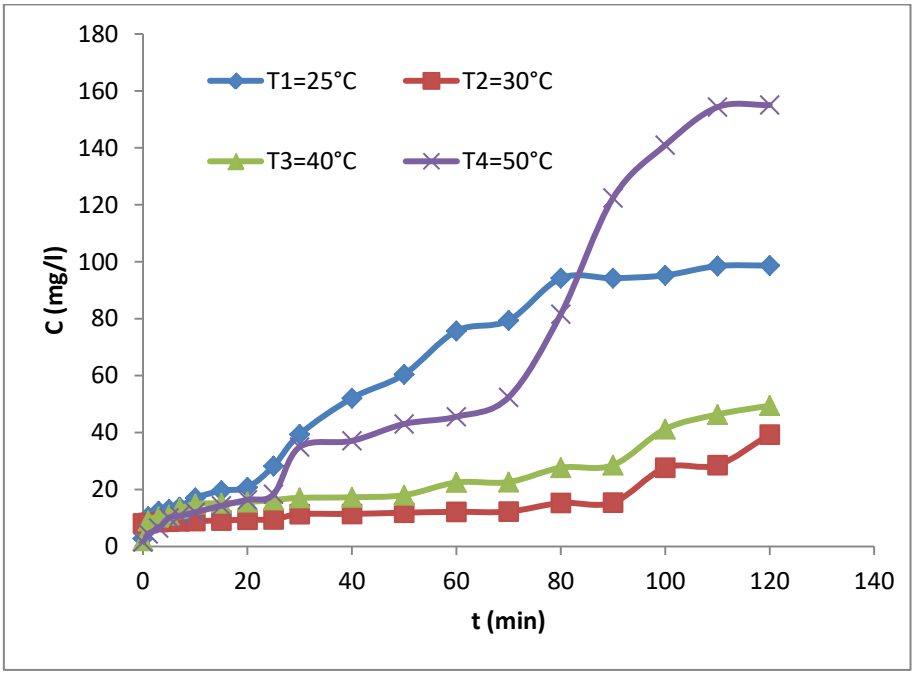


Figure IV.29 : Isotherme de désorption de Cuivre ;**Tw 0.5g/l**

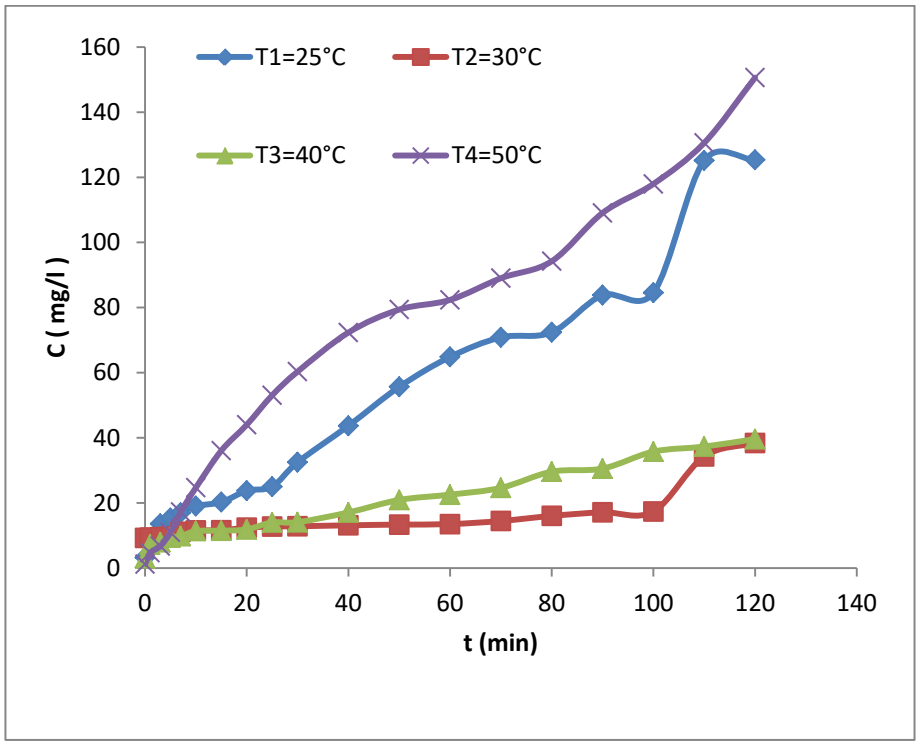


Figure IV.30 : Isotherme de désorption de Cuivre ;**Tw 1g/l**

La lecture des figures précédentes, nous permet de conclure que l'influence de la température est sélective, et il dépend de la nature du métal mis en jeu. Les points suivants peuvent être tirés :

- Pour le cuivre l'efficacité du Tween20 est meilleure pour une température de 50°C, et celle du SDS est maximale à la température ambiante (25°C)
- Pour le fer l'effet de la température ne peut pas être distingué, car les valeurs sont très proches à 25 et à 50°C.

IV.6. Evaluation qualitative du traitement

L'analyse spectroscopique par infrarouge à transformée de fourrier FTIR nous permet de détecter les vibrations caractéristiques des liaisons chimiques qui nous ont informé sur les fonctions chimiques présentes dans l'échantillon analysé.

Afin de vérifier l'efficacité de chaque traitement, nous avons effectué une analyse spectroscopique pour un échantillon contaminé de sable avant et après le lavage. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes (**Figure IV.31 ; IV.32 ; IV.33 ; IV.34 ; IV.35 et IV.36**).

D'après ces figures on constate que, avant traitement les pics qui existent sont (en Cm^{-1}):

3865.48 ; 3425.69 ; 2924.18 ; 2854.74, 2507.54, 2337.80, 2229.79, 1990.60, 1874.87 ; 1797.72 ; 1620.26 ; 1450.52 ; 1080.17 : 779.27 ; 694.40 ; 462.93. Représentant les Liaison O-H libres et liées (liaison hydrogène), ainsi que les liaisons O-H des acides carboxyliques, en plus d'autres vibrations caractéristiques (C-C, C-H,…..) ; nous remarquons que l'eau ne change pas le spectre IR du sol traité.

Cependant, le HCl fait abaisser l'intensité des pics et masque quelque uns tels ; 2507.54, 2337.80 et 2229.79.

Pour le SDS, les pics suivants 2507.54, 2337.80, 2229.79, 1450.52 ; sont masqués après traitement avec les deux concentrations. Ces vibrations correspondent toutes aux liaisons O-H des acides carboxyliques, qui peuvent être à l'origine de la fixation des cations métalliques par une réaction de réduction.

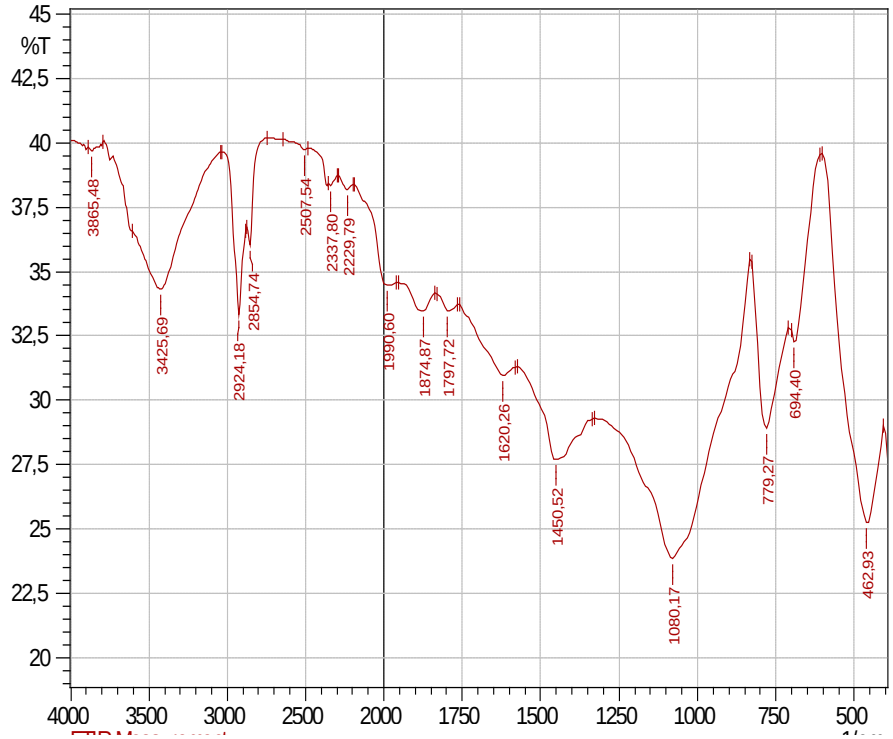


Figure IV.31 : Spectre IR du sol avant traitement

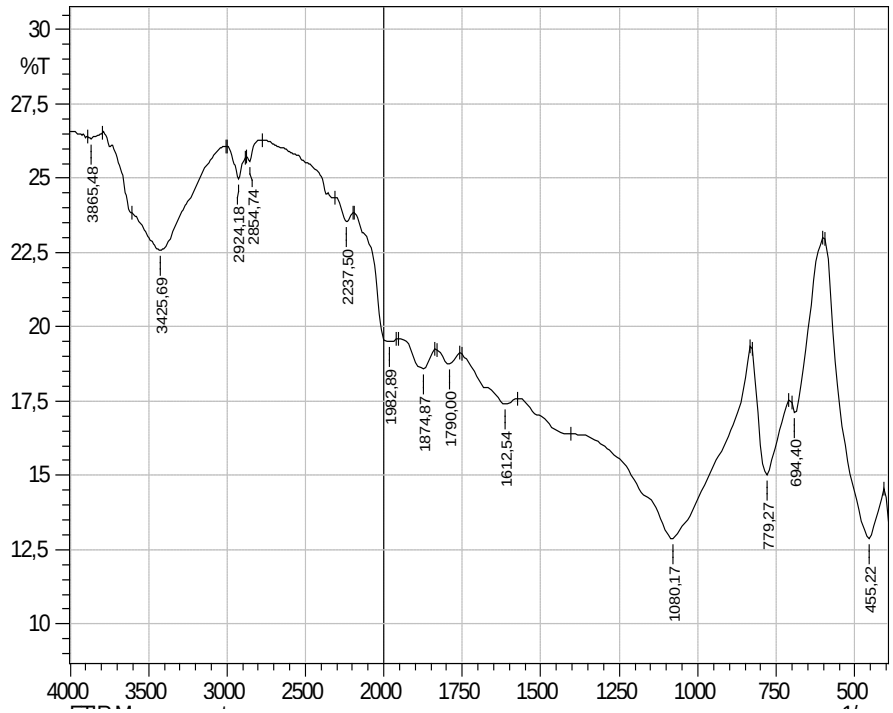


Figure IV.32: Spectre IR du sol après traitement par L'eau

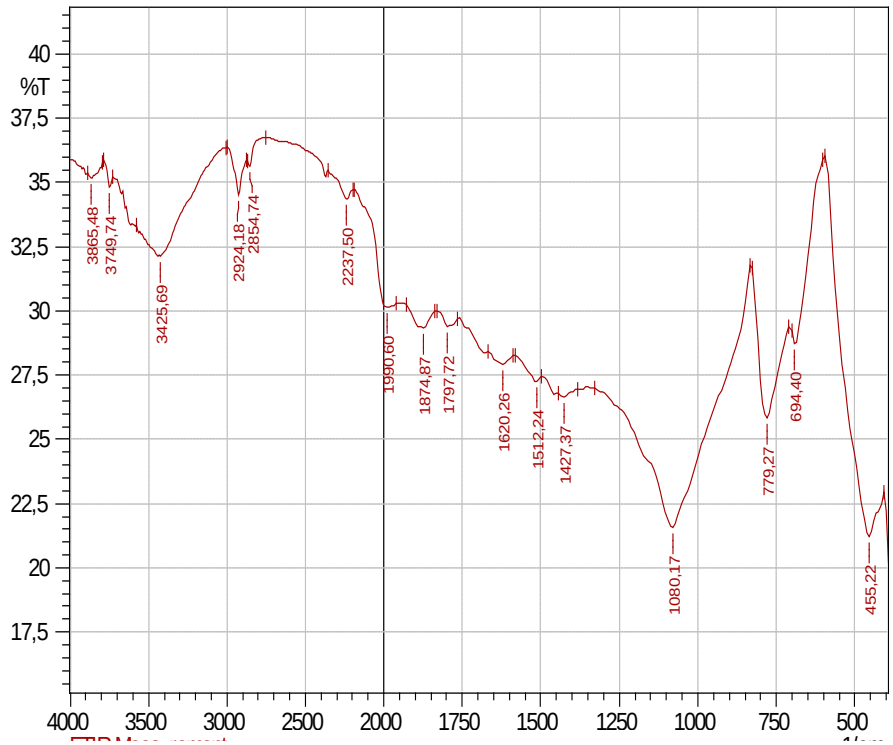


Figure IV.33 : Spectre IR du sol après traitement parHCl 0.1M

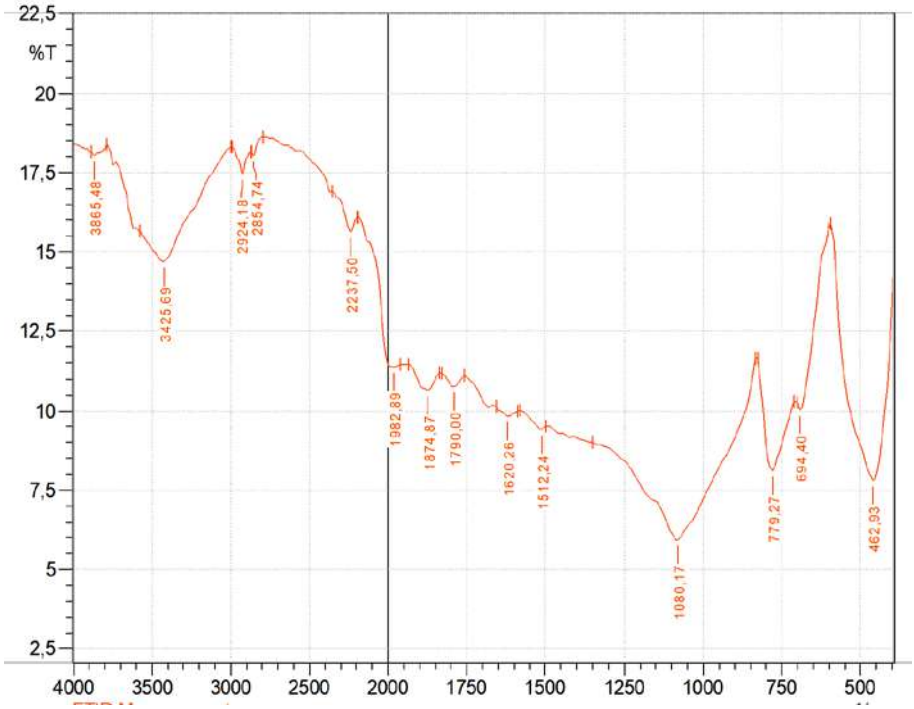


Figure IV.34 : Spectre IR du sol après traitement Par HCl 0.5M

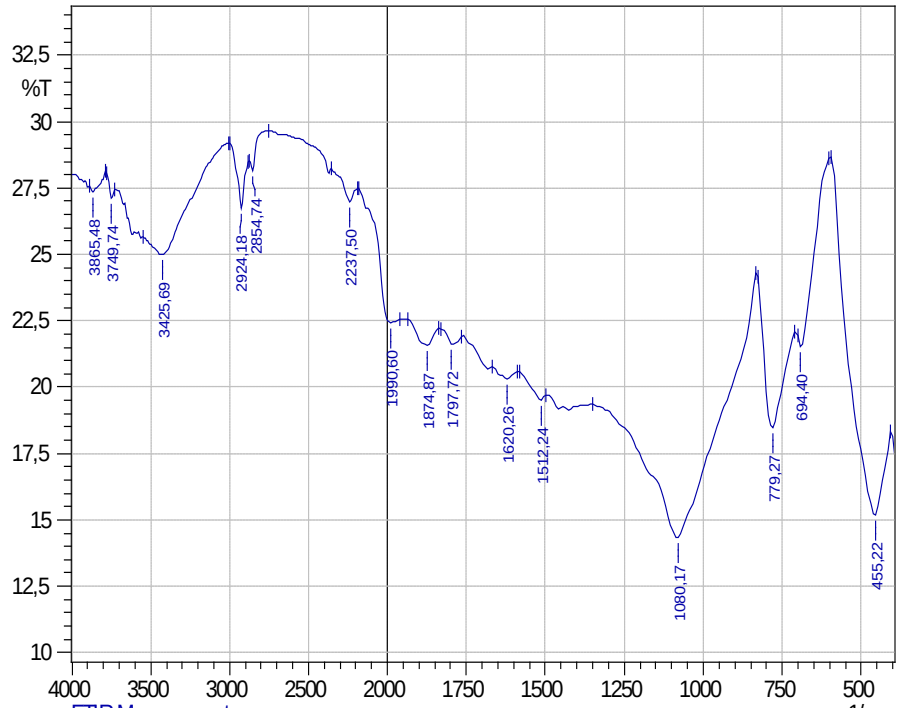


Figure IV.35 : Spectre IR du sol après traitement parSDS 0.5 g/l

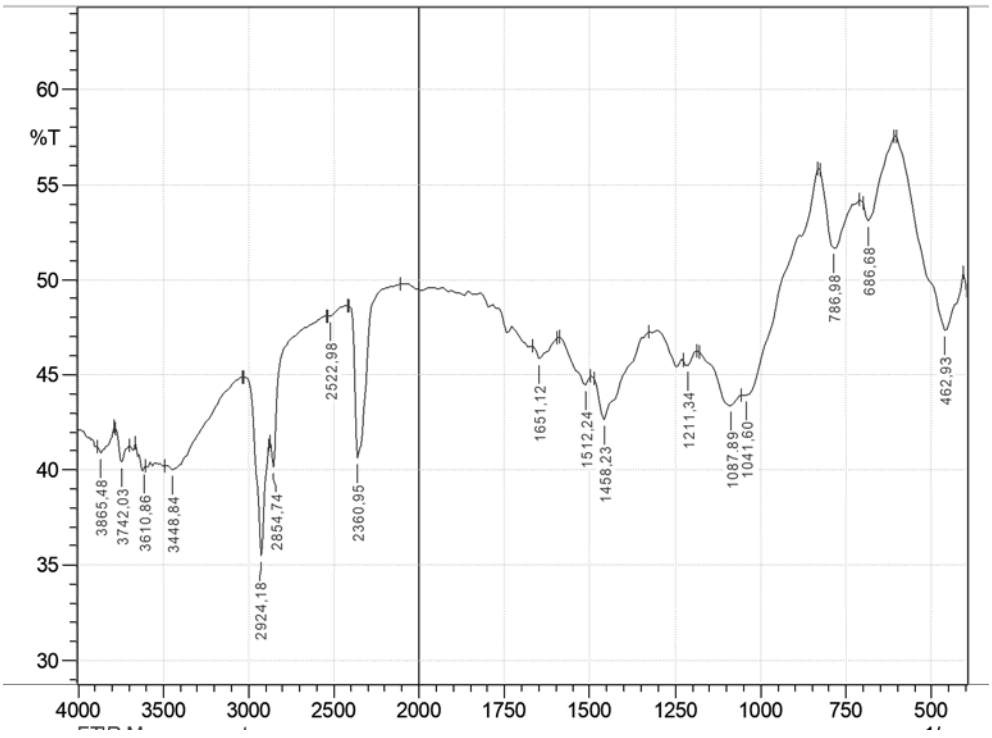


Figure IV.36 : Spectre IR du sol après traitement par SDS 0.1g/l

Conclusion générale

Les métaux lourds sont des substances non dégradables qui s'accumulent dans le sol et affectent les processus biologiques. Ils peuvent être introduits par les plantes dans la chaîne alimentaire chez les animaux et chez l'homme et représentent un risque pour la santé.

Le travail de ce mémoire de fin d'étude a été mené au laboratoire de chimie 2 au niveau du Hall technologique de l'Université de Médéa. Il a été réalisé en vue de la dépollution d'un sol contaminé par deux métaux lourds, à savoir le fer(II) et le cuivre. Le procédé d'élimination de ces espèces métalliques est basé sur la technique de lavage en batch en utilisant trois composés ou agents chimiques ; HCl, SDS et le Tween20.

Afin de déterminer les conditions optimales de l'élimination de chaque métal à part, les paramètres suivants ont été étudiés ; l'âge de contamination, type et concentration de l'agent chimique de traitement et la température. La teneur initiale en Fer et en Cuivre ainsi que la vitesse d'agitation sont fixées d'après des études antérieures : 20 mg/100g et 250 tr/min.

Les résultats obtenus peuvent être classés comme suit :

- Mécanisme d'élimination :
  - Ils existent des limitations dues à la structure du sol ou à la disponibilité des métaux qui font accélérer ou ralentir le transfert des entités métallique de la surface solide vers la phase liquide. Ceci est observé par la présence de deux ou trois étapes pendant le déroulement du traitement avant d'atteindre l'équilibre.
- En termes de rendement :
  - Pour le fer, et le cuivre, le meilleur rendement est obtenu par la solution de SDS.
  - Pour une contamination de fer d'Age 1jour, le meilleur rendement est obtenu par la solution de SDS de concentration 1g/l ; (E= 99.97%)
  - L'eau montre une efficacité remarquable pour l'élimination du fer comparée à l'acide.
  - Le SDS est plus efficace que le Tween20 pour la majorité des contaminations
  - Pour le cuivre : SDS 0.5g/l a donné 92.73% et le Tween 1g/l a permet 90.88% de rendement.

Donc la lixiviation par acide demeure la plus efficace pour le traitement d'un sol pollué par le fer ou par le cuivre.

❖ Concernant la cinétique sous les conditions étudiées :

- Les deux modèles cinétiques s'appliquent équitablement pour décrire la désorption du Cuivre.
- Pour le fer, le modèle cinétique du premier ordre s'applique bien

❖ L'effet de la température sur l'efficacité des tensioactifs :

- Pour le cuivre l'efficacité du Tween20 est meilleure pour une température de 50°C, et celle du SDS est maximale à la température ambiante (25°C)
- Pour le fer l'effet de la température ne peut pas être distingué.

Dans le future, nous espérons développer ce travail par

- l'investigation de l'effet de d'autres paramètres tels pH et salinité
- utilisation de d'autres métaux lourds.

Références Bibliographiques

Chapitre I : Généralités sur la pollution du sol

[1]Jabiol, B., Girard, M.-C., Scvartz, C. Etude des sols-Description, cartographie, utilisation : Description, cartographie, utilisation. Dunod, 2011.

[2]Dai, J.; Becquer, T.; Rouiller, J. H.; Reversat, G.; Reversat,F. B.; Lavelle, P. AppliedSoilEcology, 2019 p25- 99.

[3] AFNOR. Reconnaissance et essais géotechniques - Dénomination, description et classification des sols- Partie1 : dénomination et description. NF EN ISO 1468 1, 2019.

[4]Dutheil C. Dépollution des sols par extraction sous pression réduite : étude de quelques paramètres. INSA de Lyon, p 243, 2019.

[5] Chai J.-C., Miura N. Field vapor extraction test and long-term monitoring at a PCE contaminated site, J. Hazard. Mater., Vol. 110, n°1-3, p. 85- 92. Disponible sur: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.02.041, 2019

[6] Walker R. .,Hofstee C., Dane J. ., Hill W, Surfactant enhanced removal of PCE in apartially saturated, stratified porous medium, J. Contam. Hydrol., Vol. 34, n°1-2, p 31- 46. Disponible sur : http://dx.doi.org/10.1016/S0169-7722(98)00086-2, 2019

[7]Brusseau M. L., Jessup R. E., Rao P. S. C., Nonequilibrium sorption of organic chemicals: Elucidation of rate-limiting processes, Environ. Sci. Technol. Vol. 25, p 134- 142, 1991.

[8]Sleep B. E., Modeling transient organic vapor transport in porous media with the dusty gas model, Adv. Water Resour., Vol. 22, n°3, p. 47- 256,1998

[9]Sparks D. L., Environmental Soil Chemistry,Londres, U.K.: Academic Press, P 267, 1995.

[10]EsraelD., Dépollution des Sols par l'ExtractionMultiPhasiqueMPE:Développement d'un ModèleNumérique. Thèse de doctorat. Ecole doctorale de Chimie de Lyon, 2015.

[11]Boudouch O. Etude de la dépollution des sols par extraction sous pression réduite : application au traitement des COV. INSA de Lyon, p 202, 2009.

[12]Dutheil C. Dépollution des sols par extraction sous pression réduite : étude de quelquesparamètres. INSA de Lyon, p 243.2003.

[13]AlexanderM.,Hutchinson . T.C., HavasM., Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems, Plenum Press, New York and London, p 363, 1980.

[14]Hodson, M E .In: Environnemental Pollution, Vol. 129, No. 3, p 129-341, 2004.

[15] Nedelkoska TV, Doran PM , Characteristics of metal uptake by plants species with potential for phytoremediation and phytomining. Minerals Eng 13,549–561, 2000.

[16]Lin, C.; Lin, H. Journal of Hazardous Materials, 122, p 7.2005.

[17]Eduardo, M. J.; Rebeca, M.; Elvira, E.; Jesús, P. J. Soils and Sediments, p 301, 2010.

[18]Pueyo, M.;Sastre, J.; Hernández, E.; Vidal, M.; López- Sanchez, J. F.; Rauret, G. J. Environ. Qual., p 2054, 2003.

[19]Smail, K.;Selda, T. Ö.; Murat, B. FrobeniusEnvironnemental Bulletin, p 26,2006.

[20] SPIN, méthodesspectrométriquesd'analyse et de caractérisation (les métauxlourds), Axe " Génie des Procédés", Ecole des Mines de Saint-Étienne, 1997.

[21]Recherches Google. Les effets des métauxlourds sur l'environnementet la santé. https://www.senat.fr/rap/l00-261/l00-26150.html. Le 28 mai 2019.à 23 :56.

[22]Berthelin J., Bourrelier P.H., Contamination des sols par les éléments entraces : les risques et leur gestion. Académie des sciences. Rappel n°42. Technique et documentation, 1998.

[23]Fourest E. Etude des mécanismes de biosorption des métaux lourds par des biomasses fongiques industrielles en vue d'un procédé d'épuration des effluents aqueux contaminés. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier-Grenoble, France, 1993.

[24]Morel R., Les sols cultivés. Lavoisier, paris, 1996.

[25]Juste C., Les micropolluants métalliques dans les boues résiduaires des stations d'épuration urbaines, Convention ADEME-INRA, ADEME éd., p 209, 1995.

[26]N.Zabat. Etude de l'adsorption de composés organique aromatique sur des aluminosilicates naturels traités. Thèse de Magister. Université d'Annaba, 2000.

[27]Ghali S., Etude de la carbonisation d'un précurseur végétal les noyaux d'olives utilisation dans le traitement des eaux, mémoire de magistère, Université du 20 août 1955 – SKIKDA ,2008.

[28]Les cahiers des clubs crin, Spéciation des métaux dans le sol, CRIN, environnement, 1999.

[29] Duchaufour. Ph., Introduction à la science du sol : Végétation, environnement,6ième édition, abrégé de pédologie, Dunod, Paris, 1999.

[30]Gabet M.C., « pollution des eaux de lavage des tunnels routiers », revus Générale des routes et autoroutes,p57-64, 1991.

[31]Barrioso E.,CarvetR., CureB.,Simplification du travail du sol et pollution par les pesticides,Perspectives agricoles,p31-39, 1992.

[32]WebberM.D.,PietzR.I., GranatoT.C.,SvobodaM.L., Plant uptake of PCBs and otherorganic contaminants fromsludge –treated coal refuse, J. Environ. of quality, p120-130, 1994.

[33]Académie des sciences, Contamination des sols par les éléments traces ; Rapport n°42 ; Tec&doc ; Paris, 1998.

[34]Monique T-H, Chimie des eaux, édition paris, p 77- 79,1995.

[35]Inter-environnement BXL, Pollution par les métaux lourds,Cahier de l'environnement N°9, 1992.

[36]Tiffreau C., Sorption du mercure II à l'interface eau/solide, Etude expérimentale et modélisation, Thèse de doctorat, Université louis pasteur, Strasbourg, 1996.

[37]Ghodbane, Nouri L., Hamdaoui O., ChihaM.,Kinetics and equilibriumstudy for sorption of cadmium (II) ion fromaqueous phase by eucalyptus bark. Journal of haz. Mat., volume 152, page 148-158, Issue 1, 2008.

[38]Gounon, C. (2008). Mobilité des éléments traces métalliques dans les sédiments : couplage etcomparaison des approches chimiques et microbiologiques. Thèse de doctorat de Sciences de l'Univers et de l'Environnement. Université de Paris. 12, Val de Marne. 314p.

[39]Galsomies L., Retombées atmosphériques des métaux en France : estimationpardosage dans les mousses ; ADEME édition, 1999.

[40]Recherches Google. Futura sciences, le fer, https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-fer-721/. Le 28 mai 2019 à 01 :56.

[41]Dietriche M., Les métaux lourds et leurs effets sur la santé, conférence, Ecole polytechnique de Zurich, 14 mai 1998.

[42]Recherches Google. futura sciences, le cuivre, https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-cuivre-14798/, Le 28 mai 2019 a 02 :02 .

Chapitre II : Méthodes de dépollution des sols

[1] VANESSA .Z, CELINE .TH, JULIE. S, YAËL. S: La pollution des sols par les activités, , écologie urbaine et environnement, UTC université technologique de Compiègne, dossier EV 03. p 11.

[2] Recherches Google.http://jentreprendsenbourgognefranchecomte.fr/themes/environnement/protection-des-sols/les-techniques-de-traitement-de-la-pollution-des-sols.Le 29 mai 2019, à 21 :38.

[3] EPA,.Superfund Innovative Technology Evaluation Program .Technology Profiles 6 th edition, Rapport EPA, P424,1993.

[4] Nathanail. J, Bardos. P, et Nathanail. P**,** Contaminated Land Management, Land Quality Press and EPP Publications, Londres, p 467,2002.

[5] Recherché Google, http://www.selecdepol.fr/fiches-techniques/pompage-et-traitement/description, Le 29 mai 2019, a 21 :38.

[6] U. Sama Ksaman. T.H. Peng,J. H.Kvo ,C.H.LU,M.Y.Wey.Applied Thermal Enginneering, p 131-138 , 2016.

[7] perchet .G-T, Etude de bioremédiation de sédiments contamines par des composes organiques nitres persistants. Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 215p. 2008.

[5] Recherché Google ,http://www.selecdepol.fr/fiches-techniques/pompage-et-traitement/description , Le 29 mai 2019, a 21 :38.

[6] Sama. K ,U ;T.H.Peng,J.H.Kvo,C.H.LU,M.Y.Wey.Applied Thermal Enginneering,93, p 131-138, 2016.

[8] M.W.Lim, E.V.Lam,P.E,The International Journal for Marine Environmental Scientists, Engineers, Administrators, Politicians and Lawyers, 2016.

[9] P. Lecomte ; les sites pollues ; traitement des sols et des eaux souterraines, lavoisier, paris, 1995.

[10] Osgerby I.T, ISCO Technology Overview, Do You Really Understand the Chemistry? Contaminated Soils, Sediments and Water. in: Calabrese, E.J., Kostecki, P.T., Dragun, J. (Eds.). Springer US, p. 287-308,2006.

[11] Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph. avec la collaboration De Darmendrail D., Conil P., Bodénan F., Fauconnier D., Hubé D., Colombano S. Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes, Document du BRGM 300, p 99,2008.

[12] Association française de normalisation (AFNOR) (2003) – Norme NF X 31-620 - Qualité du sol , Prestations de services relatives aux sites et sols pollués ,études, ingénierie, réhabilitation de sites pollués et travaux de dépollution, p 40 ,Septembre, 2003.

[13] Davide. H. sites et sole pollues, master CAD. 2008.

Chapitre III : Matériels et méthodes

[1] Tiffreau C., Sorption du mercure II à interface eau/solide, Etude experimental et modélisation, Thèse de doctorat, Université louis pasteur, Strasbourg, 1996.

[2] Duchaufour. Ph., Introduction à la science du sol : Végétation, environnement,6ième édition, abrégé de pédologie, Dunod, Paris, 1999.

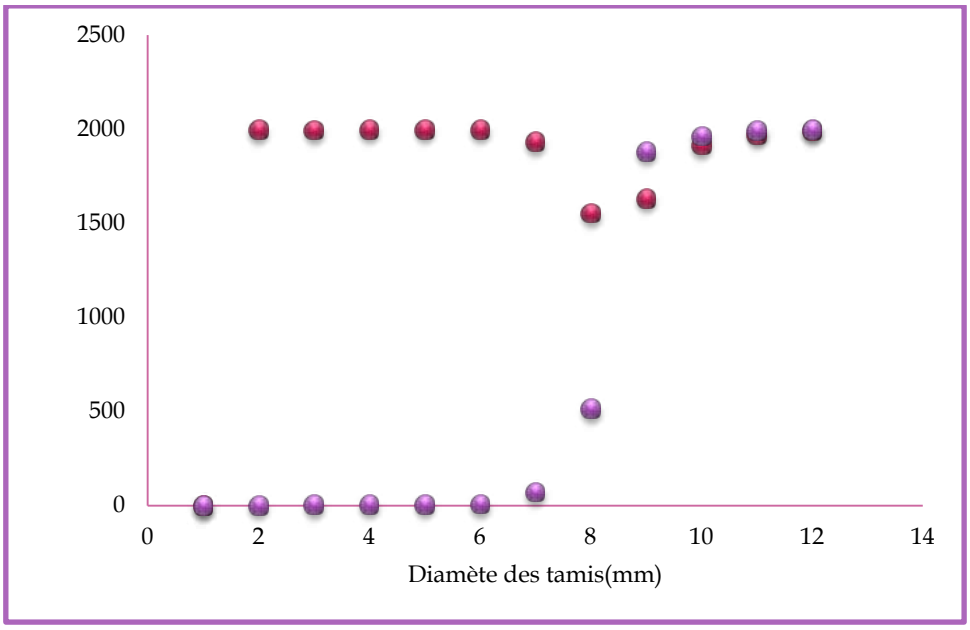
[3] SPIN, méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation (les métaux lourds), Axe " Génie des Procédés", Ecole des Mines de Saint-Étienne, 1997.

[4] Raoul .C, Le sol propriétés et fonction -tome 1: Constitution, Structure Phénomènes aux interfaces, Edition France Agricole, 2003.

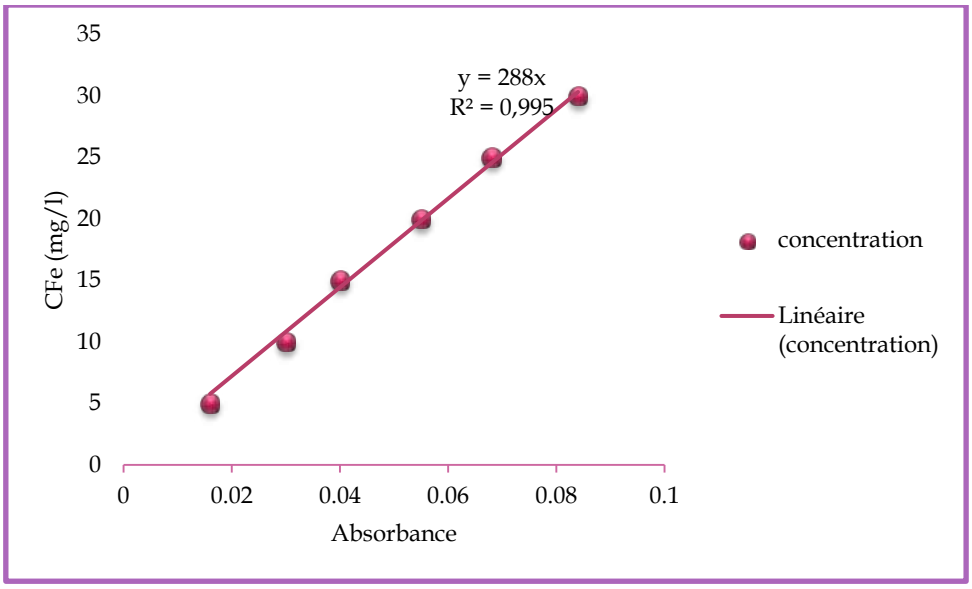
[5] Travis, C.C. Etnier, E.L, 'A survey of sorption Relationship for réactive solutés'. Journal of Environmental Quality,p3-17,1981.

ANNEXE

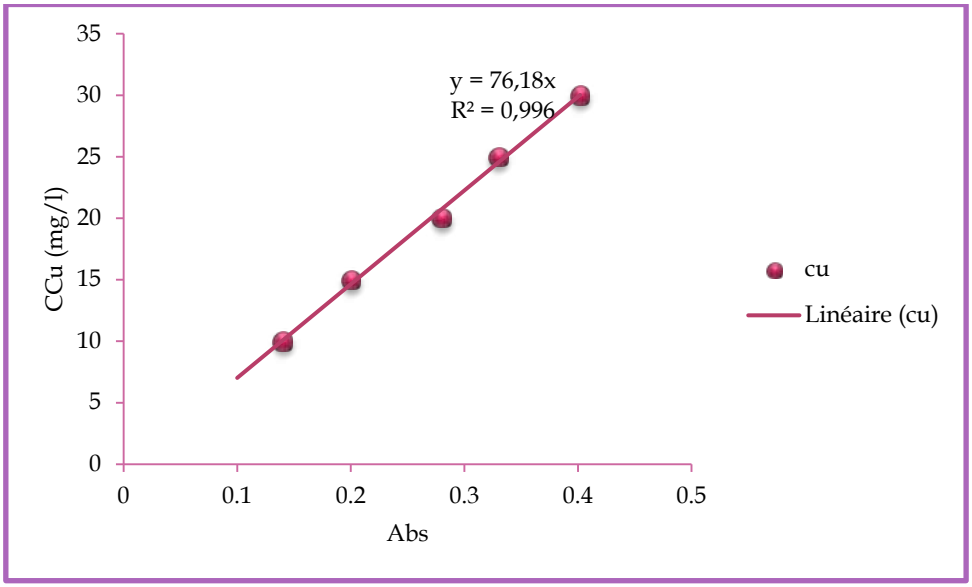
A



Courbe de distribution granulométrique



Courbe d'étalonnage de Fer



Courbe d'étalonnage de Cuivre