REPUBLIQUEALGERIENNEDEMOCRATIQUEETPOPULAIRE

MINISTEREDEL'ENSEIGNEMENTSUPERIEUREETDELARECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE MEDEA

FACULTEDESSCIENCES



Mémoire

Présentépourobtenirlediplômede**Master** En

Sciences de la nature et de la vie **Spécialité :**

Ecologie et Environnement

Par:

ASSAD Firdaws et GUETTAR Naima

Thème:

Dépollution du sol par la voie thermique

Soutenuepubliquementle :24 /06/2023., Devantlejurycomposéde:

SAIDOUNEF-Z	**Grade:MCB**	UniversitédeMedea	Président
GHALEMNaima	**Grade:MCB**	UniversitédeMedea	Examinateur
HAMZAImane	**Grade:MCR**	UniversitédeMedea	Encadreur
KEDDARIDounia	**Grade:MRB**	CRATConstantine	Co-Encadreur

Annéeuniversitaire 2022/2023

Remerciements

NousremercionsALLAHtoutpuissantquinousadonnerlecourageetlavolontéjusqu'àla réalisationdecetravail.

Tousnosremerciementsànotrepromotrice, **MmeHamzaImane,MaitredeConférencesB** àl'universitéYahiaFarès,Medea,pourl'effortfourni,poursonaide,pourlesconseilsqu'elle a prodigués, afin de nous amener jusqu'au bout de la mémoire.

Nosremerciementss'adressentà **MmeSaidouneFatmaZohra,MaitredeConférencesB**à l'universitéYahiaFarès,d'avoiracceptédeprésiderlejuryetnousfaitl'honneurd'évaluerce modeste travail.

À **Mme GhalemNaima, Maitre de Conférences B** à l'université Yahia Farès, Medea, qui a accepté d'examiner ce manuscrit. Qu'il trouveici l'expression de nos sincères remerciements

AuxenseignantsdeL'universitédeYahiaFares,quiontassurénotreformationdurantcescinq dernièresannées.

Nosvifsremerciementss'adressentàtoutel'équipedeslaboratoiresdel'université,pourtoutes l'aide dont ils nous ont mis à nos dispositions

Enfin,notreimmensegratitudeenvers nos familles et nos amis qui nous ont apporté leur soutien.Nous avons saisi cette occasion pour remercier tous ceux qui ont collaboré, de près ou de loin, à la réalisation de cette mémoire.

Dédicace

Amesplusgrandssoutiensetsourcesd'inspiration,jedédiece travail avec tout mon amour et ma reconnaissance infinis.

Amamèrequiatoujoursétémonportd'attachementetmaboussole,mercipourt onamourinconditionnel, tondévouementettonsoutien inébranlable.

Amonpèrequim'aapprisl'importancedetravailacharne,dela persévérance etdel'honnêteté,jesuisreconnaissantepourtes conseils aviseettonsoutiensansfaille .tum'ainspireaviserplushauteta poursuivremesrêves.

AmonseulfrèreAbdSamed,masœurbelkiss,mestantesFatima, zeineb ,mahdjouba ,pour tous les membres de mafamille ASSAD merci pour votre soutien constantvotre humeur contagieux et votre présence réconfortante .

Amonbinômenaima,tuasétémasourced'inspirationetde motivationpourmoitoutaulongdeceparcours. A

mes chères amies manel, rabia, sabah et touba

Amapromotricemadamehamzamaprofesseur,grâceaelle,j'ai beaucoupappris

FIRDAWS

Dédicace

TousgrâceàDieutout-puissantpourcequejesuismaintenantetpource que je suis venu à. Merci Dieu, dont la grâce est faite en faveur

Jetiensmodestetravailà:

Amonchèrpère,Toutesleslettresnepeuventexprimercequejeveux vous dire .Tous les mots ne suffisent pas à explique . Qui m'a encouragé etmon contenu m'a soutenu etm'a guidé quiétait derrière moi danstousmes choix,ungrandemercipourtongrandamour,pourtonsupport,tes conseils et tes encouragements à aller de l 'avanttout au long de mes études.Cequevousavezatteintaujourd'huiestlefruitdevosefforts,devotre fatigueetdevotrefacilitéàfournirtoutcedontvousavezbesoin,quedieu le protège et le garde . un grande merci chér papa

Amon chèr mère , A celui qui m'a réconforté et partagé avec moi les incubateursdemesétudesBquim'aencouragéàcontinueretasemél'espoir chaque fois que le désespoir m'a infiltré à celui qui m'a toujours aimé etpeint ses prières à ma façon. Merci de vos conseils qui vous encouragent à faire preuve de beaucoup d'amour et de compassion.

MERCIMESCHéRSPARENT

BiensurLavien'estcertainementpascomplèteetsansgoûtsanstoile graindemoncœur,messœurs:HADJIRA,KHADIDJA,FATIHA ,FAIZA.ETmacousine:NORELYAKIN

AmonseulfrèreRABAHetsonfemmeAICHA

ABARAE,CHOABEETSADJA,Lebrevetdenotremaison

A ceux qui ont recueilli le même rêve et partagé les doux jours avec moi tout au long de mes études universitaires à ceux qui ont partagé la réalisation de cettemémoir , mon binomeet ma sœur FIRDAWS

A mon chèr mari . mon partenair de vie SLIMANE qu'ALLAH le préserve

Merci à tous d'être dans ma vie. *NAIMA*

Résumé

Le sol prend beaucoup de temps à se former et il est une ressource non renouvelable qui contribue au maintien de l'équilibre environnemental. Avec le développement industriel et l'utilisation irrationnelle des engrais chimiques, il est devenu contaminé et affecte ainsi les facteurs biotiques et abiotiques de l'environnement. La concentration élevée des métaux lourds et la présence de substances toxiques constituent un danger pour les organismes vivants.Parmi les techniques de traitement des sols contaminés on a les techniques thermiques.Danscetteprésenteétude,nousavonscontaminéaulaboratoiredeuxéchantillons prélevées en hiver et au printemps, de deux régions différents dans la wilaya de Médéa (Zoubiria et El Omaria). C'est échantillons ont été contaminé par six métaux dont le Cobalt, Cuivre, Fer, Nickel, Magnésium et le Zinc, en concentrations égales puis les dépollué par la chaleur, en fin mesuré les concentrations par le spectrophotomètre UV-Visible. Dans ce travail, nous avons comparé l'absorption des polluants thermiques au printemps et en hiver, s'ensuite l'effet de chaque métal sur le pH et la conductivité de sol. Les valeurs du pH des sédiments du sol de Zoubiria et El Omaria, oscillent entre 8,03 (Zoubiria) en hiver et 8,08 (El Omaria) en printemps. Ces valeurs reflètent donc une légère alcalinité des sédiments du bassin versant étudier. Après les mesures de la CE nous constatons également qu'au printemps le sol présente une faible salinité (218±18 µS/cm), alors que les valeurs maximales ont été relevées en hiver (301±43 µS/cm) traduisant une salinité plus important. Dans la fin de notre travaille onatrouvéqueletraitementthermiqueparlavage dusolestunetechniqueefficaceparceque toutes les concentrations été inferieure a la norme AFNOR.

Motsclés:Sols,Métauxlourds,Techniquethermique,spectrophotomètre,Médéa.

الملخص

يستغرق تكوين التربة وقتًا طويلاً وهي مورد غير متجدد يساعد في الحفاظ على التوازن البيئي .مع التطور الصناعي والاستخدام غير الرشيد لأسمدة الكيماوية، أصبحت ملوثة وبالتالي يؤثر على العوامل الحيوية وغير الحيوية للبيئة. يشكل التركيز العالي للمعادن الثقيلة ووجود مواد سامة خطراً على الكائنات الحية .من بين تقنيات معالجة التربة الملوثة التقنيات الحرارية .في هذه الدراسة الحالية، قمنا بتلويث عينتين في المختبر تم أخذهما في الشتاء والربيع، من منطقتين مختلفتين في الية المدية هما الزوبيرية والعومارية. قمنا بتلويث هذه العينات بستة معادن منها الكوبالت والنحاس والحديد والنيكل والمغنيسيوم والزنك، بتركيزات متساوية ثم أزيلت التلوث بالحرارة، وأخيراً تم قياس التركيز اتبواسطة مقياس الطيف الضوئي المرئي للأشعة فوق البنفسجية. في هذا العمل قمنا بمقارنة امتصاص الملوثات الحرارية في الربيع والشتاء ثم تأثير كل معدن على درجة الحموضة وشوارد التربة .وتتأرجح قيم إمكانيات الهيدروجيني لرسوبيات تربة الزوبيرية والعومارية بين 8.03)الزوبيرية(في الشتاء و8.08)العومارية(في الربيع. لذلك تعكس هذه القيم قلوية طفيفة لرواسب مستجمعات المياه التي تمت دراستها. بعد قياسات الشوارد، وجدنا أيضاً أن التربة في الربيع ذات ملوحة منخفضة 18±218)(µS/cm، بينما تم تسجيل القيم القصوى في الشتاء 43±301)(µS/cm مما يعكس ملوحة أعلى. في نهاية عملنا وجدنا أن المعالجة الحرارية بغسل التربة هي تقنية فعالة ألنجمي التركيز اتكانت أقل من معيار AFNOR

الكلمات المفتاحية: التربة، المعادن الثقيلة، التقنية الحرارية، مقياس الطيف الضوئي، المدية.

Abstract

Soil takes a long time to form and is a non-renewable resource that helps maintain the environmental balance. With industrial development and the irrational use of chemical fertilisers, it has become contaminated, affecting the biotic and abiotic factors of the environment. The high concentration of heavy metals and the presence of toxic substances poseadangertolivingorganisms.Thermaltechniquesareusedtotreat contaminatedsoils. In the present study, we contaminated in the laboratory two samples taken in winter and spring, from two different regions in the wilaya of Medea (Zoubiria and El Omaria). These samples werecontaminatedwithsix metals, including cobalt, copper, iron, nickel, magnesium and zinc, in equal concentrations, then heat-polluted and the concentrations measured using aUV-visiblespectrophotometer. In this work, we compared the absorption of thermal pollutants in springand winter, thentheeffect ofeach metal on soil pHand conductivity. The pH values of the soil sediments in Zoubiria and El Omaria ranged from 8.03 (Zoubiria) in winter to 8.08 (El Omaria) in spring. These values therefore reflect a slight alkalinity in the sediments of the catchment studied. The EC measurements also show that in spring the soil has a low salinity (218±18 µS/cm), while the maximum values wererecordedinwinter (301±43 µS/cm) reflecting a higher salinity. At the end of our work, we found that thermal treatment bysoil washingis an effective technique because all the concentrations werebelow the AFNOR standard.

Keywords: Soil,Heavymetals,Thermaltechnique,spectrophotometer,Medea.

Liste des Abréviations

AFNOR : Association française de normalisation

ASTM : American Society for Testing and Materials

CE : Conductivité électrique

CEC:Capacitéd'échangecationique

COHV:composésorganohalogénésMatièresvolatiles

COV:Composéorganiquevolatile

EDDS: Ethylenediamine-*N*,*N'*-disuccinicacid

EDTA:acide ethylene diamine tetra-acetique

ETM: Eléments traces métalliques

HAP: Hydrocarburepolycycliquearomatique

HFC : composés organiques hydrophobes

NRCS :naturel resources consevation service

MO: matiere organique

PAS:procédésavancésd'oxydation

PCB: Polychlorobiphényle

pH: Potentiel hydrogène

POP:polluantorganiquepersistant

SOM :Matiere organique de sol

S/S: stabilisation/soldification

USDA: UnitedStatesDepartmentofAgriculture

USEPA:unitedstatesenvironmentalprotectionagency

Listesdes figures

ChapitreI:lesol

Figure.I.1.Composition schématique d'un sol, exprimée en pourcentage……

Figure.I.2. Triangle des textures minérales……

Figure.I.3 . Famille de technique de dépollution des sols par lieu de traitement……..

Figure.I.4 . Organigramme des technologies de depollutiondes sols……

Figure.I.5. Schéma représentant les déférents forme de la pytoremediation …….

Figure.I.6 .Confinement d'une zone contaminée par isolation de surface…….

Figure .I.7. shema de principe du lavage de sol…….

Figure.I.8. Schéma de principe du venting……...

Figure.I.9. Schéma de principe de l'air sparging couplé à un venting……..

Figure.I.10. Schéma de principe du pompage et traitement…….

Figure .I.11. Schéma de principe de l'oxydation chimique in-situ……..

Figure.I.12.schémadeprincipedela reductionchimiqueinsitu…….

Figure.II.1. Shemadeprincipedeladesorptionthermiqueex situetonsite……

ChapitreII:letraitementthermique

Figure.II.2. Schema deprincipe dela vitrivication thermique……..

Figure.II.3. schema de principe de la pyrolyse……..

Figure .II.4. schema de principe de la vitrification thermique in situ……

Figure.II.5. Schémadeprincipelavitrificationthermique……

ChapitreIV:Resultatsetdiscussion

Figure.IV.1. Evolutionspatio-temporelledupHdusoldeZoubiriaetElOmaria.

Figure.IV.2. Evolutionspatio-temporelledelaCEdessolsdusolZoubiriaetElOmaria.

Figure.IV.3. Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsdupHetCEdusolcontaminé par lecuivreZoubiria etElOmaria.

Figure.IV.4. Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsennickeldusolZoubiriaet ElOmaria.

Figure.IV.5. Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsenmagnésiumdusol Zoubiria et El Omaria.

Figure.IV.6. Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsenferdusol ZoubiriaetEl Omaria.

Figure.IV.7. Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsenzincdusolZoubiriaetEl Omaria.

Figure.IV.8. Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsencobaltdusolZoubiriaetEl Omaria.

Figure.IV.9. Evolutionspatio-temporelledesmétauxdusoldusolZoubiria.

Figure.IV.10. Evolutionspatio-temporelledes métauxdusoldusoletElOmaria.

Listedes tableaux

ChapitreI:lesol

Tableau .I 1. Classification granulométrique

Tableau.I.2.RépartitiondesclassesdesPHdessols.

Tableau.I.3.Échelle de Salinité du sol.

Tableau.I.4.Principauxélémentsmétalliquesessentielsetnon-essentiels

Tableau.I.5. Principauxeffetsdesmétauxlourds

Tableau.I.6.classementdesméthodes

ChapitreII:letraitementthermique

Tableau.II.1.lesavantagesetlesinconvénientsde ladésorptionthermique

Tableau.II.2.Lesaventagesetinconvénientsdel'incinération

Tableau.II.3.les aventages et les inconvénients de pyrolyse

Tableau.II.4.lesavantagesetlesinconvénientsdevitrification

ChapitreIV:résultatsetdiscussion

Tableau.IV.1.Résultatsdesparamètresphysiquesetchimiquesdusolduzoubiriaet de El Omaria(Moyenne±Ecart-type[Min-Max],desdeuxcampagnesdeprélèvements).

Tableau.IV.2. TeneursnaturellesproposéesparAFNOR,U44-41

Tableau.IV.3. Listedescorrélationssignificatives,hautementettrèshautement significatives entrelesdifférentsparamètresphysicochimiquesdusolavantetaprèslacontamination d'u Zoubiriaet duElOmaria.

Tabledesmatières

Liste des tableaux

Liste des

figuresListedesabrévi

ations Résume

-Introductiongénérale….....1

ChapitreI:Généralitésurlesol

I.1. Lesol

I.1.1. Ladéfinitiondesol.....3

I.1.2. Lesconstituantsdusol 3

I.1.2.1. Lesconstituantssolides… 4

I.1.2.1.1. Lesconstituantsminéraux.....4

I.1.2.1.2. Lesconstituantsorganique…..... 6

I.1.2.2. Lesconstituantsliquides(solutiondusol)….....6

I.1.2.3. Lesconstituantsgazeux(atmosphèredusol)… 6

I.1.3. Lespropriétésphysiquesetchimiquesdu sol..... 8

I.1.3.1. La textureou granulométrique 8

I.1.3.2. Lastructuredusol… 9

I.1.3.3. laporosité..... 10

I.1.3.4. Lecomplexeargilo-humique(CHA)….....11

I.1.3.5. capacitéd'échanges cationique(CEC)….....12

I.1.3.6. LepH.....11

I.1.3.7. laconductivitéélectrique.....12

I.1.3.8. Lesmétauxlourds….....12

I.1.3.9. matièreorganique 13

I.2. la pollution de sol… 13

I.2.1. la définition dela pollution… 13

I.2.2. ladéfinition delapollution de sol… 13
I.2.3. définitiond`unsolpollue 14
I.2.4. ladéfinitiond`unpolluant… 14
I.2.4.1. lestypesdepolluants du sol 14
I.2.4.2. Interactiondespolluantsaveclescomposantsdusol 15
I.2.5. les formesdelapollution desol 16
I.2.6. Lessourcesdela pollutiondusol 17
I.2.6.1. lessourcesnaturelles… 17
I.2.6.2. lessourcesanthropiques 18
I.2.7. Lesprincipauxpolluantsdanslesol… 18
I.2.7.1. leshydrocarburespolycycliquearomatiqueHAP 19
I.2.7.2. lespesticides 20
I.2.7.3. les métauxlourds 20
I.2.7.3. .1.ladéfinitiondesmétauxlourds… 21
I.2.7.3.2. classificationdesmétauxlourds… 21
I.2.7.3.3. sourcesdesmétauxlourds… 23
I.2.7.3.4. effetdesmétauxlourds… 25
I.2.8. l'impactdelapollution desol… 26
I..2.8.1.l'effetsurlasantehumaine 26
I.3. la dépollution desol 27
I.3.1. classementdesméthodesdetraitementdesol 28
I.3.2. letraitementdesol parsite… 29
I.3.3. lestechniques dedépollutiondesol 31
I.3.3.1. les techniques biologiques 31
I.3.3.2. les technique physiques 31
I.3.3.2.1. méthodesphysiquesparpiégeagedelapollution 35
I.3.3.2.2. méthodesphysiquesparévacuationdelapollution 39
I.3.3.3. les techniquechimiques… 39

I.3.3.4. les technique thermiques..... 41

I.3.4. lesprincipesderéhabilitationdesol pollue..... 42

ChapitreII:letraitementthermiquedusol

II.1. letraitementthermiquedesol 43

II.2.lesinconvénientsde traitementthermique.....43

II.3. leprincipedetraitementthermiquedesol.....44

II.4. lestechniquesdetraitementthermique.....44

II.4.1. ladésorptionthermique.....44

II.4.2.l'incinération.....46

II.4.3. lapyrolyse 48

II.4.4. lavitrification.....50

ChapitreIII:Matérielsetméthode

III. matérieletlatechniqueexpérimentale 54

III.1. produitchimiqueutilise… 54

III.2. préparationdel'échantillon… 55

III.2.1. préparationdusolpollue.....55

III.3. mesuresdesparamètres….....55

III.3.1. le pH.....55

III.3.2. laconductivité.....56

III.4. méthoded`analyse 56

III.4.1. spectrométrieU-visible… 56

III.5. leprincipeprocéduredelavage..... 59

ChapitreIV:Résultatsetdiscutions

IV.1. Caractéristiquesphysico-chimiquesdusolavantetaprèslacontamination.....58

IV.1.1. pHdusol..... 60

IV.1.1.2. CE du sol..... 61

IV.1.3. pHetCEdu soltémoinet contaminéparleCu…..... 62

IV.1.4. pHetCEdu soltémoinet contaminéparleNi…..... 62

IV.1.5. pHetCEdu soltémoinet contaminéparleMg..... 63

IV.1.6. pHetCEdu soltémoinet contaminéparleFe 64

IV.1.7. pHetCEdu soltémoinet contaminéparleZn…..... 65

IV.1.8. pHetCEdu soltémoinet contaminéparleCo…..... 66

IV.1.9. Concentrationdesmétauxdanslesol 67

IV.1.9.1. ConcentationdesmétauxdanslesoldeZoubiria..... 67

IV.1.9.2. ConcentraiondesmétauxdanslesoldeElomaria..... 68

IV.2. Analysestatistiqueunivariee 68

IV.3. Analysestatistiquebivariée 69

Conclusiongénérale

Référencebibliographique

Les Annexes

Depuis la fin du 20éme siècle, des contaminations de sol avérées sont médiatisées et ce problème a été concrètement pris en considération. En Algérie comme à l'étranger, il existe unequantitéconsidérabledesites aux prisesavec uneproblématiquede contaminationmixte, soit à la fois par des métaux et métalloïdes (As, Cd, Cu, Se, Cr, Ni, Pb, Zn, etc.) et des composés organiques (**Kherief Nacereddine et al. 2018**).

Une faible conscience environnementale a généré une mauvaise gestion des déchets issus d'activités industrielles et, plus généralement, des activités polluantes. Par conséquent, de nombreux sites dans le monde sont contaminés par des substances comme les métaux lourds (Pb, Cd, Cu, Zn, etc.), les composés organiques hydrophobes (COH),les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les biphényls polychlorés (BPC), les huiles et graisses (H&G), les hydrocarbures aromatiques monocycliques (HAM), les composés phénoliques, etc. Un sol pollué présente un risque pour la santé de l'homme, les ressources biologiques, et les écosystèmes **(Mebarki, 2020).**

Au fil des années, plusieurs industries ont engendré des quantités considérables de polluants qui ont contaminé le sous-sol. La contamination peut être causée par des déversements accidentels, des rejets liés àl'exploitation del'industrieou tout simplement par enfouissement sur les terrains des usines. Ces substances dangereuses pour la santé humaine et l'environnementseretrouventdansle soletdansplusieurscas,l'eausouterraineestégalement contaminée **(Gleize, 2011).**

Plusieurs secteurs d'activités génèrent des déchets potentiellement dangereux. Par exempleles activités agricoles avec l'épandage massif d'engrais, d'insecticides et d'herbicides, l'enfouissement dans les dépotoirs des déchets municipaux et l'industrie pétrolière avec sa multitude de réservoirs souterrains contenant des hydrocarbures qui sont une menace constante et bien réelle de contamination des sols et de l'eau souterraine.

Le problème des sols pollués par les métaux lourds est la conséquence d'un passé, et trop souvent encore d'un présent industriel, peu soucieux des rejets d'éléments toxiques dans les sols, rendant de nombreux sites potentiellement pollués et dangereux pour la santé publiqueet animale. Il existe plusieurs technologies de décontamination des sols contaminés par les métaux lourds, néanmoins toutes ne sont pas applicables dans toutes les conditions. Uneétude est donc nécessaire pour déterminer la meilleure technologie pour les sols pollués. Le contexteéconomique estàprendreenconsidération,dansce cas,afin detrouverdessolutions

innovatrices à la problématique de la contamination des sols par les métaux lourds **(Tessier, 2012).**

L'objectif de notre travail se focalise l'étude de la dépollution du sol par lavage, dont l'effet du chauffage, le pH, la Ce et le type de polluant seront étudiés. Ce manuscrit est divisé en deux parties, la première partie contenant une étude bibliographique divisée chapitres le second contenant matériel, méthodes, résultats et discussion.

Le premier chapitre contient une définition complète du sol et de ses caractéristiques, ainsi que la définition de la pollution et les moyens de l'éliminer, La deuxième chapitre contient une définition des techniques de traitement thermique.

La deuxième partie était divisée en deux chapitres, le premier chapitre comprenait une description complète des matériels et des méthodes utilisées pour la décontamination par désorption thermique. Les résultats ont été présentés et discutés dans le deuxième chapitre.

ChapitreI: Généralité sur le sol

I.1.1. Ladéfinitiondesol:

Lesol,égalementappelécouverturepédologique,estlacouchemolled'épaisseurvariablequi recouvrepresquetouteslespartiesexposéesdelalithosphère.Elleestlerésultatdemodifications de la couche supérieure de la croûte terrestre sous l'action conjuguée de facteurs climatiques et biologiques (**Baize et Jabiol 1995, Lozet et Mathieu 1998)**

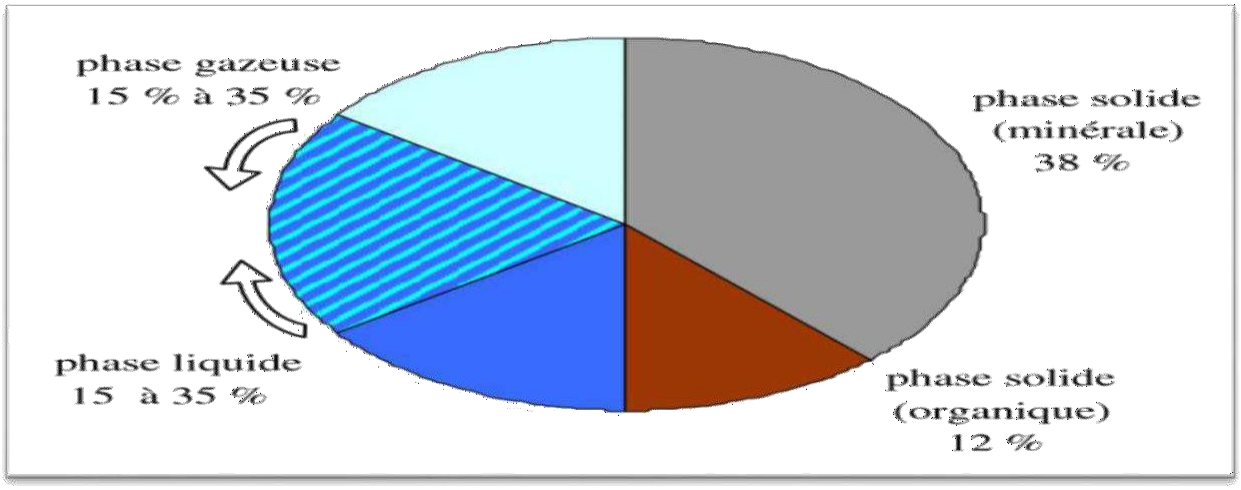
Lesolestuncorpsnaturelconstituédesolides(minérauxetmatièresorganiques),deliquideset de gaz qui setrouvent àlasurface du sol, qui occupent l'espace et qui se caractérisent par l'un ou lesdeuxélémentssuivants:deshorizonsoudescouchesquisedistinguentdumatériauinitialpar suited'ajouts,depertes,detransfertsetdetransformationsd'énergieetdematièreoudelacapacité de soutenir les plantes enracinées dans un environnement naturel. **(USDA, NRCS .2003)**

C'estunenvironnementcomplexeparsastructurephysique,sacompositionchimiqueetsa diversitéenorganismesvivants(notammentenmicroorganismes**)(Cherifetal.,2009)**

I.1.2.lesconstituantsdesol

Le sol est la couche terrestre la plus externe est un environnement hétérogène divisé en quatre parties. Trois de ces compartiments : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux delamatièresont identifiés. Le dernier compartiment concerne l'activité biologique**. (Calvet ;2003)**. Ces quatre compartimentsconstituentlesystèmesolaireetsontconstammentencontactlesunsaveclesautres par des échanges de matériaux et d'énergie causés par divers processus physiques, chimiques et biologiques. Les interfaces entre ces différents compartiments sont des environnements chimiquement réactifs qui sont propices à ces interactions et transformations.

En termes de distribution, la phase solide est la plus importante et représente généralement plus de50%delatailletotale(figure1).Lamêmechosesecomposededeuxpartiesdistinctes:fracture méniral et fracture organique. Les deux phases de liquide (liquide et gaz) partagent la maille de tailleenremplissantlesonglesdansdesproportionsvariablesselonl'étatd'hydratationdusol.Une de ces phases peut ne pas être représentée dans des conditions extrêmes : le sol est complètement sec(pasdephaseliquide)ousaturéd'eau(pasde phasegazeuse).Cependant,danslecasgénéral, le sol contient les trois stades.



FigureI.1: Compositionschématiqued'unsol,expriméeenpourcentage volumique**(Morel ;1989).**

I.1.2.1. Lesconstituantssolides

Laphasedesolsolideconsisteenunmélanged'ingrédientsorganiqueset inorganiquesdansdes proportions variables. Dans la nature, il existe deux cas extrêmes. Certains sols sont composés presque entièrement de minéraux, comme le sable du désert, tandis que d'autres sont riches en matière organique (MO), comme la tourbe. Les sols cultivés contiennent moins de 1 % à20%dematièreorganique. Laplupartd'entreeux avaientdesniveaux deMOentre1%et10%. De plus, la distribution de cette MO n'est pas uniforme, avec une teneur maximale en surface et décroissante avec la profondeur. **(Sposito ; 1989. Calvet ;2003).**

la phase solide constituée de deux fractions distinctes : la fraction minérale et la fraction organique:

I.1.2.1.1. .lesconstituantmineraux:

En général, le sol est classé selon la distribution de la taille des particules qu'il contient. société américaine ASTM (American Society for Testing and Materials) Élaboration d'un système normalisé de classification des sols fondé sur la taille des particules (tableau I).

Tableau.I.1: Classificationgranulométrique.**(Frerertetal,1995)**

Désignation	**Diamètredesgrains (mm)**

Blocserratiques	>200
Cailloux	200-60
Graviersgrossiers	60-20
Graviersmoyen	20-06
Graviersfins	6-02
Sablesgrossiers	0.6-0.2
Sablefins	0.2-0.06
Siltsgrossiers	0.06-0.02
Siltsmoyens	0.02-0.006
Siltsfins	0.006-0.002
Argiles	<0.002

Les composants minéraux sont formés à la suite de la dégradation physique et de la décompositionchimiquedesstratesrocheusessous-jacentesoudesmatériauxdéposésparle vent, l'eau et la gravité, tels que les alluvions, les colluvions et les dépôts éoliens. Ces composantspeuventêtreclassésensables(allantde2mmà50um),limons(mesurantde50 um à 20 um) et argiles (moins de 2 um) **.(Rolland ; 1988)**

- sablesetlimons:

Ils ont une granulométrie plus grossièrequel'argile. Lesable et lelimon jouent un rôlemajeur danslaconstructiondelastructuredusol,quiconstitueson"squelette".Lessolsrichesensable et en limon se distinguent par leur perméabilité à l'eau et à l'air. L'adsorption de composés organiques sur le sable de quartz peut être considérée comme minimale dans des conditions d'adsorption humide **(Fisheret all)**

- Argiles:

est un matériau naturel complexe composé principalement de silicate plus ou moins hydraté, d'aluminium en général, mais aussi de magnésium, de fer ou même de nickel qui les colore différemment. **(Calvet;2003)**

En termes de charge électrique, le sable et le limon sont essentiellement inertes puisqu'ils en possèdenttrèspeu.Al'inverse,l'argileestunesubstanceexceptionnellementréactive,bienqu'ellesoitla plus fine des trois. Sa structure minéralogique détermine trois propriétés cruciales. Avec une charge globale négative, les argiles peuvent séquestrer et libérer des ions H+ ainsi que des cations métalliques présents dans le sol. La quantité d'argile présente dans le sol est donc déterminante pour déterminer à la fois la capacité d'échange cationique du sol et son pH **.(Mumen M., 2006)**

I.1.2.1.2. lesconstituantorganique :

La matière ou phase organique du sol est constituée de tous les composants carbonés organiques vivantsetnonvivantstelsquel'humus,lesinsectes,lesmicro-organismesetlesplantes.Leterme "humus"englobetoutelamatièreorganiquedusolquin'estplusvivanteetestgénéralementdivisé en deux catégories :

- **Les substances non humiques** : sont les matières organiques dont les propriétés biophysiqueset chimiquespeuventêtreidentifiées.Ceux-cicomprennentlesglucides,leslipides, les acides aminés, les protéines et d'autres composés similaires.
- **Lessubstanceshumiques**:sontunsous-produitdetransformationschimiquesoubiologiques, telles que la polymérisation ou l'altération, de la matière organique du sol **(Panus et Gautherou. 2001)**

I.1.2.2. lesconstituantliquides:(solutiondusol)

La phase liquideest constituee de tous les liquides .Il existe dans les espaces entre les particulessolidesdusol.laphaseliquiderepresentela‘lasolutiondusol‘deleaudusolquicontient toujours des substances dissoutes .**(Hillel ;1974).**

La phase liquide correspond a l eau du permeat qui se sature en gaz dissous(O2,CO2). Mineraux dissous et particules en suspension (colloïdes) par diafiltaration . Il transporte les nutriments necessaires aux organismes vivants(Na^{+}, Mg^{2+}, $K+$, $NO3^{-}$, Cl^{-}…… **).(Mumen ; 2006)**

I.1.2.3. lesconstituantgazeux:(atmosphèredusol)

a composition chimique de la phase planétaire du sol est semblable à celle de l’atmosphère. Elle est principalement composée de diazote et de dioxygène dans des rapports presque identiques à ceux del’atmosphère(78%N2et21%O2).Cependant,enraisondel’activitébiologique,elle est

plusrichequel'airdanscertainscomposés.Deuxfacteursclésquiinfluentsursacompositionsont
:

1- laprofondeur,quiréduitleséchangesavecl'atmosphère
2- l'activité biologique, qui entraîne la consommation d'oxygène et la libération de dioxyde de carboneparlarespirationainsiqueparlesinteractionsavecsonenvironnementparlalibérationde diversesmoléculescommeleNO,N2O,NH3,CH4etH2S,ainsiquecertainscomposésorganiques volatils **(Sposito ;1989; Calvet, 2003)**

La phase gazeuse se déplace via la porosité du sol. Ces mouvements, cruciaux pour la respiration delabiomasse,sontcausésspardeuxphénomènesprincipaux:l'écoulementmassiqueetla diffusion. Le flux de masse est le mouvement de l'air dû aux changements de température et depressionatmosphérique,ouilseproduitquandlaproportiondelaphaseliquidechangedanslesol (précipitation, infiltration, et évaporation). Les fluctuations de la pression partielle des gaz dans l'atmosphèreterrestreaffectentladiffusion.Enconséquence,l'oxygènesediffusedanslesolparce quelarespirationdesêtresvivantsfaitquesapressionpartielleestinférieureàcellede l'atmosphère. D'autre part, le dioxyde de carbone se diffuse du sol à l'atmosphère **(Hausenbuiller,R. 1978).**

Tableau.I.2: Principauxconstituantsdusol**(Buttler;1992)**

	Constituantssolides		**Constituants liquides (solution du sol) Constituants**	**Constituants gazeux (atmosphère du sol)**
	Minéraux	**Organiques**		
Origine	Désagrégation physiqueet altération	Décompositiondes êtresvivants	Précipitation, nappes, ruissellement	Airhorssol, matières en décomposition, respiration

	biochimiquedes roches			
Critères de Classement	Taille (granulométrie) Qualité (minéralogie)	Etat(vivants,morts) Qualitéchimique (originelle, transformée)	Origine (météorique, phréatique) Etat physique (potentiel hydrique)Qualité chimique	Origine(air, organismes) Qualitéchimique
Catégories	Selon granulométrie - Squelette(>2mm)- Terre fine (<2mm) Selonminéralogie: -Quartz -Minéraux silicatés-Minéraux carbonatés	- Organismesvivants - Organismesmorts- Matières organiques héritées : cellulose, lignine résines. - Matières organiques -Humifiées:acides fulviques et humiques,humines.	-Eau-Substances dissoutes : glucide, alcools, acidesorganiques et minéraux - Cation et anion	Gazdel'air,N2, O2,CO2-Gaz issus de la respiration et de ladécomposition des organismes : CO2, H2, CH4, NH4…

I.1.3. lesproprietesphysiquesetchimiquesdusol:

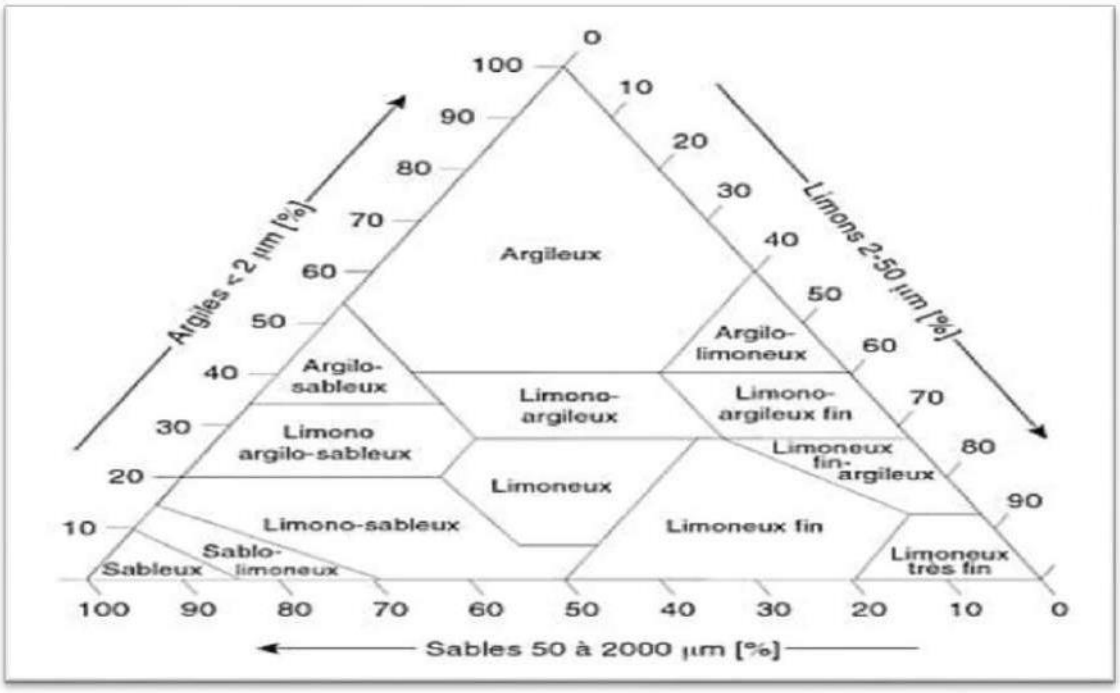
I.1.3.1. latextureougranulométrique:

La texture du sol est un ensemble de propriétés qui résultent de la composition de la particules granulométrique (pourcentage de la teneur en sable grossier et mou, limon, boue, humus et calcaire),qui estdéterminéeparl'analysede latailledesparticules (granulométrique). **(Halitim; 1988).**Ladistributiongranulométriquedesconstituantsminérauxd'unsolenfonctiondeleurtaille déterminelatexturedusol.Plusprécisément,ellefaitréférenceaurapportentrel'argile(moinsde 2 micromètres de diamètre), le limon(entre 2 et 20 micromètres de diamètre) et le sable

(entre20micromètreset2millimètresdediamètre).Plusieursautresarrangements,telsquesablo-limoneux,argilo-sableux,limono-argileux,etc.,peuventêtredistinguésenfonctiondupourcentage de chaque fraction minérale. **(Delaune et al., 1991).**

La texture reflète la partie de chaque composant qui est classée selon sa taille (figure). La proportion de sable, de limon et d'argile mesurée par analyse granulométrique (texture minéral) diffère de la fraction de fibres et de matériaux finement microagrégés dans des matériaux holorganiques dans la texture organique .**(Gobat et al., 2010).**

Latexturedusolinfluencedirectementlaporositéetlerégimed'hydratation.Lerapportargileux, en particulier, influence la production de complexes argilohumiques, la capacité d'échange, la fertilitéetlaprofondeurd'enracinement.Latextureestunepropriétéstablequinechangequ'avec l'évolution à long terme du sol, ce qui est un bon indicateur **.(Gobat et al, 2010).**



FigureI.2:Triangledestexturesminérales**(Gobatetal,2010)**

I.1.3.2. lastructuredesol:

La structure du sol reflète la façon dont les particules élémentaires du sol sont regroupées en particulescomposites,nonseulementliéesauconceptdegrappes,maisplutôtàlafaçondontelles sont disposées les unes par rapport aux autres **(Maignien ;1969).** Il convient de noter que la

structureestenfaitfondamentalementinstableetincohérentedansletemps **(Musy et Soutter ;1991)**

I.1.3.3. laporosité:

Latextureetlastructuredéterminentlaporositédusol,cequipermetla circulationde l'eauetdel'airdansles grandes cultures,ainsi quelarétentiond'eaudanslesmicro-stations **(Lanz;2004),**etfavorisentl'explorationdesracines**(VanLeeuwenetall.2004;Seguin,1986).**

La porosité reflète donc la taille des espaces et fournit des informations sur les capacités aquatiquesouatmosphériques**(Gobatetal.,2010);**Laporositépermetd'avoirunebonneidée del'étatdelastructure.Selonlatailledespores,il estdiviséengrandeporosité(vides>50µm, qui peut être rempli d'eau gravitationnelle, rapidement déchargé et colonisé avec des racines moyennes) En porosité intermédiaire ou en porosité poétique constituée d'espaces de 0,2 à 50 µm,retenirl'eauutiliséeparlesplantes,et enmicroporositéavecdesespacesdemoinsde0,2 µm retenir l'eau inutilisable. **(Aragnou et al., 2003).**

Laporositéparoriginepeutêtreclasséecommesuit:

- Porosité d'altération
- Porositétexturale
- Porositéstructurale**(BelbachiretLakhal;2017)**

I.1.3.4. lecomplexeargilo-humique(CHA):

Lecomposéhumiqueargileux(CAH)estuneassociationentrelescolloïdes(composésetargile avec une définition large) qui charge négativement et la charge positive des ions métalliques (cations) qui lient l'humus et l'argile ensemble. Le CAH est présent dans les groupements pédologiques. C'est un composé adsorbant qui retient les caténaires dans le sol (Mg2 +, Ca2 +, K +, H +) au moyen de réactions électrostatiques. Ces éléments chargés positivement peuvent ensuite attirer des anions ou des groupes anioniques. **(Boruta et al. 2016).**

I.1.3.5. LaCapacitéd'échangecationique(CEC):

LaCECd'unsolestlaquantitédecationsqu'ilpeutconserver sursoncomposéabsorbéàun certainpH. LaCECestutiliséepourmesurerlafertilitédusolenindiquantsacapacitéde

rétentiondesélémentsnutritifs.LessolsàforteCECpeuventconserverplusdecationsetontune plus grande capacité à les remplacer que les sols à faible CEC **.(Kuceríka et al ;2018).**

Lescationssontsouventmentionnésdanslesrapportsd'analysedusolcommepotassium(K+), magnésium (Mg2+) et calcium (Ca2+). Certains rapports suggèrent également que l'hydrogène (H+) et lesodium (Na+) sont les plus intéressants sur leplan nutritionnel pourla plante... Plus le sol est riche en boue et en matière organique, plus la CEC est élevée **(Zupança et al. 2018).**

I.1.3.6. lepH:

Le pH, c'est-à-dire la «potentiel Hydrogène», est un coefficient qui caractérise l'acidité ou la base du sol. Détermine la concentration d'ions H + dans la phase liquide du sol. Par leurs interactionsavecdenombreuxprocessuschimiquesetbiologiques,lepHreflèteladisponibilité des éléments dans le sol. C'est donc un indicateur utile, conjointement avec d'autres, pour comprendre la fertilité chimique du sol. **(Boruta et al. 2016).**

Le pH exprime l'interaction acide, neutre ou essentielle de l'organisme selon que la solution contientbeaucoupouquelquesionsH+libres.Auniveaudusol,lepHestvariableetaffecteles propriétés du sol. Cependant, ces différences sont limitées parce que le pH dans la chimie varie de 0 à 14 (7 est la neutralité), et parce que le pH dans le sol varie de 4,5 à 5 pour les sols plus acides à 8 pour les sols très basiques **.(Belbachir et Lakhal ; 2017).**

TableauI.3:RépartitiondesclassesdesPHdessols.

ClassedupHdusolpH	**pH**
Acide	<6
Faiblementacide	6-6.5
Neutre	6.5-7.3
Faiblementbasique	7.3-7.8
Moyennementbasique	7.8-8.5
Tendancealcalin	8.5-9
Trèsalcalin	>9

I.1.3.7. laconductivitéélectrique:

La conductivité électrique du sol ou des sédiments permet de mesurer la quantité d'ions existants qui peuvent se dissoudre en présence d'eau. Détermine la salinité du sol. Cela se traduit par la mesure de la concentration des ions dans sa phase liquide en utilisant une propriété hydrosolytique pour effectuer un courant électrique proportionnel à la concentration des ions. De façon générale, les sels minéraux du sol constituent de bons connecteurs électriques.
(Montoroi;1997)

TableauI.4: EchelledeSalinitédusol.**(USSL,1981).**

Conductivité électrique (ms/cm	**Salure**
0-0.6	Nonsalé
0.6-1.4	Peusalé
1.4-2.4	Salé
2.4-6	Trèssalés

I.1.3.8. Lesmétauxlourds:

définis comme spécifique en fonction de ses propriétés chimiques et physiques toxiques. Les métauxlourdsoulesoligo-élémentssontdesélémentsmétalliquesnaturelsdontladensitédépasse 5 g/cm3. Le métal lourd le plus toxique pour la santé humaine est: le plomb, le mercure, l'arsenic et le cadmium . les autre comme : le cuivre, le zinc, le chrome, Tout ce qui est nécessaire à l'organisme en petites quantités, il peut devenir toxique à plus fortes doses **(Yatrabi et Nejmeddine ; 2000).**

Les métaux lourds sont naturellement redistribués dans l'environnement grâce aux processus géologiquesetaux cyclesbiochimiques. **(Adametal.,2010**).Àfortesconcentrations,lesmétaux lourds créent un énorme problème environnemental parce qu'ils s'accumulent et ne sont pas biodégradables. Leur présence dans le milieu est d'origine naturelle (géogène) et des activités humaines (anthropogène). **(El Hachimi et al., 2014).**

LessourcesdesmétauxlourdsPeutavoiruneoriginenaturelleethumaine.laplupartdes‘métaux lourds’sontlescomposantesfondamentalesdelacroûteterrestre.Saconcentrationnaturelledesol est causée par le changement de roche mère, dites « fond géochimique » et des émissions volcaniques **(Zhao et al., 2014).**

Les principales sources anthropiques de métaux lourds sont les suivantes : activités minières, activités industrielles et pétrochimiques, activités urbaines et trafic routier, activités agricoles, épandages des boues de station d'épuration, incinération des déchets industriels et urbains ou ordures ménagères. **(Ahoussi et al., 2010).**

I.1.3.9. lamatièreorganique:

Onparledetoutcequiestvivantouquiétaitvivantdanslesol.Ilsecomposeprincipalementde résidus de plantes, d’animaux et d’objets microbiens. La matière organique du sol assure de nombreuses fonctions agricoles et environnementales; améliore la stabilité structurale, la fertilité, la ventilation, l'approvisionnement en eau et la biodiversité du sol.**(Feller ;1995).**

La dégradation des matières organiques dans le sol par les microorganismes produit du carbone organique, notamment sous forme de dioxyde de carbone(CO_2) et de méthane (CH_4). La matière organique dans le sol est le dépôt de carbone organique le plus important. Le premier mètre de sol du monde stocke entre 1500 et 2400 milliards de tonnes de carbone organique**. (Kučeríka et al., 2018).**

I.2. Lapollutiondesol

I.2.1. Ladéfinitiondelapollution

Le terme "pollution" désigne toute altération d’origine anthropique des concentrations des constituants chimiques naturels d’un écosystème, l’introduction de composés chimiques artificielsdanslabiosphère,laperturbationdufluxd’énergie,oulerejetdeproduitschimiques toxiques dans l’environnement .l’intensité du rayonnement, le flux de matières ou même l’introduction d’espèces exotiques dans un biome naturel (**Balet. 2016)**

I.2.2. ladéfinitiondelapollutiondesol

La pollution des sols correspond à l'accumulation de composés toxiques : produits chimiques, Sels, substances radioactives ou pathogènes, qui ont tous des effets nocifs sur les organismes vivants Actif, peut être absorbé par le feuillage ou la voie racinaire des plantes, par inhalation, ingestion ou toucher des animaux ».**(Hateb et al ; 2012)**

Unesubstancetoxiqueestunesubstanced'originenaturelleousynthétisée,minéraleouorganique, toxique pour les organismes vivants et susceptible d'être absorbée par les tissus foliaires ou rudimentaires des plantes, inhalée, consommée ou mise en contact par les animaux. Il intoxique les organismes touchés en altérant une fonction vitale qui peut entraîner la mort.**(Ramade, 2000)**

I.2.3.-ladéfinitiondunsolpollue

Unsolpolluéestunsoldanslequellaconcentrationdeproduitschimiquesestsupérieureàcequi estnormalementvuetuneouplusieursdesfonctionsdusolsontaffectéesnégativementdemanière irréversible.**(Tomasin.2003)**

I.2.4. .Ladéfinitiondunpolluant

Les termes normalisés de l'AFNOR (Association française de normalisation) définit le polluant commeunaltéragènebiologique,physique,ouchimique,quiau-delàd'uncertainseuil,etparfois danscertainesconditions(potentialisation),développedesimpactsnégatifssurtoutoupartied'un écosystème ou de l'environnement en général.**(khellout ;2004-2010)**

I.2.4.1. .Lestypesdespolluantsdesol

Diverspolluantssontmisenévidence,telsque:

- Les éléments métalliques, qui sont fréquemment retrouvés : plomb, zinc, arsenic, chrome, cadmium…Leurprésencepeutêtreliéeàl'évolutionnaturelledelarochedusoloupardes impacts d'activités anthropiques.
- Les composés organiques, qui sont principalement introduits par l'homme : notamment les hydrocarbures détectés dans 40 % des sites diagnostiqués dans la base de données Basol (hydrocarburesaromatiquespolycycliques(HAP),solvantshalogénéscommeletrichloréthylène par exemple, composés organiques volatiles (COV), etc.).

I.2.4.2. Interactionsdespolluantsaveclescomposantsdusol

L'un des principaux services écologiques fournis par le sol est le filtrage, le tamponage et Transformationdespolluantsinorganiquesetorganiques.Cesfonctionsessentiellesgarantissent Bonne qualité des eaux souterraines et production alimentaire sûre **(Blum, 2005).** Quand les polluantsdanslesol,ilssubissentdesprocédésphysiques,physico-chimiques,microbiologiques et les processus biochimiques qui les conservent, les réduisent ou les dégradent .Les caractéristiques importantes du sol qui affectent le comportement des polluants comprennent:Minéralogiedusoletteneurenargile(textureduSol);quantitédematièreorganique du sol(MO), pH (acidité) du sol; niveaux d'humidité; et température. Les propriétés deLes polluants eux-mêmes sont également très importants et comprennent la taille, la forme,structure moléculaire,lasolubilité,larépartitiondeschargesetlanatureacido-basedelamolécules**(Gevao et al ; 2000).**

- **Adsorptiondescontaminantsdanslesol**

La sorption (ou adsorption) est unprocessusparlequellesmoléculesd'unfluide interagissent avec un solide et sont conservés sur le solide pendant un certain temps **(Navarro et al, 2007)**. Sorption peut être chimique dans sa nature (comme avec la liaison ionique et hydrogène) ou purement physique (as with van der Waals forces). Les ions ou molécules qui sont positivement chargés (cationiques) participent au cation échange sur les surfaces chargées. La matière organique du sol (SOM) et les minéraux d'argile sont les la source des sites d'échange de cation dans le sol et la capacité d'échanges de cations (CEC) de différentes fractions SOM et types de minéraux d'argile diffèrent considérablement. Accusé négativement Les ions ou molécules (anioniques) sont, en général, plus faiblement liés dans les sols et réagissent avec SOM principalement par liaison à l'hydrogène et l'échangedeligands**(Gevaoetal;2000**).Lesétatsd'oxydationdecertainsionsoumoléculespeuvent passerparétatscationnés,neutresouanioniquesenréponseaupHdelasolutiondusol;parconséquent Leurabsorptiondanslesoldépenddu pH.Enoutre,certainesmoléculespeuventouperdentdesprotons etprésententainsiuncomportementacideoubasique;lasorptiondecesLesmoléculessontégalement dépendantes du pH. modifier la présence ou l'absence de l'oxygène en raison d'un changement des conditions d'humidité du sol provoque également des

changementsdanslesétatsd'oxydationdecertainsionsetcomposésetpeutIls'agitd'unimportant contrôledela mobilitéde ces contaminants.

I.2.5. Lesformesdelapollutiondesol

Selon ce qui a été mentionné, les actions intentionnelles et involontaires peuvent entraîner une contamination du sol. Les dépositions directes de polluants dans le sol et les processus environnementauxcomplexesquipourraiententraînerunecontaminationindirectedusolparl'eau ou l'air peuvent être considérés comme des exemples de ces activités. **(Tarazona, 2014).** Les nombreuses formes de pollution des sols sont discutées dans les sections ci-dessous.

Unincidentouuneséquenced'événementsdansunendroitdonnéquilibèredestoxinesdanslesol peutentraînerunepollutiondusol,etlasourceetletypedecontaminationpeuventêtreclairement identifiés. La contamination point source est le nom donné à ce type de pollution. Les principales causes de contamination par les sources pointes sont anthropiques.

Les anciens sites de fabrication, l'insuffisance des déchets et de l'élimination des eaux usées, les décharges non gérées, une application excessive de pesticides, diverses fuites et bien d'autres situations sont des exemples. Dans de nombreuses régions du monde, des activités telles que l'exploitationminièreetlafontequiutilisentdesnormesenvironnementalessubparessontdessources de pollution des métaux lourds **(Lu et al., 2015; Mackay et al., 2013; Podolský et al., 2015;Strzebońskaetal ;2017)**

Ilexistedeux typesdepollutiondessols:

-Pollutiondesourceponctuelle:lespolluantssontdéposésoudiffuséssur unezonelimitéeet peuvent être homologues **.(Jeannot et al ;2000)**

-Pollutiondiffuse:lapropagationouledépôtdepolluantssurunegrandesurface**.(Jeannotetal ;2000)**.Leterme«pollutiondiffuse»désignelespollutionsquisontdisperséesdansdesrégions extrêmement vastes, s'accumulent dans le sol et manquent d'une cause unique ou évidente. Lorsque la libération, la transformation et la dilution des polluants dans d'autres supports ont eu lieu avant leur transfertdans le sol, une contamination diffuse se produit. **(FAO, 2015).** Les polluants sont transportés à travers les systèmes impliquant l'air, le sol et l'eau dans la

pollutiondiffuse.Parconséquent,afindequantifieravecprécisioncetypedecontamination,des études complexes comprenant ces trois compartiments sont nécessaires. **(Geissen et al., 2015)**. La pollution diffuseest si difficileàtracer et àdélimitersaportéespatiale. C'est aussi difficileà analyser. Étant donné qu'il n'est pas clair combien des polluants qui produisent une pollution locale se comporteront dans l'écosystème, ils peuvent également contribuer à la polluation diffuse.Pour chacun de ces types, il existe deux sources de contamination :

- Contaminationaccidentelle:(déversementoudépôtsponctuelsdepolluants)ouLesémissions de polluants varient dans le temps.

- Pollution chronique : (apport persistant de polluants par fuite ou lessivage) dont l'impact

Potentiel cumulatif supérieur à la contamination accidentelle **(Jeannot et al., 2000)**

I.2.6. Lessourcesdelapollutiondusol

I.2.6.1.Les sources naturelles :

-Lafractionpédo-géochimiqueetladynamiquedel'environnementquiontdonnélieuau développement du sol auront un impact significatif sur les concentrations de fond dans les sols d'unerégion.Parconséquent,l'utilisationdemoyennesoud'intervalleglobalestinappropriée.pour déterminer les concentrations de fond au niveau national, régional ou local (**Horckmans et al., 2005.Payetal;2012)**.Lorsquel'onprendencomptelesfluctuationsnaturellesdelaconcentration de traces dans le type de roche mère, les métaux lourds dans les sols, par exemple, peuvent varier de deux à trois ordres de magnitude. **(Shacklette and Boerngen, 1984).**

-Plusieursmatièrespremièresdusolsontdessourcesnaturellesdecertainsmétauxlourdsetautresdes éléments,telsquelesradionucléides..Lessourcesnaturellesincluentémissionsvolcaniques**(Albanese et al., 2007)** et la météorisation des minéraux contenant de l'acide et mines **(Díez et al., 2009),** mais aussi des zones minéralisées naturellement présentes d'arsenopyrite formés par la météorisation de rochesportantdusulfure**(Scott,AshleyetLawie,de2001)**.Beaucoupdecesminérauxprésententune grande variabilité spatiale et beaucoup d'entre eux peuvent être trouvés à des concentrations plus élevées dans des couches plus profondes **(Li et al., 2017).** Cependant, comme il est légèrement bioaccessible quand il provient de sources naturelles **(Juhasz et al., 2007).**

I.2.6.2. Lessourcesanthropiques;

L'origine anthropique de la dégradation des sols est principalement due à divers les activités humainesquiappauvrissentlessols(del'agricultureà l'industrie)Matières organiques, éléments minéraux et micro-organismes, les transformant en sols contaminés. **(Qi et al., 2015).**

Nouspouvonsciter,quelquesexemplesdesourcesanthropiquesdeladégradationdessols:

-La déforestation, le surpâturage et les incendies de forêt entraînent La végétation recouvre et accélère l'érosion des sols **.(Wenyou et al., 2018)**

-L'épandageexcessifd'engrais(surtoutphosphatesrichesencadmiumetProduitsphytosanitaires (insecticides)pourfertiliserlesoloudésherberorganismesnuisiblesauxcultures
(Rongetal.,2018)

-Sururbanisation des terres agricoles : Surfaces bétonnées recouvrant le sol Le sol empêche l'eau de pénétrer dans la terre, sans laquelle aucune vie ne peut se développer **(Shixue et al., 2018)** .

- Émissionstoxiquesintensivesetpolluantsrichesenmétauxlourdsrejetésparlesentrepriseset la circulation automobile

- Ledépôtetl'accumulationdesbouesdestationd'épuration,desdéchetsindustrielset

ménagers surles sols sous forme dedécharges autorisées ou sauvages (**Pengyan et al.,**

2018)

I.2.7. Lesprincipauxpolluantsdanslesol

I.2.7.1. LeshydrocarburespolycycliquearomatiqueHAP

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques sont des hydrocarbures aromatiques composés de plusieurscyclesbenzéniquesliésentreeuxsousdiversesformes.LaplupartdesHAPproviennent de processus de pyrolyse, en particulier de la combustion incomplète de matières organiques ou de composés carbonés**.(Yaoetall,2022).**Les HAP sont des sous-produits de combustion incomplète. Leur présence dans les compartiments environnementaux (eau, air, sol, biomasse) a uneorigine naturelleou anthropique. La teneur des HAP d'originenaturelledans les sols est <10 µg.kg-1. Ces HAP peuvent avoir comme source les feux de forêts et les éruptions

volcaniques**(BOUZID,2019)**.Maiscertainsd'entreeuxsontégalementfabriquésparPlantes **(Girardetal.,2011).**

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont souvent composés de molécules non polaires produites par deux cycles de benzène ou plus, constituent un sous-ensemble bien connudecettedernièrecatégoriedepolluants.Onsaitquelescomposésorganiqueshydrophobes (HFC),qui comprennent lesHAP,sontextrêmementtératogènes,mutagènesetcancérogènes De plus, en raison de caractéristiques comme une faible volatilité, une faible solubilité dans l'eau et une faible biodégradabilité, elles sont persistantes dans les sols et les sédiments. Ces caractéristiques empêchent le sol de les éliminer efficacement .**(Lopez-Vizcaino et al ; 2014).**

I.2.7.2. Lespesticides

Les pesticides sont généralement appelés la catégorie des produits chimiques synthétiques utiliséspourassurerlasécuritéalimentaireetrépondreauxdemandesdelapopulationmondiale. Le terme « pesticide » est généralement employé pour désigner le produit chimique utilisé pour détruire les ravageurs **(Ahmed et al., 2011).**

L'écosystème est contaminé par les pesticides, leurs molécules intermédiaires et les produits chimiques utilisés dans leur synthèse parce qu'ils sont incroyablement résistantsàla biodégradationSeulement1à3%despesticidesutilisésdanslesculturesatteignentlescibles prévues; le reste a un effet défavorable sur les espèces non ciblées ou pénètre dans l'environnement et contamine l'eau, le sol et l'air **(khan et al; 2020) .**

La pollution des sols par les pesticides peut entraîner des fluctuations des propriétés physicochimiques de sols agricoles.**(khaledetal;2020).**Enraisondeleurscaractéristiques xénobiotiques,ces substances peuvent affecter négativement le sol microbien et les activités enzymatiques qui sont considérées comme des indicateurs essentiels de la tolérance du sol aux polluants**(Aroraetal.,2019;Micuțietal.,2018).**Laprésencedepesticidesdanslesolpourrait également avoir une incidencE l'activité microbienne du sol et la dégradation associée de la matière organique (MO) **(Arora et al.2019; Dolliver et al., 2008; Kinney et al., 2005; Pan et Chu, 2016).**

Encoreunefois,leproblèmeseposelorsquelespesticidessontappliquésenquantitéssupérieures à celles nécessaires et en utilisant des méthodes qui encouragent leur propagation dans l'environnement,tellesquelapulvérisationdezonespeupléesavecdeséquipementsd'application inappropriés, mal entretenus ou mal calibrés ou par des avions affectant des organismes non cibles.**(carvalho ; 2017)**

I.2.7.3. .Lesmétauxlourds;

I.2.7.3.1. Ladéfinitiondesmétauxlourds

Le terme plutôt imprécis "métaux lourds" est basé sur la densité Métaux chimiques avec une densité supérieure à 3,5 g/cm³ et un numéro atomique supérieurà 20. Les métaux lourds comprennent généralement le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cobalt (Co), cuivre (Cu), étain (Sn),fer(Fe),manganèse (Mn),mercure(Hg),molybdène(Mo),Nickel(Ni),plomb(Pb),zinc(Zn). les métalloïdes arsenic (As) et sélénium (Se),Mais pas un métal, qui est généralement classé comme un métal en raison de sa toxicité **(Baize, 2009)**

Lesmétaux lourdssontprésentsdanstouslescompartimentsdel'environnement,maisengénéral enquantitéstrèsfaibles.Onditquelesmétauxsont présents«en traces».Ilssontaussi«latrace » du passé géologique et de l'activité de l'Homme. Certains sont indispensables au déroulement desprocessusbiologiquesdesvégétauxetdesanimauxàdesquantitésinfinitésimale,ilssontalors nommés « Oligoélément» . **(Benhaddya M L .,2014).**

métaux lourds, définis comme métaux ou métalloïdes ayant une densité spécifique supérieure à 5 g/cm3 **(Järup, 2003; Oves et al., 2012)**

Les sources de métaux lourds peuvent être d'origine naturelle et anthropique. En effet, la plupart des 'métaux lourds' sont des éléments constitutifs de la croûte terrestre. Leur concentration naturelle dans le sol résulte de l'altération des roches mères, dites « fond géochimique » et des émissions volcaniques **(Zhao et al., 2014).**

Les métaux lourds ont souvent de faibles seuils de toxicité, de longues périodes de résidence (parfois des décennies de dépassement) et une biodisponibilité persistante **(Jiang et al., 2017).** L'accumulation excessive de métaux lourds peut donc perturber les processus biochimiques habituels qui se produisent dans les sols, entraînant une détérioration de la qualité des sols, une

diminutiondelaproductivitéetdelaqualitéagricolesetdesrisquespourlasantéhumaine**.(Jia et al ; 2019) .**

Les métaux sont un facteur de stress parce qu'ils ne sont pas biodégradables et peuvent persister dans le sol pendant une longue période, ayant peut-être des effets négatifs durables sur l'écosystème naturel du sol. **(Tang et al ; 2019)**

I.2.7.3.2. Classificationdesmetauxlourds

- **métauxessentiels**

sont des oligo-élément essentiel pour de nombreux processus cellulaires Et on les retrouvent en très faible proportion dans les tissus biologiques. certains peuvent devenir La toxicité survient lorsquelaconcentrationdépasseuncertainseuil.C'estlecasducuivre(Cu),duzinc(Zn),fer(Fe). Parexemple,lezinc(Zn)àuneconcentrationde1millimolaireestunoligo-élémentimpliquédans denombreusesréactionsenzymatiques(déshydrogénases,protéases,peptidase),danslesprotéines, les glucides et Lipide. **(Kabata-pendias A et Pendias H., 2001)**

- **Métauxtoxiques**

Sont des polluants avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration.Ilsn'ontaucuneffetbénéfiqueconnupourlacellule.C'estlecasduplomb(Pb),du mercure (Hg), du cadmium (Cd). **(Behanzin G. J et al., 2014).**

Eléments essentiels majeurs	Oligo-éléments essentiels	Eléments "essentiels" en ultra trace	Eléments non-essentiels
Calcium, Phosphore, Potassium, Soufre Magnesium, Chlore, Sodium	Fer, Iode, Cuivre, Manganese, zinc, Cobalt, Molybdène, Sélénium, Chrome, Nickel, Vanadium, Silicone, Arsenic	Lithium, Fluor, Aluminium, Étain, Plomb, (Cadmium)* * essentiel si deficit de Zinc	Cadmium, Mercure

TableauI.5:Principauxélémentsmétalliquesessentielsetnon-essentiels**(Hopkin,1989)**

I.2.7.3.3. sourcesdesmetauxlourds

Danslacroûteterrestre,lesmétauxlourdssontnaturellementprésentsetsontlibérés.parunevariété d'activités humaines, qui a conduit à des quantités élevées de métaux lourds dangereux concentration dans le sol. Le plus typique Les métaux lourds trouvés dans les sols contaminés comprennent Pb, Cr, As, Zn, Cd, Cu et Hg, dans cet ordre. Les processus naturels contribuent également à la pollution des sols par les métaux lourds**(khaled et al ; 2017)**

- ## Lessourcesnaturelles

Les métaux lourds sont naturellement présents dans les sols en raison de l'érosion du substrat rocheux sous-jacent. Elles sont généralement extraites des minerais après les étapes de traitement des minéraux **(PNUE/AMP, 2004;Shakoor et al, 2015).** Les métaux lourds se trouvent dans les rochessousdiversesformeschimiquesappeléesminerais,etcesmétaux sontensuiteextraitssous formedeminéraux**(Fuge et al., 1991).**Dans les formations de minerais, les métaux lourds apparaissentsouventsousformed'oxydesdeSe,Al,MnetSbainsiquedesulfuresdePb,Co,Fe, As, Pb-Zn, Ag et Ni. Par conséquent, ces métaux sont souvent extraits des sols sous forme de minerais d'oxydes et de sulfures.Typiquement, les sulfures de chalcopyrite, de CuFeS2 et de Fe existent naturellement dans les sols avec les sulfures métalliques d'As, de Hg, de Pb et de Cd. (pyrite, FeS2). Pour cette raison, la majorité de ces métaux lourds sont produits après extraction comme sous-produits de divers procédés hydrométallurgiques ou comme partie des gaz d'échappementdanslesprocédéspyrométallurgiques.Parexemple,parcequeleCdetlesphalérite demineraideZncoexistent,leCdestprincipalementproduitcommesous-produitduprocessusde raffinage de Zn. Ainsi, des quantités considérables de métaux lourds sont redistribuées chaque année de l'aquifère pollué de la croûte terrestre aux divers milieux environnementaux, ycompris l'eau, l'air et le sol. Par conséquent, des concentrations élevées de métaux sont naturellement présentesdansles solsdérivésdelamatièremère etdesconcentrationsaccruesdemétaux dansle substrat rocheux. **(Pourrut et al., 2011)**

- ## Lessourcesanthropiques

Lessourcesanthropiques decontaminationdusolparlesmétaux lourdscomprennentleraffinage et l'extraction des minerais, des pesticides, des batteries, des industries du papier, des tanneries, des industries des engrais, l'élimination des déchets solides, y compris les boues d'épuration,

l’irrigation des eaux usées et les gaz d’échappement des véhicules**. (Niazi et al., 2011, 2015; Shahid et al., 2015).**

Ross(1994)adivisél'anthropogènesourcesde contaminationmétalliqueencinqgroupes:

1. Agriculture(Zn, As,Pb,Cd,Cu,sélénium(Se)eturanium(U))
2. Minesetfusionmétalliques(Cd,Pb,AsandHg)
3. industrie(Cd,Hg,As,Cr,Cu,Co,NiandZn)
4. Dépannagedesdéchets(As,Pb,Cu,Cd,Cr,ZnandHg)
5. Dépositionsatmosphériques(As,Pb,Cr,Hg,Cu,CdandU).**(Ross.1994)**

I.2.7.3.4. Effetdesmetauxlourds

- **l`effetsurlasantehumaine**

Les métaux lourds, lorsqu'ils sont consommés par les humains ou d'autres organismes supérieurs, présententdesrisquespourlasantépubliqueenaltérantlafonctionimmunitaire normale,eninduisant unetoxicitéetenaugmentantl'incidenceducancer,desanomaliesdudéveloppementetdelamortalité.(**zheng et al ,2023).** Les sols contaminés sont des sites où il existe un risque ou un danger permanent pour la santé.humains; en fait, de nombreux produits chimiques (ycompris les métaux lourds) ont été mesurésDanslessolscontaminés,plusieurseffetssurlasantésontconnus.LàLacontaminationsefait alors par le tube digestif (consommation d'eau ou de plantes contaminées et animaux contaminés), ou par les voies respiratoires (inhalation de poussières de sols contaminés)émis dans l'atmosphère). En effet, les polluants toxiques (métaux lourds)Transmettre le sol aux humains en respirant des aérosols dans un sol contaminé ou à travers des chaînes La nutrition peut provoquer diverses maladies, notamment des troubles neurologiques aigus et chroniques,Foie et rein, cœur et poumon, digestion et carcinogenèse, etc. **(Jun et al., 2018).**

TableauI.6: Principauxeffetsdesmétauxlourds.(**huynh;2009**)

L'éléments	L'effets
As	Toxique, possible cancérigène
Cd	Hypertension, dommage sur la foi
Cr	Cancérigène sous forme de Cr
Cu	Peu toxique envers les animaux, toxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés
Hg	Toxicité chronique et aigue
Ni	Allergies de peau, maladie respiratoires possible cancérigéné
Pb	Toxique
Se	Essentielle à faible doses, toxique à doses élevées
Zn	Toxique pour les végétaux à fortes teneurs

- **Effetsurenvironnementetlachainealimentaire**

  En comparaison avec le contact avec la peau ou l'inhalation, la consommation d'aliments contaminéspardesmétauxlourdsestconsidéréecommelecanalprincipal(N90%)del'exposition humaine**.(Momboetal.,2015;Xiongetal.,2016**).Grâceàl'absorptiondesracines,lesolsertde voie directe pour la contamination des légumes et des cultures par des métaux lourds. **(Pierart et al.,2015).**Silabiodisponibilitédespolluantsestélevée,leslégumesetlesculturescultivéesdans des zones polluées par des métaux lourds peuvent absorber plus de métaux lourdes que la loi ne l'autorise,cequipourraitavoirdeseffetsnéfastessurlasantépublique.**(Xiongetal.,2014).**Dans plusieurs régions du monde, la déposition accrue de métaux lourds par les usines au-dessus des MPL a été démontrée, des concentrations excessives de métaux lourds) dans le tissu végétal peuvent causer une variété d'impacts physiologiques, morphologiques et biochimiques nocifs.**(shahidetal;2014)**.Eninterférantavecl'absorptionetletransportdenutrimentsetd'eau, en affectant le métabolisme de l'azote, en perturbant l'action d'ATPase, en réduisant la photosynthèse, en entravant le développement des plantes et en gênant le fonctionnement des machines photosynthiques des plantes, les métaux lourds et leurs loids provoquent une toxicité végétale.déclenchelafermeturedesstomatesetdeschloroplastes**(Shahidetal.,2014).**Dessignes invisibles de dommages aux plantes tels que le bronzage des racines, la nécrose, la chlorose et le roulement des feuilles peuvent également être apportés par des métaux lourds **(Pourrut et al., 2013).** L'exposition excessive aux métaux lourdspeut affecter les cycles cellulaires et la division, produiredesespècesd'oxygèneplusréactives(ROS)etinduiredesanomalieschromosomiquesau niveau cellulaire. **(Shahid et al., 2014, 2015).**

I.2.8. l`impactdelapollutiondesol

I.2.8.1.Leffetsurlasantehumaine

SixdangerspourlasantéhumaineassociésausolsontrésumésparOliveretGregory**(Oliverand Gregory, 2015)**. Les risques de contamination élémentaire (tels que As, Cd et Pb),la contaminationchimiqueorganique(telles que les PCB, les PAH et les POPs) et la pollution pharmaceutique(commelesœstrogènesetlesantibiotiques)sonttroisdeceux-ciquisontliésàla pollue du sol. Les trois dangers supplémentaires comprennent la malnutrition causée par la détérioration des sols, les carences nutritionnelles et les agents pathogènes du sol, y compris l'anthrax et les prions**.(olive rang gregory ; 2015)**

I.2.8.2.1effetsurl1environnement

La pollution du sol peut conduire à la dégradation du sol, réduire la qualité et le rendement des culturesetconduireàl'accumulationdemétauxlourdsdanslachaînealimentaire.**(DeCocketal.,2021;Lü et al., 2022;Lyu et al., 2022**). Les sols contaminés à leur tour une source possible de propagationdirecteouindirectePolluantsdansl'environnement,parl'eau,lapoussièredansl'air, lesémissionsdegazsoitparreconcentrationet/outransfertdepolluantspardesorganismeschaîne alimentaire,entraînant unepertedebiodiversitévégétaleet animaleet détruirel'équilibrededivers écosystèmes environnementaux**.(Lei et al., 2016).**

I.3. Ladépollutiondesol

I.3.1. Classementdesmethodesdetraitementdesol

TableauI.7:Classementdesméthodesdetraitementdesol(**locomte,1998**)

Techniques	Insitu	Exsitu
Méthodes physiques par évacuationdelapollution	Ventilationdelazonenon saturée Extractiondoublephase Barbotageinsitu(ouinjection et bullage d air in situ) Pompageettraitement Pompageecremage	Excavationdessols Trigranulométrique Lavagealeau
Méthodes physiques par piégeagedela pollution	Confinementparcouvertureet etancheification Confinementvertical Piège hydraulique ou confinementhydraulique Solidificationstabilisation in situ	Encapsulation onsite et élimination en centres de stockagedesdéchets Soldificationstabilisation
Méthodeschimiques	Lavageinsitu Oxydationchimiqueinsitu Réductionchimiqueinsitu	Miseensolutionetextraction Chimique Oxydation et réduction Chimique
Méthodesthermiques	Vitrification Désorptionthermiqueinsitu	Incinération Désorptionthermique Vitrification Pyrolyse
Méthodesbiologique	Biodegradation in situ dynamisee Bioventing Biosparging Attenuationnaturellecontrolee Phytoremediation	Bioréacteur Biotertre Compostage landfarming

I.3.2. Letraitementdesolparsite

le traitement des sites contaminés peut se faire in situ, sur site après excavation, ou hors site (ex situ) lorsque les parties polluées sont ramenées à un endroit extérieur pour les traiter (centre de traitement).**(Girard et al ; 2005)**

Application du traitement« in situ» :Le principe consiste à traiter les formations contaminéesdirectement dans le milieu naturel contaminé (sur place) sans enlever les parties contaminées **(Lecomte, 1998).**

Le traitementinsituexploitel'activitébiologique intrinsèqueouladégradationnaturelledusolet limite le mouvement des polluants **(Girard et al., 2005).**

-Application du traitement « sur site » : Le principe est de décontaminer le matériel in situ après sonretraitdumilieunaturel.Letraitementsefaitdansuneinstallationutilisantdesunitésmobiles d'épuration **(Lecomte, 1998).**

- L'application du traitement hors site «ex situ »: consiste à traiter les matériaux à décontaminer dans une zone dédiée hors site après évacuation par excavation, où les terres traitées peuvent être restituées **(Lecomte, 1998).**

Lestraitementssursiteetexsitusontconçuspouroptimiserlestaux dedégradationetrendreles contaminants plus facilement biodégradables **(Girard et al., 2005).**

En règle générale, les technologies de réparation peuvent être classées en deuxstratégies principales : laremédicationinsituetlaremédiationexsitu.Laréparationinsituconsisteàtraiterlepolluantàson emplacement d'origine. Cette stratégie vise à éliminer les polluants du sol ou des sédiments sans déplacer le sol ou le sédiment lui-même. La réparation ex situ est effectuée par l'excavation et le traitement du sol ou des sédiments contaminés ailleurs loin du site. En comparant ces deux stratégies, laréparationinsituoffreuncertainnombred'avantagestechniques,économiquesetenvironnementaux potentiels.Dans certains cas, la réparation in situ est le seul moyen d'éliminer les polluants en tenant compte de l'ampleur de la zone contaminée et de son efficacité en termes de coût. Pour une grande échelle de sols ou de sédiments contaminés, la réparationin situ estattrayante car ellecausemoinsde perturbations à l'écosystème, l'opération est relativement simple et le coût est moins cher que le traitement ex situ.**(song et al ; 2017)**

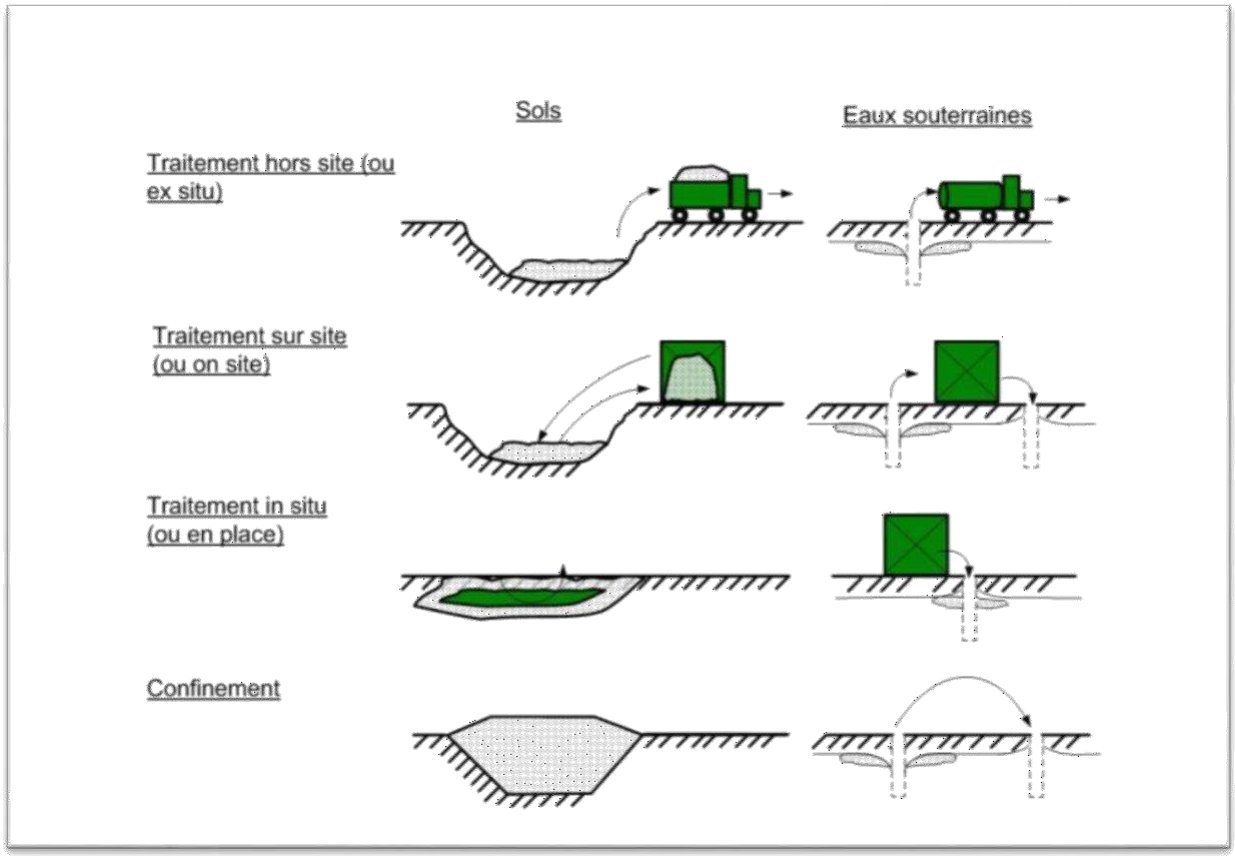
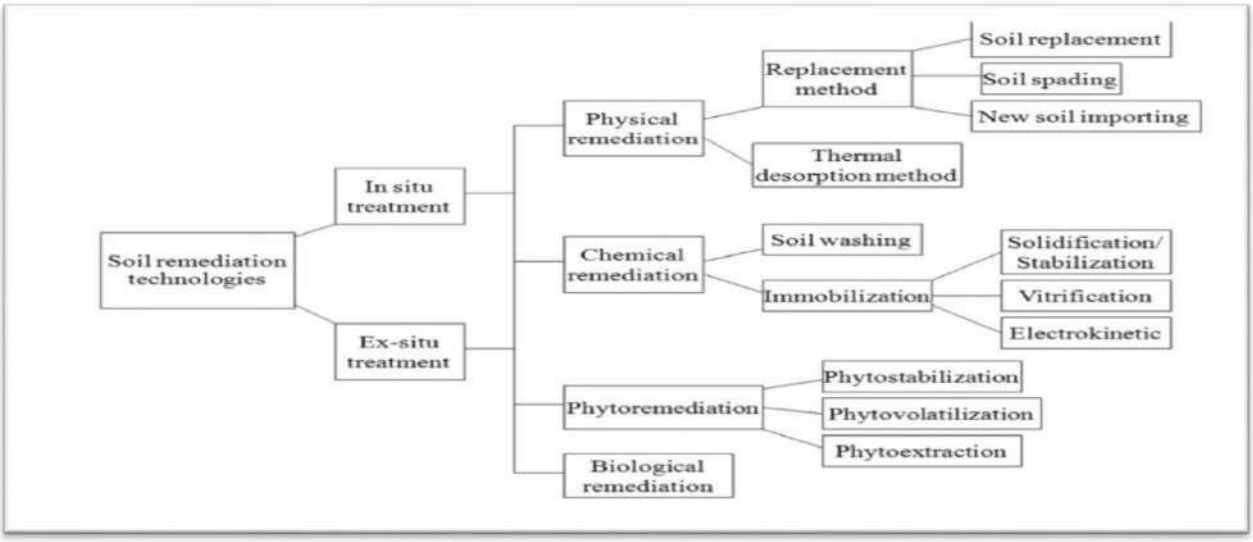


Figure **I.3:**Familledetechniquededépollutiondessolsparlieudetraitement(Colombanoetal, 2010).

I.3.3. Lestechniquesdedepollutiondesol



Figure**I.4**:Organigrammedestechnologiesdedepollutiondessols**(Najadetal;2017)**

I.3.3.1. Lestechniquesbiologiques

- **Bioremediation**

Lemotbioremédiation estforméde"Bios",signifiantlavie,seréférantàunorganismeVivantet « remédier » signifie résoudre des problèmes. **(Sardrood et al., 2013**).Il s'agit d'un ensemble de biotechnologies microbiennes(bactéries et/ou champignons) dégradent les polluants. Ces organisationspeuventavoirprésentdansleszonescontaminées(local)ouajoutéàl'environnement (exogène). **(Abdelly, 2006).**

- La bioremédiation est un processus qui utilise micro-organismes et leurs produits à éliminercontaminants du sol . En particulier, les microorganismes indigènes du sol jouent un rôle clé rôledanslesbioremédiationsdessolstransformerdescomposésorganiquescomplexeseninorganiques simples composés ou dans leurs éléments constitutifs. Cette processus est appelé minéralisation. Les micro-organismes sont adsorbés aux particules du sol par le mécanisme ionique échange. En général, les particules de sol ont une charge négative, et le sol et les bactéries peuvent tenir ensemble par une liaisonioniqueimpliquantdescationspolyvalents.Latechnologiedebioremédiationutilisedesmicro-organismes pourréduire, éliminer,contenir ou transformer en contaminantsbéninsprésentsdanslessols,lessédiments,l'eauetl'air**.(Adams etal;2015).**

La bioremédiation, qui est apparue comme un processus relativement économique, peut s'avérer un outil efficace pour contrer les effets néfastes de la pollution et rendre le sol contaminé moins pollué et exempt de composés toxiques ou récalcitrants**.(Verma et al ; 2019)**

Utilisantdescréaturesvivantes,tellesquedesbactériesetdesmicro-organismes,labioremédiation est une branche de la biotechnologie qui purge les poisons et les polluants du sol. Les micro-organismesvivantspeuventêtreutilisésen bioremédiationpour éliminer oudétoxifier lestoxines d'un environnement particulier. Les antibiotiques sont connus pour soumettre les microbes à la pression de sélection, ce qui entraîne l'enrichissement des ARM. Bien qu'elle soit utilisée pour l'assainissement des sols, la biorestauration est plus efficace**.(Li et al ; 2023).**

- **Phytoremediation**

L'utilisation des plantes pour absorber, transporter ou modifier les polluants est une technique appelée phytoremédiation, qui est respectueuse de l'environnement et qui réussit à réduire les

dommages que les polluants causent à l'environnement et à la santé humaine. Les métaux lourds, les contaminants organiques et même les matières radioactives qui polluent le sol, l'eau et les sédiments sont les principales cibles de la phytoremédiation **(Lin et al., 2021;).**

Une procédure de décontamination assistée par les plantes. En collaboration avec des micro-organismes,desplantescommelesgraminées,lesarbustesetlesarbresnettoientl'environnement(sol, eau et air) en dégradant, accumulant et stabilisant les toxines **(Gomes, 2012; Rajkumar et al., 2012; Cameselle et al., 2019).** Il s'agit d'une « technologie verte » qui permet d'éliminer les toxines du sol (comme les métaux lourds et les polluants organiques) tout en réduisant la production de déchets secondaires**(Nejadetal.,2018).**C'estunprogrèstechnologiquelargementreconnuparlegrandpublic, réaliste, pratique et attrayant. De plus, la phytoremédiation est relativement simple à appliquer puisqu'ellenenécessitepasd'équipementhautdegammecoûteuxnid'employésspécialisés**(Mandal et al., 2014; Liu et al., 2018).** Compte tenu de la capacité des plantes à extraire les métaux lourds de l'eau et du sol et à les accumuler en diverses parties (racines, tiges, feuilles, fleurs, fruits), la phytoremédiationestactuellementconsidéréecommeunenouvelleméthodeécologiqued'élimination des métaux lourds de l'environnement. Il le fait sans affecter négativement la structure, la fertilité ou l'activité biologique du sol.**(Gavrilescu ; 2022).**

Mais,ilyaaussiplusieursinconvénients,ycomprislacroissancelentedel'usine,faiblebiomasse, méthode chronophage, et la sensibilité aux métaux lourds. L'exposition aux métaux lourds à diverses concentrations démontre une phytotoxicité qui a un effet néfaste sur le processus de phytoremédiation. – **(Shahet Daverey ;2020)**

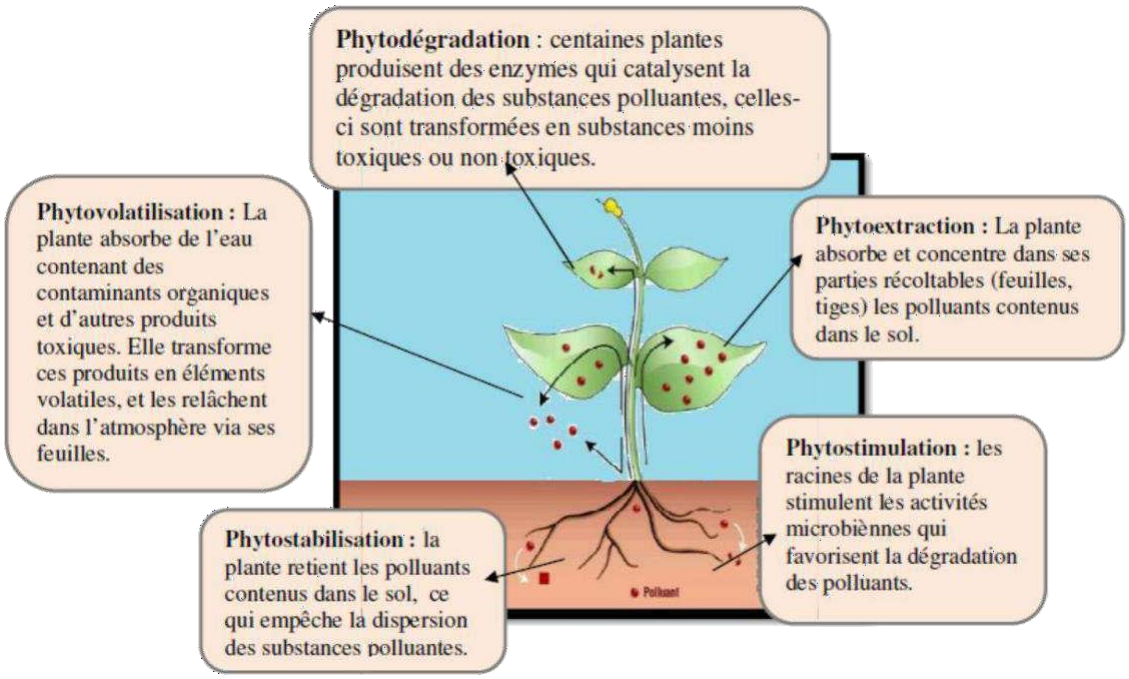


Figure **I.5**:Schémareprésentantlesdéférentsformedelapytoremediation.(Shahetdaverey 2020)

I.3.3.2. Lestechniquesphysiques

I.3.3.2.1. Méthodesphysiquesparpiégeagedelapollution

- **Leconfinement**

les techniques de confinement consistent à isoler lasourcedepollutiondes autres sources Intermédiaire, coupé avec du ciment, de l'argile ou de la matière synthétique voie de transfert.Ce traitement convient à presque tous les types de Pollution : composés organiques volatils (COV), composés organohalogénés Matières volatiles (COHV), PCB, HAP, métaux et métalloïdes. Le confinement peut se faire soit sur sol excavé, soit in situ. à l'intérieur Dans le premier cas, le confinementesteffectuédansunréférentiel.Danslaseconde,Unebarrièrephysiqueimperméable doit être installée autour des sources de pollution **(Devlin et Parker, 1996).**

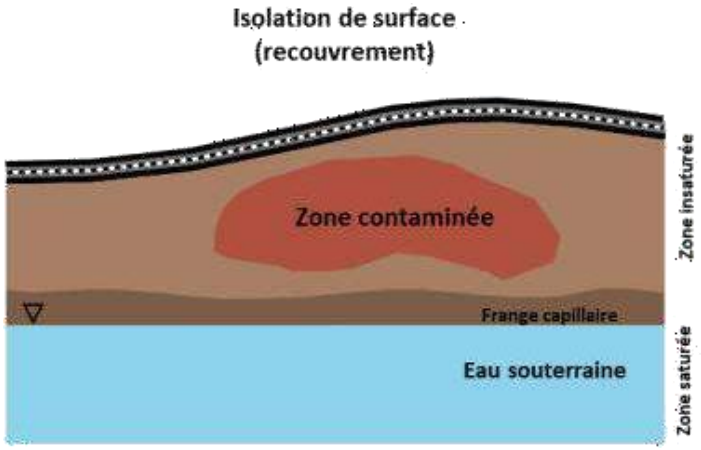


Figure **I.6**:Confinementd'unezonecontaminéeparisolationdesurface(Colombanoetal., 2010)

- **Lastabilisationetsoldification**

L'immobilisationchimiqueinsitu,égalementconnuesouslenomdesolidification/stabilisationinsitu (S/S),estleprocessusdecaptureoud'imobilisationdespolluantsdanslesolcontaminéenajoutantdes agents chimiques au milieu initial pour solidifier le sol ou changer les fractions polluantes mobiles (c'est-à-dire les formes solubles et interchangeables) en précipitations et/ou en matériaux fortement adsorbables.Les contaminants dans le sol ne sont ni extraits ni éliminés par immobilisation chimique. En conséquence, il y a beaucoup moins de chances que les métaux lourds soient transportés vers les plantes,lesmicrobesetl'eau**.(Tajudinetal.,2016).**Aulieudecela,lamobilité/solubilitédesmétaux lourds et lesconcentrations dans l'eau des pores du sol sont considérablement réduites.Les techniques insituetexsitupeuventutiliserlatechniquederéparationdessolsconnuesouslenomdesolidification. Afin de transformer le sol contaminé en un bloc solide, la solidification in-situ implique l'ajout d'un agent liantau sol,leplus souvent du ciment, de l'asphalte, delacendre de lamoucheet/ou del'argile. Si les contaminants sont enterrés profondément dans le sol, un robinet équipé d'une tête d'injection et d'ungrand mélangeur peut être utilisé pour injecterdesbouesliantesdansla sous-surface et mélanger lesdéchets.Lescontaminantspiégésnepeuventpasêtredéverséscarleblocsolideestimperméableà l'eau**(Tajudinetal.,2016).**Cependant,sil'intégritédublocsolideestcompromiseaufildutempspar

des perturbations mécaniques incontrôlées et des intempéries naturelles, les contaminants piégés peuvent finalement redevenir mobiles. **(FRTR, 2012).**

Ilconvientdedistinguerlasolidificationetlastabilisationquisontdeuxprocessusdistinctsvisant à réduire les parties mobiles du sol :

soldification : La soldification implique la liaisonphysique ou le piégeage des contaminants dans une substance stable, dure et inerte. Le durcissement doit être appliqué sur l'ensemble du support souillé. L'objectif est de réduire l'exposition eau/polluants en agissant principalement sur la réduction de la porosité (réduction de la perméabilité),

Stabilisation:Ilexistedeuxmodesdestabilisation:

conversionchimiquedespolluantslixiviablesencomposésfaiblementsolublesouinsolubles,

En mélangeant avec divers agents auxiliaires pour augmenter la capacité du matériau à adsorber les polluants, de sorte qu'il ne s'écoule pas facilement.Une stratégie corrective pratique et abordable pour lessolspolluésestlastabilisation/solidification(S/S),quiconsisteàajouterdesliantscimentairesaux solspourimmobiliserlespolluants.Lafixationchimiqueetl'encapsulationphysiquedespolluantssont desétapesduprocessusdetraitementS/S.Laprocédureviseàréduirelatoxicitéouàralentirlerythme de migration des polluants dans l'environnement.**(kogbara.**
2014).

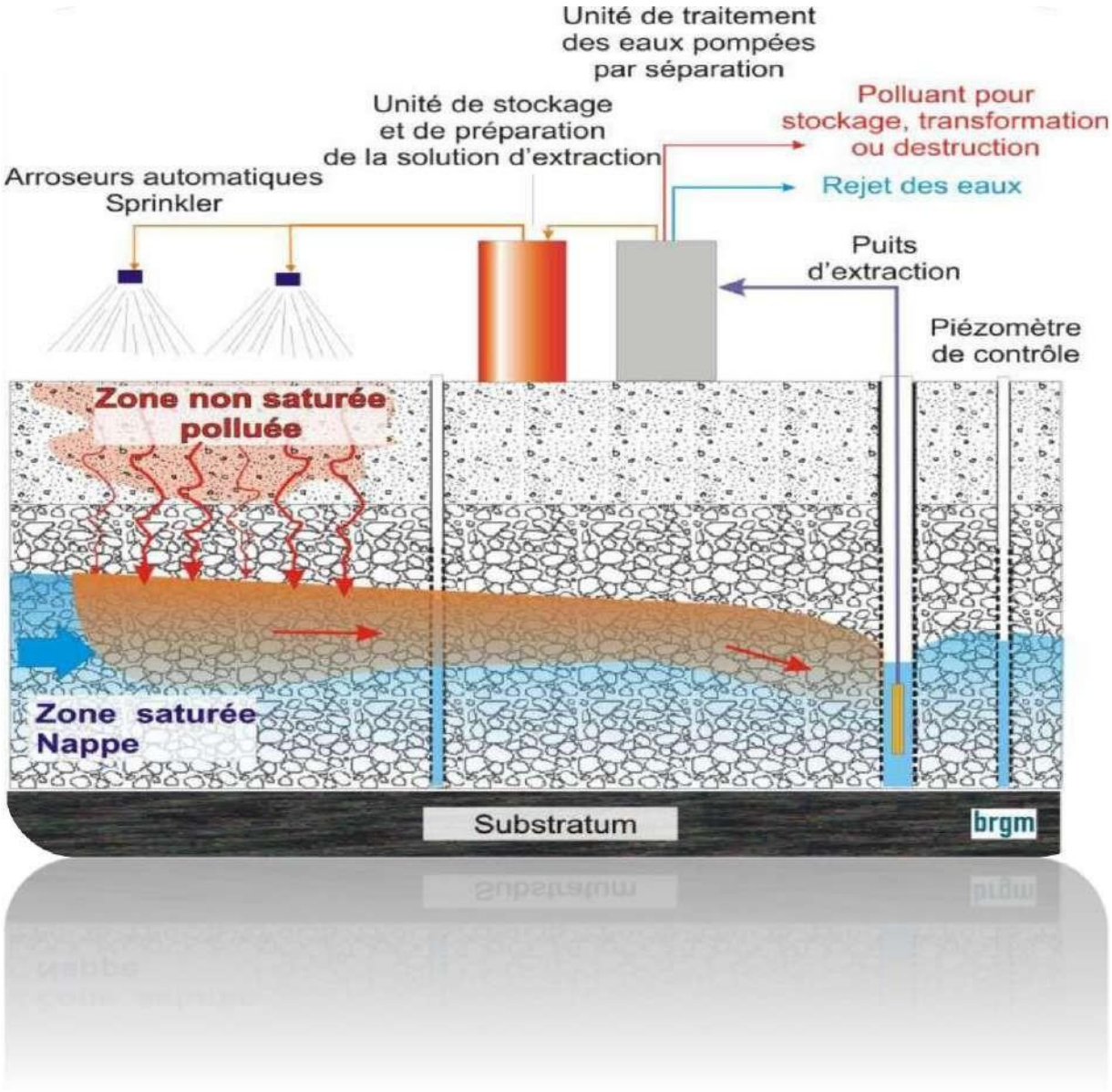
- **Lavagedesol**

Lesmétauxlourdssontretirésdusolparunprocédéappelé «lavagedessols »utilisantdivers réactifs et agents extracteurs**. (Guo et al., 2016; Park et Son, 2016)**

Lessivagedemétauxlourdsàpartirdematériauxcontaminésàl'aided'extractantsappropriésLes sols se sont avérés être un substitut efficace à plusieurs des méthodes traditionnelles pour l'assainissement des sols pollués. Selon le type de métal et de sol, le sol contaminé est extrait et combiné avec une solution extractive appropriée pendant le lavage du sol. Pendant un certain temps, la solution et la saleté sont complètement mélangées. Malgré la pluie, les métaux lourds danslesolsontdéplacésdusolàlaphaseliquideparéchanged'ions,chélationouadsorption,puis sont séparés du lixiviat. **(Ferraro et al., 2015).**

Pour que le lavage du sol soit efficace, l'extractant doit pouvoir dissoudre les métaux lourds présents dans le sol. Le nettoyage du sol serait idéal pour les substances extractives qui peuvent dissoudre d'importantes quantités de métaux. Parce qu'ils peuvent créer des complexes stables avec la majorité des métaux lourds sur une large plage de pH, les chélates synthétiques comme l'EDTA et l'EDDS sont considérés comme les plus efficaces et appropriés pour le nettoyage des sols chez les extractants**. (Saifullah et al., 2015).**

L'EDTA est l'agent chélateur synthétique le plus efficace pour l'élimination des métaux cationiques,maispaspourlesmétaux anioniques **(Udovicet Lestan,2010).**Pourlaréhabilitation dessolspolluéspardesmétaux,desprocédéstelsqueleremplacementouleremplissagedessols par électrodialyse, solidification], lavage des sols et phytoremédiation ont été largement utilisés. Enraisondesonfonctionnementsimpleetrapide,lelavagedelasaletéestl'undecestraitements quiestconsidérécommeleplusréussi.Lelavagedessolsestmaintenantutilisécommeméthode de réparation durable . Cette approche peut être transformée en une technique d'assainissement écologique, néanmoins, à condition que des progrès en matière d'agents de lavage puissent être réalisés . L'efficacité d'enlèvement des métaux lourds sera influencée par les caractéristiques du sol, comme la masse volumique, la texture et le pH . Afin d'obtenir une efficacité d'enlèvement élevée,cesparamètresdoiventêtreprisencompte;néanmoins,nousdevrionségalementrechercher des agents efficaces et écologiques .**(Li et al ; 2023)**



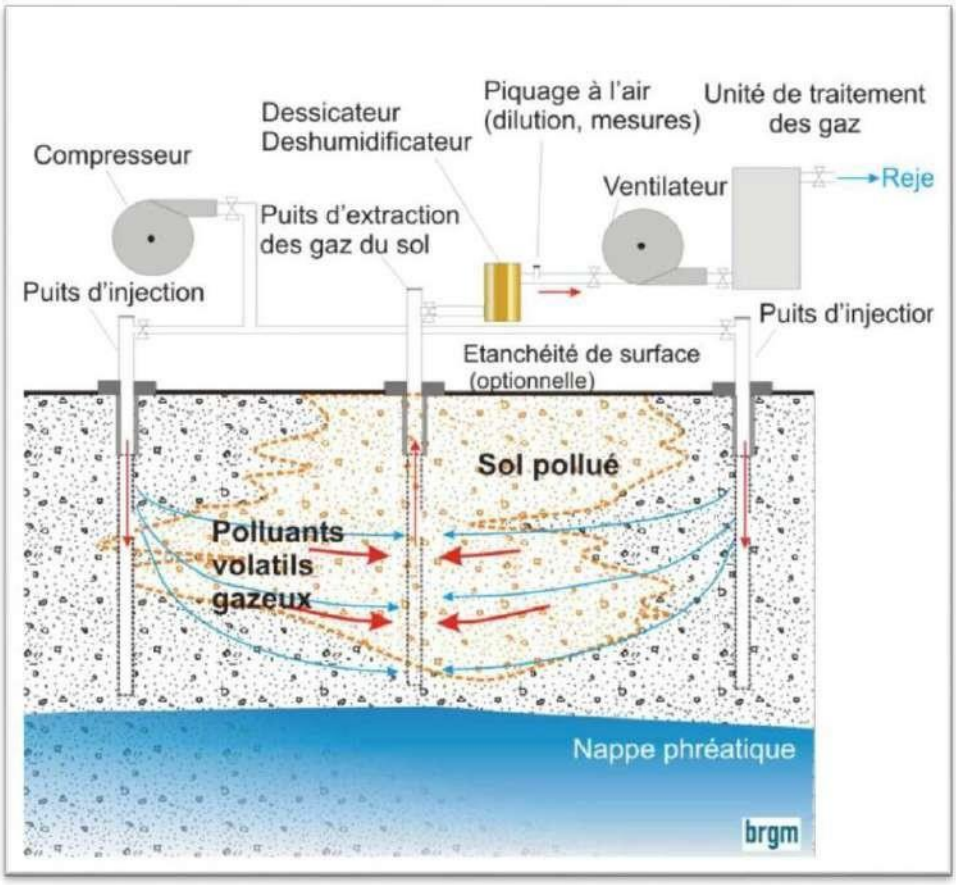
Figure**I.7**:shemadeprincipedulavagedesol.(colombanoetal;2010)

I.3.3.2.2. Methodesphysiquesparevacuationdelapollution

- **Ventilationdelazonenonsaturee(venting)**

La ventilation consiste à extraire les polluants volatils en pressurisant la surface insaturée.Les composés volatils rejetés dans le sol s'évaporeront tant que les pores ne seront pas saturés. L'évacuation entraînera, par dépression à chaque point d'extraction, une circulation d'air et un renouvellement de l'air pollué dans les pores. Ce renouvellement d'air a pour conséquence de modifier les équilibres chimiques entre les différentes phases présentes (air, eau, sol). Par

conséquent, lorsqu'il traverse la zone contaminée, l'air « se remplit » avec des contaminants. Le déplacement d'équilibre des phases permet la dépollution des phases solide et gazeuse de la zone insaturée. Les vapeurs sont recueillies par les points d'extraction et ensuite traitées à la surface**.(khan et al.2004)**

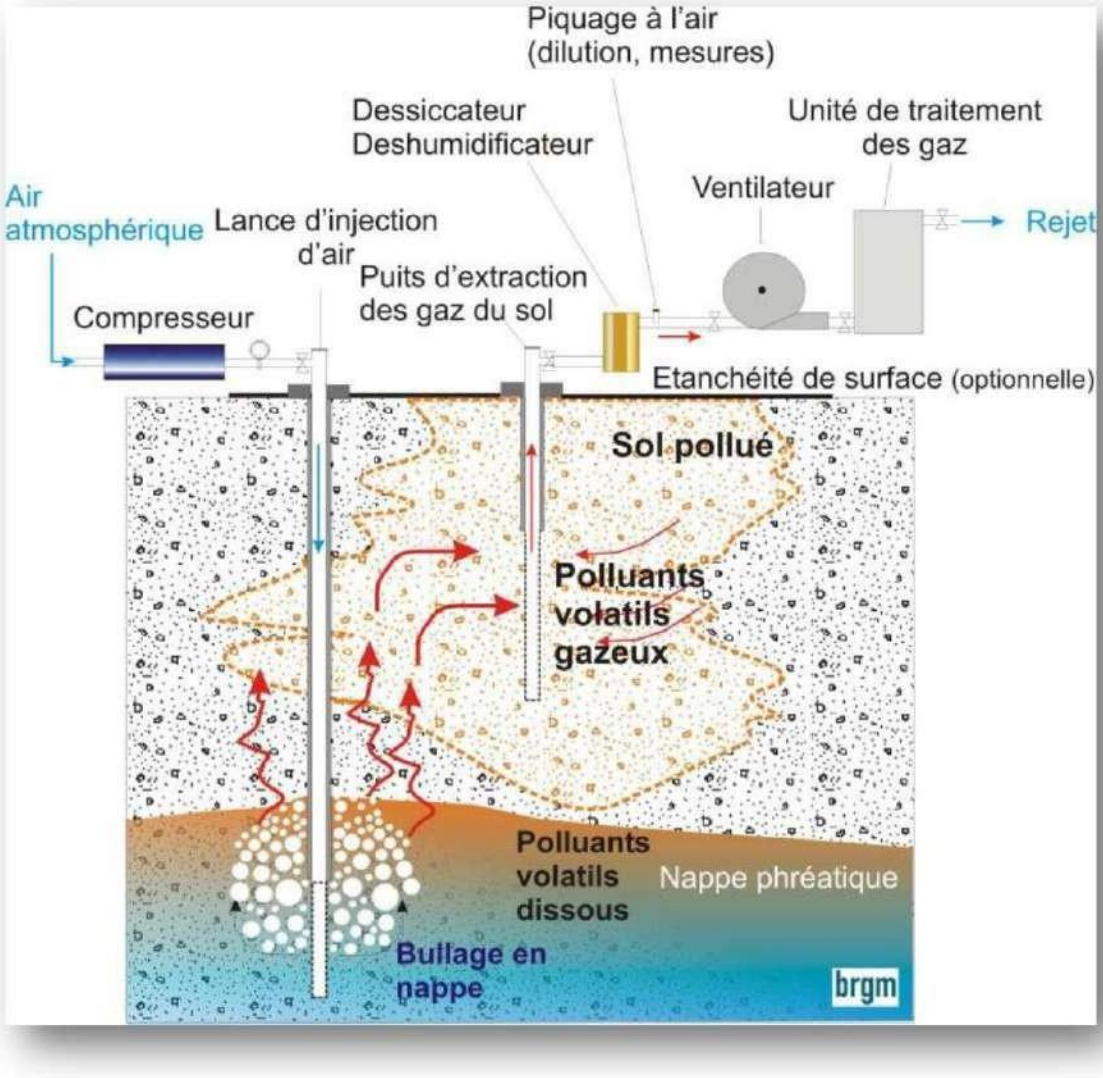


Figure**I.8**:*Schémadeprincipeduventing.(colombanoetal;2010)*

- **Barbotageinsitu(ouinjectionetbullagedairinsitu).Sparging**

le sparging repose sur le même principe que le venting mais son application est réalisée dans la zone saturée et dans le frange capilaire. aussi,lair injecte dans la nappe(et non dans la zone saturée comme dans le venting)va favoriser la volatilisation des polluants qui seront extraitsauLe sparging consiste à injecterungaz(généralementdel'air)souspressionsouslatoituredelanappe.L'airensepropageant à travers la zonesaturéeetenremontant verslasurfacecrée descanaux oùilentreencontactavecles polluants dissous ou adsorbés, ce qui entraîne leur volatilisation. L'air chargé en polluants est alors évacué via despuitsd'extraction (positionnésen alternance aveclespuitsd'injection) versle système de traitement des gaz (Venting). Cette technique rend également

possibleletraitementdelafrangecapillaire.niveaudelazonevadoseettraitessursite**(khanet al ; 2004)**



*Figure***I.9**-*Schémade principedel'airspargingcoupléàunventing*

- **lepompagesuivreduntraitement(pumpanttreat)**

Le pompage et le traitement consistent à pomper l'eau souterraine contaminée et à la traiter sur place (ou à l'évacuer dans un centre agréé) avant rejet.Le type de traitement varie en fonction du contaminant, du débit et du pourcentage d'épuration à atteindre.

Le**Pompageet traitement**permetd'extrairelespolluants organiquesou minérauxen phasedissoute danslazonesaturéeetlafrangecapillaireetdelesdirigerversdespointsd'extractionen

vuedetraitement.Unrabattementenunouplusieurspointsdelanappeestalorscréé (augmentation du gradient hydraulique).

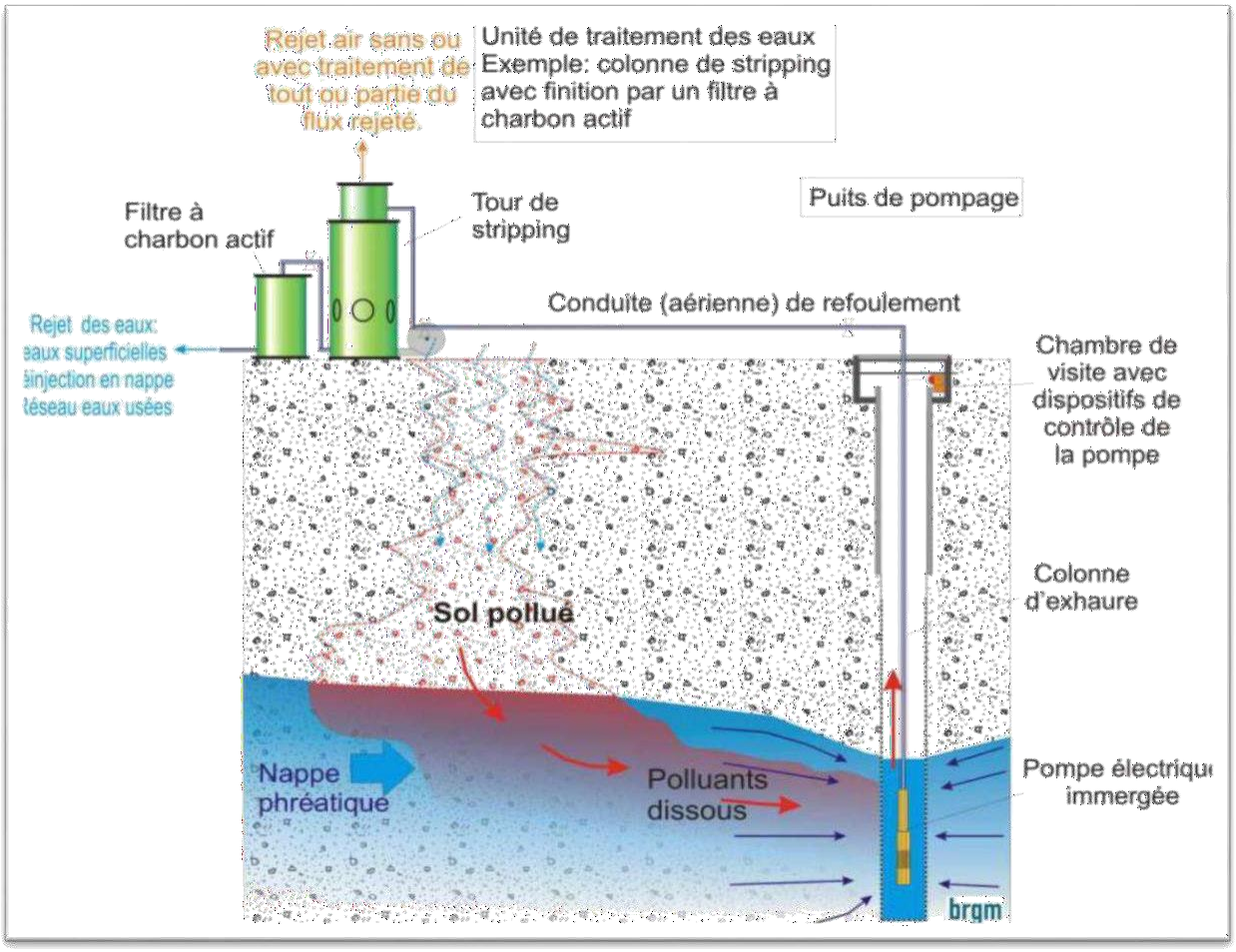
Cettetechniquetraitelepanacheplutôtquelasourcedepollution.Ilestdoncjudicieux detraiter au préalable, si possible, la source de pollution.

Lacirculationd'eauinduitepar lepompagepermetdegénérer unrenouvellementdel'eau dans lesporesdelazonesaturée.Les équilibresdephasessontalorsdéplacés,cequiimplique que:

- l'eauenpassantdansunezonepolluéevasechargerenpolluants,
- lesconcentrationsenpolluantsadsorbéssurlamatricesolide(danslazonecapillaireetla zone saturée) et présents sous forme gazeuse (zone vadose) vont légèrement diminuer.

Préalablementàlamiseenplacedutraitement,ilconviendradetrouverunexutoirepourleseaux pompées.Lechoixdupointderejetestprimordial.Dépendammentducontexteenvironnemental, des débits pompés et des autorisations administratives, les rejets pourront être réalisés :

- àcertainesconcentrations,danslesréseaux d'eaux usées,lesréseaux d'eaux pluviales,les eaux superficielles,lanappe(réinjection),
- dans certains cas dans des centres d'élimination agréés. En pratique, étant donné les volumespompés,l'éliminationencentreagréé estpeufréquente;elleselimiteàdesrejetsfaibles et concentrés.



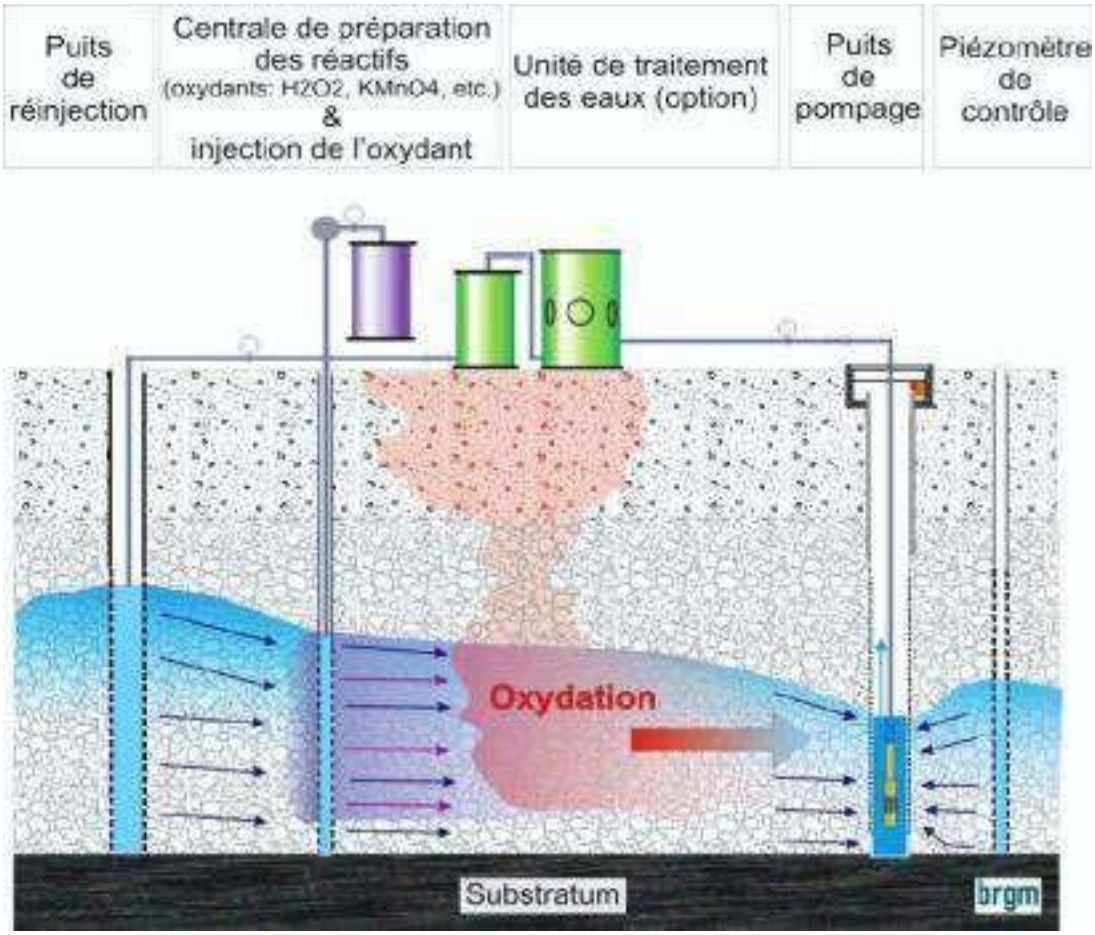
*Figure***I.10***-Schémadeprincipedupompageettraitement.*

I.3.3.3. Lestechniqueschimiques

- **Oxydationchimique**

Oxydation par des produits chimiques. techniques modernes d'oxydation. L'oxydation chimique dans les sols pollués a pour but de transformer les polluants en matières biodégradables ou inorganiques en les minéralisant en CO2, en eau et en matières inorganiquesLes cinq substances oxydantes les plus utilisées sont le chlore, le peroxyde d'hydrogène, l'ozone et le dioxyde de chlore**.(Pavel et Gavrilescu, 2008).** Pour décomposer les pesticides, cependant, ces techniques

conventionnellesd'oxydationchimiquenesuffisentpas.Pouraméliorerlerendement,cesoxydants peuventêtreassociésàdesselsdefer,àdessemi-conducteurs(commeleTiO2)et/ouàl'irradiation auxrayonsultravioletsvisibles.Lesprocédésavancésd'oxydation(PAS),uneapprochepotentielle pour l'assainissement des sols pollués par des produits chimiques organiques extrêmement réfractaires comme les pesticides, sont ce que ces procédures d'assainissement sont appelées**. (Cheng et al., 2016)**

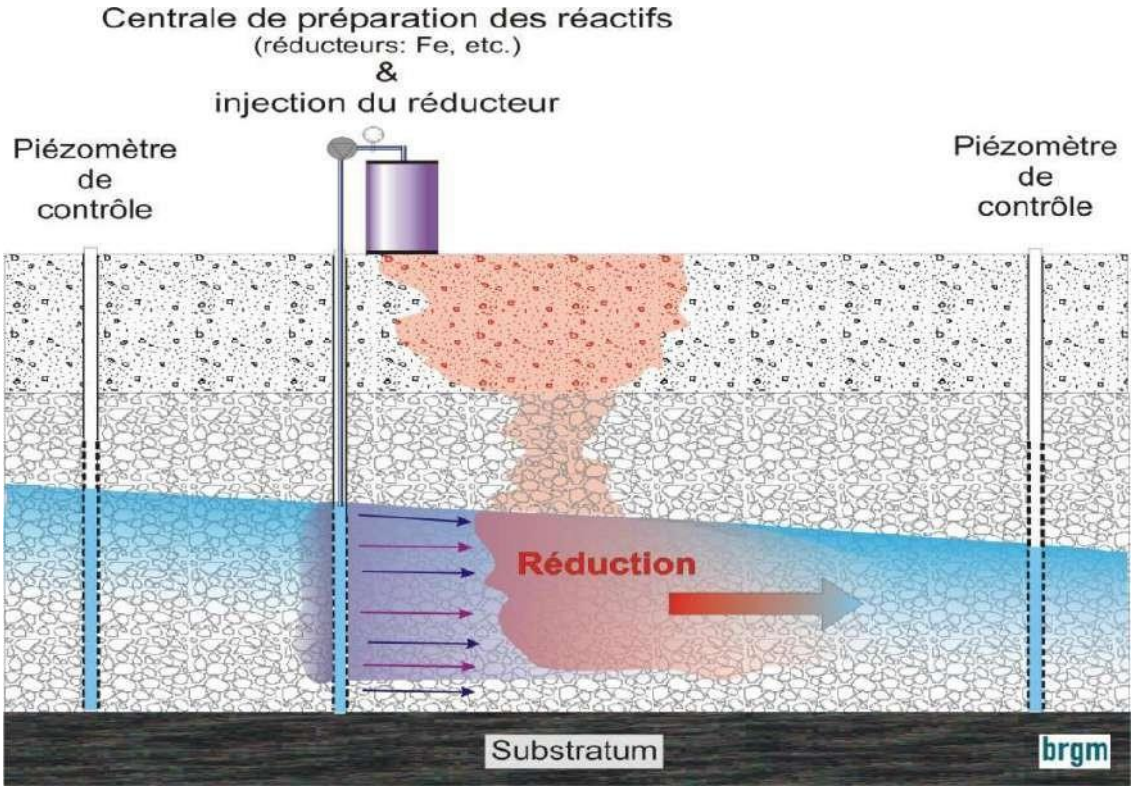


Figure**I.11**:Schémadeprincipedel'oxydationchimique in-situ

- **Réductionchimiqueinsitu**

La réduction chimique in situ consiste à injecter des agents réducteurs dans le sol (zones saturées et nonsaturées)sansexcavation.Ceréducteurestutiliséauxfinssuivantes:Destructiontotaleoupartielle des polluants organiques (destruction entraînant une minéralisation complète des polluants

ou formation de sous-produits de dégradation souvent plus biodégradables),Soit réduire les polluants inorganiques pour les stabiliser, soit réduire leur toxicité**.(colombano et al ; 2010)**



Figure**I.12**:schémadeprincipedela reductionchimiqueinsitu(colombanoetal; 2010)

I.3.3.4. Lestechniquesthermiques

Letraitementthermiquepeutêtreeffectué"sursite"surlesitelui-mêmeoudansunemplacement"hors site" approprié tel qu'une usine d'incinération. Cette technique convient aux sols contaminés par des composés organiques qui s'oxydent facilement et se transforment en CO2 et H2O. L'excavation de la terre, le concassage et le criblage sont nécessaires avant le traitement thermique.

Ilexistedeuxméthodesdechauffage:

- Chauffagedirect,lesolestchauffédirectementà1000°Cparintroductiond'oxygène.

- Chauffageindirectaveclasoledansunfourétancheetnonencontactavecunesourcedechaleur. La température est d'environ 800°C, ce qui est suffisant pour extraire les polluants par la vapeur dégagée **(Samaksaman et al ; 2016)**

I.3.4. Lesprincipesderéhabilitationdesol pollue

Lesprincipesdelaréhabilitationdurablesurlesquelss'appuiel'analysededéveloppementdurable sontceuxédictésparl'USEPA.Cesont:

-Optimiserlademande énergétique: latechnologiedoit être peu énergivore; si possible,elledoit pouvoir utiliser des sources d'énergie renouvelables

- Minimiser les émissions atmosphériques : la technologie ne doit pas utiliser de machines qui consomment de grandes quantités d'énergie fossile ; source des émissions de poussière.

-Optimisationdelademandeeneau: Latechnologienedoitpasconsommerdegrandesquantités d'eau,elledoitpermettrederéutiliserl'eaudansleprocessusdedécontaminationouàd'autresfins telles que l'irrigation.

-.Laminimisationdesimpactssurlesécosystèmesetlesterres:latechnologienedoitpasperturber, outre mesure, les habitats naturels.

.L'optimisation de la consommation des matériaux et de la gestion des déchets : la technologie ne doitpasconsommerbeaucoupdematériauxninedoitgénérerbeaucoupdedéchets;lecaséchéant, le recyclage doit être possible.

La participation publique : elle permet une plus grande acceptabilité sociale du projet**.(Nouri et Haddioui ;2016).**

ChapitreIII Traitement thermique du sol

II.1. letraitementthermiquedesol

Laréparationthermiqueestunecatégoriedetechniquesquiutilisentl'applicationdelachaleur pour :

1. améliorerlamobilitédescontaminants(parexemple,injectiondevapeur/air chaud);
2. séparerlescontaminantsdesparticulesdusol(parex.,désorptionthermiques,chauffageàmicro- ondes)
3. transformerlespolluantsensous-produitsmoinstoxiques(p.ex.,pyrolyse);
4. détruirelespollueurs(ex.incinération,forage);ou
5. immobiliserlespollutants(ex.,vitrification).**(FRTR,2017)**

la méthode la plus appropriée est une détermination spécifique au projet. Bien qu'il ne soit pas applicable dans toutes les situations, la réparation thermique offre un meilleur contrôle sur les paramètresopérationnels(parexemple,tempsdechauffage,température)etestutiliséelorsqueles objectifs comprennent :

1. l'éliminationrapidedescontaminants;
2. lerespectstrictd'unobjectifdenettoyage,nécessitantunefiabilitéélevée;et
3. laréductiondela responsabilitéàlongterme**.(vidonichetal.2016)**

II.2. lesincovineantsdetraitementthermique

Bienqueletraitementthermiquepuisseêtreplusrapideetplusfiablequecertainesautresméthodes,il nécessite généralement plus d'infrastructure et de machines, ce qui entraîne des coûts plus élevés. De plus, il est connu que le chauffage du sol affecte de nombreuses propriétés du sol. **(Sierraetal.,2016,Yietal.,2016,Papeetal.,2015).**

Ladéterminationdel'effetglobalduchauffagedusolsurlesfonctionsdusolnepeutpasêtremesurée directement,carcesfonctionssontrégiesparlesinteractionsdynamiquesdenombreusespropriétésdu sol et des processus environnementaux différents. Néanmoins, l'identification des changements dans les propriétés spécifiques du sol est précieuse pour faire des hypothèses sur la façon dont la fonction globale du sol sera affectée par le chauffage **(O'Brien et al., 2017).**

II.3. Leprincipedetraitementthermiquedesol

la majorité des études sur le traitement thermique des sols pollués achevés à ce jour ont été effectuées à des températures élevées (habituellement à 350-600 °C), ce qui peut atteindre les objectifs de nettoyage, mais avec une efficacité énergétique extrêmement faible. Ces enquêtes se sontdoncconcentréessurleschangementsinduitsparlestempératuresélevéesdanslesparamètres du sol**.(Ren et al ; 2020)**

Les méthodes thermiques, de loin couramment utilisées, représentent le premier choix dans le processus de décontamination ; ainsi, près d'un tiers des sites aux États-Unis choisissent l'incinération pouréliminerles matériaux contaminés. Ces techniques peuvent êtreappliquées sur site ou hors site, c'est le cas le plus courant. Actuellement, des méthodes in situ sont développées àtitreexpérimental.Nousprésenteronstouràtour:

Incinération,
Pyrolyse,
Vitrification,
Désorptionthermique**(Locomte;1998)**

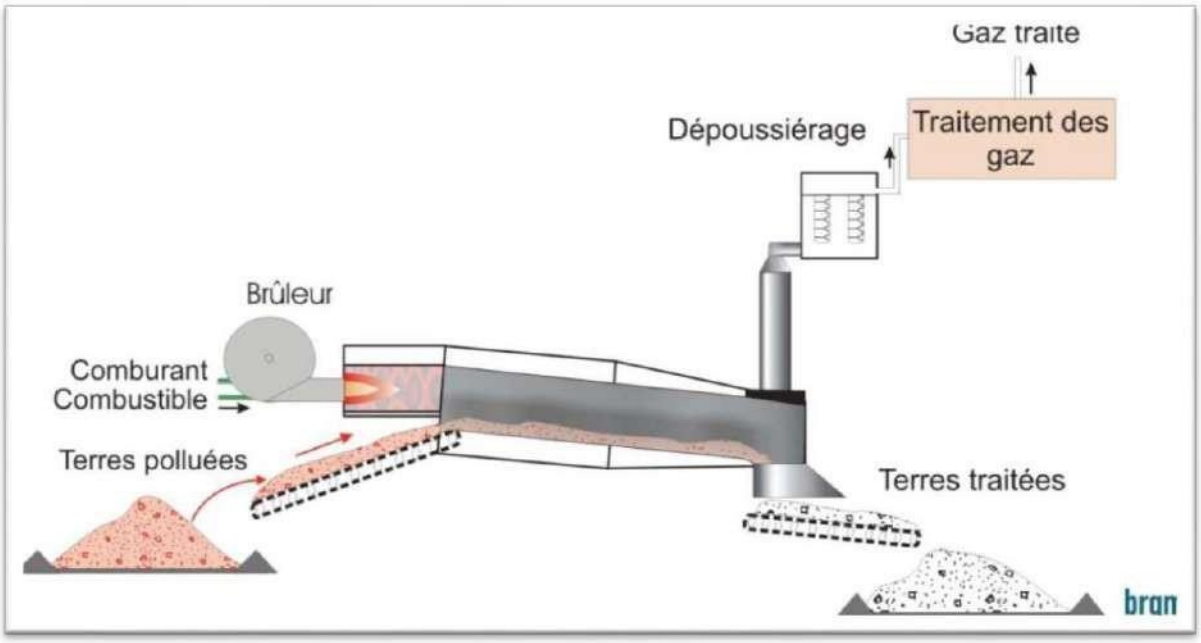
II.4. lestechniquesdetraitementthermique

:II.4.1.ladésorptionthermique

Ladesorptionthermiqueestunprocessusdanslequellescontaminantsciblesvolatils/semi-volatils dans le sol sont d'abord chauffés à une température appropriée par chauffage direct ou indirect sousvideoudansungazporteurpourséparerlescontaminantsciblesdesmilieuxcontaminés(sol); les effluents gazeux de la desorption thermique sont ensuite éliminés ou recyclés dans le système detraitementdeseffluentsgazeux**.(zhaoetal;2019).**Technologiededégradationmoléculairedes polluantscauséeparLatempératuremonte.Ladésorptionthermiquesefaitparinjection Chauffage dans le sol (in situ) ou dans un four (ex situ) pour extraire les contaminantsVolatil et semi-volatil (principe de volatilité). **(Roudier, 2005)**

Appliquerlatechnologie dedésorptionthermique eninjectantdelachaleur dans lesol Extraction des polluants volatils et semi-volatils (in situ)ouaufour (exsitu)(PrincipedeVolatilité).Ce principe s'applique au hors site, une fois que le solL'excavation des sols contaminés est effectuée directement sur le site de la zone de sols contaminés **(Roudier, 2005)**.

Le principe de la désorption thermique ex situ consiste à placer le sol contaminé dansUnité de désorption (four) à une) température comprise entre 150 et 540°C. ce permet la séparation des polluants adsorbés sur les particules du sol et favorise La volatilisation du composé sera ensuite récupérée sous forme gazeuse. en principe Pendant ce temps, la désorption thermique in situ consisteàinjecterdelavapeurdanslazonepollué,chauffelesolparrésistance(courant),parFour à micro-ondes ou radiateur **(Roudier, 2005).**



Figure**II.1**:Shemadeprincipedeladesorptionthermiqueexsituetonsite(colombanoetal; 2010) **Les aventages et les inconvénients**

Commetouteautretechniquederéhabilitationdesite,ladésorptionthermiqueprésente

TableauII.1: Avantagesetinconvénientsdeladésorptionthermique**.(Colombanoetal.2010)**

Lesaventages	**Lesinconvénients**
Réutilisationpossibledessolsàla suite du traitement. Peuttraitertouslescontaminants organiquesdusiteàl'étude (PCP, dioxinesetfuranes,HAP). Tauxd'efficacitétrèsélevé;	✓ Nedétruitpaslespolluants, Ilssontuniquementextraitsdelamatricesol. ✓ D'autresprocessusdoivent pourlamanipulationdegaz; ✓ MoinsdecomposéstenacesV olatil, donc le besoin de température plus élevée

Solutiondedécontaminationrapide; Peuttraiterdescontaminantsen concentration élevée. ; Peuttraitertouslestypesdesols	entraînerdescoûtsplusélevés; ✓ Lessolsdoiventêtreconformes diamètre maximum sinon ils doitêtreréduitàplusfinparticule; ✓ Traitement antérieur du solcoûtélevédutraitement

II.4.2.Lincinération:

Lestempératuresutiliséessontgénéralementassezélevées,entraînantainsilaminéralisationdes composés sous forme de CO2, de vapeur d'eau et de cendres. L'incinération est une technique utiliséepourcreuserlesolouinsitu.Enmodeexsitu,ilconsisteàbrûlerlessolscontaminésdans des fours atteignant des températures extrêmes de 870 à 1200°C puis à induire leur destruction avec ou sans phase de volatilisation. Il fonctionne pour une large gamme de polluants et de concentrations, mais est plus spécifique aux composés organiques. **(Ademe, 2014).**

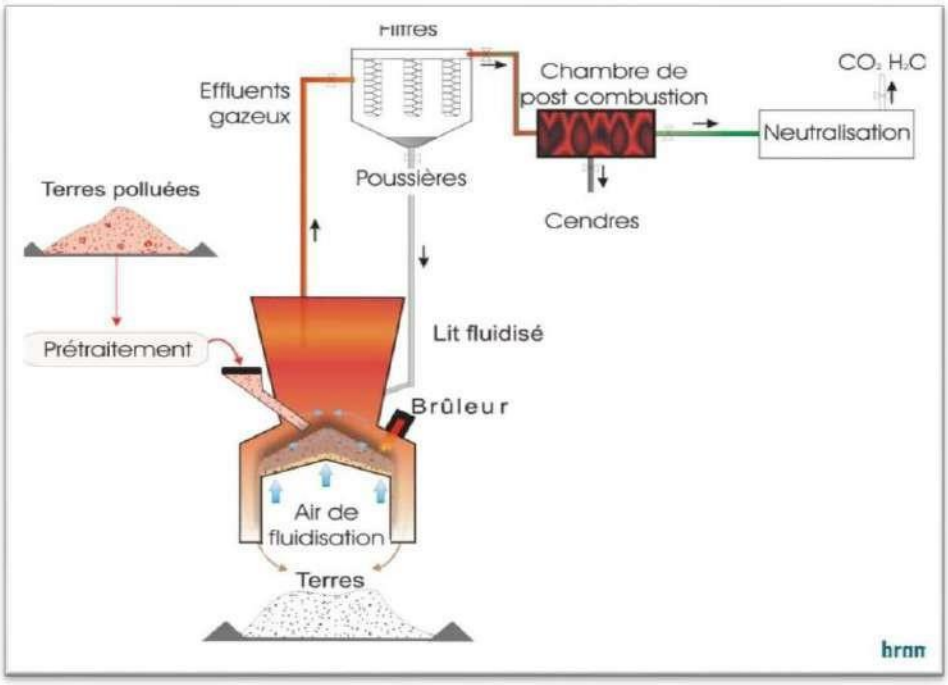
L'incinérationestunedestechniquesdetraitementlesplusanciennes.Sonprincipes'appuiesur la combustion aérobie (en présence d'air) dans un four à hautes températures (870 à 1200°C) **(colombanoetal,2010).** Lacombustionaérobiedétruitlespolluantsorganiquesenvapeurd'eau, endioxydedecarboneetenrésidusdecombustion.Généralement,l'incinérationsedécomposeen deux phases :

- Lapremièrechambre(température>400°C)pour absorber etvolatiliserlespolluantsorganiques,
- Une seconde chambre de combustion, où sont détruits les polluants organiques (température > 1000°C). Avant l'incinération, le sol est prétraité (tamis, séché...), seules quelques centimètres de particules sont acceptables dans le four. Les composés gazeux et particulaires sont entraînés dans le flux de gaz et collectés pour être éliminés. Le chlore, l'azote et le soufre (sous forme de HCl, NOxetSOx)sontgénéralementéliminésdesémissionsatmosphériquesparneutralisationdansdes solutions alcalines. **(RISER-Roberts, E. et al 1998) .**

Parconséquent,l'incinérationestgénéralementappliquéecommeunetechnologieexsituqui impliquel'excavationdesolscontaminésetlacombustiondansl'undesquatreprincipauxtypes

d'unités d'incinération : fours rotatifs,réacteurs à lit fluidisé,injection de liquide, ou réchauffeurs infrarouges **.(Yeung et al ; 2010)** .Après le traitement, les sols doivent être hydratés pour lutter contre la poussière avant d'être réutilisés comme remblai pour des projets de construction ou d'autres applications non agricoles. Bien que les conditions de traitement varient selonlecontaminantcible,l'incinérationest généralementeffectuéeà600-1600°C**.(Vidonishet al ; 2016).**

Lesniveauxd'oxygèneentrantsontmaintenusàenviron10%pourlacombustiondescomposés organiques volatils (COV). Toutefois, les niveaux d'oxygène et les taux de charge du sol doivent êtrepris en compteavec lalimiteinférieured'explosion des contaminants (LIE)afind'assurer un traitement sûr.**(vidonish et al ; 2016).**



Figure**II.2**:Schemadeprincipedelavitrivicationthermique.(colombanoetal;2010)

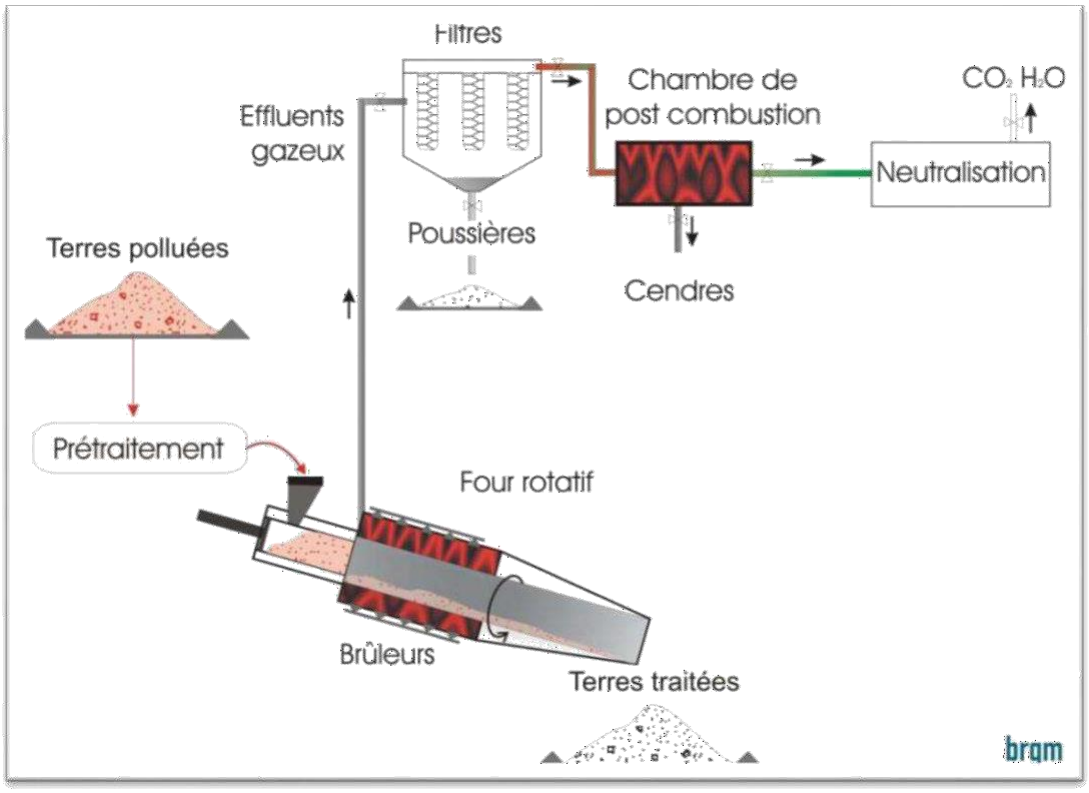
TableauII.2:Lesaventagesetlesinconvenantsdel'incinération

Lesaventages	Lesinconvenients
Réductiondesvolumesdedéchetsde90% Rapiditédetraitement Pas de prétraitement (dans le cas des incinérateurséquipésdefoursàgrilles) Adaptation aux gros gisements Possibilité de récupérer et valoriser l'énergie Possibilitéderécupérerlesmétaux Garantie de long terme	Formationdecendres,derésiduspolluants Problèmedesseuilsderentabilitépourles petites unités Productiond'énergieélectriquepeuefficace dans la plupart des cas Investissementsélevés Coûtsdefonctionnementenfortecroissance Empêche toute inflexion de la politique des Déchets Oppositionssocialescroissantes

Tableuxpresentequelquedesaventagesetinconvenientsdelincineration(Miquel et poignant. 1999)

.II.3. yse

La pyrolyse consiste à chauffer les sols touchés dans des atmosphères anoxiques, généralement à 400 à 1200 °C pour divers déchets dangereux (< 550 °C pour les hydrocarbures). La pyrolyse consiste à chauffer le sol en l'absence d'oxygène pour extraire les polluants aéroportés et semi-volatils, elle s'effectue sur site ou hors site**. (Philippe, 2009 et Chairat, 2015).**



Figure**II.3**:shemadeprincipedelapyrolyse.(colombanietal;2010)

TableauII.3:Lesaventagesetlesinconvinaintsdepyrolyse

Lesaventages	**Lesinconvénients**
Ilestutilisépourtraiterdenombreux contaminants,ycomprislessubstancessemi-volatilesetfaiblementvolatiles,etaune excellentefiabilité etdesrésultats exceptionnels. la réparation des sols extrêmement contaminés,mêmel'argileetlessols hétérogènespeuventbénéficierdecette procédure, permettantdesniveaux élevésdepollution,la procédurerapide.	Lespolluantsnesontpasdétruitsparle processusdedésorption. L'excavationdusolestnécessairepourla procédure. Lesémissionsaériennesdoiventêtretraitées demanièreurgenteetcoûteuse,lesgaz doiventprincipalementêtrerefroidispour protégerlesunitésdetraitementenaval,etles sortiesdesous-produitsdoiventêtreprisesen comptedèsledébutduprojetcarelles peuventcauserdegravesproblèmes.

Cetteméthodepeuttraitertouteslesformesde déchetsetconvientparticulièrementau traitementdessolsrichesenmatière organique.C'estmoinscoûteuxque l'incinération et la vitrification et nécessite moins de gaz à traiter que la combustion. Réévaluationpotentielledel'énergiepourles sous-produits solides.	Lesrendementsdepurificationpeuventêtre considérablement affectés par la variabilité des sols. La chaleur doit être appliquée comme pré-traitementauxsolsdontlateneurenhumidité est supérieure à 20 %. L'efficacitéopérationnelleestinfluencéepar lestempératuresréellesàlasourcedu polluant.

.II.4. vication

Ce processus implique de solidifier/stabiliser le sol en augmentant la température afin de le transformer en un matériau vitrifié fondu par refroidissement.Des électrodes en graphite (habituellement 4) sont insérées dans lasourcepolluante(zonevadose). Un courant électrique est alors imposé entre les électrodes ; le passage du courant dans les sols génère, par effet Joule, une augmentation importante de la température (1 600 à 2 000°C), ce qui entraîne la fusion des sols (puisunevitrificationlorsdesonrefroidissement).Lesélectrodessontenfoncéesaufuretàmesure delavitrificationdelasurfacedusolverslebasdelazoneàtraiter.Lescomposésorganiquessont soit détruits soit volatilisés et acheminés vers une unité de traitement spécifique. Pour ce faire, l'ensemble de la zone à traiter doit être placée sous une hotte mise en dépression.Les composés inorganiques mais aussi l'amiante et les radionucléides sont incorporés dans la matrice vitrifiée. Cette dernière est très stable inerte et très peu lixiviable.

La vitrification est effectuéedans un fourqui peut atteindre des températures très élevées (1600 à 2000°C)lorsquedessolscontaminéssontintroduits.Lechauffagepeutêtreréaliséaumoyend'une fusionélectrique,d'unefusionparinduction,d'unetorcheàplasma,d'unecombustionàl'oxygène, d'un four électrique, d'un four à micro-ondes, etc.

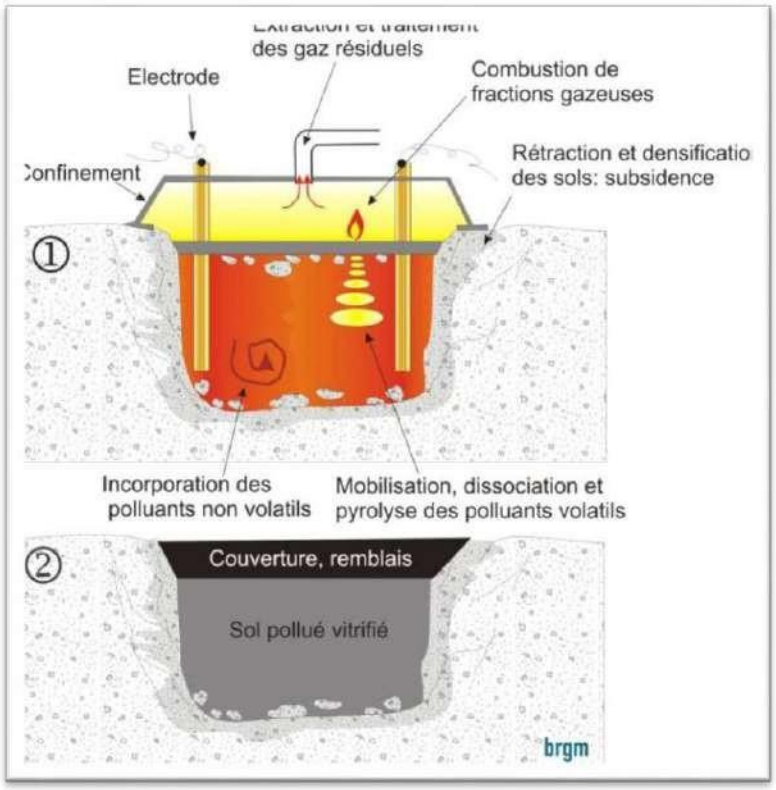
Les composés organiques ainsi que certains composés métalliques volatils (mercure, etc.) sont pyrolysés et vaporisés à ces très hautes températures. La vapeur d'eau et les produits de pyrolyse

sontrécupérésetenvoyésversuneunitédetraitementdesrejetsatmosphériques(similaireàcelles utilisées en incinération).

Des composés inorganiques ainsi que de l'amiante et des radionucléides sont incorporés dans lamatrice vitrifiée. Ces derniers sont très stables, inertes et rarement lixiviables.

Lamassevitreuseenfusionestsoitcouléedansdeslingotièressoitrefroidieàl'eauetconditionnée sousformedegranulats.

Desajoutscommelasilice,l'aluminepeuventêtreréaliséssurlessolspourobtenirunebonne vitrification.



Figure**II.4**:schemadeprincipedelavitrificationthermiqueinsitu

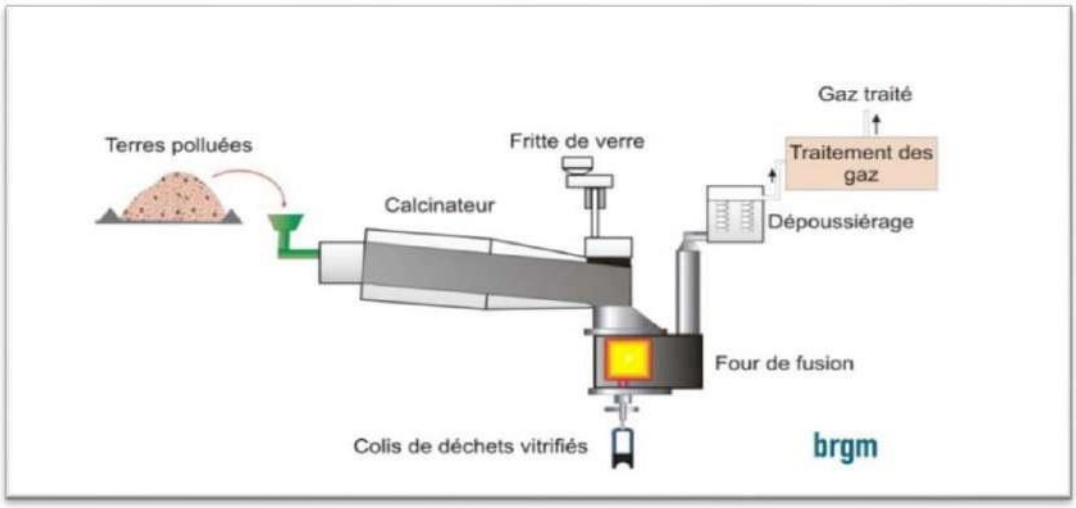
la**Vitrification**estréaliséedansdesfoursquipermettentd'obtenirdestempératuresextrêmement élevées (1 600 à 2 000°C) lors de l'introduction des sols pollués. L'élévation de la température peut être réalisée viala fusion électrique, la fusion parinduction, la fusion partorche à plasma, la fusion par oxycombustion, les électrobrûleurs, le four à micro-ondes.

Les composés organiques ainsi que certains composés métalliques volatils (mercure…) sont pyrolysésetvaporisésàcestrèshautestempératures.Lavapeurd'eauetlesproduitspyrolyséssont récupérés et dirigés vers les unités de traitement des rejets atmosphériques (similaires à ceux utilisés en incinération).

Lescomposésinorganiquesmaisaussil'amianteetlesradionucléidessontincorporésdansla matricevitrifiée.Cettedernièreesttrèsstable,inerteettrèspeulixiviable.

Lamassevitreuseenfusionestsoitcouléedansdeslingotièressoitrefroidieàl'eauetconditionnée sousformedegranulats.

Desajoutstelsquelasilice,l'aluminepeuventêtreréaliséssurlessolsafind'obtenirunebonne vitrification.



Figure**II.5**:Schémadeprincipelavitrificationthermique(colombanoetal;2010)

TableauII.4:Les avantagesetlesinconvénientsdelavitrificationthermique(colombanoet al ;2010

LesAvantages	**Lesinconvénients**
Disponiblepourdenombreux produits; Lesrésidussolidesnesontpasfacilement lessivés ; Destechnologiesparticulièrementadaptées aux polluants toxiques ininflammables ; Une technologie éprouvée (dans certains pays étrangers) a prouvé une grande fiabilité et des résultats extrêmement remarquables ; Technique efficace même pour les sols argileux et hétérogènes.	Les contaminants peu volatils (métaux, radionucléides,asbestos,etc.)restentdanslesol mais sont immobilisés, la quantité de contaminantsorganiquesprésentsdoitêtre inférieureà5-10%,lasurfacedusoltraitéest petite à chaque installation ($10m^2$), la profondeur maximale du traitement est d'environ 6 m, et la méthode ne peut pas être utilisée à proximité d'immeubles, d'infrastructures,deréseaux ou d'autreszonessensibles; Unapprovisionnementengraphiteetenverre entre lesélectrodespeutcompenserlemanque deconductivitédusol,cequilimitelatechnique danslescasd'humiditéfaibleoùlephénomène devitrificationn'estpaspossibleparcequela conductanceélectriquedusolesttropfaible; Latechniquenécessitelagestiondessubstances qui augmententlerisqued'explosion,y compriscellesquisontdangereusespourla technique (humidité, soufre, chlorures et phosphore)

Materielset methode

III.matérieletméthodes

Cetteétudeaétémenéedanslebutdedépolluerlesoldansunlaboratoiredepédologiea l'universitédeyahia faresaouzrademedea.

III.matérielsettechniqueexpérimentale III.1.produits chimiques utilisés

Les produits utilisée dans cette étude ont été prépare à partir des réactifs purs introduits dans le tableau suivant.

TableauIII.1. Lesproduitschimiquesutilisés

Produits	Formulebrute	Massemolaire g/mol	Marque
SulfatedecuivreII pentahydraté	$CuSO_4,5H_2O$	249.68	VWRChemicals BDH
Sulfatedezinc heptahydrate	$ZnSO_4.7H_2O$	287.55	Riedel-deHain
SulfatedeferII	$FeSO_4$	151.91	Riedel-deHain
Sulfatedenickel Hexahydraté	$NiSO_4 \cdot 6H_2O$	262.85	Riedel-deHain
Sulfatede magnésium Heptahydrate	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	246.47	BIOCHEM
Chloruredecobalt II Hexahydraté	$COCl.6H_2O$	237.39	Cheminova

III.2.Préparationdel'échantillon:

Notre travaille consisteà prendre une quantité (presque 7 kg) du sol de terre agricole et la pollue par des métaux qu'ils sont disponible dans laboratoire, ensuite la dépolluer en utilisant notre technique (extraction des polluants par la chaleur).

Nous avons prélève deux échantillons a deux endroitsdifférents en hiver et au printemps (Zoubiria et El oumaria deux communes de wilaya medea) .

Chaque échantillon du sol 1kg est tamise a 0.1 mm puis 0.08 mm pour éliminer les éléments grossiers et les débits organiques ensuite ils sont lave a l eau distille puis place a l étuve pour le séchage .

III.2. préparationdusolpollue

Pourpréparerunsolpollueparlecuivre

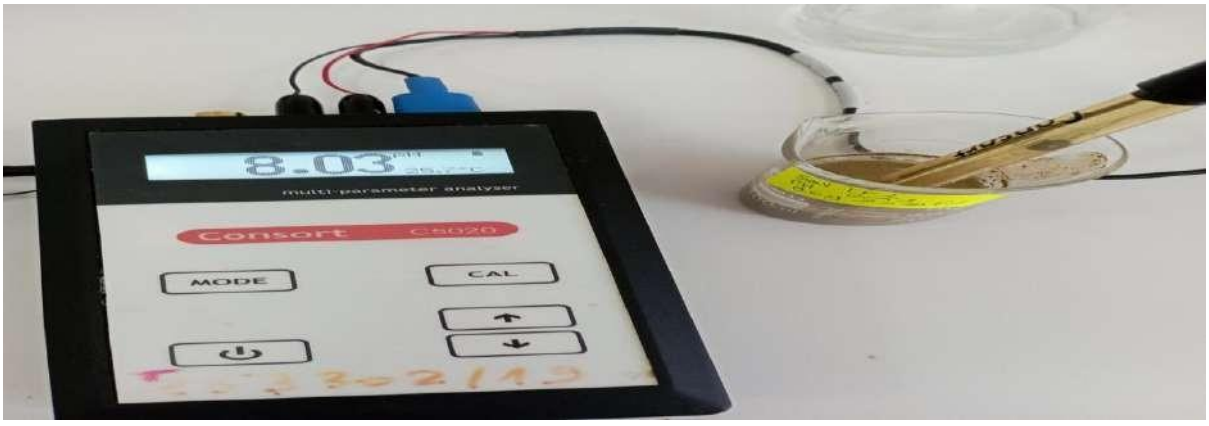
Dans une fiole jauge de 250ml: on dissout 0.1 g de sulfate de cuivre a 125ml de l'eau distille sous agitation magnétique. La solution de cuivre est bien mélange avec 500g du sol , puis laisse séchée a l étuve a 37 C°. l échantillon est utilise par la suite dans les expériences de dépollution du sol (même technique avec autre métaux : Zn , Mg , Ni, Co, Fe)

III.3. Mesuredesparamètres

III.3.1. lePH

On introduisons 10g du sol pollue dans un bécher de 100 ml , puis nous ajoutons 25ml de l eau distille. Âpres agitation de 30 min la solution est ensuite laisser reposer pendant 10min . puis nous avons réalisons la mesure du PH de la solution a l aide d en PH mètre .

LePHaétémesureraussiavantlapollution



FigureIII.1.pHmétre

LePHdoitêtremesurer pourchaque échantillon

III.3.2. Laconductivité

On introduit10 g du sol pollue dans un bécher de 100ml , puis nous ajoutons 50 ml de l eau distille . après agitation de 30 min la solution est ensuite laisser reposer pendant 10 min , puis nous avons réalisons la mesure de CE de la solution a l aide d un conductimètre

LaCEaétémesureaussiavantlapollution



FigureIII.2.condictimétre

LaCE doit êtremesurepour chaqueéchantillon

III. Méthodedanalyse

III.1 .SpectromètreUV-Visible

La spectroscopie est une technique qui mesure l'interaction de molécules avec rayonnement électromagnétique. Lumière dans le proche des rayons ultraviolets (UV) et visible (vis) de la gamme le spectre électromagnétique a une énergie d'environ 150–400 kJ mol .

L'énergie de la lumière est utilisée pour promouvoir électrons de l'état du sol à un étatexcité. Aspectre est obtenu lorsque l'absorption de la lumière est mesurée en fonction de sa fréquenceou desalongueurd'onde.Moléculesavecélectronsdansdes systèmesaromatiques délocalisés absorbentsouvent la lumière dans le proche UV (150–400 nm) ou le régionvisible (400-800 nm).

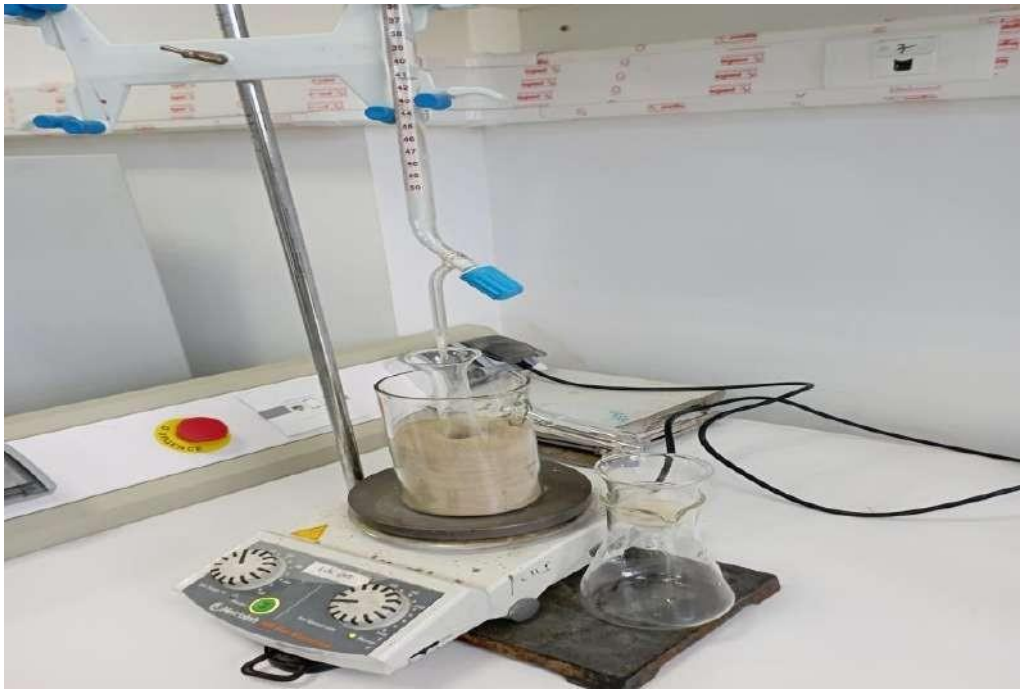


FigureIII.3. L'appareildespectrophotométreUV-Visible

La spectroscopie d'absorption est généralement effectuée avec molécules dissoutes dans un solvant transparent, comme dans tampons aqueux. L'absorbance d'un soluté dépend linéairement sur sa concentration et donc son absorption spectroscopie est idéale pour les mesures quantitatives. La longueur d'l'absorbance d'une molécule dépend non seulement du produit chimique nature mais aussi sur l'environnement moléculaire de son chromophores.La spectroscopie d'absorption est donc excellente technique pour suivre les réactions de liaison des ligands, catalyse enzymatique et transitions conformation elles dans les protéines et les acides nucléiques. Mesures spectroscopiques sont très sensible et non destructif, et ne nécessitent que de petites quantités de matériel à analyser**.(Franz-Xavier Schmid,2001**)

III.2.Procéduredelavage

Suruneplaquechauffantedetempérature80C°.Nous introduisons environ 400g de sol pollue dans le réacteur , de l'autre on remplit a l eau distille une burette graduée de 50 ml 5 (pour cette technique on utilise environ 400 ml de l'eau distille pour chaque échantillon). pour faciliter la circulation goutte à goutte de l'eau distillée qui tombe goutte a goutte dans une colonne place au centre de réacteur.



FigureIII.4. Protocold'extractiondespolluants

Resultatset discussion

La quatrième et dernière partie decetravail est consacrée essentiellement à laprésentation et à la discussion des différents résultats obtenus au moyen des différentes méthodes statistiques. Tout d'abord les résultats de l'analyse statistique univariée seront envisagés, ces résultats sont relatifs à la description des données, à l'application du test t de Student, la corrélation.

Dans ce paragraphe, les résultats de la descriptiondes données obtenues dans chaque campagne et régions pour chacune des variables mesurées sont présentés. Cette description seracommentéeetconfrontée,àlanormeAFNOR,etàchaquefoislesrésultats,serontévaluer par figure et tableau.

IV.1. Caractéristiquesphysico-chimiquesdusolavantetaprèslacontamination

Lesrésultatsobtenusaucoursdesdeuxcampagnesd'échantillonnagesdanslesdeuxrégions d'étude (Moyenne ± Ecart-type, Minimum, Maximum) des analyses de certains paramètres physico-chimiques (pH et conductivité) de 4 échantillons du sol, dont on va effectuer une contamination au laboratoire. Ainsi, évaluer les teneurs en ETM (Co, Cu, Fe, Mg, Ni et Zn), soient 56 échantillons seront évaluer. Avant l'interprétation et la discussion des résultats obtenus dans cette étude, il est nécessaire de comprendre les niveaux naturels conforme à la norme et les différents paramètres qui affectent ces niveaux, en plus de l'impact des activités humaines. **Le Goff et Bonnomet (2004)** affirment que les concentrations en ETM sont plus facilement mesurables dans les sédiments et sol que dans l'eau.

Encequiconcernelasourcenaturelledumétaltrace,c'estlarochemèrequiestlaprincipale sourcedemétaldanslesol,etquivaried'unezoneàl'autreetd'unbassinversantàl'autre.Dans notre cas on a procédez à une contamination du sol agricole au laboratoire de deux régions différenteappartenantàlawilayadeMédéaquisont :ZoubairiaetElOmaria.Nousappliquons lanormeAFNOR(U44-41).Cesvaleursderéférence,appeléesfondgéochimiquesouniveaux de fond, sont enregistrées dans le **tableau IV.1**

Tableau IV.1:Résultatsdes paramètres physiques et chimiques du sol duZoubiria et de El Omaria (Moyenne ± Ecart-type [Min-Max], des deux campagnes de prélèvements).

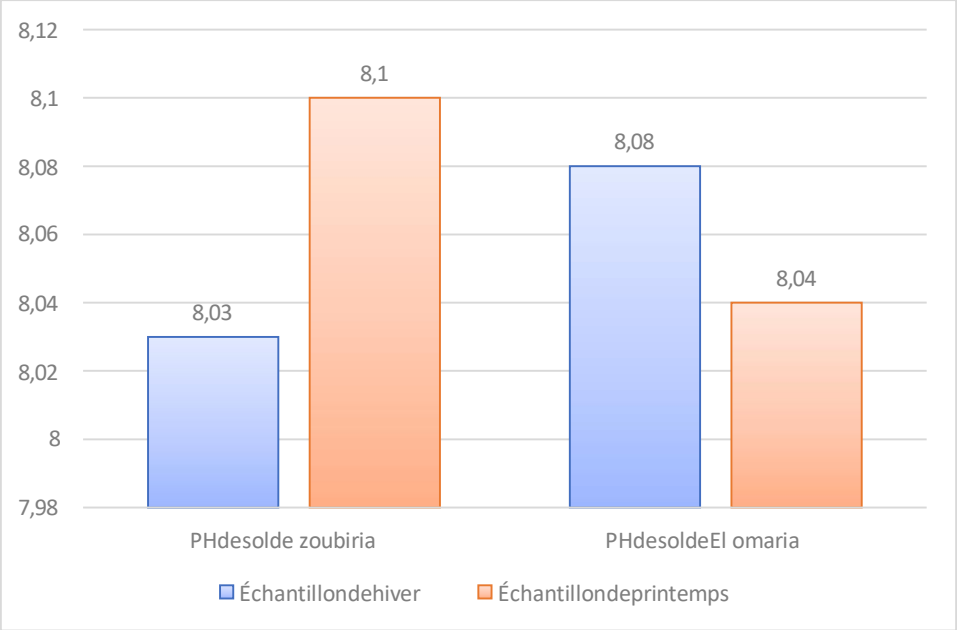
Régions **Paramètres**	**Zoubiria**	**ElOmaria**
n=56		
pH	8,06 ± 0,05 [8,03-8,10]	8,06 ± 0,02 [8,04-8,08]
CEµS/cm	301 ± 43 [270-331]	218 ± 18 [205-230]
pHdusolcontaminerparCu	7,91 ± 0,04 [7,88-7,95]	7,94 ± 0,07 [7,89-7,99]
pHdusolcontaminerparNi	7,91 ± 0,08 [7,85-7,97]	8,05 ± 0,05 [8,01-8,09]
pHdusolcontaminerparMg	7,92 ± 0,12 [7,84-8,01]	8,00 ± 0,07 [7,95-8,05]
pHdusolcontaminerparFe	7,97 ± 0,11 [7,89-8,05]	7,99 ± 0,08 [7,93-8,05]
pHdusolcontaminerparZn	7,90 ± 0,03 [7,88-7,93]	7,93 ± 0,13 [7,84-8,03]
pHdusolcontaminerparCo	7,98 ± 0,03 [7,96-8,01]	8,00 ± 0,12 [7,92-8,09]
CEdusolcontaminerparCu µS/cm	418 ± 43 [373-462]	199 ± 19 [185-213]
CEdusolcontaminerparNi µS/cm	348 ± 31 [326-370]	206 ± 48 [171-240]
CEdusolcontaminerparMg µS/cm	356 ± 18 [343-368]	193 ± 11 [185-200]
CEdusolcontaminerparFe µS/cm	432 ± 19 [418-445]	258 ± 26 [238-277]
CEdusolcontaminerparZn µS/cm	401 ± 65 [355-447]	247 ± 13 [238-256]
CEdusolcontaminerparCo µS/cm	387 ± 44 [356-418]	271 ± 98 [202-340]

TableauIV.2. Teneursnaturellesproposéespar**AFNOR,U44-41:**

Elements	Cu	Co	Ni	Mg	Zn	Fe
Limitevaleur(AFNORU44-41)	100	/	50	100	300	/

IV.1.1. pHdusol

Les valeurs moyennes ± l'écart-type du pH, ainsi que les minima et maxima du sol sont regroupés dans le **tableau IV.1** et les fluctuations spatio-temporelles, elles sont illustrées par la **figure IV.1**



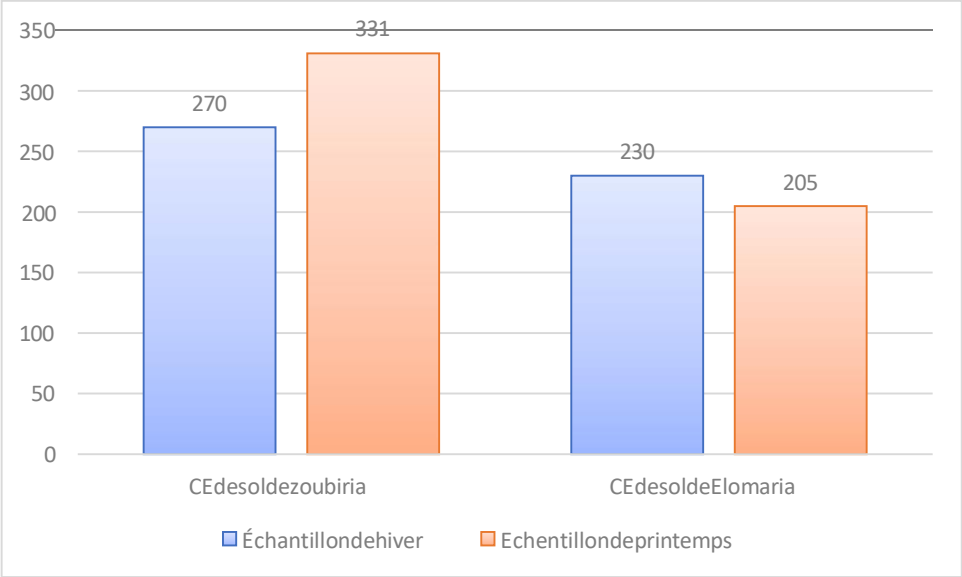
FigureIV.1: Evolutionspatio-temporelledupHdusoldeZoubiriaetElOmaria.

LesvaleursdupHdessédimentsdusoldeZoubiriaetElOmaria,oscillententre8,03(Zoubiria) enhiveret8,08(ElOmaria)enprintemps.Cesvaleursreflètentdoncunelégèrealcalinité des sédimentsdubassinversantétudier.CepHélevépeutêtreattribuéàlaminéralogiedessolset la nature de la roche mère, riches en calcaires et argiles. Pourcequiest des variations saisonnièresdupH(**FigureIV.1**),lesplusfaiblesvaleursontétéenregistréesdurantlasaison hivernale pour Zoubiria, alors que les plus élevées ont été enregistrées dans la même période pour le sol d'El Omaria. Quant aux variations spatiales du pH, il n'y a pas de grandes fluctuations entre les différentes stations étudiées et elles ne présentent pas de grandes amplitudes saisonnières. Comme nous venons de le constater, la moyenne du pH des deux typesdesol,estauxalentoursde8,alcalincequiluiconfèreainsiunrôleimportantàpropos

de la rétention des métaux traces par les sédiments tout en diminuant leur relargage. Cette moyenne est proche de celle citée par Mouhoun en 2015.

IV.1.1.2. CEdusol

Les résultats de la conductivité électrique du sol sont donnés dans le **tableau IV.1**. Les variations spatio-temporelles de ce paramètre sont illustrées par la **figure IV.2**Les valeurs fluctuententre205µS/cm(ElOmaria)et331µS/cm(Zoubiria).Laplusgrandeamplitudedes moyennes des CE(301 ± 43 µS/cm)des stations est enregistrée à Zoubiria, elle est presquela moitier de la moyenne citée par **Sahli et al. (2014)** 617±460 µS/cm du bassins Boumerzoug.

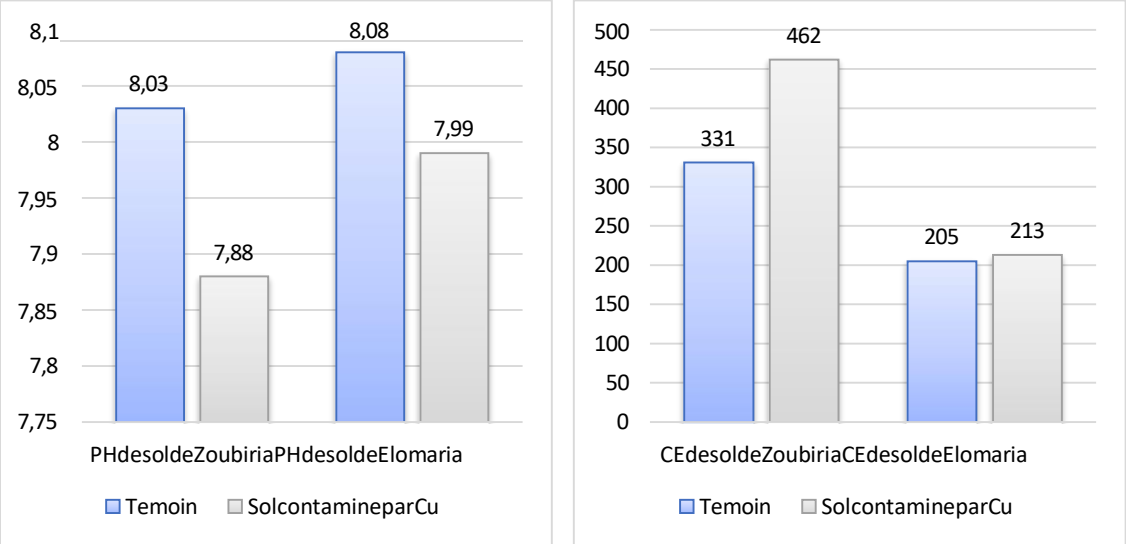


FigureIV.2/Evolutionspatio-temporelledelaCEdessolsdusolZoubiriaetElOmaria.

Les mesures présentées dans le **tableauIV.1** ainsi que les variations spatio-temporelle**(figure IV.2)**révèlentdestauxpasassezimportantsdeselssolublesdanslesoldesdeuxrégions.Nous constatons également qu'au printemps le sol présente une faible salinité dans, alors que les valeurs maximales ont été relevées en hiver traduisant une salinité plus importante. Ceci s'explique probablement par le phénomène de dilution, dû essentiellement au régime d'écoulement des oueds avec des débits plus importants en hiver (période de hautes eaux) et plus faibles en été (période d'étiage), **Chytry et al. (2019)**ont également constaté que le pH du sol tendance à la baisse lorsque les précipitations augmentent. Par ailleurs, **Keddari et al. (2019)** dans le cas de l'oued Boumerzoug, ont noté une moyenne similaire à la nôtre (378 ± 103 µS/cm).

IV.1.3. pHetCEdusoltémoinetcontaminéparleCu

Les valeurs moyennes ± l'écart-type du pH et conductivité du sol contaminé par le Cu, ainsi que les minimumset maximums des sols prélevés à 2 reprises pour chacune des 2 stations, se trouventdansle**tableauIV.2**Lesvariationsspatio-temporellesdeceparamètresontillustrées par la **figure IV.3**



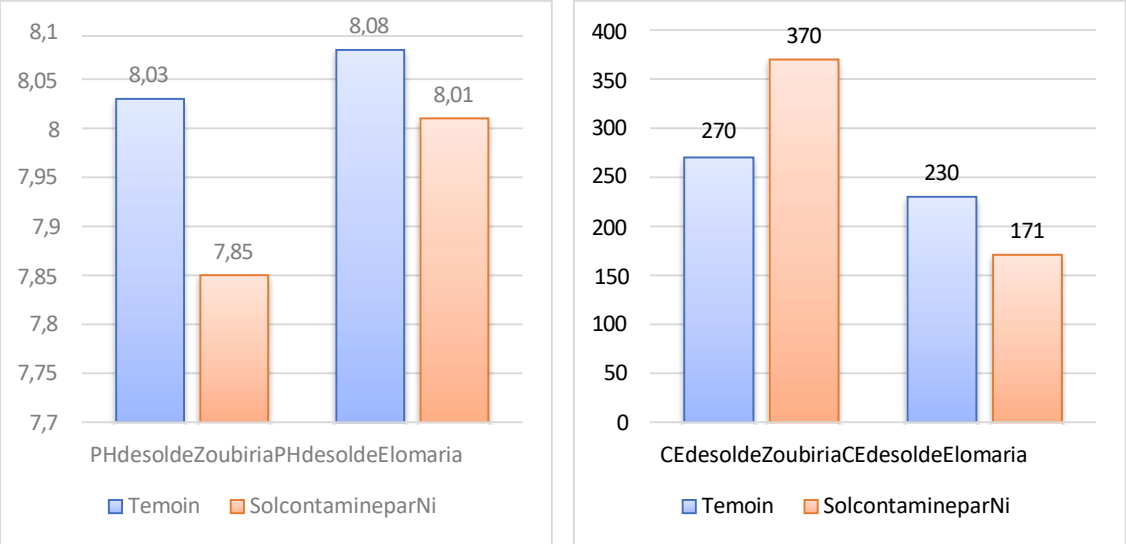
FigureIV.3: Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsdupHetCEdusol contaminé par le cuivre Zoubiria et El Omaria.

Les teneurs du pH contaminé par le cuivre de l'ensemble des prélèvements (n=56) du sol des deux régions (le **tableau IV.1** et **figure IV.3**) oscillent entre 7,88 (Zoubiria) et7,99 (El Omaria).**Serpaudetal.(1994)**ontdémontréqu'uneaugmentationdupHfavorisel'adsorption du cuivre et une augmentation de la température (de 10 à 40°C) diminue le pourcentage du cuivre adsorbé de 79 % à 67,4 %. Pendant la saison des pluies, les faibles concentrations en cuivre des sols pourraient s'expliquer probablement par les phénomènes de dilution qui s'opèrent par des apports de sols moins ou non contaminés.

IV.1.4. CEdusoltémoinetcontaminéparleNi

Les teneurs moyennes ± les écart-types ainsi que les minimums et maximums du nickel (mg/kgms),dessédiments prélevésà 4reprises pour chacunedes 2stations,sont notéesdans

dansletableau**IV.1**.Lesvariationsspatio-temporellesdesteneursennickelobservéeslors desdeux campagnesd'échantillonnagesontillustréespar **figureIV.4**



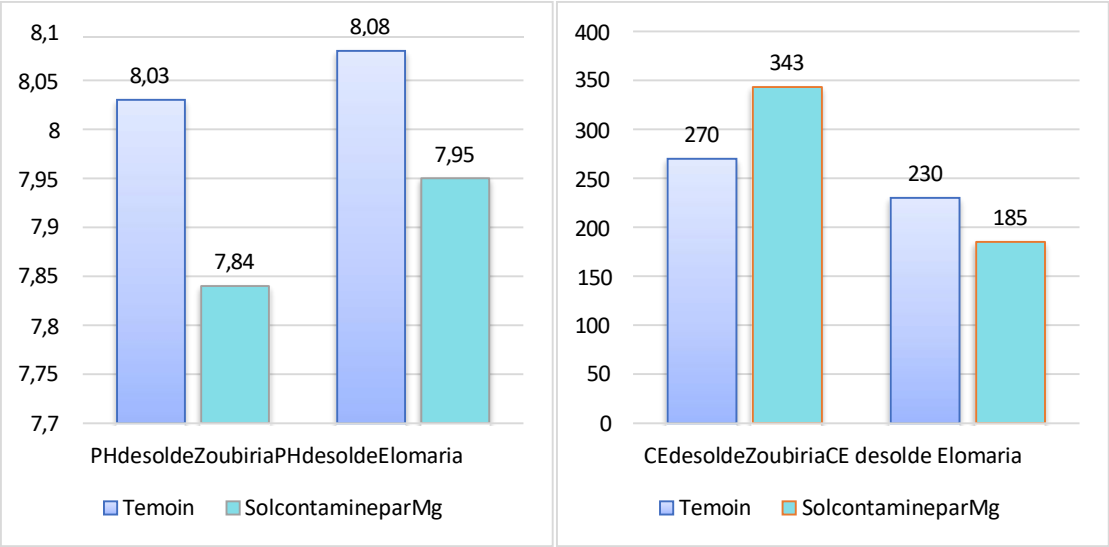
FigureIV.4: Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsennickeldusolZoubiriaetEl Omaria.

Labiodisponibilitédunickelvarieenfonctiondup**H**,dupotentield'oxydo-réduction,de laforceionique, dutype etdelaconcentrationen ligands etdelaprésencedesurfaces solides tels les oxyhydroxydes de fer et de manganèse pour lesquels le nickel a une forte affinité (**Tissier et al.1996**). **Audry (2003)** a observé un certain comportement, contrôlé par la concentration et la réduction de ces phases porteuses.

IV.1.5. pHetCEdusoltémoinetcontaminéparleMg

Lesvariationsspatio-temporellesdesteneursconstatéessontillustréesparla**figureIV.5**Les teneurs des sédiments prélevés à 4 reprises pour chacune des 2 stations, sont notées dans le **tableau IV.1**

Les teneurs de pH contaminé en manganèse de l'ensemble des prélèvements (n=56) du sol de ZoubiriaetElOmaria**(tableauIV.1etfigureIV.5)**oscillententre7,84(Zoubiria)et8,08(El Omaria) avec une moyenne des 2 stations de 7,92 ± 0,12 et 8±0,07



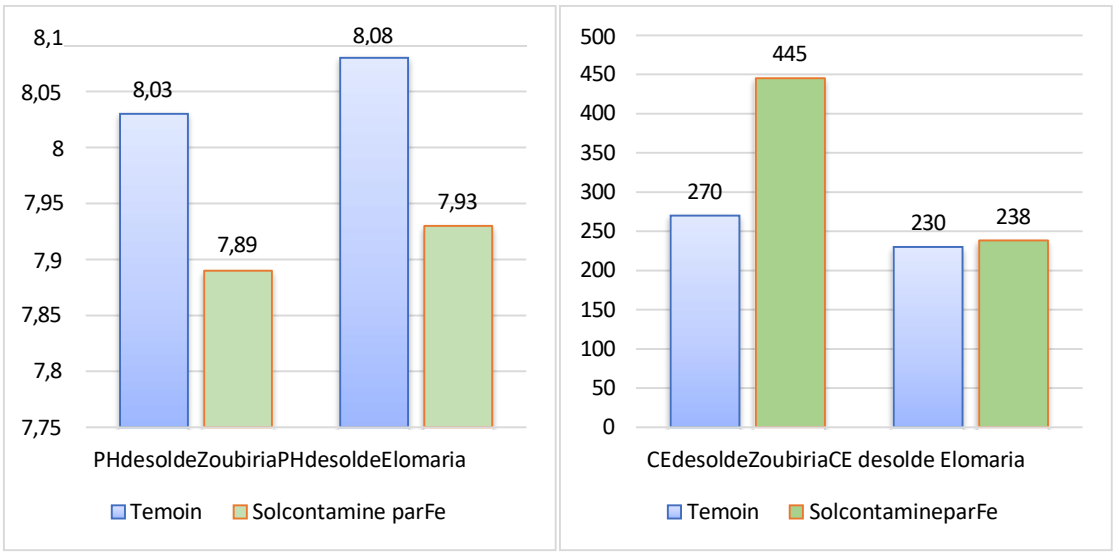
FigureIV.5: Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsenmagnésiumdusol Zoubiria et El Omaria.

Lemagnésiumdanslesolestessentielaubonfonctionnementdelaplante,ilconstitue20%de la chlorophylle, ilintervientdans les mouvements de sèves(comme la potasse) etle processusd'assimilationdesnitratesauniveaudusystèmeracinaireetdanslamiseenréserve des sucres (tubercules, graines). Lors de l'assimilation racinaire, le magnésium est en concurrence avec la potasse, c'est pourquoi l'équilibre Mg/K est essentiel pour piloter les apportsdemagnésieetdepotasse.Deplus,l'excèsdemagnésiumausoldevientviteunfacteur de blocage du potassium, du calcium mais aussi des oligo-éléments (surtout du manganèse). Un apport au sol n'est jamais systématiquement nécessaire a priori **(Blanchard, 2000).**

IV.1.6. CEdusoltémoinetcontaminéparleFe

Les teneurs du Fer dans le sol des deux stations, prélevés à 2 reprises pour chacune, sont enregistrées dans le **tableauIV.1**Les variations spatio-temporelles des teneurs en Fer observées lors des deux campagnes d'échantillonnage sont illustrées par la **figure IV.6**

D'après les résultats notés dans **tableau IV.1** et **figure IV.6**, la teneur moyenne du pH contaminé par le Fer pour les 56 prélèvements varies entre 7,89-8,05 (Zoubiria) et 7,93-8,05 (ElOmaria).Lacomparaisondesmoyennesdesteneursen Ferdusoldesdeuxstationsrévèle que les deux stations sont chargées par le Fer.

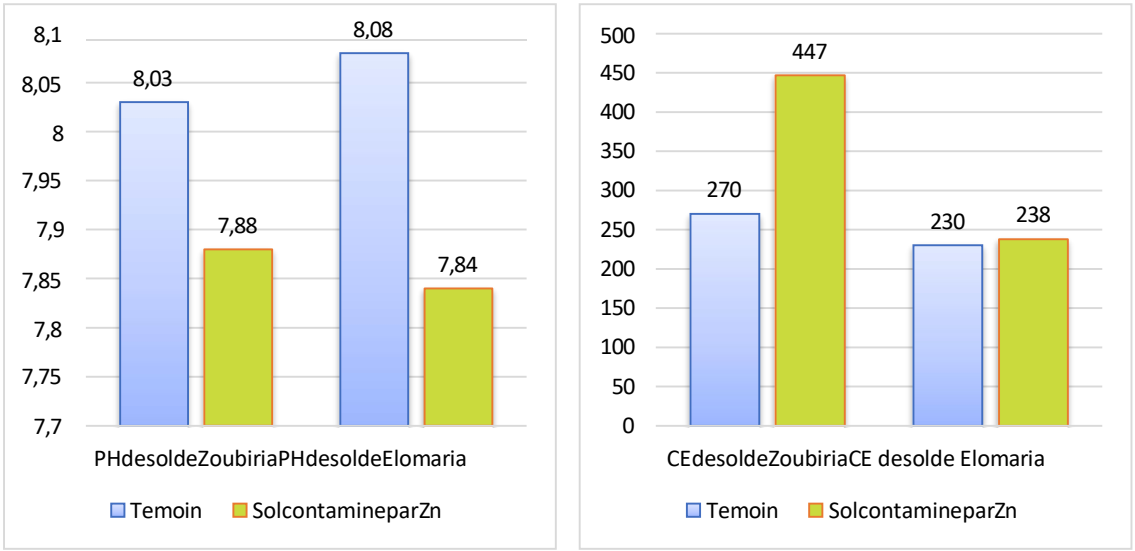


FigureIV.6: Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsenferdusolZoubiriaetEl Omaria.

Lorsd'excédentenferdanslesol,lesfeuillesbrunissentetsecouvrentdepetitestachesbrunes. Unexcédentferriquepeutapparaîtredansunsolacideetprovoquerunecarenceenmanganèse (**Bouabdli et al. 2005)**.

IV.1.7. CEdusoltémoinetcontaminéparleZn

Les teneurs moyennes ± les écart-types ainsi que les minimums et maximums du zinc, des sédimentsprélevésà4reprisespourchacunedes2stations,sontconsignésdans**tableau IV.1**.Lesvariationsspatio-temporellesdesteneursenzincobservéeslorsdesdeuxcampagnes d'échantillonnagesontillustréespar**figureIV.7.**

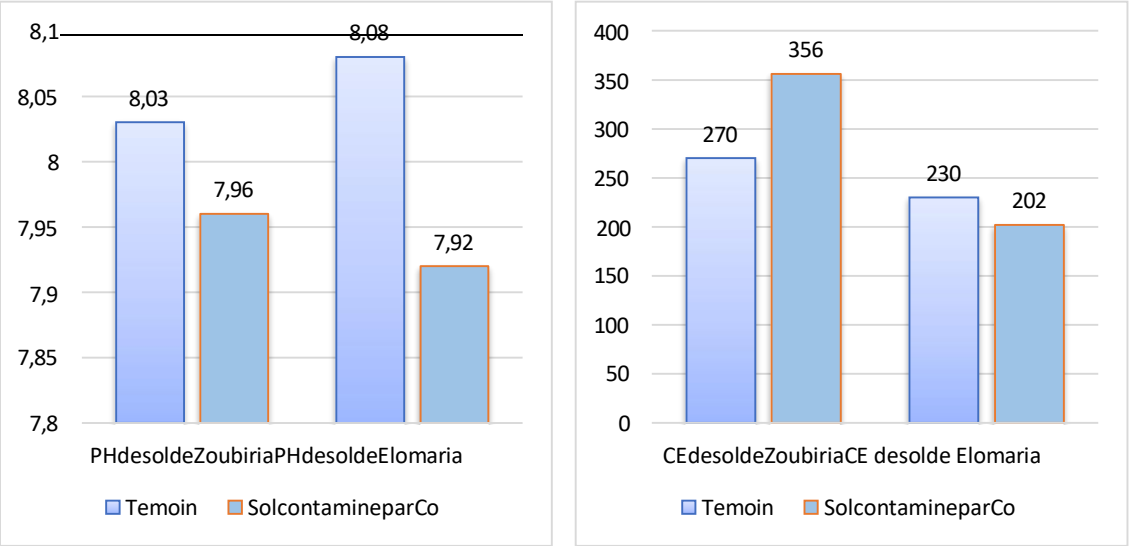


FigureIV.7. Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsenzincdusolZoubiriaetEl Omaria.

D'après les variations spatiales des teneurs en zinc(**figureIV.7etle tableau IV.1**),l'analyse des fluctuations par stations montre qu'elles sont plus accentuées dans El Omaria avec des moyennes respectives 7,90 ± 0,03, et 401 ± 65µS/cm. Les concentrations élevées rencontrées dans la partie en amont du barrage seraient dues à la nature de la roche mère et la dominance de la dilution à l'aval des cours d'eau où les débits sont plus importants et la vitesse d'écoulement plus lente. Par conséquent, des niveaux aussi élevés de zinc dans certains sites de la zone d'étude peuvent être attribués aux effets des rejets domestiques et de l'agriculture (**Jourdan et al. 2005**).

IV.1.8. pHetCEdusoltémoinetcontaminéparleCo

D'après les résultats consignés dans le tableau **IV.1**, les teneurs en pH contaminé par le cobalt fluctuent de 7,92 à 8,08 dans la même station El Omaria. Les variations spatio-temporelles de la CE des 2 stations de prélèvements, sont représentées sous forme d'histogramme **(Figure IV.8).**

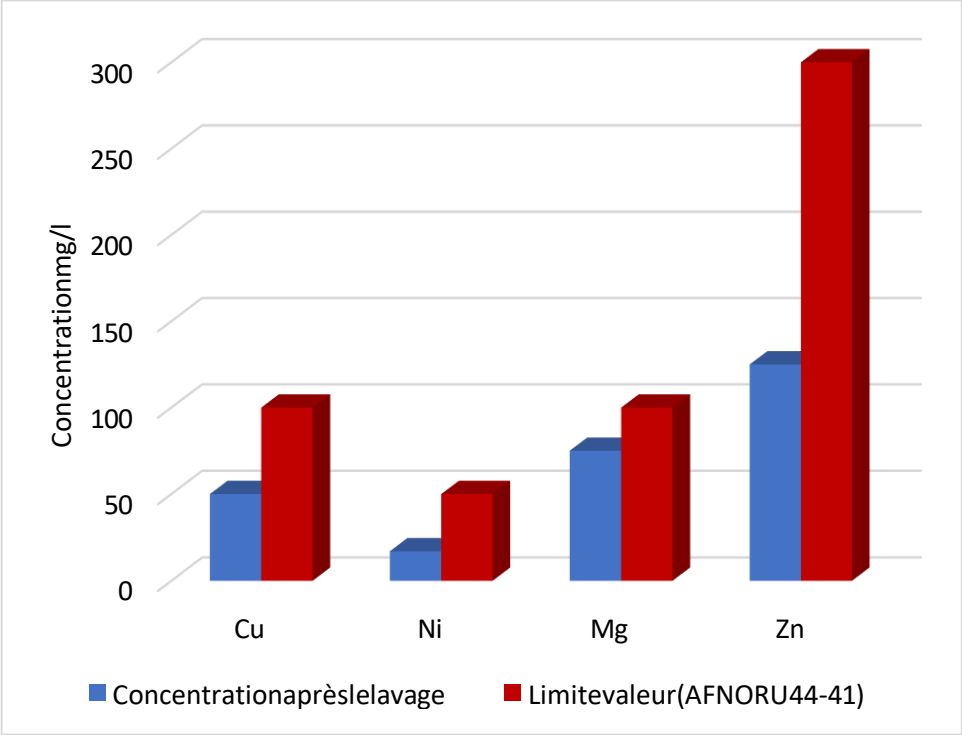


FigureIV.8: Variationsspatio-temporellesdesconcentrationsencobaltdusolZoubiriaetEl Omaria.

Ilapparaîtquelaconductivitédusolcontaminerparlecobaltvarientd'unesaisonàl'autre : c'est en période printanière, qu'on a observé la moyenne du Co la plus élevée (387 ± 44 µS/cm) par opposition à la période hivernale (271 ± 98 µS/cm).

IV.1.9. Concentrationdesmétauxdanslesol

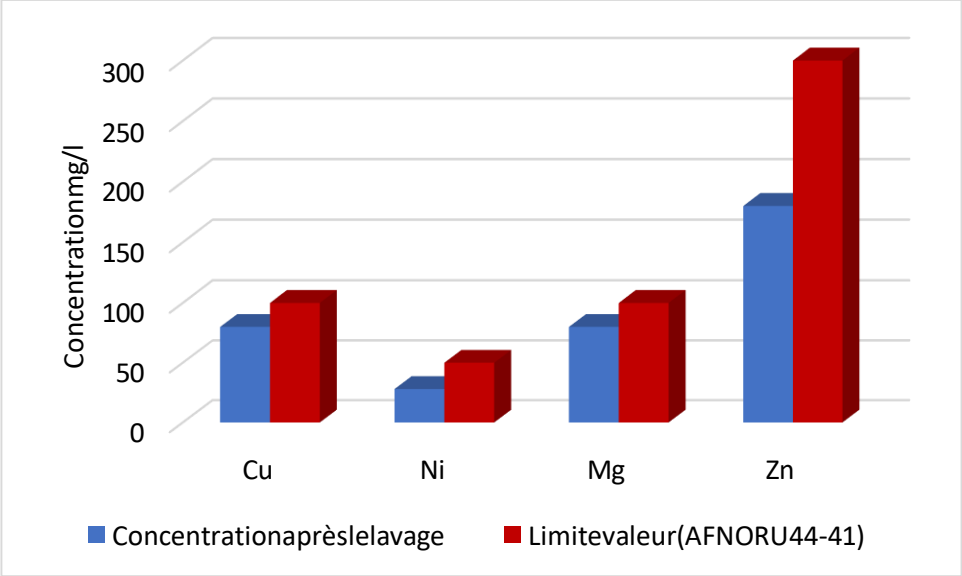
IV.1.9.1. ConcentrationdesmétauxdanslesoldeZoubiria



FigureIV.8: Evolutionspatio-temporelledesmétauxdusoldusol Zoubiria.

Les teneurs du cuivre sont à 50% inférieures à 100 mg/kg ms et rendent compte d'une bonne qualité selon **AFNOR (U44-41).** Comparée à la teneur moyenne du Ni avant et après lelavage,onpeutdirequ'ilesttrèsefficace.EncequiconcerneleMgetleZn,des éléments nécessaires au sol, le processus dedépollution thermiqueest efficaceaussi avec25% et 50% respectivement.

III.1.9.1. Concentrationdesmétauxdanslesold'ElOmaria



FigureIV.9: Evolutionspatio-temporelledesmétauxdusoldusoletElOmaria.

Le lavage du sol à haute température, dont le sol est chauffé à 40, 60 jusqu'a 280°C, on voit bien que la température jeu un rôle très important dans la dépollution du sol : plus la températureaugmenteletauxdesmétauxdanslasolutionaugmente.Ilestimportantdesavoir queletaux total du cuivre, nickel, magnésium et lezincextrait est dueàun volumedelavage total égale à 400 ml.

III.2.Analysestatistiqueunivariée

TesttdeStudentpouréchantillonsindépendants

Lesvariationssignificatifsdesparamètresphysico-chimiquesdusoletdesteneursenETM du sol ont été appuyer par l'analyse statistique par le test T Student a été mise en œuvre et a permis de révéler des différences significatives en fonction des saisons et de prélèvements.

Ainsi il est possible de souligner les différences significatives entre les saisons de prélèvements pour les paramètres des deux régions :

✓Ilexistedesdifférenceshautement significativesentrelepH,pourleZn etleCu;

- ✓ Des différences hautement significatives ont été observer pour le pH et la conductivitépourle Cu et Mget très hautement significatives pourle reste (Ni, Fe, Zn, Co) ;
- ✓Il s'est avérer qu'il existe des différences très hautement significatives pour la conductivité (CE) du sol, pour les 6 métaux ;

Sur la base des résultats de ce test statistique, on peut conclure que, d'une manière générale, le sol du Zoubiria et El Omaria, présentent quelques variations importantes sur la qualité physico-chimique du sol au cours des deux campagnes d'étude.

III.3.Analysestatistiquebivariée

Les corrélations linéaires obtenues pour les 14 variables prises deux à deux, ainsi que les valeurs des probabilités p correspondantes, figurent dans le **tableau IV.2** qui montre qu'il existedescorrélationspositivesetdescorrélationsnégatives.Parmicescorrélationsonobserve des corrélations justes significatives, des corrélations hautement significatives et des corrélations très hautement significatives. **Tableau IV.2** suivant synthétise l'essentiel des corrélations obtenues entre les 14 variables.

Tableau IV.2: Liste des corrélations significatives, hautement et très hautement significativesentrelesdifférentsparamètresphysicochimiquesdusolavantetaprèsla contamination d'u Zoubiria et du El Omaria.

Corrélationspositives			**Corrélationsnégatives**		
Significatives	**Hautement significatives**	**Très hautement significatives**	**Significatives**	**Hautement significatives**	**Très hautement significatives**
CENietpH Zn	CECuetpH Co	/	CECuetpH Zn	CEMgetpH Fe	CE Co et pH
			CEMget pH Co		
			CEFeetpH Co		

Conclusion

Conclusiongénérale

La contamination des sols et des eaux souterraines par les engrais, des déversements d'hydrocarburespétroliersestfréquente.Elleentraînedesrisquespourl'environnementetlasanté humaine. Souvent, la contamination est associée aux défaillances des réservoirs de stockage souterrain dans les stations de service. Lorsque les substances dangereuses contenues dans les hydrocarbures sont près des activités humaines, elles peuvent altérer l'eau potable et les sols agricolesetcauserdesodeursdésagréables.Ladépollutionoudécontaminationdessolsconsisteà rendre le sol, le sous-sol, et les eaux souterraines pollués par d'anciens dépôts de déchets ou par l'infiltrationdesubstancespolluantes,aptesàunnouvelusage(agricole,résidentielouindustriel).

On a réalisé de dépollution le sol contamine par les métaux lourds suivants : cuivre (Cu), Nickel (Ni), Magnésium (Mg), le Fer (Fe), zinc (Zn) et le cobalt (Co) avec l'étude des caractéristique physico-chimiques de sol et la comparaison entre eux dans l'hiver et le printemps. Leprocédés d'élimination ces éléments est un traitement thermiquequi consistelavagedesol par l'eau distille sous l'utilisation la température. L'objectif d'utilisation ce protocole est pour capter les polluants dans une solution liquide on augmente la température 80°, 180°, 240 °. On observe queonaugmentelatempératurequel'extractiondespolluantsaugmente.Lesolestchaufféa40C°, jusqu'à 240 Plus la température augmente le taux des métaux dans la solution augmente.On a observé Les teneurs du cuivre sont à 50% inférieures à 100 mg/kg ms et rendent compte d'une bonne qualité selon AFNOR (U44-41). Comparée à la teneur moyenne du Ni avant et après le lavage, on peut dire qu'il est très efficace. En ce qui concerne le Mg et le Zn, des éléments nécessaires au sol, le processus de dépollution thermique est efficace aussi avec 25% et 50% respectivement.

Ainsi, la teneur des extractions des métaux dans la solution par notre traitement thermique estinférieureàlanormeAFNOR(U44-41)pourlesdeuxtypesdesolZoubiriaetElOmariadonc cette technique est efficace pour éliminer les métaux.

Lesreferences:

Aragnou.M;Gobat.J.M;Matthey.W,2003.Lesolvivant,basepedologie/biologiedessols .2ed,enFrance.

Delaune. M;Reiffsteck.M; Feller. C; 1991. L'analyse granulométrique de sols et sédiments à l'aide du microgranulomètre « Sedigraph 5000 ET » Comparaison avec la méthode pipette Robinson. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie. 26, 183-189.

Frerert.R.K;Schwab G.O;Edminster T.W. and BARNES, K.K. . John Wiley & Sons,New York(1995):Soil and Water Conservation Engineering. Agronomy Journal.47,284- 284.

Gobat. J.M; Aragno. M et Matthey .W, 2010. Le sol vivant bases de pédologie–biologie des sols (3eme Ed.). Presses polytechniques et universitaires romandes, p 51- 53- 62.

Panus. M etGautheyrou. J.2001. L'analyse Du Sol Minéralogique, Organique Et Minérale. Edition Springer.

QiW.,ZhiyiX.,Fangbai L.,2015. Usingensemblemodelstoidentifyandapportionheavy metal pollution sources in agricultural soils on a local scale. Environmental Pollution, 206, 227-235.

Rolland.P ;1988.Lesystèmedesgrandestourbièreséquatoriales.AnnalesGéographie ,544,942-666.

Vanleeuwen. C;Friant. P ; Choné X., Trégoat O., Koundouras S., & Dubourdieu D.,(2004. Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir. American Journal of Enology and Viticulture 55, 207–217.

Abdelly.C;2007.B.ioremédiation/phytoremédiation.Thèse de doctorat. Tunisie :Université de Tunisie.

Adam.S; Edorhe. P ;Totin.H;Koumolou.L; Amoussou. E;Akikokou.K; Boko.M; 2010. Pesticides et métaux lourds dans l'eau de boisson, les sols et les sédiments de la ceinture cotonnière de Gogounou, Kandi et Banikoara (Bénin). International Journal of Biological and Chemical Sciences. 4, 1170-1179.

Albanese, S., De Vivo, B., Lima, A. & Cicchella, D. 2007. Geochemical background and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy). Journal of Geochemical Exploration. 93, 21–34.

Arora S, Arora S, Sahni D, Sehgal M, Srivastava D,2019. Singh A. Pesticides use and its effect on soil bacteria and fungal populations, microbial biomass carbon and enzymatic activity. CURRENT SCIENCE; 116: 643-649.

BELBACHIR,I.,LAKEHAL, S. (2017) : Caractérisation de quelques types de sols entourant la zone industrielle de l'Oued El Berdi (wilaya de Bouira), Université AKIL MOHAND OUIHADJ-BOUIRA.

Baize.DetJabio.B.1995.Guidepourladescriptiondessols.Ed. INRA.

Boruta. B; Lemanowicz. J; Bartkowiak .A. 2016. Variationinbiologicaland physicochemical parameters of the soil affected by uncontrolled landfill sites. Environmental Earth Sciences.75 ,201.

Buttller. A; 1992.Hydrochimie de nappes des prairies humides de la rive sud de lac de Neuchâtel. Bull.Ecol ; 415-421.

Calvet R., 1989. Adsorption of organic chemicals in soils. Environmental Health Perspectives, 83, 145-177.

Calvet. R; 2003. Le sol, propriétés et fonctions, tome 1, Constitution et structures, phénomènes aux interfaces. Ed. France Agricole DUNOD.p455.

Cheng, M., Zeng, G., Huang, D., Lai, C., Xu, P., Zhang, C., Liu, Y., 2016. Hydroxyl radicals based advanced oxidation processes (AOPs) for remediation of soils contaminated with organic compounds: a review. Chem. Eng. J. 284, 582–598.

Cherif. H; Ayari. F., Ouzaria. H; Marzoratib.M;Brusetti.L;Jedidia .N; Hassen .A; Daffonchiob.D.,2009.Effects of municipal solid waste compost, farmyard manure and chemical fertilizers on whea growth, soil composition and soil bacterial characteristics under Tunisian arid climate. European journal of soil biology, 45, 138 -145.

Díez, M., Simón, M., Martín, F., Dorronsoro, C., García, I. & Van Gestel, C.A.M. 2009. Ambient trace element background concentrations in soils and their use in risk assessment.

DolliverH;GuptaS; Noll. S;2008. Antibiotic degradation during manure composting. Journal of environmental quality; 37.1245-1253.

El Hachimi M.L; Fekhaoui. M; Abidi A.E., Rhoujatti .A., 2014. Contamination des solsparlesmétaux lourds àpartirdemines abandonnées : lecas des mines Aouli-Mibladen-Zeïda au Maroc. Cahiers Agricultures, 23.

Feller. C;1995. La matière organique du sol : un indicateur de la fertilité. Application aux zones sahélienne et soudanienne. Agriculture et développement.8, 35-41.

Ferraro, A., van Hullebusch, E.D., Huguenot, D., Fabbricino, M., Esposito, G., 2015. ApplicationofanelectrochemicaltreatmentforEDDSsoilwashingsolutionregenerationand reusein amulti-stepsoilwashingprocess:caseofaCucontaminatedsoil.J.Environ.Manag. 163, 62–69.

FRTR (Federal Remediation Technologies Roundtable), 2017. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0.

Gavrilescu.M;2022.Enhancingphytoremediationofsoilspollutedwithheavymetals. Current Opinion in Biotechnology . 74, 21-31.

Girard.M.C; Walter.C ; Remy. J.C ; Berthlin. J; et MOREL.J.I., 2005. Sol et environnement. Edition DUNOD. Paris.529.

Halitim,A.(1988): Lessolsdesrégionsarides d'Algérie.Ed. O.P.U,Alger.p384.

Hausenbuiller. R. L. 1978. Soil science, principles and practices. 2ème Ed. Wm. C. Brown Company Publishers.

Horckmans, L., Swennen, R., Deckers, J. & Maquil, R. 2005. Local background concentrations of trace elements in soils: a case study in the Grand Duchy of Luxembourg. CATENA.59, 279–304

Jia,X; Hu.B; Marchant.B.P; Zhou.L; Shi.Z; Zhu.Y .2019 . A methodological frameworkfor identifying potential sources of soil heavy metal pollution based on machine learning: A case study in the Yangtze Delta, China. Environmental Pollution . 250, 601-609.

Jiang.Y;Chao.S ;Liu.J ;Yang.Y;Chen.Y;Zhang.A;Cao.H.2017.Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China. Chemosphere , 168, 1658-1668.

Juhasz, A.L., Smith, E., Weber, J., Rees, M., Rofe, A., Kuchel, T., Sansom, L. & Naidu, R. 2007. In vitro assessment of arsenic bioaccessibility in contaminated (anthropogenic and geogenic) soils. Chemosphere. 69, 69–78.

Pendias.K , A. and Pendias, H. (2001) Trace Elements in Soils and Plants.3rdEdition, CRC Press, Boca Raton.

Khalid.S , Shahid.M; Niazi.N.K, Murtaza .B ; Bibi.I; Dumat.C. 2017. A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. Journal of Geochemical Exploration.182, 247-268.

Khaled. S ; Shahid.M; Murtaza.B; Bibi.I; Natasha ; Naeem .M.A; Niazi.N.K . 2020. A critical review of different factors governing the fate of pesticides in soil under biochar application. Sience of The Total Environment . 711, 134645 .

Khan.F.I; Husain.T; et Hejazi.R. 2004.An overview and analysis of site remediation technologies.Journal of environmental management .71.95-122.

Kinney CA, Mandernack KW, Mosier AR. 2005.Laboratory investigations into the effects of the pesticides mancozeb, chlorothalonil, and prosulfuron on nitrous oxide and nitric oxide production in fertilized soil. Soil Biology and Biochemistry, 37: 837-850.

Kogbara.R.B . 2014. A review of the mechanical and leaching performance of stabilized/solidified contaminated soils. Environmental reviews.22.

Kučeríka .J;Tokarskib.D;Demyand. M.S;Merbache.I ; Siewertf. C. 2018. Linking soil organic matter thermal stability with contents of clay, bound water, organic carbon and nitrogen.Geoderma.316,38-46.

Li, J.-S., Beiyuan, J., Tsang, D.C.W., Wang, L., Poon, C.S., Li, X.-D. & Fendorf, S. 2017. Arseniccontaining soil from geogenic source in Hong Kong: Leaching characteristics and stabilization/solidification. Chemosphere, 182: 31–39.

Liu, L., Li, W., Song, W., Guo, M., 2018. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. Science Total Environment. 633, 206–219.

Lin.H; Liu.C; Li.B; Dong .Y; 2021. *Trifolium repens* L. regulated phytoremediation of heavymetalcontaminatedsoilbypromotingsoilenzymeactivitiesandbeneficialrhizosphere associated microorganisms. Journal of Hazardous Materials . 402, 123829 .

Lopez-Vizcaino R; Alonso .J; Canizares.P ; Leon; M.J ; Navarro.V; Rodrigo.M.A; Saez.C . 2014 . Electroremediation of a natural soil polluted with phenanthrene in a pilot plant.Journal of Hazardous Materials. 265,142-150.

Lozet. J et Mathieu, C. 1998. Dictionnaire de science du sol. Ed. Technique & Documentation.

Lü.Q;Xiao.Q;Guo.Y;Wang.Y;Cai.L; You.W;Zheng.X; Lin.R.2022.Pollution monitoring, risk assessment and target remediation of heavy metals in rice from a five-year investigation in Western Fujian region,China.Journal of Hazardous Materials.424,127551.

M. Nouri.M et Haddioui.A .2016.'Les techniques de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds: une revue,' Maghrebian J. Pure Appl. Sci., 2,. 47–58.

Maignien.R ;1969.Manueldeprospectionpédologique.DocumenttechniqueN°11. Orstom,Paris.P131.

Micuți. M; Bădulescu. L, Israel-Roming F..2018 Effect of Pesticides on Enzymatic Activity in Soil. Bulletin UASVM Animal Science and Biotechnologies; 75: 2.

Morel.R.1989.Lessolscultivés.Ed.Technique&Documentation.

MumenM.,2006.CaractérisationduFonctionnementHydriquedesSolsàl'aided'un ModèleMécanistedeTransfertsd'EauetdeChaleurMisenŒuvreenFonctiondes Informations Disponibles sur le Sol. Thèse de doctorat. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse .p : 6.

Musy.Aet SoutterM., 1991. Physiquedu sol. Premièreédition ISBN2-88074-211-0, 1991, Presses polytechniques et universitaires romandes.p 331.

Najad.Z.D;Jung.M.C ;Kim.K.H.2017.Remediationofsoilscontaminatedwithheavymetals with an emphasis on immobilization technology. Environment geochem Health .

O'Brien, P.L., DeSutter, T.M., Casey, F.X.M., Wick, A.F., Khan, E., 2017. Wheat growthin soils treated by ex situ thermal desorption. Journal Environment Quality . 46, 897-905.

Oves M, Khan M S, Zaidi A, Ahmad E. 2012. Soil contamination, nutritive value, andhuman health risk assessment of heavymetals: An overview. In: Zaidi A, Wani P A, Khan M S, eds., Toxicity of Heavy Metals To Legumes and Bioremediation. Springer, Vienna,1–27.

PanM, ChuL.2016. Adsorptionanddegradationoffiveselectedantibioticsinagricultural soil. Science of the Total Environment; 545: 48-56.

Pape, A., Switzer, C., McCosh, N., Knapp, C.W., 2015. Impacts of thermal and smouldering remediation on plant growth and soil ecology. Geoderma 243-244, 1-9.

Park.Bet Son.Y; 2017. Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removalof heavy metals from soils. Ultrasonics Sonochemistry .35, 640-645.

Pavel.L;Garilescu.M.2008. Overview of ex situ decontamination techniques for soil cleanup. Environmental Engineeering and Management Journal . 7,815-834.

Paye, H. de S., Mello, J.W.V. de & Melo, S.B. de. 2012. Métodos de análise multivariada no estabelecimento de valores de referência de qualidade para elementos-traçoemsolos. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 36,1031–1042.

Pengyan Z., Chengzhe Q., Xin H., Guohua K., Mingzhou Q., Dan Y., Bo P., Yanyan L., Jianjian H., Richard PD., 2018. Risk assessment and source analysis of soil heavy metal pollution from lower reaches of Yellow River irrigation in China. Science of the Total Environment, 633, 1136- 1147.

Ren.J; Song.X; Ding.D. 2020. Sustainable remediation of diesel-contaminated soil by low temperaturethermaltreatment:Improvedenergyefficiencyandsoilreusability.Chemosphere . 241, 124952.

Rong J., Meie W.,Weiping C., Xuzhi L., 2018. Ecological risk evaluation of combined pollution of herbicide siduron andheavy metals in soils. Science of the Total Environment, 626, 1047- 1056.

Shixue W., Xinran L., Min L., Xing C., Sai L., Chenga L., Xianbiao L., Ye L., 2018. Sources, influencing factors and environmental indications of PAH pollution in urban soil columns of Shanghai, China. Ecological Indicators, 85, 1170-1180.

Pourrut,B.,Shahid, M., Douay, F., Dumat, C., Pinelli, E., 2013. Molecular mechanisms involved in lead uptake, toxicity and detoxification in higher plants. In: Gupta, D.K.(Ed.), Heavy Metal Stress in Plants. Springer-Verlag, Berlin.

Colombano, S., Saada, A., Guerin, V., Bataillard, P., Bellenfant, G., Beranger, S., Hube, D., Blanc, C., Zornig, C., Girardeau, I., 2010. Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts-bénéfices. Final Rep. BRGM-RP-58609-FR.

Hateb,A.,Mbengue,M.,Noubatare,N.,Faye S.etNiang,Y.2012.Pollutiondusolparles pesticides et les engrais, P19 .

Jeannot, R., Lemière, B., Chiron, S., Augustin, F. et Darmendrail,D.2000.Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. France.

Sardrood,B.P.,Goltapeh,E.M.andVarma,A.2013.Anintroductiontobioremediation. InFungiasbioremediators,Springer,Berlin,Heidelberg,p3-27.

Adame.G.O; Fufeyin.P.T ; Okoro.S.E; Ethinomem.I .2015.Bioremediation,Bistimulation and Bioaugmention: A Review . Intenational Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation .3 , 28-39 .

Scott, K.., Ashley, P.. & Lawie, D.. 2001. The geochemistry, mineralogy and maturity of gossans derived from volcanogenic Zn–Pb–Cu deposits of the eastern Lachlan Fold Belt, NSW, Australia. Journal of Geochemical Exploration. 72, 169–191.

Shacklette, H.T. & Boerngen, J.G. 1984. Element Concentrations in Soils and Other Surficial Materials of the Conterminous United States. , p. 63. US Geological Survey.

Shahet.V; Daverey.A. 2020. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. Environmental Technology & Innovation . 18, 100774.

Baize.D.2009. Éléments en traces dans les sols : fonds géochimiques; fonds pédoGéochimiques et teneurs agricoles habituelles. Définitions et utilités. Courr.Environ. INRA, 57, 63-72.

Sierra,M.J., Millan, R., Lopez, F.A., Alguacil, F.J., Canada, I., 2016. Sustainable remediationofmercurycontaminatedsoils by thermal desorption. EnvironmentalScience Pollution Research. 23, 4898-4907.

Gomes.H.I;2012.Pytoremediationforbioenergy:challenges and opportunities . Environmental Technology Reviews. 1.59-66.

Cameselle, C., Gouveia, S., Urréjola, S., 2019. Benefits of phytoremediation amended with DC electric field. Application to soils contaminated with heavy metals. Chemosphere 229, 481–488.

Rajkumar, M., Sandhya, S., Prasad, M.N.V., Freitas, H., 2012. Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. Biotechnolgy Advances . 30, 1562–1574.

Nejad, Z.D., Jung, M.C., Kim, K.H., 2018. Remediation of soils contaminated with heavy metals with an emphasis on immobilization technology. Environ. Geochem. Health 40, 927–953.

Mandal, A., Purakayastha,T.J., Ramana, S., Neenu, S., Bhaduri, D., Chakraborty, K., Manna, M.C., Rao, A.S., 2014. Statusonphytoremediationofheavymetals in India- A review. Int. J. Bio-Resour. Stress Manag. 5, 553.

Shakoor, M., Niazi, N., Bibi, I., Rahman, M., Naidu, R., Dong, Z., Shahid, M., Arshad, M., 2015. Unraveling health risk and speciation of arsenic from groundwater in rural areas of Punjab, Pakistan. Intenational Journal ofEnvironmental Research and Public Health 12, 12371–12390.

United Nations Environmental Protection/Global Program of Action (UNEP/GPA), 2004. Why the marine environment needs protection from heavy metals. Heavy Metals. UNEP/GPA.

Fuge, R., Glover, S.P., Pearce, N.J., Perkins, W.T., 1991. Some observations on heavy metal concentrations in soils of the Mendip region of north Somerset. Environ. Geochem. Health .13 ,193–196.

Pourrut, B., Jean, S., Silvestre, J., Pinelli, E., 2011. Lead-induced DNA damage in Vicia faba root cells: potential involvement of oxidative stress. Mutat. Res. 726, 123–128.

Guo, X., Wei, Z., Wu, Q., Li, C., Qian, T., Zheng, W., 2016. Effect of soil washing with onlychelators or combining with ferric chloride on soil heavy metal removal and phytoavailability: field experiments. Chemosphere 147, 412–419.

Saifullah, Shahid, M., Zia-Ur-Rehman,M.,Sabir, M., Ahmad, H.R., 2015. Phytoremediation of Pb-contaminated soils using synthetic chelates. Soil Remediation and Plants. Elsevier Inc.

Udovic, M., Lestan, D., 2010. Fractionation and bioavailability of Cu in soil remediated by EDTA leaching and processed by earthworms (Lumbricus terrestris L.). Environ. Sci. Pollut. Res. 17, 561–570.

Li.S; Ondon.B.S; Ho.S.H; Li.F. 2023. Emerging soil contamination of antibioticsresistance bacteria (ARB) carrying genes (ARGs): New challenges for soil remediation and conservation. Environmental Research. 219.115132.

Tang.J ; Zhang.J ; Ren.L ; Zhou.Y; Gao.J ; Luo.L;Yang.Y ;Peng .Q; Huang .H; Chen.A.2019. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. Journal of Environmental Management.242, 121-130.

Podolský, F.,Ettler,V.,Šebek,O.,Ježek,J.,Mihaljevič,M.,Kříbek, B., Sracek,O., Vaněk, A., Penížek, V., Majer, V., Mapani, B., Kamona, F. & Nyambe, I. 2015. Mercuryinsoil profiles from metal mining and smelting areas in Namibia and Zambia: distribution and potential sources. Journal of Soils and Sediments. 15, 648–658.

Mackay, A.K., Taylor, M.P., Munksgaard, N.C., Hudson-Edwards, K.A. & Burn-Nunes, L. 2013. Identification of environmental lead sources and pathways in a mining and smelting town: Mount Isa, Australia. Environmental Pollution, 180: 304–311.

Lu, Y., Song, S., Wang, R., Liu, Z., Meng, J., Sweetman, A.J., Jenkins, A., Ferrier, R.C., Li, H., Luo, W. & Wang, T. 2015. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. Environment International, 77: 5–15.

Strzebońska, M., Jarosz-Krzemińska, E. & Adamiec, E. 2017. Assessing Historical Mining and SmeltingEffects on HeavyMetal Pollution ofRiverSystems overSpan ofTwo Decades. Water, Air, & Soil Pollution, 228.

Song.B; Zeng.G; Gong.J ; Liang.J ; Xu.P; Liu.Z; Zhang.C; Cheng.M; Liu.Y; Yi.H et Ren.X. 2017. Evaluation methods for assessing effectiveness of in situ remediation of soiland sediment contaminated with organic pollutants and heavy metals.Environment International. 105, 43-55.

Sposito.G;1989.Thechemistryofsoils.OxfordUniversityPress.

Yatrabi. A et Nejmeddine.A., 2000. Fractionnement et mobilité des métaux lourds dans un sol en amont des eaux usées de tanneries. Revue des sciences de l'eau, 13, 203-212**.**

Yoa.B.L; Messoum.F.G; et Tano.k; 2022. Contamination des fèves de cacao par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en Côte d'Ivoire. Revue Marocainedes sciences agronomiques et veterinaires , 10 .

Yi,Y.M.,Park,S.,Munster,C.,Kim,G.,Sung,K.,2016.Changesinecologicalproperties ofpetroleumoil-contaminatedsoilafterlow-temperaturethermaldesorptiontreatment. Water Air Soil Pollution. 227, 108.

Zhao . L; Xu .Y., Hou.H., Shangguan .Y., Li. F., 2014. Source identification and health risk assessment of metals in urban soils around the Tanggu chemical industrial district, Tianjin, China. Science of The Total Environment, 46, 654-662.

Zhao.C; Dong.Y; Feng.Y; Li.Y; Dong.Y.2019. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review.Chemosphere.221, 841-855.

Zheng.F;Guo.X;Tang.M;Zhu.D;Wang.H;Yang.X;Chen.B.2023.Variationinpollution status,sources, and risks of soil heavy metals in regions with different levels of urbanization.866,161355.

De Cock.A;De Troyer.N; Eurie.M.A.F;Arevalo.I.G;Echelpoel.W.P;Jacxsens.L; Luca.S; Laing.G.D;Tack.F;Granda.L;2021Goethals.P.L.M.From mangrove to fork: metal presence in the Guayas estuary (Ecuador) and commercial mangrove crabs.Foods,10.3390.

Lyu.S;Wu.L;Wen.X;J.Wang.J;Chen.W.2022..Effects of reclaimed wastewater irrigation on soil-crop systems in China: a review.Science of The Total Environment.813,152531.(Ed.), Heavy Metal Stress in Plants. Springer-Verlag, Berlin.

RISER-Roberts, E. (1998) : Remediation of Petroleum-Contaminated Soils: Biological, Physical, and Chemical Processes. Lewis Publishers, Boca Raton.p 542.1214–1224.

ZupančIč.N.,TurnIškicR.,MILERDM.,GRčMANCH.,2018.Geochemicalfingerprint ofinsolublematerialinsoilondifferentlimestoneformations.Catena,170,10-24.

Ahoussi.E.K;Soro.N;Kouassi.A.M; Soro.G;Koffi.Y.B;Zade.S.P.2010. Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds (Cu2+, Mn2+, Zn2+ et Pb2+) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. International Journal of Biological and Chemical Sciences, 4.1753-1765.

Huynh:T.M.D.2009.Impactsdesmetauxlourdssurlinteractionplante/verdeterre /microfloretellurique.thesededoctorat.universite ParisEst.

Niazi, N.K., Bishop, T.F.A., Singh, B., 2011. Evaluation of spatial variability of soil arsenic adjacent to a disused cattle-dip site, using model-based geostatistics. Environmental. ScienceTechnology. 45, 10463–10470.

Philippe.V;2009.LestraitementsthermiquesdesmatièresrésiduellesComments'y

Pierart,A.,Shahid,M.,Séjalon-Delmas,N.,Dumat,C.,2015.Antimonybioavailability: plants. Rev. Environ. Contam. Toxicol. 232, 1–44.

Mombo, S., Foucault, Y., Deola, F., Gaillard, I., Goix, S., Shahid, M., Schreck, E., Pierart, A.,Dumat, C., 2015. Management of human health risk in the context of kitchen gardens polluted byleadandcadmiumnearaleadrecyclingcompany.JournalofSoilsandSediments .16(4).

Ramade R., 2000. Dictionnaire encyclopédique des pollutions. Ediscience international. Paris (France), 58-365.

Tajudin, S.A.A., Azmi, M.A.M., Nabila, A.T.A., 2016. Stabilization/solidification remediation method for contaminated soil: a review. IOP ConferenceSeries Materials Science and Engineering. 136, 012043.

Tarazona,J.V.2014.Pollution,Soil. EncyclopediaofToxicology,pp.1019–1023.

Tomasin,D.2003. Essai sur le fait juridique de la pollution des sols.page 34 Toulouse,272p.

Xiong, T., Leveque, T., Shahid, M., Foucault, Y., Mombo, S., Dumat, C., 2014. Lead and cadmiumphytoavailability and human bioaccessibility for vegetables exposed to soil or atmospheric pollution by process ultrafine particules.Journal environmental quality.43,1593-600.

Xiong,T.,Austruy,A.,Pierart,A., Shahid, M., 2016. Kinetic study of phytotoxicity induced by foliar lead uptake for vegetables exposed to fine particles and implications for sustainable urban agriculture. J. Environ. Sci. 1–12.

Vidonish .J.E; Zygourakis.K; Masiello .C.A; Gao.X; Mathieu.J,Alvarez.P.J.J.2016. Pyrolytic treatment and fertility enhancement of soils contaminated with heavy hydrocarbons.environmental science technologies .50, 2498-2506.

Wenyou H., Huifeng W., Lurui D., Biao H., OleK B., Hans Christian BH., Yue H., Peter EH., 2018. Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach. Environmental Pollution , 23 , 650-661.

Roudier,P2005.Techniquesderéhabilitationdessitesetsolspollués-Fichesdesynthèse.In Pack..

Navarro,S.,Vela,N.&Navarro,G.2007.Review.Anoverviewontheenvironmental behaviour of pesticide residues in soils. Spanish Journal of Agricultural Research. 5.3, 357.

Ross, S.M., 1994. Sources and Forms of potentially Toxic Metals in Soil-Plant Systems.P 3-25.

LECOMTE, P. 1998 . Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. 2éme édition Lavoisier.

SAMAKSAMAN,U.,PENG,T.H.,KUO,J.H.,LU,C.H.,WEY,M.Y.(2016):Applied ThermalEngineering.93,131-138p.

Miquel.Get Poignant.1999. Rapport sur les nouvelles techniques de recyclage et de valorisation des déchets ménagers et des déchets industriels banals.Paris : Officeparlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques.

Shahid,M.,Dumat,C.,Pourrut,B.,Abbas,G.,Shahid,N.,Pinelli,E.,2015. Roleofmetal speciation in lead-induced oxidative stress to Vicia faba roots. Russ. J. Plant Physiol. 62, 448–454.

FRTR,2012.RemediationTechnologiesScreeningMatrixandReferenceGuide,Version4.0. FederalRemediationTechnologiesRoundtable,Washington,DC.

Blum, W.E.H. 2005. Functions of Soil for Society and the Environment. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology. 4, 75–79.

Gevao, B., Semple, K.T. & Jones, K.C. 2000. Bound pesticide residues in soils: a review. Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987). 108, 3–14.

BaletJM.,2016.Gestiondesdéchets.5èédition.p:10-11.

Lei C., Guobo W., Yucen Z., Zhenyao S., 2016. Evaluating the impacts of soil data on hydrological and nonpoint source pollution prediction. Science of the Total Environment, 564, 19-28.

Jun W., Jian L., Leiming L., Xiuyun M., Yongming L., 2018. Pollution, ecological-health risks, and sources of heavy metals in soil of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. Chemosphere, 201, 234- 242.

Khan.S.H; Pathak.B ; 2020. Zinc oxide based photocatalytic degradation of persistent pesticides: A comprehensive review. Environmental Nanotechnology , Monitoring & Management.13, 100290.

Ahmed.S;Rasul.M.G; Martens .W.N; Brown.R ; Hasib.M.A . 2011. Advances in Heterogeneous Photocatalytic Degradation of Phenols and Dyes in Wastewater: A Review.Water,Air, & Soil pollution. 215,3-29.

Hopkin, S.P., 1989. Ecophysiology of metals in terrestrial invertebrates. Elsevier, Applied science, NY, USA, p366 .

BehanzinG.J.,Adjoue.S.,Yessoufoua.g.,Dahouenona.e.etsezana.,2014.Effetdessels de métaux lourds (chlorure de Cobalt et chlorure de Mercure) sur l'activité des hépatocytes,

JournalAppliedBiosciences,83,7499-7505.

Benhaddya M.L. 2014 ; Gestion et traitement de la pollution au niveau de la zone industrielle hassi messaoud ; université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf ; Diplôme de Doctorat En Sciences .

Bouzid.I; 2019 .Développement et évaluation d'une méthode à base de mousse pour l'oxydation améliorée de sols insaturés contaminés par des hydrocarbures.Memoire de doctorat .These de doctorat de l etablissement universite Bourgogne Franche-comotepreparee a l institut Utinam.

Girard,M.-C.,Walter,C.,Rémy,J.-C.,Berthelin,J.,Morel,J.-L.,2011.Solset environnement:2eédition. Dunod.

Carvalho.F.P. 2017. Pesticides, environment, and food safety. Food and Energy Security, 6,48–60.

Chairat A.,(2015. Etude Experimentale Et Modelisation PourLeTraitementThermique DuSysteme "Dioxyde D'uranium-Resine Epoxydique". Thèse De Doctorat, L'université De Toulouse.p 272.

Recherchegoogle.https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/pollution-et-sante/sols.consulte le 03/07/2019

KhelloutS.(2004-2010):Impactdelapollutionparlepétrolesurlastabilitéstructurelle d'unsol.p13.

Shahid, M., Dumat, C., Pourrut,B.,Abbas, G., Shahid, N., Pinelli, E., 2015. Role ofmetal speciation in lead-induced oxidative stress to Vicia faba roots. Russ. J. PlantPhysiol.62, 448–454.

Geissen,V.,Mol,H.,Klumpp,E.,Umlauf,G.,Nadal,M.,vanderPloeg,M.,vandeZee, S.E.A.T.M. & Ritsema, C.J. 2015. Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management. International Soil and Water Conservation Research:3; 57-65.

FAO & ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report. Rome, Italy, food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils.

Oliver, M.A. & Gregory, P.J. 2015. Soil, food security and human health: a review: Soil, food security and human health. European Journal of Soil Science. 66; 257–276.

Yeung.A.T;Chen.L; Tang(Eds).X;2010.Remediationtechnologiesforcontaminatedsites. advaces in environmental geotechnics , Zhejiang Universite Press, Hangzou . 328-369.

USDA. NRCS .2003. Keys to soil taxonomy, 9th edn. United States Department of Agriculture/Government Printing Ofice, Washington, DC .

Verma.S;Kuila.A.2019.Bioremediationofheavymetalsbymicrobialprocess. Environmental Technology & Innovation.14,100369.

Seguin.G;1986.'Terroirs'andpedologyofwinegrowing.Experiential,42, 861–873.

Boruta. B; Lemanowicz. J; Bartkowiak .A. 2016. Variationinbiologicaland physicochemical parameters of the soil affected by uncontrolled landfill sites. Environmental Earth Sciences.75 ,201.

Calvet. R; 2003. Le sol, propriétés et fonctions, tome 1, Constitution et structures, phénomènes aux interfaces. Ed. France Agricole DUNOD.p455.

Adam.S; Edorhe. P ;Totin.H;Koumolou.L; Amoussou. E;Akikokou.K; Boko.M; 2010. Pesticides et métaux lourds dans l'eau de boisson, les sols et les sédiments de la ceinture cotonnière de Gogounou, Kandi et Banikoara (Bénin). International Journal of Biological and Chemical Sciences. 4, 1170-1179.

Devlin, J., Parker, B., 1996. Optimum hydraulic conductivity to limit contaminant flux through cutoff walls. Groundwater 34, 719–726.

Recherche google. https://selecdepol.fr/fiche-technique/vitrification-in-situ. consulte le13/03/2023.

Järup L. 2003. Hazards of heavy metal contamination. British Medical Bulletin, 68, 167–182.

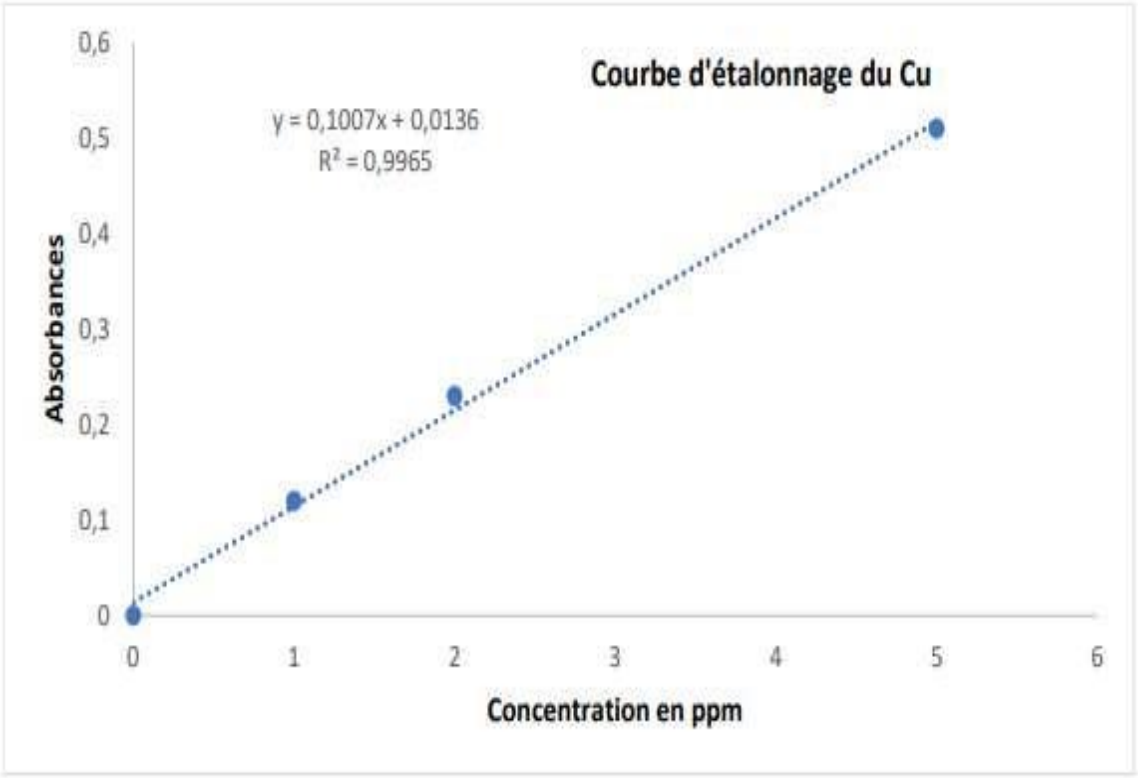
Fischer.U;Schulin.R;Keller.M;.1996:Experimentalandnumericalinvestigationofsoil vapor extraction, Water Resources Research. 32 ,3413-3427.

HILLEL,D.(1974):L'eauetlesol,principesetprocessusphysiques.Ed.VANDER. 256p.

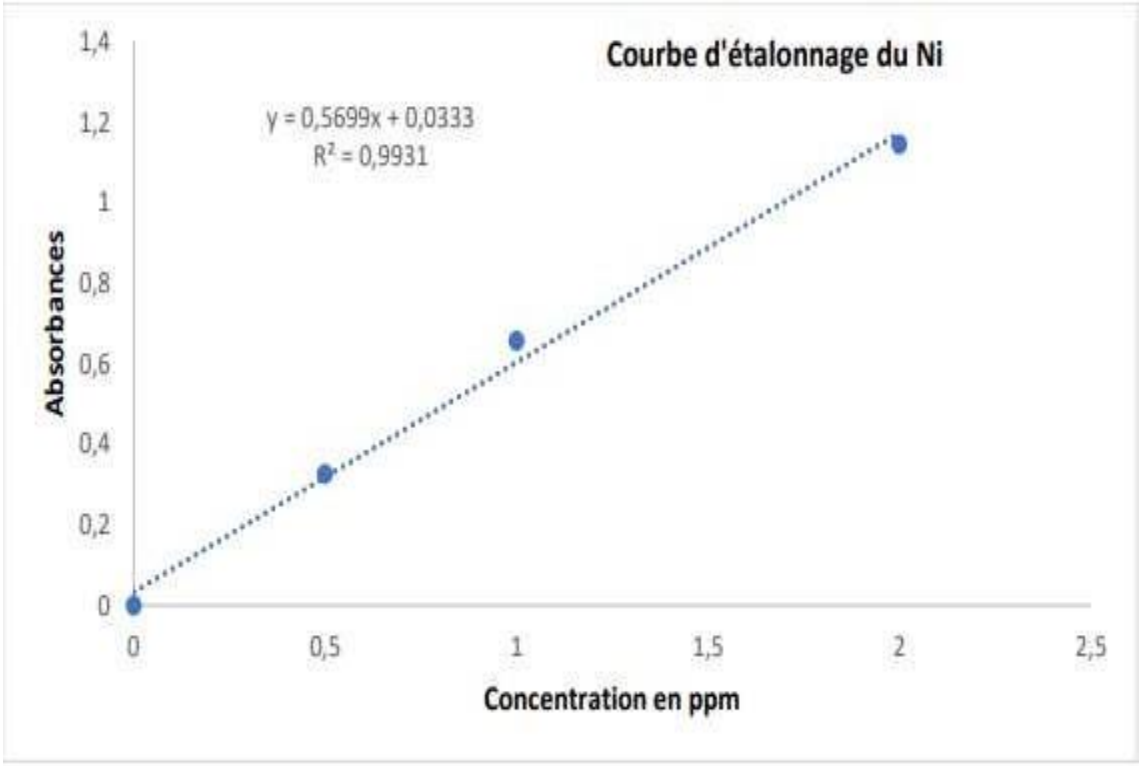
Lanz.J;2004.Soilsandwinequality,Wynland,p53-54.

Shahid,M.,Pourrut,B.,Dumat,C.,Nadeem,M.,Aslam,M.,Pinelli,E.,2014.Heavy-metalinduced reactive oxygen species: phytotoxicity and physicochemical changes in plants. Rev. Environ. Contam. Toxicol. 232, 1–44.

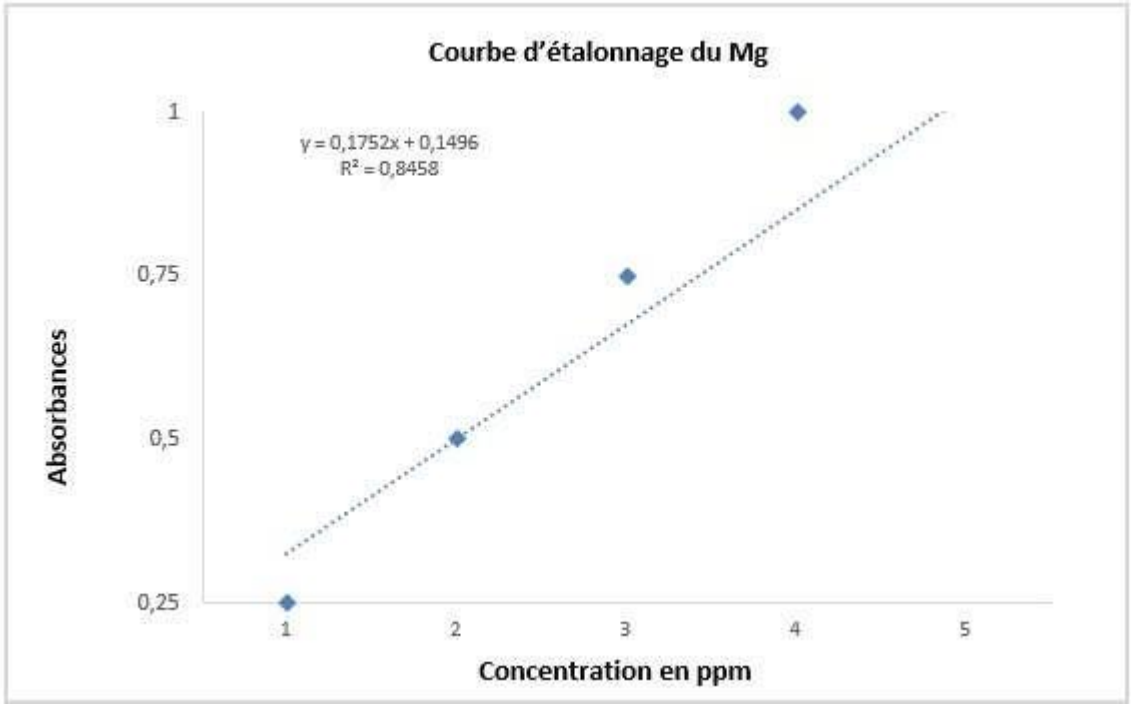
LES ANNEXES



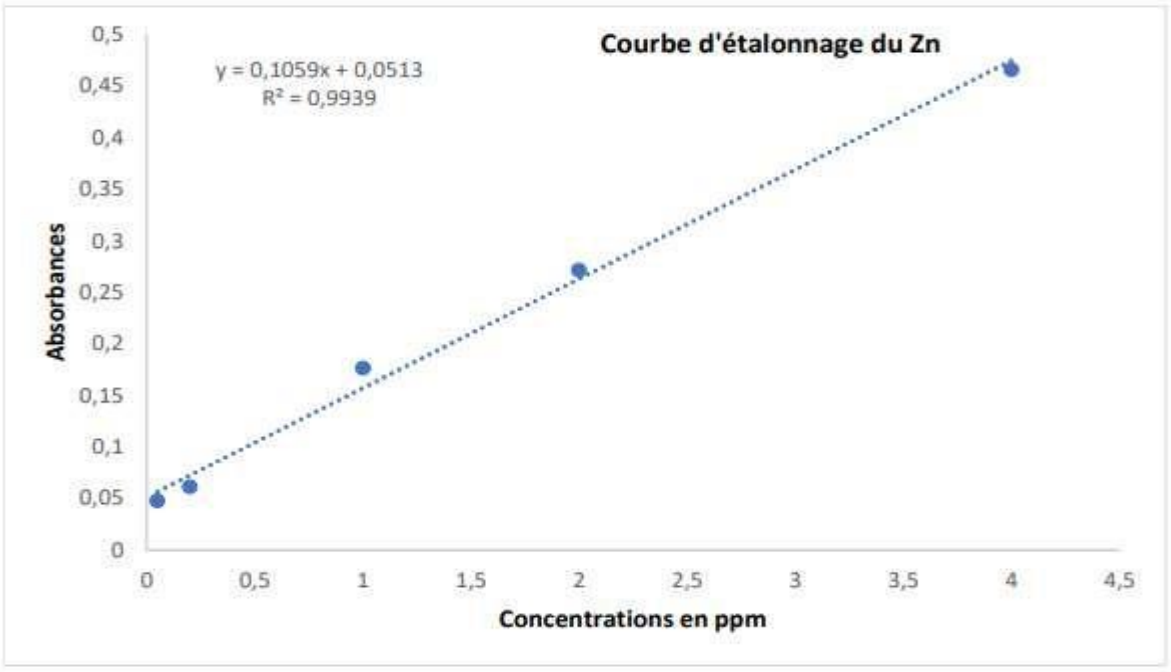
Courbed'étalonnagedecuivre



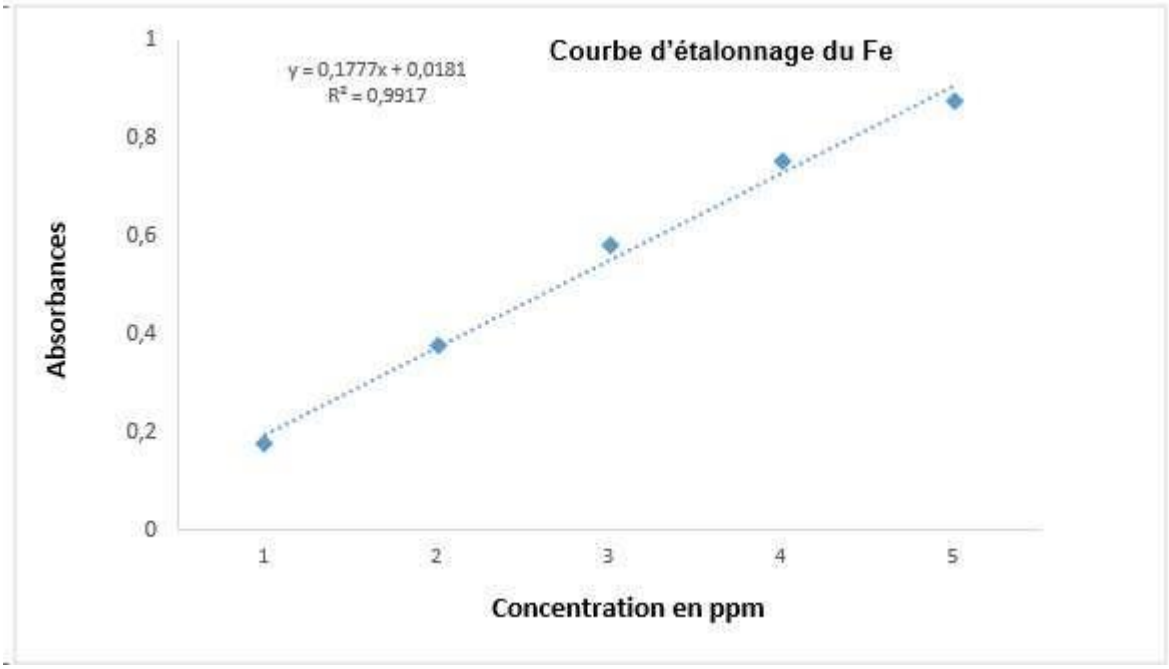
CourbedétalonnagedeNickel



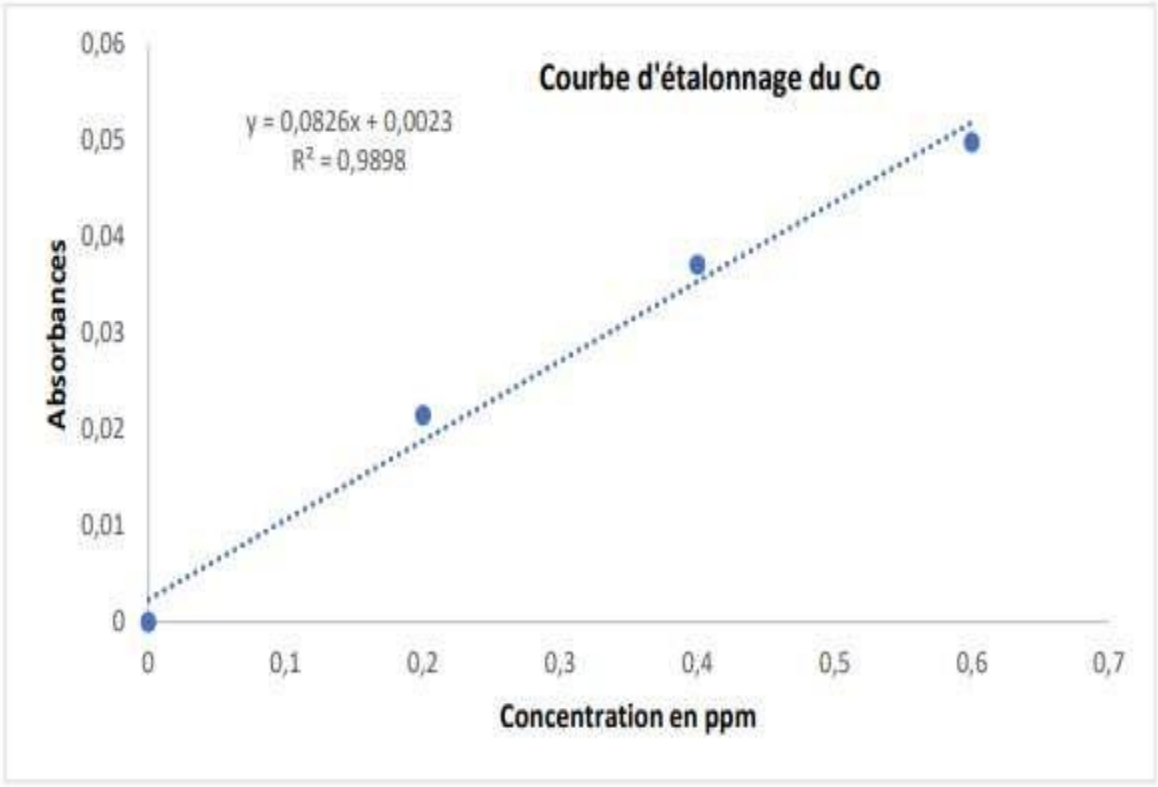
Courbed'étalonnagedemagnésium



Courbed'étalonnagedezinc



Courbed'étalonnagedeFer



Courbed’étalonnagedecobalt