



**UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA - BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DES MINES ET GEOLOGIE**

*Mémoire de Master*

*Présenté par*

*SAHNOUNE Rachid*

**En vue de l'obtention du Diplôme de Master en  
Mines et géologie  
Option : Valorisation des Ressources  
minérales**

Thème

*Analyse et Caractérisation physico-chimique des Sols  
d'Entreposage de la station de Pétrole (Bejaia)*

Soutenu le 25/ 06 /2014

Encadreur: K.MOUSSACEB

Co-Encadreur : D.BELLACH

Membre de jury : A.H.BOUKEROUI

L.TAKOURABET

*Année Universitaire: 2013-2014*

## Remerciement

*Ce mémoire ne serait pas ce qu'il est sans la collaboration, l'aide et le soutien de nombreuses personnes. Il m'a permis de vivre une expérience très enrichissante au niveau professionnel et humain.*

*Tout d'abord Dieu merci pour m'avoir donné les critères qu'il faut (courage, patience, santé et volante) que sans lesquels ce travail n'aurait pas été mis au point.*

*Qu'il me soit permis d'exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont apporté soutien, conseils et assistance afin d'aboutir à la réalisation de ce mémoire.*

*Je tiens vivement à remercier Monsieur, Karim MOUSSACEB Maître de conférences à l'université de Bejaia, d'avoir accepté de m'encadrer. Je le remercie infiniment pour sa patience, sa compréhension, sa disponibilité, son aide indispensable ainsi que la liberté qui ma donner afin d'exploiter et d'employer mes capacité au complet et qui ont rendu ce travail concret.*

*Mes vifs remerciements à Mr, BOUKEROUI A.Hamid pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de ma soutenance. Je tiens également à remercier le membre du jury qui a pris la peine d'examiner ce travail à savoir Mme TAKOURABET Lynda.*

*Un grand remerciement pour Mlle BELLACH Dihia pour son grand aide pour ce mémoire, ses explications, sa présence, sa disponibilité, sa compréhension comme une grande sœur pour moi*

*Je remercie Mr BELLEBCHOHE Cherif pour sa contribution à la réalisation de ce mémoire*

*Je tiens à remercier aussi Mr. MERABET Djoudi de M'avoir donné un si grand bagage que long de ma formation de cinq an concernant la pensée scientifique*

*Je remercie aussi Mr. ARKOUB Hamid pour ces divers conseils méthodologiques qui m'ont beaucoup aidé*

*Je tiens à remercier aussi (Mme SOUCI, Mme MALEK, Mme BOUZIDI, Mr MAZA, Mr AKDIM, Mr JAMAA, Mr AIT HABIB, Mr TARIKET ainsi que l'ensemble de mes enseignants)*

*Je remercie vivement les techniciennes Mlle AYAD, Mlle RABHI, Mme MOUSSACEB et aussi le technicien du laboratoire de G.C (JAMEL)*

*Je remercie et je dédie ce mémoire à mes parents dont je suis le fruit de leurs sacrifices et à mes frères et sœurs qui avaient été les ailes avec lesquels j'ai pu voler et prendre le droit chemin et je remercie ma famille pour leurs compréhensions et leurs patience et d'avoir pu me supporter et de ne pas avoir craqué aux moments voulu, et je remercie particulièrement mon frère Karim qui avait été comme une deuxième moitié de moi-même.*

*Je tiens à remercier toute ma classe de Mater II sans exception pour leurs présences et les bons moments qu'on avaient passés ensemble durant ces cinq ans et plus précisément cette année*

*Et je tien aussi a remercié la section des Master I qui ont été comme des frères à nous, et je tien à faire un remerciement exceptionnel pour Rima, Lyla, Kawtar, Karim, Miloud, Issam, Sadek, Rabeh,...etc, et je fais un remerciement assez spécial pour Mlle MEDJBER Hayet qui avait été comme une souer pour moi avec ces idée, ces conseils, ca compréhensions.*

*Enfin, je serai coupable d'oublier dans ces remerciements mes amis du lycée (3Exp2), Fares CHETTOUH (Ammi Essaid), Yanni le Selfy, Awris le Gladiateur, Batich Jackson, Moustafa Geek, Zahir Ticket, KIKI, Bilala le vieu amazigh, Bernard, la J106 et 104...etc. Et je remercie aussi du côté des filles Sira james, Samira, Dania, Wafa, Kahina, Fatima, Didou, Dadou, Didouh, Samou,...etc. (mais la place manque pour citer tout le monde) qui ont contribué à me donner un air convenable pour mieux avancé dans mon mémoire. Finalement, j'exprime ma profonde reconnaissance envers tous ceux et celles qui m'ont encouragé et soutenu de près ou de loin durant la réalisation de ce travail.*

*A tous, merci !!!!!*

## Sommaire

Remerciement

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des sigles, symboles et abréviations

### INTRODUCTION GENERALE

|   |   |
|---|---|
| CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....                  | 1 |
| I.1. GENERALITE SUR LES SOLS .....                          | 1 |
| I.1.1. Définition du sol .....                              | 1 |
| I.1.2. Diverses phases du sol .....                         | 1 |
| I.1.2.1. Phase liquide du sol .....                         | 1 |
| I.1.2.2. Phase gazeuse du sol.....                          | 2 |
| I.1.2.3. Phase solide du sol.....                           | 2 |
| I.1.2.3.1. Eléments grossiers .....                         | 2 |
| I.1.2.3.2. Terre fine.....                                  | 2 |
| I.1.3. Fractions constitutives du sol .....                 | 3 |
| I.1.3.1. Fractions minérales.....                           | 3 |
| I.1.3.2. Fractions organiques.....                          | 3 |
| I.1.4. Différents horizons d'un sol .....                   | 4 |
| I.2. CARACTERISTIQUES ET PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS..... | 5 |
| I.2.1. Propriétés physiques du sol.....                     | 5 |
| I.2.1.1. Structure.....                                     | 5 |
| I.2.1.2. Texture.....                                       | 6 |
| I.2.1.2.1. Perméabilité du sol à l'eau et à l'air.....      | 6 |
| I.2.1.2.2. Rétention de l'eau .....                         | 6 |
| I.2.1.3. Porosité.....                                      | 6 |
| I.2.1.4. Connectivité.....                                  | 6 |
| I.3. POLLUTION DES SOLS.....                                | 6 |
| I.3.1. Problématique liée aux sites et sols pollués.....    | 6 |
| I.3.2. Divers types de pollutions.....                      | 7 |
| I.3.2.1. Pollution organique.....                           | 7 |
| I.3.2.2. Pollution minérale (métaux lourds) .....           | 8 |

|  |    |
|--|----|
| I.3.2.2.1. Les métaux lourds .....   | 8  |
| I.3.2.2.2. Métaux lourds dans les sols .....   | 8  |
| I.3.2.2.3. Spéciation chimique des métaux lourds dans les sols.....                  | 8  |
| I.3.2.2.4. Origines des métaux dans les sols.....                                    | 9  |
| I.3.2.2.5. Sources naturelles de contamination.....                                  | 10 |
| I.3.2.2.6. Sources anthropiques de contamination.....                                | 10 |
| I.3.2.3. Devenir des métaux lourds dans les sols .....                               | 11 |
| I.3.2.4. Comportement des métaux lourds dans le sol .....                            | 11 |
| I.3.2.4.1. Cas du plomb .....  | 11 |
| I.3.2.4.2. Cas du zinc .....   | 12 |
| I.3.2.4.3. Cas du chrome.....  | 12 |
| I.3.2.4.4. Impact des métaux lourds sur l'environnement et sur la santé .....        | 12 |
| I.4. STABILISATION/SOLIDIFICATION.....   | 13 |
| I.4.1. Principe de la stabilisation/solidification .....                             | 13 |
| I.4.2. Mécanismes d'immobilisation des contaminants .....                            | 14 |
| I.4.2.1. Encapsulation.....  | 14 |
| I.4.2.2. Sorption .....  | 15 |
| I.4.2.3. Oxydation/réduction .....   | 15 |
| I.4.2.4. Dissolution/précipitation .....   | 15 |
| I.4.3. Stabilisation/solidification par des liants hydrauliques.....                 | 15 |
| I.4.3.1. Incorporation de déchets dans les matrices ciment .....                     | 15 |
| I.4.3.2. Liants hydrauliques.....  | 16 |
| I.4.3.3. Origine des ciments.....  | 16 |
| I.4.3.4. Type des ciments.....   | 16 |
| I.4.3.5. Hydratation du ciment Portland.....   | 17 |
| CHAPITRE II. ECHANTILLONAGE, FORMULATIONS ET PROTOCOLES<br>EXPERIMENTAUX.....        | 19 |
| II.1. PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS .....   | 19 |
| II.2. PREPARATIONS DES ECHANTILLONS AVANT L'ANALYSE.....                             | 20 |
| II.2.1. Homogénéisation et quartage : .....  | 20 |
| II.3. CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES.....  | 21 |
| II.3.1. Granulométrie par tamisage, norme AFNOR NF X31-101 .....                     | 21 |
| II.3.2. Détermination de l'humidité résiduelle, norme AFNOR NF X 31-102 (1992) ..... | 22 |

|                                       |  |    |
|---------------------------------------|--|----|
| II.3.3.                               | Détermination du pH, norme AFNOR NF X31-103 (1992)                           | 22 |
| II.3.4.                               | Mesure de la conductivité électrique   | 23 |
| II.3.5.                               | Détermination de la quantité de bleu de méthylène                            | 24 |
| II.3.6.                               | La diffraction des Rayons X  | 26 |
| II.3.7.                               | Spectrométrie infrarouge   | 27 |
| II.4.                                 | TENEURS EN METAUX LOURDS/EXTRACTIONS DES METAUX LOURDS                       | 28 |
| II.4.1.                               | Test TCLP  | 28 |
| II.5.                                 | LES DIFFERENTES ANALYSES EFFECTUEES SUR LES LIXIVIATS                        | 29 |
| II.6.                                 | METHODES D'ANALYSES  | 29 |
| II.6.1.                               | Méthodes titrimétriques  | 29 |
| II.6.2.                               | La spectrométrie d'absorption atomique                                       | 30 |
| II.6.3.                               | Spectrométrie d'absorption UV-Visible  | 31 |
| II.7.                                 | STABILISATION/SOLIDIFICATION AU LIANT HYDRAULIQUE                            | 32 |
| II.7.1.                               | Détermination des résistances mécaniques                                     | 33 |
| II.7.1.1.                             | Résistance à la flexion  | 34 |
| II.7.1.2.                             | Résistance à la compression  | 34 |
| II.8.                                 | TEST DE LIXIVIATION TCLP SUR MONOLITHE ET ANALYSE PAR DIFFRACTION AU RAYON-X | 35 |
| CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION |  | 36 |
| III.1.                                | CARACTERISATION DU SOL   | 36 |
| III.1.1.                              | Echantillonnage  | 36 |
| III.1.2.                              | Résultats de l'analyse granulométrique                                       | 37 |
| III.1.2.1.                            | Variation du rendement pondérale en fonction de la granulométrie             | 37 |
| III.1.2.2.                            | Courbe granulométrique   | 38 |
| III.1.2.3.                            | Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité)                              | 40 |
| III.1.2.4.                            | Coefficient de courbure  | 41 |
| III.1.3.                              | Analyse physico-chimique   | 42 |
| III.1.4.                              | Valeur de bleu de méthylène (VBS), exprimé en $\text{cm}^3/\text{g}$         | 43 |
| III.1.5.                              | Résultats de la spectroscopie Infrarouge                                     | 43 |
| III.1.6.                              | Composition minéralogique du sol   | 45 |
| III.1.7.                              | Résultats des tests de lixiviations  | 48 |
| III.1.7.1.                            | Teneurs en sulfates  | 48 |
| III.1.7.2.                            | Teneurs en chlorure  | 49 |
| III.1.7.3.                            | Teneurs en plomb   | 49 |

|  |    |
|--|----|
| III.1.7.4. Teneurs en nickel .....                               | 50 |
| III.2. Caractérisation des matériaux stabilisés/solidifiés ..... | 50 |
| III.2.1. Essais mécaniques .....                                 | 50 |
| III.2.2. Diffractogrammes DRX des matériaux S/S.....             | 52 |
| III.2.3. Résultats du test TCLP après S/S .....                  | 55 |
| III.2.3.1. Teneur en plomb.....                                  | 55 |
| III.2.3.1.1. Taux de rétention du plomb .....                    | 56 |
| III.2.3.2.Teneur en Nickel .....                                 | 56 |
| III.2.3.2.1.Taux de rétention du nickel.....                     | 57 |

## CONCLUSION GENERALE

Références bibliographique

Résumé

## **LISTE DES SIGLES, SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS**

### **Caractères Grecs**

**$\Theta$**  : Angle D'incidence Des Rayons

**$\Lambda$**  : longueur d'onde des rayons

**$\nu$**  : Nombre d'onde

### **Caractères Latins**

**A** : Absorbance

**MO** : Matière Organique

**$\theta_t$**  : Porosité Total

**pH**: Potentiel Hydrogène

**H** : taux d'Humidité

**Vs** : Volume Solide

**Va** : Volume Apparent

**VBS** : Valeur Bleu Solide

**$A^\circ$**  : Unité De Distance Entre Deux Plans Cristallographiques

**$R_c$** : Résistance a la Compression

**$R_f$** : Résistance a la Flexion

### **Sigles**

**HAP** : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

**HDP** : Hydrocarbures, Diphényles Poly-Chlorés

**BETX** : Benzène/Ethyle-benzène/Toluène/Xylène

**USDA**: United State Department of Agriculture

**S/S** : Stabilisation/Solidification

**NF** : Norme Française

**ASTM**: American Society for Testing and Materials

**FTIR** : Infrarouge à Transformée de Fourier

**TCLP**: Toxicity Characteristic Leaching Procedure

**EDTA**: éthylène diamine tétracétique acide

**SAA** : Spectroscopie D'adsorption Atomique

**UV** : Ultra-Violet

**DRX** : Diffraction Des Rayons X



## Liste Des Tableaux

|  |    |
|--|----|
| CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....   | 1  |
| Tableau I.1 : Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie .....                | 10 |
| Tableau I.2 : Les symptômes et maladies causés par les métaux lourds .....                   | 13 |
| Tableau I.3 : Les divers résultats de la clinkérisation des matières minérales .....         | 17 |
| Tableau I.4 : Proportion des principaux produits d'hydratation du ciment Portland .....      | 18 |
| <br>   |    |
| CHAPITRE II. ÉCHANTILLONNAGE, FORMULATIONS ET PROTOCOLES<br>EXPERIMENTAUX .....              | 19 |
| Tableau II.1. Localisation Géographique .....  | 20 |
| Tableau II.2. Calcul des pourcentages des fractions passantes (refus), pour M = 1000 g. .... | 22 |
| Tableau II.3 : la valeur du bleu de méthylène associé à chaque type de sol .....             | 24 |
| Tableau II.4. Différentes analyses effectuées sur le lixiviat. ....                          | 29 |
| Tableau II.5 Formulation utilisée dans le procédé de S/S.....                                | 33 |
| <br>   |    |
| CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION .....  | 36 |
| Tableau III.1 Les coefficients de courbures et d'uniformités (Cc/Cu).....                    | 42 |
| Tableau III.2. Résultats physico-chimiques obtenus après caractérisation du sol .....        | 43 |
| Tableau III.3 Valeur de bleu de méthylène (VBS).....   | 44 |
| Tableau III.4. Analyse des spectres IR des cinq échantillons de sol étudié. ....             | 46 |
| Tableau III.5. Phases identifiées pour les différents échantillons de sol.....               | 49 |
| Tableau III.6 Valeur des essais mécaniques en .....  | 52 |
| Tableau III.8 Taux de rétention du plomb.....  | 57 |
| Tableau III.9 Taux de rétention du nickel .....  | 58 |

## Liste Des Figures

|  |    |
|--|----|
| CHAPITRE I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....   | 1  |
| Figure I.1 : Représente de manière simplifiée l'influence de quelques paramètres sur les facteurs de pédogenèse.....                       | 5  |
| <br>   |    |
| CHAPITRE II. ECHANTILLONAGE, FORMULATIONS ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX.....   | 19 |
| Figure II.1. Points de prélèvements.....   | 20 |
| Figure II.2. Méthode du Quartage .....   | 21 |
| Figure II.3 Essai au Bleu de Méthylène .....   | 25 |
| Figure II.4 : Illustration de la loi de Bragg et de l'indexation des pics : association d'un pic de diffraction et d'un plan (hkl). .....  | 27 |
| Figure II.5. Schéma de principe d'analyse par spectroscopie infrarouge. ....   | 28 |
| Figure II.6. Les instruments de base pour la spectrométrie d'absorption atomique. ....   | 31 |
| Figure II.7. schéma de principe d'un spectrophotomètre d'absorption UV-visible.....  | 32 |
| <br>   |    |
| CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION .....  | 36 |
| Figure III.1. Le principe du quartage suivi afin d'arriver à un échantillon représentatif.....   | 36 |
| III.1.2.2. Courbe granulométrique.....   | 39 |
| Figure III.2. Variation du rendement pondéral en fonction des classes granulométriques obtenues par tamisage des échantillons de sol. .... | 39 |
| Figure III.3. Evolution des refus et des tamisât en fonction des ouvertures des tamis des échantillons du sol. ....                        | 41 |
| Figure III.4. Résultats de la Spectroscopie Infra-rouge de nos échantillons de sol .....   | 46 |
| Figure III.5. Les Diffractogrammes des Echantillons De Sol .....   | 48 |
| Figure III.6. La superposition des diffractogrammes des échantillons du sol.....   | 48 |
| Figure III.7. Evolution des concentrations des sulfates en fonction de type d'échantillon.....   | 50 |
| Figure III.8. Evolution des concentrations des chlorures en fonction de type d'échantillons. ....  | 50 |
| Figure III.9. Evolution des concentrations du plomb en fonction de type d'échantillon.....   | 51 |
| Figure III.10. Evolution des concentrations du nickel en fonction de type d'échantillon. ....  | 51 |
| Figure III.11. Résistance à la Flexion .....   | 52 |
| Figure III.12. Résistance à la Compression.....  | 52 |
| Figure III.13. les diffractogrammes des échantillons de sol S/S .....  | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Figure III.14. La superposition des diffractogrammes des échantillons du sol en question ....                      | 56 |
| Figure III.15. Comparaison des diffractogrammes obtenus avant et après S/S de différents échantillons de sol ..... | 56 |
| Figure III.16. Les résultats obtenus pour les concentrations du plomb après S/S du sol.....                        | 57 |
| Figure III.17 Les résultats obtenus pour les concentrations du nickel après S/S du sol .....                       | 58 |

## INTRODUCTION GENERALE

L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux. A l'échelle microscopique, les métaux lourds ont aussi des effets néfastes sur les populations bactériennes (microorganismes), ce qui n'est pas sans conséquence sur le fonctionnement de l'écosystème. [1]

Il est donc primordial non seulement de mieux connaître les facteurs essentiels contrôlant la mobilité et la biodisponibilité des polluants dans les sols, mais aussi de développer des solutions de réhabilitation efficaces et durables visant à limiter les risques liés à la pollution métallique et à restaurer et à préserver les ressources en sols.

Parmi les différentes substances polluantes pouvant se retrouver dans les sols suite à diverses activités humaines (c.-à-d. de sources anthropiques), les métaux lourds ont reçu une attention particulière en termes d'accumulation dans les sols et les sédiments, d'absorption par les plantes et de contamination des eaux souterraines. Par ailleurs, à l'inverse des contaminants organiques, les métaux lourds ne sont pas dégradés ou éliminés par les mécanismes naturels. En outre, leur temps de résidence dans les sols (c.-à-d. leur persistance) semble nettement plus grand que dans les autres compartiments de la biosphère (hydrosphère, atmosphère) voire même permanent.

Le sol doit être protégé en tant que ressource naturelle car il contient des substances essentielles au maintien des écosystèmes et des populations humaines, tels les minéraux essentiels, l'eau et les éléments traces. De plus, il agit comme tampon lors du transport de substances polluantes entre l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Par ailleurs, le sol peut servir de réservoir pour les substances polluantes en accumulant et concentrant ces substances à des niveaux largement supérieurs aux concentrations retrouvées dans l'eau interstitielle. [2]

Dans cette optique, une méthodologie d'évaluation d'impact de pollution par métaux lourds du sol étudié a été suivie et un mode de traitement par le procédé de la stabilisation /solidification à base de liant hydraulique a été proposé et qui consiste à mélanger le sol contaminé avec un liant hydraulique le rendant ainsi plus stable.

Pour atteindre ces objectifs de recherche, notre mémoire est subdivisé en trois chapitres à savoir:

Le premier chapitre, sera consacré à la présentation d'une revue bibliographique sur le sol et ces composants, la pollution de sol, types et propriétés physico-chimiques des polluants.

Alors que le deuxième chapitre, sera consacré à la présentation de l'ensemble des protocoles expérimentaux, la méthodologie suivie dans la caractérisation du sol et le traitement de ce sol par le procédé de stabilisation/solidification.

Dans le troisième chapitre nous présenterons l'ensemble de nos résultats et leurs interprétations, et on termine par une conclusion générale.

## CHAPITRE I. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

### I.1. GENERALITE SUR LES SOLS

Les sols sont des systèmes multiphasiques complexes et hétérogènes, composés d'air, d'eau et de solide (sable, limon, argile, matière organique (MO), nutriments, écosystèmes,...etc.) en outre, les sols sont des médias ouverts et dynamiques, échangeant de la matière et de l'énergie avec l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère [3], ils doivent accomplir cinq fonctions principales de base :

- ❖ Offrir un habitat physique, chimique et biologique pour les organismes vivants;
- ❖ Réguler les flux d'eau, le stockage et le recyclage des cycles des nutriments et d'autres éléments;
- ❖ Maintenir les activités et diversités biologiques pour subvenir à la croissance des plantes et la productivité des animaux;
- ❖ Filtrer, tamponner, transformer, immobiliser et détoxifier les substances organiques et inorganiques;
- ❖ Fournir un support mécanique aux organismes vivants et à leurs structures [4].

#### I.1.1. Définition du sol

Le sol est la couche superficielle meuble de la lithosphère terrestre, présentant une épaisseur variable de quelques centimètres à plusieurs mètres. Il est constitué par un mélange de matériaux minéraux et organiques, qui sert de support et milieu naturel pour la croissance des plantes [5,6]. Qui est dénommée couverture pédologique, est la résultante au cours du temps de plusieurs facteurs génétiques :

- ❖ La roche-mère sur laquelle s'est développé;
- ❖ Environnementaux tels que le climat, le relief et la végétation [7-9].

#### I.1.2. Diverses phases du sol

##### I.1.2.1. Phase liquide du sol

La phase liquide du sol est souvent désignée par le terme « solution du sol », occupe une partie plus ou moins importante de la porosité du sol, est constituée d'eau où se trouvent diverses substances organiques et minérales dissoutes et des particules en suspension.

La composition de la solution du sol varie selon :

- ☞ Le climat,
- ☞ Les apports anthropiques (fertilisants, produits de traitement phytosanitaire...etc.)

☞ L'activité biologique du sol (exsudats racinaires, produits de synthèse et de dégradation microbienne ...etc.).

### **I.1.2.2. Phase gazeuse du sol**

Dans un sol bien aéré, les gaz qui règnent dans l'atmosphère du sol sont :

- ❖ L'azote (78 à 80%) ;
- ❖ L'oxygène (18 à 20%) ;
- ❖ Le dioxyde de carbone (0,2 à 3%).

D'autres molécules gazeuses d'origine anthropique telles que les pesticides ou les HAP peuvent également être détectées dans l'atmosphère du sol. Ces gaz peuvent exister dans le sol :

- ❖ Soit à l'état libre;
- ❖ Soit dissous dans la solution du sol.

Cependant, dans certaines conditions (d'hydro-morphie par exemple), la phase gazeuse peut être absente ; tout l'espace poral du sol est alors occupé par l'eau et le sol est dit saturé [7, 10-12].

### **I.1.2.3. Phase solide du sol**

La phase solide du sol est en général majoritairement minérale qui comprend :

#### **I.1.2.3.1. Eléments grossiers**

Ce sont les éléments > 2mm et on les classe par dimensions :

- 0,2 cm à 2 cm : graviers ;
- 2 à 5 cm : cailloux ;
- 5 à 20 cm : pierres ;
- > 20 cm : blocs.

Leur expression se fait en pourcentage, qu'on donne sur le terrain en fonction du volume et en laboratoire en fonction de la masse (sur un échantillon de sol, au laboratoire, on estime le pourcentage après passage au tamis de 2mm).

#### **I.1.2.3.2. Terre fine**

La terre fine est la fraction de terre qu'il reste lorsqu'on retire les éléments grossiers (donc < 2 mm, au tamis). On peut classer les éléments de la terre fine par dimensions :

- 2mm à 0,2 mm : sable grossiers ;
- 0,2 mm à 50  $\mu$ m : sable fins ;
- 50  $\mu$ m à 20  $\mu$ m : limons grossiers ;
- 20  $\mu$ m à 2  $\mu$ m : limons fins ;
- < 2  $\mu$ m : argiles.

Elle comprend aussi une fraction organique dont le taux varie selon le type de sol et les conditions de pédogenèse. Les sols cultivés présentent des taux de matière organique compris dans une gamme allant de moins de 1% à 20% de la masse du sol [12].

### **I.1.3. Fractions constitutives du sol**

Le sol contient deux fractions intervenant principalement dans la sorption des polluants à savoir les fractions organiques et minérales.

#### **I.1.3.1. Fractions minérales**

Il existe trois catégories majoritaires dans le sol :

➤ **Les silicates** sont des oxydes de silice qui ont des structures très diverses (Unités isolées (olivine  $(\text{Fe}, \text{Mg})_2 [\text{SiO}_4]$ ); Chaîne (pyroxène  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{SiO}_3)_2$ ) ; Feuillet (smectite) et sont souvent associés à des cations métalliques tels que l'aluminium, le fer ou le magnésium.

➤ **Les oxydes, oxy-hydroxydes et hydroxydes** les plus importants et les très abondants dans les sols sont :

La gibbsite (oxyde d'aluminium  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), La goethite et l'hématite (oxydes de fer  $(\text{FeO-OH})$ ,  $(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ ), la birnessite et la lithiophorite (oxydes de manganèse).

➤ **Les carbonates** les plus abondants sont les carbonates de calcium (Calcite) et les carbonates de magnésium (Dolomite  $(\text{Ca}, \text{Mg}) (\text{CO}_3)_2$ ).

Ceux-ci peuvent Co-précipiter avec d'autres métaux (exemple : calcite magnésienne) ou former un revêtement sur d'autres minéraux (coating) en changeant ainsi leurs propriétés de surfaces [13].

#### **I.1.3.2. Fractions organiques**

En ce qui concerne la matière organique ou phase organique du sol, elle correspond à tout ce qui est constitué de carbone organique, qu'il soit vivant ou non vivant (insectes, plantes, humus, microorganismes...etc.).

L'humus est un terme qui regroupe l'ensemble de la matière organique non vivante du sol et qui peut être classé en deux catégories :

➤ **Substances non humiques**

Correspondent à la fraction de matière organique dont les caractéristiques biophysicochimiques sont reconnaissables (exemple : les hydrates de carbone, les protéines, les acides aminés, les lipides,...etc.).

➤ **Substances humiques**

Sont issues de la transformation chimique ou biologique (altération, polymérisation,...etc.) de la matière organique du sol [14].



#### I.1.4. Différents horizons d'un sol

Un sol est une pellicule d'altération recouvrant une roche, il est formé d'une fraction minérale et de matières organiques (l'humus). Les processus d'altération, d'humidification et de différenciation aboutissent à l'apparition de couches superposées plus ou moins distinctes et différentes selon la texture, la structure et la composition chimique.

Ces différentes couches correspondent aux horizons dont l'ensemble constitue le profil du sol.

Ces horizons peuvent être déclinés en différents sous horizons en fonction du type de sols rencontrés. On distingue quatre horizons majeurs [15]:

☛ **L'horizon A** est un horizon majeur occupant la partie supérieure du profil (0-30 cm) et présentant une quantité importante de matière organique et une faible quantité en argile, fer et aluminium. Cette matière organique provient des plantes en phase de décomposition.

☛ **L'horizon S** situé au-dessous de A (50-90 cm) est le lieu d'altération des minéraux primaires, de libération d'oxyhydroxydes de fer, de décarbonatation, etc.

☛ **L'horizon B** est situé au-dessous de S (90-150 cm), il est caractérisé par des teneurs en argile, fer et humus plus élevées que les horizons A, S et C. Cet enrichissement peut être dû soit à des transformations des minéraux préexistants, soit à des apports illuviaux. La matière organique présente dans cet horizon est plus âgée et provient de l'horizon supérieur (A). Elle est adsorbée sur les argiles et les oxydes de fer et d'aluminium.

☛ Enfin **l'horizon C** situé au-dessous de B (en dessous de 150 cm) est un horizon minéral avec une faible teneur en matière organique.

Les facteurs de différenciation de la couverture pédologique sont :

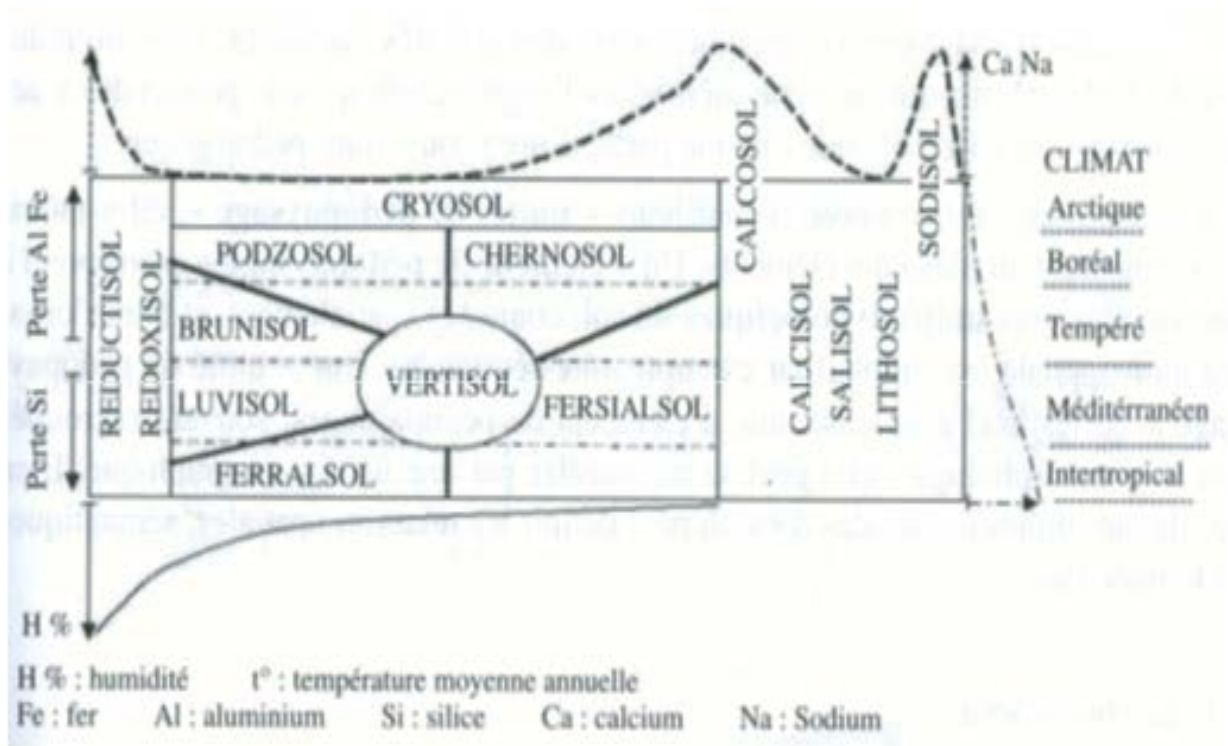
- Les formations superficielles,
- Le matériau dans lesquels la pédogenèse se développe,
- Le relief,
- La géomorphologie,
- La végétation,
- La faune,
- Les diverses activités humaines,
- L'énergie apportée au système par le soleil (chaleur),
- La terre (la gravité),

Mais aussi par la biologie (végétation, faune) et enfin la durée d'évolution.

Les effets du climat constituent un facteur de différenciation important sur la structure des différents sols. En effet, en fonction des températures et de l'humidité on verra apparaître des sols différents :

- ✓ Cryosols (zones froides),
- ✓ Ferralsols (zones chaudes).

Elle contient aussi des quantités en protéines et des fragments d'hydrates de carbone, des composés aminés, phénoliques ou aromatiques issus de l'activité biologique.



**Figure I.1 :** Représente de manière simplifiée l'influence de quelques paramètres sur les facteurs de pédogenèse [15].

## I.2. CARACTERISTIQUES ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DES SOLS

### I.2.1. Propriétés physiques du sol

#### I.2.1.1. Structure

La structure d'un sol est l'assemblage, à un moment donnée, de ses constituants solide. La stabilité structurale dépend de la matière organique des sols.

Le complexe argilo-humique joue un rôle structurale, ce rôle est plus ou moins important selon les teneurs en eau du sol et varie en fonction du type d'argile. La matière organique augmente la stabilité des agrégats. Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol, les échanges gazeuses entre le sol et l'atmosphère. Une bonne structure va assurer une grande facilité de circulation d'eau, donc laisse s'écouler l'excès, assure une bonne aération des racines, une bonne germination, une pénétration

profondes des racines et une bonne exploration par les racines des ressources nutritives du sol [16].

### **I.2.1.2. Texture**

La texture du sol est à la base de toutes les autres propriétés, c'est la propriété du sol qui traduit de manière globale la composition granulométrique de la terre fine [17].

La texture constitue un caractère fondamental du sol, car elle influe sur :

#### **I.2.1.2.1. Perméabilité du sol à l'eau et à l'air**

La perméabilité est indépendante du taux de la matière organique. Le critère retenu pour mesurer la perméabilité est la vitesse de percolation de l'eau exprimée en  $\text{Cm}^3/\text{h}$ . Le taux élevé de la matière organique n'implique pas forcément une bonne perméabilité [18]. Cependant, son degré de décomposition a une influence sur cette dernière ; plus la matière organique est décomposée, plus la perméabilité est faible et vice-versa.

#### **I.2.1.2.2. Rétention de l'eau**

Sous forme de vapeur ou liquide, l'eau occupe environ un quart du volume d'un sol, quand ce dernier est saturé, l'eau qui percole à travers une tranche du sol le fait sous l'influence de la gravité [19]. La teneur en air est complémentaire de la teneur en eau, puisque ces deux fluides se partagent l'espace poreux [20].

$$\text{Porosité totale}(\% \text{ vol}) = \text{humidité}(\%) + \text{teneur en air}(\%) \dots \dots \dots \text{Eq(I.1)}$$

#### **I.2.1.3. Porosité**

La porosité d'un sol est une grandeur physique qui exprime le rapport entre le volume occupé par ses pores et son volume totale.

Considérons un échantillon de matériau terreux. Soient  $v_a$  le volume total de cet échantillon qui est qualifié d'apparent puisque c'est le volume qui est directement aperçu et  $v_s$  le volume occupé par les particules du sol. La porosité totale  $\theta_t$  est définie par l'équation [21]:

$$\theta_t = 1 - v_s / v_a \dots \dots \dots \text{Eq(I.2)}$$

#### **I.2.1.4. Connectivité**

Elle exprime l'importance des connexions entre les pores qui est un déterminant de la continuité de la phase gazeuse, donc de l'écoulement de l'air. [22]

## **I.3. POLLUTION DES SOLS**

### **I.3.1. Problématique liée aux sites et sols pollués**

Mines, usines sidérurgiques, métallurgiques, pétrochimiques, combustions de matière carbonée, usines à gaz, décharges sauvages, traitement du bois, activités domestiques...etc.

Nombreuses sont les activités humaines qui durant des décennies ont rejeté dans l'environnement des quantités importantes de micropolluants, faute de techniques et de

réglementation stricte en matière de protection. Ces micropolluants se sont accumulés au fil du temps au niveau des sols où ils atteignent des teneurs supérieures à celles des fonds géochimiques.

Les hydrocarbures, notamment les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les produits chlorés et les métaux lourds sont les principaux polluants trouvés dans les sols contaminés [23].

L'attention portée aux pollutions des sols est récente. Pendant longtemps, les sols ont été appréciés pour leurs qualités auto épuratrices: ils jouent un rôle de filtre et d'épurateur pour les substances polluantes en transit. Il n'y avait, en vérité, pas d'analyse sérieuse de ce phénomène, mais on considérait que la terre absorbait et digérait tout.

Les activités humaines sont à l'origine d'une augmentation des éléments traces métalliques dans l'atmosphère, le sol et l'eau. Les industries métallurgiques et chimiques ainsi que des pratiques aussi variées que la combustion d'énergies fossiles ou l'épandage d'engrais, de pesticides et de boues de stations d'épurations dans les champs apportent dans la biosphère des quantités importantes de métaux.

Où le processus de transfert des métaux dans le sol est régit par deux principaux phénomènes les précipitations (pluie, neige) et l'irrigation.

- ✓ Une partie est évacuée par évaporation ou ruissellement de surface.
- ✓ Une partie pénètre dans le sol

Et se dirige alors soit vers les racines des plantes, ou vers les horizons profonds et les nappes phréatiques.

Au cours de ces transports, l'eau se charge en éléments en traces dissous. Ce transfert d'éléments en traces d'un point à un autre du sol (en l'espèce des horizons de surface aux horizons profonds) a lieu soit par :

- ✓ Advection lorsque les éléments se déplacent à la même vitesse et selon les mêmes trajectoires que la masse d'eau,
- ✓ Diffusion lorsque le déplacement est retardé, le circuit est complexe. [24]

La pollution se présente sous forme de poussières atmosphériques précipitées par les pluies ou sous forme de rejet direct au sol. Deux types de pollution ont été déterminés.

### **I.3.2. Divers types de pollutions**

#### **I.3.2.1. Pollution organique**

Les polluants organiques renferment une large gamme de composés qui peuvent être classés selon :

☛ **Leur origine** (pesticides, carburants, explosifs, résidus de l'industrie pétrolière, déchets issus de la production de coke, ...etc.),

☛ **Leur structure chimique** (hydrocarbures, diphényles poly-chlorés (HDP), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), benzène/toluène/éthyle-benzène/xylène (BETX), dioxines...etc.)

☛ **Leur propriétés chimiques ou physiques** (liquides non aqueux, composés organiques volatiles).

### **I.3.2.2. Pollution minérale (métaux lourds)**

#### **I.3.2.2.1. Les métaux lourds**

Les éléments que l'on désigne sous le terme de métaux lourds sont ceux dont la masse volumique est supérieure à 5-6 g/cm<sup>3</sup>. Ils ont en commun les propriétés suivantes :

- Structure cristalline à température ambiante, à l'exception du mercure qui est liquide,
- Aspect brillant,
- Ductilité, malléabilité,
- Électrons de conduction faiblement liés, d'où une propension à former des cations et des liaisons ioniques,
- Bonne, voire excellente conductivité thermique et électrique.

#### **I.3.2.2.2. Métaux lourds dans les sols**

Parmi la variété de polluants du sol, les métaux lourds posent un problème particulier dans la mesure où ils sont non biodégradables : ils s'accumulent donc dans le sol tant que perdure la source de contamination ; cette période peut durer plusieurs dizaines d'années. Ajoutons que la toxicité des métaux lourds, connue depuis l'Antiquité pour certains d'entre eux, a été tragiquement illustrée au XXe siècle par plusieurs catastrophes telle que celle de Minamata (Japon) dans les années 50, qui ont motivé l'étude des effets de ces éléments sur l'environnement et sur la santé. [25]

#### **I.3.2.2.3. Spéciation chimique des métaux lourds dans les sols**

La spéciation chimique des métaux lourds, c'est-à-dire leur répartition entre différents états d'oxydation ou de complexations, détermine principalement leur distribution dans les phases aqueuses ou solides du sol. Les propriétés physico-chimiques des sols telles que le pH, le potentiel d'oxydo-réduction influencent la spéciation des métaux lourds et conditionnent généralement leur solubilité, leur mobilité ainsi que leur toxicité vis-à-vis des organismes.

La biodisponibilité et l'écotoxicité des métaux lourds dépendent également de leurs interactions avec les fractions organiques et/ou minérales du sol. Les minéraux argileux possèdent de grandes capacités d'échanges cationiques. [26]

La composition chimico-minéralogique du sol est un paramètre important qui va influencer la biodisponibilité et l'écotoxicité des métaux lourds. Ces éléments n'étant pas biodégradables, ils constituent des composés extrêmement stables dans l'environnement [27]

#### **I.3.2.2.4. Origines des métaux dans les sols**

Aujourd'hui, on distingue deux principales origines des métaux lourds :

❖ **Les métaux d'usage courant** : le Tableau I.4 recense les principales utilisations des métaux dans l'industrie.

❖ **Les éléments plus rares** qui sont l'objet d'un intérêt économique accru en raison de leur rôle stratégique pour certaines applications [28]. C'est notamment le cas du :

- ☛ Scandium (fort potentiel dans l'aéronautique en remplacement du titane) [29],
- ☛ Platine (piles à combustible, catalyse Diesel), [30]
- ☛ Rhénium (utilisé pour fabriquer des superalliages dans l'aéronautique), [31]
- ☛ Germanium, [32]
- ☛ L'indium ou du tantale (tous trois employés en microélectronique) [33]

Mais ces activités industriels sont la source de pollutions importantes de l'environnement par les métaux lourds, qu'il s'agisse de l'air, de l'eau, des sols, voire directement des êtres vivants.

**Tableau I.1 : Utilisation actuelle courante des métaux dans l'industrie [34]**

| Métal | Utilisations  | Métal | Utilisations  |
|-------|---|-------|---|
| Al    | Transport 25%<br>Bâtiments 8.1%<br>Emballage 20%<br>Construction électrique 10%<br>Autres 25%           | Ni    | Acier inoxydable 65%<br>Alliages de nickel 15%<br>Aciers et font alliées 7.5%<br>Revêtement de surface 7.5<br>Autres 25%      |
| Cd    | Piles 70%<br>Pigments 13%<br>Autres 17%   | Hg    | Cellules d'électrolyse 50%<br>Construction électrique 25%<br>Autres 25%   |
| Cr    | Aciers inoxydables 65%<br>Chimie et réfractaires 20%<br>Divers 15%                                      | Pb    | Batteries 70%<br>Laminés et munitions 10%<br>Chimie 10%<br>Autres 10%   |
| Fe    | Sidérurgie 99%<br>Autres 1%   | Mo    | Ferromolybdène et alliages 70%<br>Chimie (catalyseurs)30%   |
| Co    | Superaliages 72.6%<br>Aimants 9%<br>Carbures cimentés 3.4%<br>Céramiques 9.6%<br>Chimie 5.4%            | Zn    | Galvanisation 50%<br>Pièces moulées 15%<br>Laiton et autres métaux d'alliages 20%<br>Demi-produits 5%<br>Chimie et autres 10% |
| Cu    | Construction électrique 55%<br>Bâtiment 20%<br>Équipement industriel 10%<br>Transports 5%<br>Autres 10% | Sn    | Fer blanc 30%<br>Soudure 30%<br>Chimie 15%<br>Étain et divers 25%   |

### I.3.2.2.5. Sources naturelles de contamination

Par le phénomène de l'altération et l'érosion de la roche. Dans certains cas les sols ainsi formés peuvent donc être fortement concentrés en métaux, au point que cette contamination naturelle soit problématique sur le plan écologique.

Il existe d'autres sources de contamination naturelle des sols par les métaux, à titre d'exemple :

- ☞ Le cycle biogéochimique entre les sols et les plantes.
- ☞ Processus d'accumulation, dans un horizon du sol, des métaux provenant d'un autre horizon (illuviation).
- ☞ Apport par lessivage du sol et érosion en surface.
- ☞ Apports lointains d'origine atmosphérique: volcans (émissions d'As, Hg, Ni, Zn), feux de forêt (émission de Zn), embruns marins (émissions de Hg, Na), poussières et aérosols transportés par les vents.

### I.3.2.2.6. Sources anthropiques de contamination

Due à l'activité humaine qui intervient sur une échelle de temps beaucoup plus courte, de l'ordre de la décennie, voire moins. On distingue deux types de contamination [35]:

- ✓ Les contaminations diffuses;
- ✓ Les contaminations ponctuelles;

### I.3.2.3. Devenir des métaux lourds dans les sols [36]

On a recours à deux notions :

➤ **La mobilité** : d'un élément caractérise son aptitude à passer d'un compartiment du sol où il est retenu avec une certaine énergie à un autre, où il est retenu avec une moindre énergie. Plus une substance se déplace dans le sol, plus elle sera susceptible d'être absorbée par un organisme vivant.

➤ **La biodisponibilité** : qui est l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment quelconque du sol dans un être vivant, (bactérie, végétal, animal ou homme), le plus souvent via la solution du sol.

En fonction de la mobilité de l'élément considéré, celui-ci va s'accumuler préférentiellement dans tel ou tel horizon du sol et avoir un effet différent sur les plantes, qui puisent leurs ressources à travers leurs racines bien au-delà de l'horizon de surface, et sur les organismes du sol.

### I.3.2.4. Comportement des métaux lourds dans le sol

Les associations des métaux aux différents constituants du sol, peuvent être diverses:

- ☞ Inclusion dans les réseaux cristallins des minéraux primaires et secondaires;
- ☞ Adsorption sur les phases hydroxylées du fer (Fe), aluminium(Al), magnésium (Mn)
- ☞ Complexations ou inclusion dans les macromolécules organiques ;
- ☞ Echange ionique avec les surfaces des minéraux argileux et des matières organiques.
- ☞ Présence sous une forme soluble, colloïdale ou particulaire dans la solution du sol. [37]

La répartition des métaux dans les différentes phases du sol évolue au cours du temps ; les éléments passent d'une forme à l'autre, en permanence, mais avec des vitesses variables, sous l'influence de facteurs externes. L'ensemble des réactions subies par le métal modifie, en augmentant sa mobilité ou au contraire en participant à sa rétention (adsorption ou précipitation), le transport de l'élément à travers le sol. [38]

#### I.3.2.4.1. Cas du plomb

Le plomb est le plus répandu des métaux lourds. Le plomb est généralement considéré comme peu mobile dans les sols, surtout en conditions réduites. Cependant sa solubilité peut augmenter rapidement suite à la formation de complexes organiques.



Le plomb est un métal amphotère, c'est-à-dire sensible aux variations de pH : la solubilité est minimale dans l'intervalle de pH = 9 jusqu'à pH=11.

#### **I.3.2.4.2. Cas du zinc**

La concentration en zinc de la solution du sol dépend de sa concentration totale dans le sol, de la solubilité de ses composés, et de l'ampleur de l'absorption.

Le sulfate de zinc est très soluble alors que l'oxyde est relativement insoluble. Le pH du sol semble être un des principaux facteurs affectant la mobilité ou la rétention de zinc (Zn). Dans des sols acides (pH<5) et oxydés, le zinc est un des métaux lourds les plus mobiles. [39]

#### **I.3.2.4.3. Cas du chrome**

Le sol se trouve à l'état de valence  $\text{Cr}^{3+}$  ou Cr(VI) dans les sols, mais les deux valences exhibent des toxicités et des mobilités différentes.

Dans les sols des régions tempérées, où les minéraux argileux prédominent, les cations Cr(VI) sont repoussés par la charge négative des particules du sol. Cette répulsion et la solubilité des composés de Cr(VI) rendent le chrome hexa-valent assez mobile [40] ce qui en fait la forme la plus toxique pour les systèmes biologiques. Le chrome trivalent apparaît le plus souvent sous la forme de cation dans les sols où il forme des composés oxydes ou hydroxydes relativement insolubles. De par sa charge positive, le cation Cr(III) est attiré par les particules de sol chargées négativement et s'associe avec les fractions les plus fines du sol. Cr(III) est donc moins mobile que Cr(VI) dans les sols. [41]

#### **I.3.2.4.4. Impact des métaux lourds sur l'environnement et sur la santé**

Certains éléments sont nécessaires à la vie en très faible quantité : ce sont les oligo-éléments. À trop faible dose ils provoquent des carences dans l'organisme, mais ils deviennent toxiques à haute dose.

**Tableau I.2 : Les symptômes et maladies causé par les métaux lourds [42]**

| <b>Métal</b>     | <b>Maladies organiques</b>  | <b>Effets neurologiques et psychiatriques</b>   |
|------------------|---|---|
| <b>Aluminium</b> | Douleurs articulaires, décalcification des os, anémie   | Démence, Alzheimer, Parkinson, Encéphalopathie avec des perturbations de mémoire, de concentration et de mobilité   |
| <b>Arsenic</b>   | Diabète de type 2   | Atteintes au système nerveux, menant à des faiblesses, surdité, paresthésies, psychoses organiques avec somnolence, troubles, stupeur, délires, schizophrénie   |
| <b>Cadmium</b>   | Lésions rénales et pulmonaires, fragilisation des os, anémies, augmentation du risque de cancer en cas d'inhalation   | Aucune référence trouvée à ce stade   |
| <b>Mercure</b>   | Lésions du cerveau, maladies auto- immunes (arthrite rhumatique, lupus, sclérose en plaques), maladies cardiovasculaires (hypertension et autres), cancer du foie | Diminution de l'intelligence, troubles de la parole, agitation, agressivité, troubles visuels et auditifs, poly-neuropathie, myasthénie grave, Alzheimer  |
| <b>Nickel</b>    | Allergies, dermatites, eczémas  | Maux de tête, vertiges, manque de sommeil   |
| <b>Plomb</b>     | Effets hématologiques et cardiovasculaires (hypertension), atteintes rénales  | Dépressions allant jusqu'au suicide, manque d'attention, atteinte à l'intelligence visuelle et aux fonctions motrices, troubles de mémoire, difficultés d'apprentissage,  tats de fatigue, agitation, agressivité, psychoses, hallucinations, poly-neuropathie, périphérique, encéphalopathie, saturnisme |

## I.4. STABILISATION/SOLIDIFICATION

### I.4.1. Principe de la stabilisation/solidification

La stabilisation/solidification (S/S) est une technique de réhabilitation non destructive qui a pour but de réduire la mobilité de contaminants présents dans un sol contaminé ou toutes autres matières résiduelles dangereuses (boues, sédiments, matières radioactives,...etc.)[43].Elle comporte divers techniques dont on peut citer :

➤ **Les plus répandus :**

Le procédé Stabilisation/Solidification a base des liants hydrauliques [44]

Le procédé Neutrec par SOLVAY [45]

La vitrification [46,47]

➤ **Les moins répandus :**

Le procédé Tredi-Ash [48]

Contrairement à plusieurs autres techniques, celle-ci ne permet pas d'extraire ou d'éliminer les contaminants, mais plutôt d'empêcher leur migration dans l'environnement.

Les objectifs à accomplir par le procédé S/S sont :

- ☞ Réduire la mobilité ou la solubilité des contaminants;
- ☞ Améliorer la maniabilité et les caractéristiques physiques du sol en produisant un solide sans liquide en phase libre;
- ☞ Réduire les surfaces exposées par lesquelles les contaminants pourraient lixiviés. [49]

Afin de créer un monolithe de sols contaminés qui respectera les objectifs demander. [50]

De son côté, la stabilisation inclut tous les mécanismes visant à convertir les contaminants sous des formes moins solubles, mobiles ou toxiques [51]

Cette conversion est essentiellement obtenue à l'aide de réactions chimiques telles la précipitation/dissolution, l'oxydation/réduction ou la sorption chimique. [52]

La stabilisation et la solidification sont deux mécanismes d'immobilisation distincts qui interviennent différemment selon les procédés de S/S utilisés. Ainsi elle permet outre la solidification, la réduction de la surface de contact entre le déchet et l'environnement. Elle agit ainsi comme élément de stabilisation du déchet dans la mesure où, en réduisant l'interface déchet-environnement, elle réduit la mobilité de ses contaminants. [51]

#### **I.4.2. Mécanismes d'immobilisation des contaminants**

Les mécanismes d'immobilisation sont nombreux, mais on peut les regrouper sous deux catégories :

- Les mécanismes physiques
- Les mécanismes chimiques.

La prédominance de l'un par rapport à l'autre dépend de plusieurs facteurs, dont la nature des agents de liaison, des additifs ou des contaminants. Parmi les mécanismes les plus importants, on retrouve l'encapsulation, la sorption, l'oxydation/réduction et la précipitation/dissolution. [52]

##### **I.4.2.1. Encapsulation**

Il s'agit donc d'un mécanisme d'immobilisation physique qui consiste en un confinement des sols et de leurs contaminants dans des capsules formées par des agents de

liaison [53]. Lors du durcissement des liants, la matrice de liaison agit comme une barrière imperméable et empêche la migration des contaminants hors des sols, que ce soit sous forme solide, liquide ou gazeuse.

#### **I.4.2.2. Sorption**

La sorption est un mécanisme d'immobilisation qui peut être chimique ou physique. En S/S, les contaminants sous phase aqueuse peuvent être attirés par les particules d'un sol, d'un agent de liaison ou d'un additif. Cette attraction résulte en une accumulation du contaminant à la surface d'une particule (adsorption) ou à l'intérieur de celle-ci (absorption) [54].

#### **I.4.2.3. Oxydation/réduction**

En contamination des sols, certains métaux sont plus susceptibles aux réactions d'oxydation/réduction tels l'arsenic, le sélénium, le chrome, le mercure et le plomb [55]. L'état d'oxydation est donc une caractéristique à considérer puisque l'intervention pour une décontamination variera selon la forme du métal [56]

#### **I.4.2.4. Dissolution/précipitation**

Dans les sols, on peut retrouver les contaminants sous différentes formes. Une modification de l'environnement par l'ajout de liants ou d'additifs peut changer les limites de saturation en contaminants de l'eau, ce qui se traduit par leur précipitation ou leur dissolution. Les métaux traces sont particulièrement sensibles à cette situation [57-60]. En S/S, on s'intéresse surtout au pH du sol comme indicateur des conditions environnementales.

Lorsque le pH se situe entre 7 et 11, la solubilité est généralement à son minimum [55]. Par contre, les métaux amphotères ou oxyanioniques ont également tendance à se solubiliser avec une augmentation du pH [61].

Ainsi, l'ajout d'un liant alcalin pourrait causer une dissolution des métaux non solubilisés et augmenter leur risque de lixiviation dans l'environnement. [53]

### **I.4.3. Stabilisation/solidification par des liants hydrauliques**

#### **I.4.3.1. Incorporation de déchets dans les matrices ciment**

L'incorporation de déchets dans les matrices ciment induit des perturbations dans l'hydratation, et peut avoir des conséquences sur les propriétés physiques et chimiques de la matrice [62-64]

L'ajout d'un déchet dans un mortier peut avoir des conséquences non négligeables sur l'hydratation du côté de :

- La maniabilité avec l'augmentation de la teneur en déchets.
- Le temps de prise peut être multiplié.

➤ La résistance à la compression et la porosité finale du matériau sont très sensibles au taux de déchet incorporés en substitution du sable dans ces mortiers [64].

#### **I.4.3.2. Liants hydrauliques**

Il s'agit de poudres constituées de sels minéraux anhydres instables. En présence d'eau, ils s'hydratent, forment une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement. Au sens strict du terme, les liants hydrauliques sont les ciments et la chaux. Les matériaux pouzzolaniques (cendres volantes, scories, ciment au laitier ...etc.) sont souvent utilisés en tant qu'additifs à ces liants.

#### **I.4.3.3. Origine des ciments**

Du fait de l'analogie de sa composition avec celle de la pierre de Portland, est le plus courant. Il est constitué principalement de clinker, résultant de la cuisson jusqu'à fusion partielle (vers 1450°C) puis du broyage d'un mélange de roches calcaires et argileuses.

#### **I.4.3.4. Type des ciments**

On distingue les différents types de ciments comme suit:

- ✓ **CPA-CEM I** (le ciment portland artificiel) contiennent du clinker et au maximum 5 % de constituants secondaires,
- ✓ **CPJ-CEM II** (Ciment Portland Composé) contiennent du clinker (65-94 %) et jusqu'à 35 % de constituants principaux (calcaire, schiste calciné, cendres volantes, pouzzolane naturelle, laitiers de haut-fourneau, fumées de silice) ;
- ✓ **CHF-CEM III** (Ciments De Hauts Fourneaux) contiennent du clinker (5-64 %) et de fortes teneurs (36 à 95 %) de laitiers de haut-fourneau, [65]
- ✓ **CPZ-CEM IV** (Ciments Pouzzolaniques) contiennent de 11 % à 55 % d'ajouts pouzzolaniques (fumées de silice, pouzzolanes, cendres volantes).
- ✓ **CLC-CEM V** (Ciments Composés), contiennent du laitier (18-50 %) et des pouzzolanes et cendres volantes siliceuses (18-50 %).

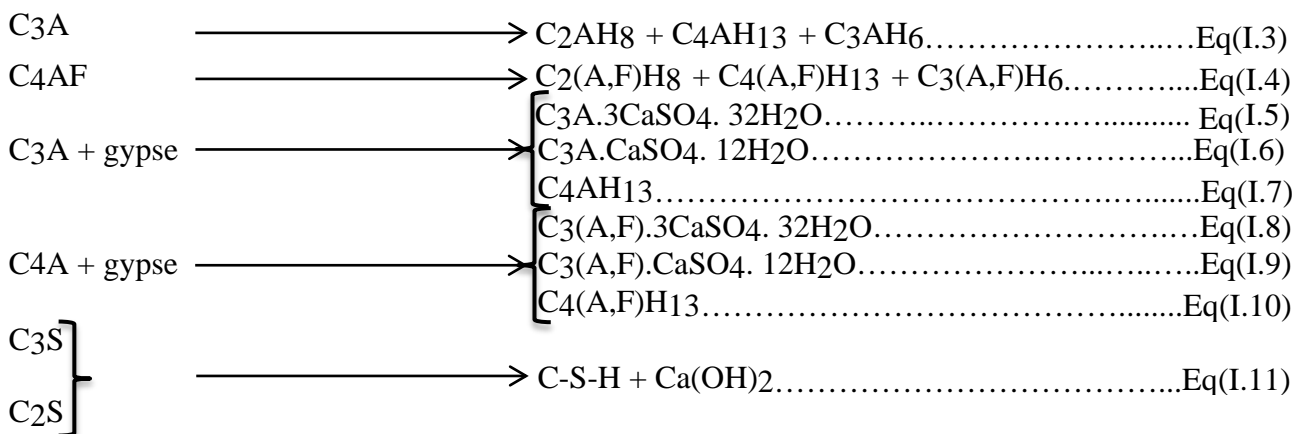
Le mélange complexe des matières minérales introduites dans le four à clinkérisation aboutit après cuisson à des solutions solides dérivées des phases minéralogiques figurant dans le tableau I.7 [66].

**Tableau I.3 :** Les divers résultats de la clinkérisation des matières minérales [66].

| Constituant et notation  | Alite<br>$C_3S$   | Bélite<br>$C_2S$                 | Célite I<br>$C_3A$  | Célite II<br>$C_4AF$  |
|--|---|----------------------------------|---|---|
| Formule chimique   | $3CaO.SiO_2$  | $2CaO.SiO_2$                     | $3CaO.Al_2O_3$  | $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$  |
| Proportion dans le clinker                                     | 50-70%  | 15-30%                           | 5-10%   | 5-15%   |
| Rôle dans l'hydratation, la prise et le durcissement du ciment | Prise initiale et contribution à la résistance initiale | résistance au-delà d'une semaine | dégagement de chaleur lors de l'hydratation, prise rapide en l'absence de gypse | diminution de la température de clinkérisation, hydratation rapide mais faible contribution à la résistance |

#### I.4.3.5. Hydratation du ciment portland

Le mélange du ciment Portland et de l'eau s'apparente à un système dispersé constitué d'un réseau de particules dans une phase aqueuse. Les atomes de ces particules ( $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) présentent des liaisons insaturées qui, au contact de l'eau, sont le siège ou l'origine de nombreuses réactions d'adsorption, d'hydrolyse, de dissolution, de solvatation ou de cristallisation. Les mécanismes d'hydratation sont résumés ci-après par les évolutions des principaux constituants [67]



Les aluminates  $C_3A$  et  $C_4AF$  réagissent, formant immédiatement des hydrates d'aluminates de calcium (1 et 2). Lorsque des sulfates (issus du gypse) entrent en solution, ils réagissent avec ces aluminates pour les envelopper d'hydrates de sulfoaluminates de calcium appelés ettringite (3 et 6). Ce dernier composé, très peu soluble dans la solution basique de gypse, ralentit l'hydratation des grains de ciment.

Quelques heures après l'ajout de l'eau, la quantité de sulfates de calcium disponible est faible, l'ettringite réagit alors avec les aluminates de calcium ( $C_3A$ ) et se transforme en mono-

sulfates (4 et 7). Le C3A réagit avec de l'eau et de l'hydroxyde de calcium pour former des aluminates de tétra-calcium (5 et 8). Après quelques jours, très peu d'ettringite subsiste. [68]

Parallèlement aux premières réactions des aluminates, les silicates s'hydratent, plus lentement. Les principaux produits d'hydratation sont au nombre de deux : un gel de silicate de calcium hydraté, la tobermorite encore désignée par C-S-H selon sa composition stœchiométrique approximative, et l'hydroxyde de calcium cristallisé appelé portlandite (9). Le durcissement, la résistance et quelques autres propriétés du ciment hydraté sont principalement dus au gel C-S-H.

En résumé, l'hydratation du ciment conduit à l'obtention de trois types de produits dont les proportions sont rapportées dans le tableau I.8 [69]

**Tableau I.4 :** Proportion des principaux produits d'hydratation du ciment Portland

| <b>Constituant</b>                           | <b>Sulfo-aluminates de calcium<br/>ettringite et mono-sulfates</b> | <b>Tobermorite<br/>C-S-H</b> | <b>Portlandite<br/>Ca(OH)<sub>2</sub></b> |
|--|--|------------------------------|---|
| <b>Proportion dans le ciment<br/>hydraté</b> | 20-30%   | 50-70%                       | 5-15%                                     |

## CHAPITRE II. ECHANTILLONAGE, FORMULATIONS ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

L'analyse des sols est un procédé complexe de par la multiplicité des paramètres à mesurer pour caractériser complètement un échantillon: teneur en eau, granulométrie, composition minéralogique, caractérisation des matières organiques, composition élémentaire (organique et totale), pH, carbonates, capacité d'échange cationique et anionique, concentration en métaux,...etc. À cette fin, un arsenal de méthodes normalisées est mis au point pour mesurer tel ou tel paramètre.

Pour les éléments traces métalliques dans l'échantillon des sols, des méthodes référencées qui consistent à mesurer leur teneur totale ainsi que leur spéciation sont utilisées. [70-72]

En chimie analytique, la plupart des analyses de métaux lourds dans les sols se font en deux étapes: une étape de mise en solution de l'échantillon, qui consiste à extraire l'élément d'intérêt sous une forme soluble facilement analysable, et la phase de mesure proprement dite, généralement une technique spectrométrique. Par ailleurs, il existe certaines techniques d'analyse telles que fluorescence par rayon-X qui s'appliquent directement à l'échantillon solide. [70]

### II.1. PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS

Notre échantillonnage a été effectué au niveau de terminal marin nord de Sonatrach sise aux quatre chemins-Bejaia. Nous nous sommes fixés des règles strictes et au lieu et mode de prélèvement.

Après décaissage à la pelle et évacuation des 5 premiers centimètres, cinq prélèvements de la couche de surface sur une profondeur de 35 à 45 cm ont été effectués au niveau du sol. Les points de prélèvements sont représentés sur la figure II.1.



Figure II.1. Points de prélèvements



**Tableau 1.** Localisation Géographique

| Indice | Indice du puits | Nom complet du puits         | Localisation géographique |                |                |
|--------|-----------------|------------------------------|---------------------------|----------------|----------------|
|        |                 |                              | X                         | Y              | Z              |
| 1      | PO-01-09        | Puits d'observation N°1-2009 | 684804.4847               | 4068111.1086   | 4.183          |
| 2      | PO-02-09        | Puits d'observation N°2-2009 | 685015.3715               | 4067981.0023   | 2.535          |
| 3      | PO-03-09        | Puits d'observation N°3-2009 | 685246.7162               | 4067762.1198   | 2.751          |
| 4      | PO-10-03        | Puits d'observation N°3-2010 | Non Disponible            | Non Disponible | Non Disponible |
| 5      | Cuvette         | A cote du bac 4E2            | Non Disponible            | Non Disponible | Non Disponible |

Après réception des échantillons au laboratoire, l'échantillonnage secondaire a été effectué par quartage d'environ 2 kg de l'échantillon global. Le sol est disposé en couche mince pendant 24 heures à température ambiante, puis homogénéisé par brassage manuel. Le sol est ensuite tamisé sur une maille inférieure à 2 mm. La conservation des échantillons se fait ensuite dans des sacs en polyéthylène et à 4°C avant préparation pour analyses selon les normes françaises NF ISO 11464.

## II.2. PREPARATIONS DES ECHANTILLONS AVANT L'ANALYSE

### II.2.1. Homogénéisation et quartage :

Un échantillonnage intermédiaire s'est fait selon la technique des quartages de façon à minimiser les risques d'erreur sur la composition des sols liés à leur hétérogénéité et pour obtenir la masse de résidus nécessaire pour les analyses et tests (Figure II.2). Les particules de taille supérieure à 2 mm sont concassées à un diamètre  $d=2\text{mm}$ . Le résidu résultant des sols est ainsi préparé aux traitements chimiques.

$$Q_i \geq k \times d^2 \dots\dots\dots \text{Eq(II.1)}$$

$$m \leq Q_i / k \times d^2 \dots\dots\dots \text{Eq(II.2)}$$

$$m = 2 \times n \dots\dots\dots \text{Eq(II.3)}$$

Avec :

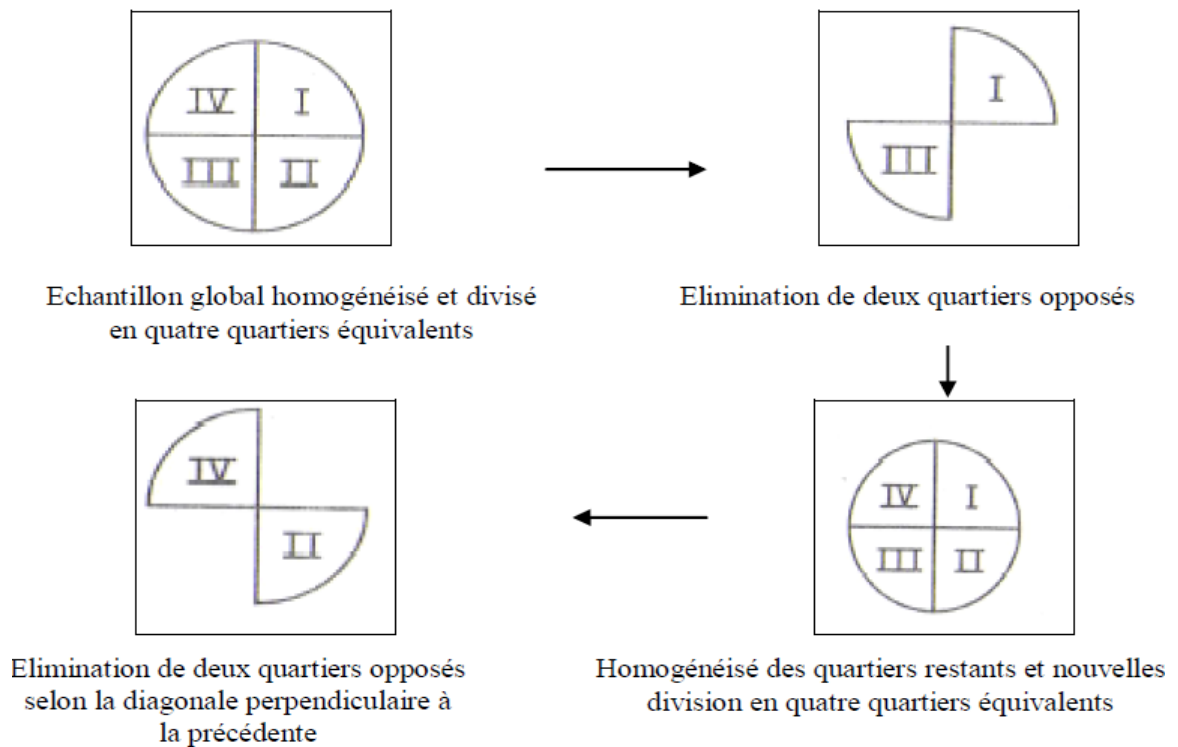
**Q<sub>i</sub>** : Masse initiale à quarter,

**m** : Masse déterminant le nombre de quartage, utilisée comme moyen de vérification ;

**d** : Diamètre de plus gros grain ;

**k** : Coefficient de répartition de la minéralisation (matériau homogénéisation;  $k = 0,1$ ) ;

**n** : Nombre de quartage.



**Figure II.2.** Méthode du Quartage

### II.3. CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUES

#### II.3.1. Granulométrie par tamisage, norme AFNOR NF X31-101

La détermination de la distribution de la taille des particules, ou composition granulométrique du sol, est appelée analyse granulométrique [73].

Le protocole de fractionnement mettant ainsi en œuvre deux méthodes complémentaires (fractionnement par voie sèche jusqu'à 80  $\mu\text{m}$  puis séparation gravimétrique jusqu'à 2  $\mu\text{m}$  par sédimentation des particules (selon de la loi Stokes) permet de classer les particules en fonction de leur diamètre (tableau II.1).

##### ➤ Principe de la Granulométrie par tamisage

Le principe de cette manipulation consiste à prendre un échantillon de sol séché et de le verser dans une colonne de tamis classés dans l'ordre croissant des ouvertures. La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique.

##### ➤ Calcul

Le calcul des pourcentages des fractions passantes (refus) se fait selon la formule indiquée dans le tableau II.1.

**Tableau II.1.** Calcul des pourcentages des fractions passantes (refus), pour M = 1000 g.

| Ouverture des tamis (mm) | Echantillon | Masse des refus partiels Ri (g) | Masse des refus cumulés Rn (g) | Pourcentage des refus cumulés $R_n / P_s \times 100 \%$ | Pourcentage des tamis cumulés $100 - (R_n / P_s) \%$ |
|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------|---|--|
| 2                        |             | m1                              | m1                             | $R_1 = 100 * (m_1 / M)$                                 | $T_1 = 100 - R_1$                                    |
| 1.4                      |             | m2                              | m1+m2                          | $R_2 = 100 * (m_1 / M)$                                 | $T_2 = 100 - R_2$                                    |
| 1                        |             | m3                              | m1+m2+m3                       | $R = 100 * (m / M)$                                     | $T = 100 - R_3$                                      |
| 0.71                     |             | m4                              | .....                          | $R_4 = 100 * (m_4 / M)$                                 | $T_4 = 100 - R_4$                                    |
| 0.5                      |             | m5                              | .....                          | $R_5 = 100 * (m_5 / M)$                                 | $T_5 = 100 - R_5$                                    |
| 0.355                    |             | m6                              | .....                          | $R_6 = 100 * (m_6 / M)$                                 | $T_6 = 100 - R_6$                                    |
| 0.160                    |             | m7                              | .....                          | $R_7 = 100 * (m_7 / M)$                                 | $T_7 = 100 - R_7$                                    |
| <0.160 (fond)            |             | m8                              | .....                          | $R_8 = 100 * (m_8 / M)$                                 | $T_8 = 100 - R_8$                                    |

### II.3.2. Détermination de l'humidité résiduelle, norme AFNOR NF X 31-102 (1992)

L'humidité résiduelle est définie comme la masse perdue après séchage à 105°C d'un échantillon dont la masse est constante à 40°C. Sa mesure permet de déterminer la masse sèche d'un échantillon du sol. L'humidité résiduelle H est exprimée en pourcentage massique et elle est calculée par la relation suivante:

$$H = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \dots \dots \dots \text{Eq(II.4)}$$

☞ M<sub>0</sub>: étant la masse initiale d'échantillon séché à 40°C et ;

☞ M<sub>1</sub>: sa masse finale, après séchage à 105°C pendant 24 heures et refroidissement.

### II.3.3. Détermination du pH, norme AFNOR NF X31-103 (1992) [74]

Le pH fait partie d'une des plus importantes caractéristiques physico-chimiques des sols, car la spéciation, et donc la mobilité et la biodisponibilité des éléments traces métalliques sont liées à sa valeur. Le pH est défini par la relation:

$$\text{pH} = -\log_{H^+} \dots \dots \dots \text{Eq(II.5)}$$

Où :H<sup>+</sup> => l'activité des ions d'hydrogène en solution.

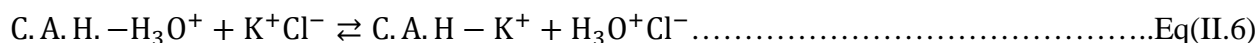
En solution diluée, l'activité peut être considérée égale à la concentration. Puisque le pH ne peut être mesuré qu'en solution, le pH du sol est en fait le pH d'une solution en équilibre avec lui [75]

Ainsi, le principe de mesure du pH des sols est la mise en équilibre ionique entre la phase solide et la phase liquide. Selon les méthodes, les suspensions peuvent être réalisées avec de :

- L'eau distillée pour la détermination d'acidité réelle,
- Solutions salines telles que le chlorure de potassium ou le chlorure de calcium, détermination de l'acidité potentielle.

L'acidité réelle prend en compte uniquement les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  libérés dans la solution par le sol, contrairement à l'acidité potentielle qui prend en compte également les ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  échangeables, retenus notamment par les complexes argilo - humiques (C.A.H.)[76]; ces derniers sont susceptibles de fixer des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  capables de passer dans la solution du sol par l'échange avec des cations.

Dans ce cas, le pH du sol dans une solution de KCl est souvent plus acide que le pH du sol dans l'eau, des ions  $\text{H}_3\text{O}^+$  du sol étant libérés par échange avec le potassium de la solution.



Les normes AFNOR X 31-103 et AFNOR X 31-104 respectivement préconisent la détermination du pH du sol dans l'eau et dans une solution de KCl 1M.

➤ **Principe**

Une suspension de sol est préparée dans cinq fois son volume, au choix:

- D'eau;
- D'une solution de chlorure de potassium (KCl) à 1 mol/L;

➤ **Mode opératoire**

➤ **Pour le  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$**

10 ± 0,005 g de sol sont mis en suspension dans 50 ± 0,1 ml d'eau distillée, agités pendant 1 heure sur une plaque d'agitation. Puis laisser au repos pendant 2 heures.

➤ **Pour le  $\text{pH}_{\text{KCl}}$**

10 ± 0,005 g de sol sont mis en suspension dans 50 ± 0,1 ml de chlorure de potassium (KCl) à 1 mol/L, agités pendant 1 heure sur une plaque d'agitation. Puis laisser au repos pendant 2 heures.

Le pH est ensuite mesuré à l'aide d'un pH-mètre de type RADIOMETER M220

### II.3.4. Mesure de la conductivité électrique

La conductivité électrique est une mesure qui donne une approximation de la concentration des sels solubles présents dans l'échantillon.

➤ **Principe**

La norme utilisée est la NF X 31-113 qui est basée sur l'extraction des sels d'un échantillon, solubles dans l'eau, dans des conditions bien définies et dans un rapport sol sec/eau égal à 1/5 (m/m). Deux électrodes en platine maintenues en parallèle dans une colonne d'extrait aqueux de sédiment permettent de mesurer le courant conduit par les ions présents.

### ➤ **Mode opératoire**

On pèse 10 g d'échantillon de sol préparé pour essai qu'on transvase dans un flacon en polyéthylène, on y ajoute 50 ml d'eau distillée, on ferme le flacon et on le place dans l'agitateur mécanique à mouvement horizontal, on agite pendant 30min. Après filtration, on mesure la conductivité de la solution obtenue. [77]

### **II.3.5. Détermination de la quantité de bleu de méthylène**

Elle est d'usage courant en géotechnique pour évaluer la fraction argileuse d'un sol ou d'un granulat, mais également dans l'industrie des bentonites. Le résultat de l'essai dépend directement de la nature minéralogique des argiles et de leur quantité dans le sol. Cette mesure permet d'évaluer rapidement l'activité colloïdale des matériaux argileux.

La quantité de bleu de méthylène adsorbé par un échantillon augmente lorsque sa surface spécifique augmente.

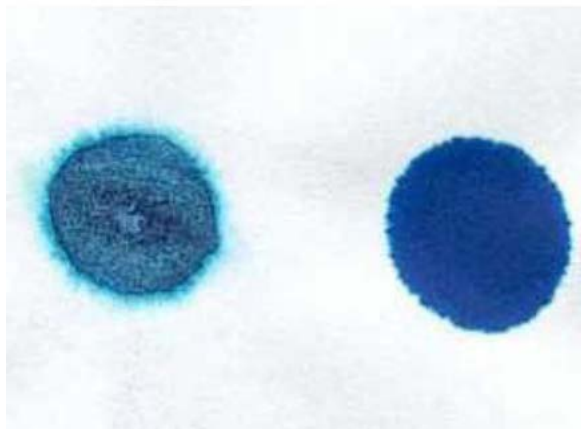
La valeur de bleu de méthylène (VBS) représente ainsi la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules de sol. Etant donné que dans un sol c'est avant tout, la surface spécifique de particule argileuse qui détermine sa surface spécifique totale, on peut considérer que la VBS exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenue dans ce sol (tableau II.3).

**Tableau II.2 :** la valeur du bleu de méthylène associé à chaque type de sol

| Valeur du bleu du sol (cm <sup>3</sup> g) | Nature du sol         |
|---|-----------------------|
| < 0,2                                     | Sol sableux           |
| 0,2 – 2,5                                 | Sol limoneux          |
| 2,5 – 6                                   | Sol limoneux- sableux |
| 6 -8                                      | sols argileux         |
| >8  | sols très argileux    |

### ➤ **Principe**

La VBS se détermine à partir de l'essai au bleu de méthylène à la tache sur la fraction 0/5 mm. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène. A chaque ajout on contrôle l'adsorption en prélevant une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre normalisé pour faire une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache (Figure II.3).



**Figure II.3** Essai au Bleu de Méthylène

➤ **Mode opératoire**

Prélever une masse de  $10 \pm 0,01$  g de sol sec, puis la mettre dans un becher de 100 ml, ensuite à l'aide de l'agitateur disperser la suspension pendant 5 min. à l'aide d'un dispositif de dosage, introduire 5 ml de bleu et agiter à une vitesse de (400 tr/min) pendant une minute. Au bout de  $1 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ , procéder à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante:

- ✓ Poser le papier filtre sur un support adapté non absorbant;
- ✓ Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre.

La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore (essai de tache), La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 mm et 12 mm de diamètre. Procéder à des injections successives par pas de 5 ml à 10 ml (selon l'argilosité du matériau) de solution de bleu jusqu'à l'apparition d'une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tache. L'essai est dit alors positif.

À partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu dans la solution et effectuer des taches, de minute en minute, sans ajout de solution. Si l'essai redevient négatif à la cinquième tache ou avant, procéder à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2 ml à 5 ml, selon l'argilosité du matériau, en lieu et place des pas de 5 ml à 10 ml introduits précédemment.

En effet, il est nécessaire de réduire les quantités injectées, car à ce stade de l'essai la suspension est en voie de saturation. Chaque addition est suivie des taches effectuées de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai reste positif pour cinq taches consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (V) de la solution de bleu qui a été nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

Dans tous les cas, le volume V doit être supérieur à 10 ml. Si le volume V est inférieur à 10 ml, l'essai doit être recommencé avec une prise d'essai de masse supérieure. La valeur de bleu de méthylène du sol est calculée selon la formule suivante:

$$VBS = V / M \text{ (cm}^3\text{/g)}$$

$\left\{ \begin{array}{l} V: \text{ volume du bleu ajouté en cm}^3; \\ M: \text{ la prise d'essai. [73]} \end{array} \right.$

### II.3.6. La diffraction des Rayons X

La diffraction des rayons X (DRX) est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. Cette méthode ne s'applique, jusqu'à récemment, qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles...) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement périodique et ordonné des atomes dans des plans réticulaires (hkl) tridimensionnels.

La méthode permet ainsi clairement de distinguer les produits amorphes (verres...) des produits cristallisés. La diffraction des rayons X sur poudre est une méthode d'analyse de phases non destructive. Au début de son introduction (années 1910), la diffraction des rayons X était utilisée surtout pour déterminer les structures des cristaux.

Grâce à l'avancée technologique moderne, qui a introduit la diffractométrie, la diffraction permet la détermination des structures nouvellement élaborées, et d'identifier en quelques minutes les phases cristallisées présentes dans tout matériau par comparaison automatisée avec un fichier de références réactualisé annuellement et comportant actuellement les données de plus de 69 500 composés.

Elle permet également d'étudier les conditions de formation de phases, leur évolution en fonction de la température ou de l'atmosphère, donc de connaître le comportement d'un matériau dans les conditions d'utilisation telles que la température, le balayage gazeux, etc.

#### ➤ **Obtention des résultats**

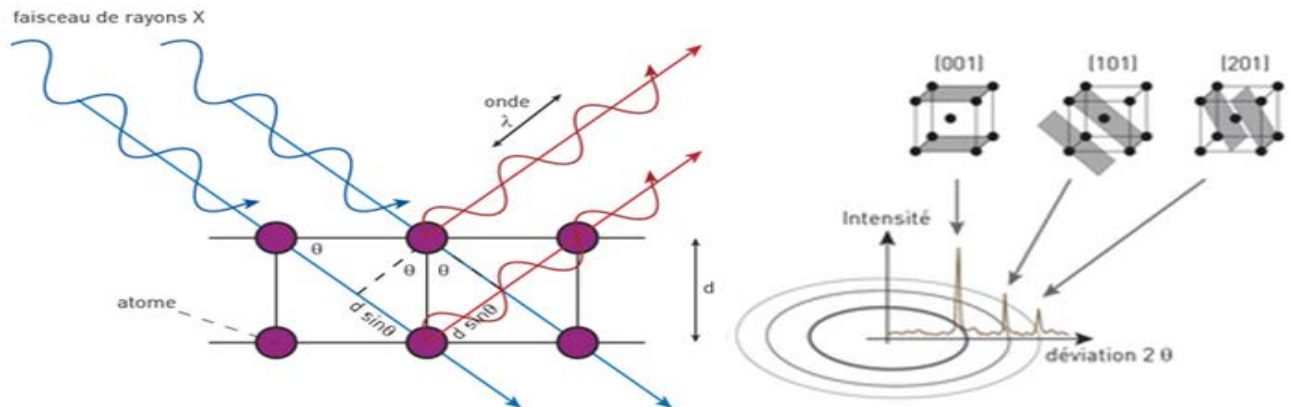
L'identification se fait manuellement (on indexant les pics) ou automatiquement en utilisant des logiciels d'identification et les banques de données de références ASTM.

Les différents anneaux correspondent aux pics obtenus avec le diffractomètre. Ils indiquent une valeur de distance réticulaire.

Les difficultés d'application de la méthode diffractométrique sont liées à :

❖ La nécessité de prélever et mettre suffisamment de matière dans le porte substrat, pour qu'elle soit représentative;

❖ La présence de plusieurs produits: les mélanges sont toujours difficiles à analyser car les « pics » caractéristiques peuvent se confondre; [78]



**Figure II.4 :** Illustration de la loi de Bragg et de l'indexation des pics : association d'un pic de diffraction et d'un plan (hkl).

### ➤ Conditions expérimentales

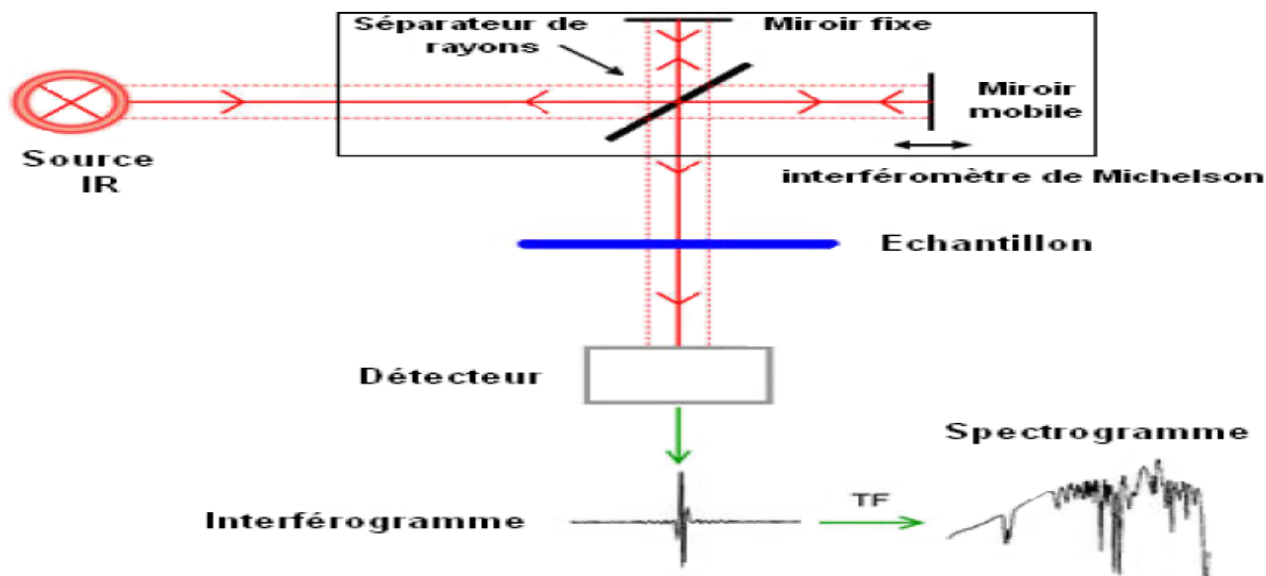
Dans le cadre de nos études, les analyses à la température ambiante ont été effectuées sur un diffractomètre de type X Pert Pro Panalitical en utilisant la raie  $K\alpha_1$  du cuivre de longueur d'onde  $\lambda=1,540598 \text{ \AA}$ . Les diffractogrammes ont été enregistrés de  $0^\circ$  à  $80^\circ$  ( $2\theta$ ) avec un pas de  $0.01^\circ$ .

### II.3.7. Spectrométrie infrarouge

La spectroscopie infrarouge est extrêmement sensible aux variations de la structure cristallographique et de la composition chimique des minéraux. Ainsi les compositions chimiques variables des minéraux peuvent avoir un impact important sur la forme générale des spectres. Cette information disponible dans les spectres de minéraux est résumée dans un diagramme de « signatures spectrales ».

L'analyse IR s'effectue sur des pastilles de KBr fabriquées en respectant les proportions suivantes : 80% de KBr et 20 % de matériau finement broyé.





**Figure II.5.** Schéma de principe d'analyse par spectroscopie infrarouge.

#### ➤ Conditions expérimentales

La Spectroscopie Infrarouge a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre à transformée de Fourier de marque SHMADZU FTIR 8400, sur une gamme de 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  avec une résolution de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

## II.4. TENEURS EN METAUX LOURDS/EXTRACTIONS DES METAUX LOURDS

Les procédures d'extraction simple sont des méthodes qui s'exécutent en une seule étape. Elles sont retenues en sciences des sols afin de quantifier la disponibilité potentielle des métaux lourds, pour prévoir la prise des éléments essentiels, pour diagnostiquer l'insuffisance ou l'excès des éléments dans les sols ou encore pour pouvoir étudier le comportement physico-chimique des éléments de traces métalliques dans les sols. Elles sont encore aujourd'hui, largement employées en raison de leur facilité de mise en œuvre. De nombreux protocoles ont été développés ces dernières décennies, parmi ces tests on trouve le test de lixiviation TCLP.

### II.4.1. Test TCLP

La Lixiviation est un procédé qui est utilisé pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques (TCLP, EPA 1311) afin d'évaluer si un résidu industriel est considéré comme une matière lixiviable selon l'article 3 du Règlement sur les matières dangereuses. Ce protocole de lixiviation peut également être utilisé pour déterminer la solubilité d'espèces inorganiques dans d'autres guides publiés par le ministère de l'Environnement du Québec. Ce protocole est tiré de la méthode EPA 1311: Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP).

### ➤ **Principe et théorie**

Le principe des tests de lixiviation est de :

- Déterminer les phénomènes de fixation des contaminants
- Comprendre les mécanismes de leurs relargage.
- Détermination du principal agent susceptible de véhiculer les éléments toxiques

vers l'environnement est l'eau.

### ➤ **Mode opératoire : Lixiviation pour l'évaluation de la mobilité des espèces inorganiques (TCLP, EPA 1311)**

Le solide est broyé à une grosseur inférieure à 9,5 mm. Par la suite, il est mis en contact avec la solution de lixiviation (rapport solide-liquide de 1 : 20) et agité pendant 18 heures à la température ambiante.

### ➤ **Préparation de la Solution de lixiviation du test TCLP**

Dans un ballon de 1 litre contenant environ 500 ml d'eau, verser 5,7 ml d'acide acétique. Peser précisément environ 2,572 g d'hydroxyde de sodium et le dissoudre dans le ballon. Compléter au trait de jauge avec de l'eau. Le pH de cette solution devrait être  $4,93 \pm 0,05$ . [79]

## **II.5. LES DIFFERENTES ANALYSES EFFECTUEES SUR LES LIXIVIATS**

Les analyses effectuées sur lixiviat sont récapitulées dans le tableau II.4.

**Tableau II.4.** Différentes analyse effectuées sur le lixiviat.

| <b>Paramètre</b>                             | <b>Matériel et réactifs</b>                     | <b>Référence</b> |
|--|---|------------------|
| Dosage des chlorures                         | Méthode de Mohr.                                | [80]             |
| Dosage des sulfates et du chrome (VI)        | Spectroscopie UV. Visible.                      | [80]             |
| Dosage du zinc, nickel, cadmium, et du plomb | Spectrophotométrie d'adsorption atomique (SAA). | [80]             |

## **II.6. METHODES D'ANALYSES**

### **II.6.1. Méthodes titrimétries**

La titrimétrie comprend l'ensemble des méthodes analytiques basées sur la détermination d'un réactif de concentration connue qui est nécessaire pour réagir complètement avec une solution de volume connu contenant la substance à analyser (l'analyte). Le réactif peut être une solution étalon, un produit chimique (titrage gravimétrique ou par précipitation) ou un courant électrique de grandeur connue (titrage colorimétrique). [81]

## II.6.2. La spectrométrie d'absorption atomique

### ➤ Principe

L'absorption atomique est un processus qui se produit lorsqu'un atome appartenant à l'état fondamental passe à l'état excité par l'absorption d'une énergie, sous la forme d'un rayonnement électromagnétique, qui correspond à une longueur d'onde spécifique.

Le spectre d'absorption atomique d'un élément est constitué d'une série de raies de résonance, tous originaires de l'état électronique fondamentale et finissent dans différents états excités.

En général, la raie de la transition entre l'état fondamental et le premier état excité définit la plus forte capacité d'absorption, et c'est la raie habituellement utilisée.

Les transitions entre l'état fondamental et l'état excité se produisent uniquement lorsque le rayonnement incident, provenant d'une source lumineuse, est exactement égale à la fréquence d'une transition spécifique. Une partie de l'énergie de la radiation incidente  $I_0$  est absorbée.

Le rayonnement émis est donné par  $I$ , qui est égale à :

$$I = I_0 \times e^{-(\epsilon l)} \dots \dots \dots \text{Eq(II.9)}$$

Où :  $\epsilon$  est le coefficient d'absorption de l'élément à analyser

$l$  est la longueur du trajet horizontal du rayonnement à travers la chambre d'absorption.

L'absorption atomique est déterminée par la variation de la puissance rayonnante du faisceau incident en présence et en absence d'atomes analytes dans l'atomiseur. La quantité d'énergie absorbée, à partir d'un faisceau de rayonnement pour la longueur d'onde d'une raie de résonance, augmentera avec l'augmentation du nombre d'atomes de l'élément sélectionné dans la chambre d'absorption.

$$\text{Absorption} = \text{Atome excité} = \text{Atome fondamental} + h\nu \text{ absorbé} \dots \dots \dots \text{Eq(II.10)}$$

$$A = \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \dots \dots \dots \text{Eq(II.11)}$$

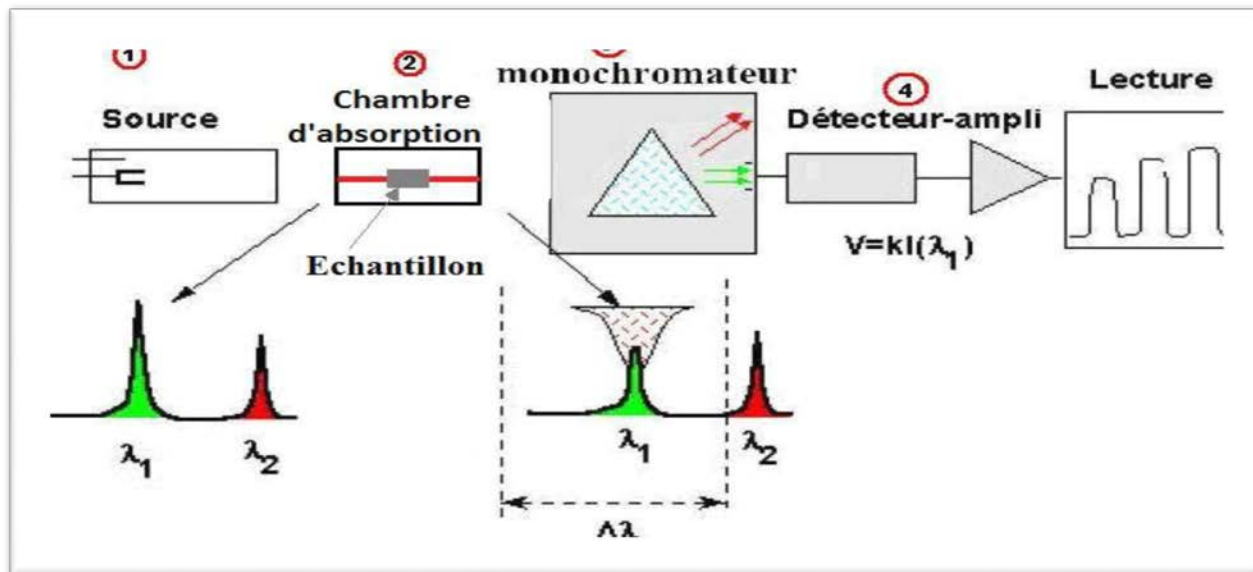
On peut déterminer les concentrations des échantillons en comparant les quantités de rayonnement absorbé par ces derniers avec la quantité de radiation absorbé par les standards. La lecture de l'instrument peut être calibrée de façon à afficher les concentrations de l'échantillon directement.

### ➤ Appareillage

Les instruments de base pour la spectrométrie d'absorption atomique comportent quatre parties principales:

Le faisceau lumineux issu de la source (1) traverse la chambre d'absorption (flamme ou four) (2) dans laquelle l'élément se trouve porté à l'état atomique, avant d'être focalisé sur la

fente d'entrée d'un monochromateur (3) qui sélectionne un intervalle très étroit de longueurs d'onde. Le trajet optique se termine sur la fenêtre d'entrée du détecteur (4) (Figure II.6) [82].



**Figure II.6.** Les instruments de base pour la spectrométrie d'absorption atomique.

### II.6.3. Spectrométrie d'absorption UV-Visible

La spectrophotométrie d'absorption de l'ultraviolet et du visible est une méthode d'analyse quantitative d'un grand nombre d'espèces organiques et inorganiques. Elle est basée sur l'étude des interactions entre la matière et les radiations électromagnétiques. [83]

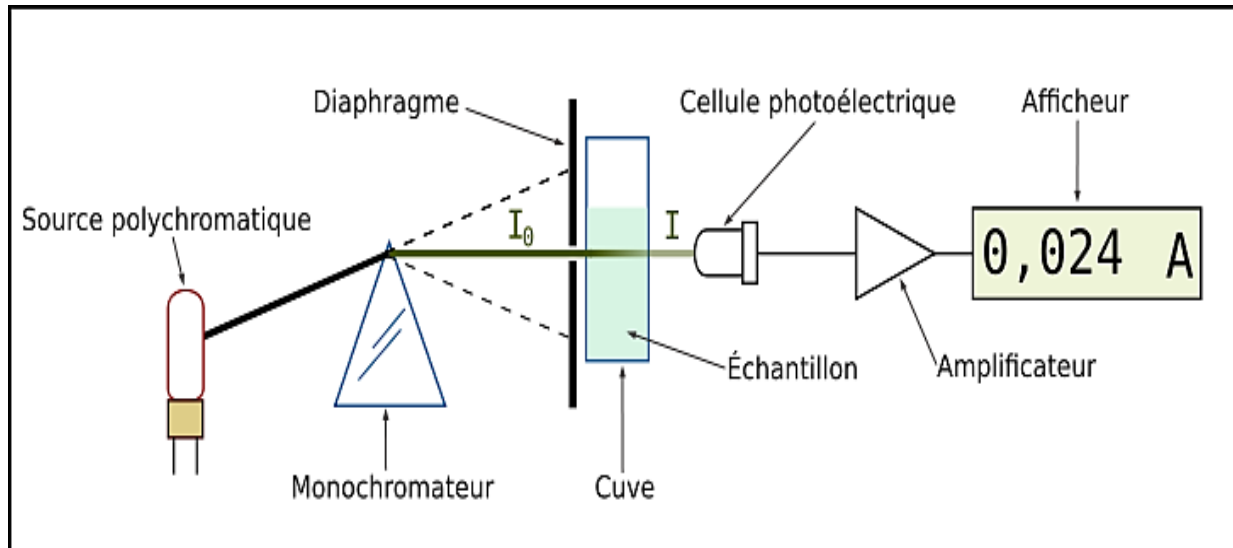
Les matériaux absorbent la lumière différemment selon la longueur d'onde de la lumière.

#### ➤ Principe de mesure :

Le principe repose sur un faisceau monochromatique d'une longueur d'onde donnée qui traverse l'échantillon, et un détecteur en sortie de cuve mesure l'absorption du rayon incident. La technique d'analyse est souvent utilisée dans un mode quantitatif pour déterminer la concentration d'une entité chimique en solution, en utilisant la Loi de Beer-Lambert :

$$A = \varepsilon \cdot L \cdot c \dots \dots \dots \text{Eq(II.12)}$$

Où : A : Absorbance de la solution ; L : Largeur de la cellule contenant la solution ; C : Concentration du composé en solution ;  $\varepsilon$  : Coefficient d'extinction molaire du composé (constante).



**Figure II.7.** schéma de principe d'un spectrophotomètre d'absorption UV-visible

## II.7. STABILISATION/SOLIDIFICATION AU LIANT HYDRAULIQUE

Le choix d'une technologie de traitement de sols contaminés dépend toujours des besoins et des circonstances du projet étudié (quantités, concentrations en contaminants, budget, échéancier, réglementations, etc.). L'utilisation d'un procédé de S/S au ciment sera généralement motivée par la présence d'une forte concentration en métaux ou d'autres éléments inorganiques dans les sols. Bien entendu, l'utilisation de ce type de procédé est régie par une réglementation stricte, surtout si une revalorisation des sols traités est envisagée (remblai, matériaux de construction, etc.).

### ➤ Formulation

La première étape dans la mise au point du procédé de Stabilisation/Solidification est le choix des constituants. Nous avons choisi un procédé à base de liants hydrauliques, donc à base de ciment et d'eau. La quantité d'eau est un paramètre important pour l'obtention d'une matrice la plus performante possible, on a opté pour le meilleur compromis, entre une quantité d'eau suffisante pour une bonne maniabilité, et pas trop élevée pour éviter d'augmenter la porosité avec un rapport. Les formulations finales sont présentées dans le tableau II.3.

**Tableau II.6** Formulation utilisée dans le procédé de S/S.

|          |         | 5%    | 7%    | 10% | 15%   | Masse total sec(g)             |
|----------|---------|-------|-------|-----|-------|--------------------------------|
| PO-01-09 | Ms(g)   | 332.5 | 325.5 | 315 | 297.5 | 350                            |
|          | Mc(g)   | 17.5  | 24.5  | 35  | 52.5  |                                |
|          | Ve (ml) | 200   | 180   | 190 | 190   |                                |
| PO-02-09 | Ms(g)   | 380   | 372   | 360 | 340   | 400                            |
|          | Mc(g)   | 20    | 28    | 40  | 60    |                                |
|          | Ve (ml) | 300   | 300   | 300 | 300   |                                |
| PO-03-09 | Ms(g)   | 380   | 372   | 360 | 340   | 400                            |
|          | Mc(g)   | 20    | 28    | 40  | 60    |                                |
|          | Ve (ml) | 190   | 180   | 190 | 180   |                                |
| PO-03-10 | Ms(g)   | 380   | 418.5 | 405 | 382.5 | 5% :400<br>(7,10,15)% :<br>450 |
|          | Mc(g)   | 20    | 31.5  | 45  | 67.5  |                                |
|          | Ve (ml) | 100   | 100   | 100 | 100   |                                |
| Cuvette  | Ms(g)   | 380   | 325.5 | 315 | 297.5 | 5% :400<br>(7,10,15)% :<br>350 |
|          | Mc(g)   | 20    | 24.5  | 35  | 52.5  |                                |
|          | Ve (ml) | 300   | 200   | 200 | 200   |                                |

Ms : masse solide, Mc : masse ciment, Ve : Volume de l'eau

### ➤ Mise en œuvre

Le mélange est effectué conformément à la norme NF P 98-230-3 [84,85]. Les constituants sont introduits dans un malaxeur, dans l'ordre des masses décroissantes, puis malaxés à sec pendant une à deux minutes. L'eau est enfin ajoutée et le tout est malaxé pendant 15 minutes environ.

Le mélange est coulé dans des moules rectangulaires en acier de dimension (4\*4\*16 cm<sup>3</sup>) puis stocké dans des moules à l'abri de l'air, à température ambiante (20 ± 3°C).

Au bout de 28 jours de cure, les éprouvettes sont démoulées afin de subir des essais de caractérisation, tel que la résistance mécanique, l'analyse par diffraction au rayon-X et le test de lixiviation TCLP.

#### II.7.1. Détermination des résistances mécaniques [86]

Après une cure de 28 jours, les éprouvettes de dimension 4\*4\*16 cm<sup>3</sup> ont subis des tests mécaniques selon la norme EN 196-1.

### ➤ Principe

La résistance mécanique est mesurée selon la norme (EN 196-1) cette norme européenne décrit une méthode de détermination des résistances à la compression et à la flexion d'un mortier de ciment.

La norme classe les ciments suivant leur résistance normale à 2 et 28 jours. La résistance normale du ciment est la résistance à la compression mesurée sur mortier normalisé conservé à 20°C conformément à la norme EN 196 - 1. Elle s'exprime couramment en MPa ou N/mm<sup>2</sup>.

#### II.7.1.1. Résistance à flexion

L'essai de rupture par flexion est effectué sur une éprouvette prismatique de (4\*4\*16 cm<sup>3</sup>) en mortier placé sur deux rouleaux distant de 100 mm. On actionne la presse qui va appliquer une charge progressive, continue et sans chocs à vitesse constante sur l'éprouvette jusqu'au moment de rupture.

Ensuite, on enregistre les résultats de la charge de rupture  $F_f$  et de la contrainte  $R_f$  correspondantes. Cette contrainte est appelée résistance à la flexion et si  $F_f$  est exprimée en (N),  $R_f$  est exprimée en (MPa).

$$R_f = 1.5 \times F_f \times \frac{1}{b^3} \dots\dots\dots \text{Eq(II.15)}$$

Avec :

- $R_f$  : Résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré;
- $b$  : Côté de la section carrée du prisme, en millimètres;
- $F_f$  : Charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons;

#### II.7.1.2. Résistance à compression

L'essai consiste à placer l'extrémité du monolithe, de chaque éprouvette obtenu après rupture par flexion, dans la machine d'essai à la compression entre deux plaques d'acier. A l'aide de la presse on presse l'éprouvette à vitesse constante, en lui appliquant une charge progressive jusqu'à rupture de l'éprouvette. On lit sur l'afficheur de la presse la charge de rupture  $F_c$  et la contrainte de rupture  $R_c$ . Cette contrainte est appelée résistance à la compression et si  $F_c$  est exprimée en (N),  $R_c$  est exprimée en (MPa).

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \dots\dots\dots \text{Eq(II.16)}$$

- $R_c$  : Résistance à la compression, en newtons par millimètre carré;
- $F_c$  : Charge maximale à la rupture, en newtons. [86]

## **II.8. TEST DE LIXIVIATION TCLP SUR MONOLITHE ET ANALYSE PAR DIFFRACTION AU RAYON-X**

L'efficacité du traitement du sol par le procédé S/S est définie par deux paramètres: la formation de monolithes de sol et de leur tenue mécanique, et par la résistance à la lixiviation des contaminants. [87] Dans le but de vérifier l'efficacité de procédé de S/S on a refait le test TCLP pour comparer les teneurs en métaux relarguées avant et après S/S ainsi que l'analyse par diffraction au rayon-X sur matériaux S/S.



**CHAPITRE III. RESULTATS ET DISCUSSION**

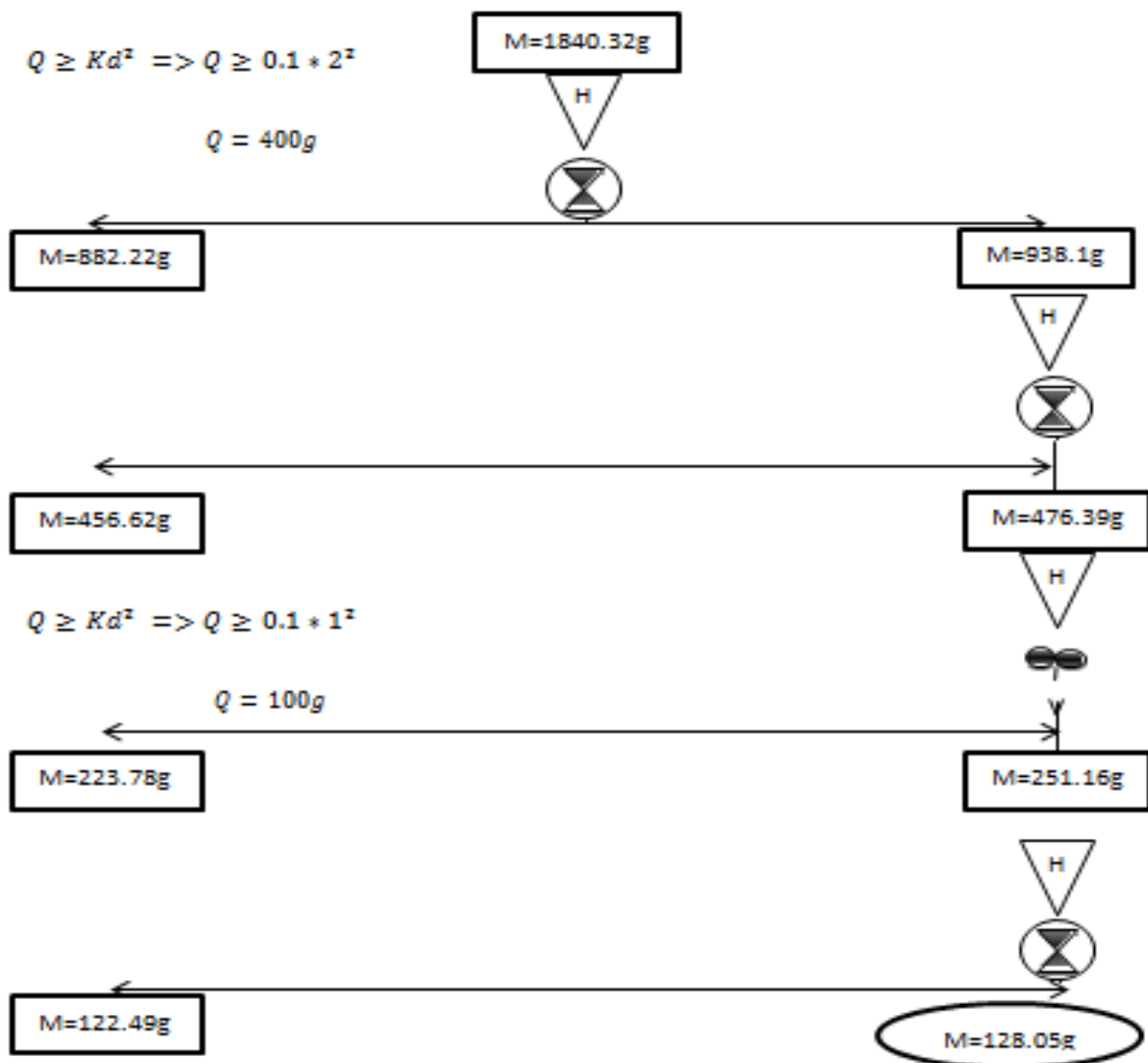
L'étude expérimentale a été réalisée sur cinq échantillons de sol. La première étape du travail réalisé est une caractérisation physico-chimique la plus large possible du sol.

L'objectif est d'arriver à une connaissance approfondie du milieu, (pH, conductivité, teneur en espèces métalliques, granulométrie,...etc.), afin d'identifier des grandeurs utiles pour le traitement par stabilisation/solidification dans le cas d'une contamination par les métaux lourds.

**III.1. CARACTERISATION DU SOL**

**III.1.1.Echantillonnage**

La figure III.1 montre les divers étapes à suivre afin d'avoir un échantillon représentative de notre sol et cela selon la loi de RICHARDS



**Figure III.1.** Le principe du quartage suivi afin d'arriver à un échantillon représentatif

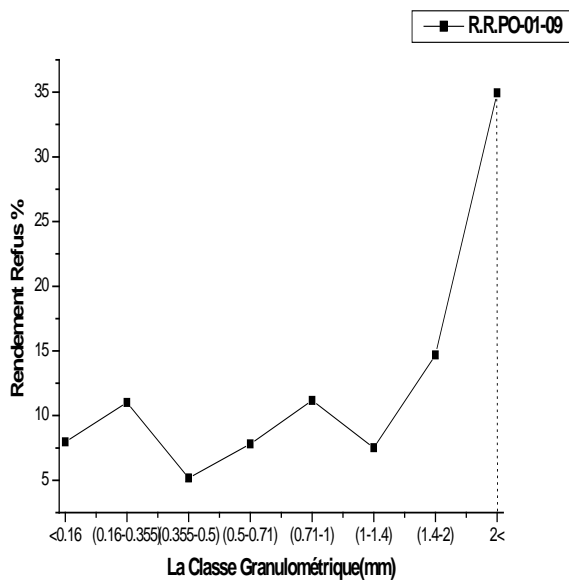
### III.1.2. Résultats de l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour objectif de mesurer la distribution par taille de particules d'un échantillon. L'identification des différentes familles granulométriques qui constituent un échantillon permet par ailleurs de définir sa texture.

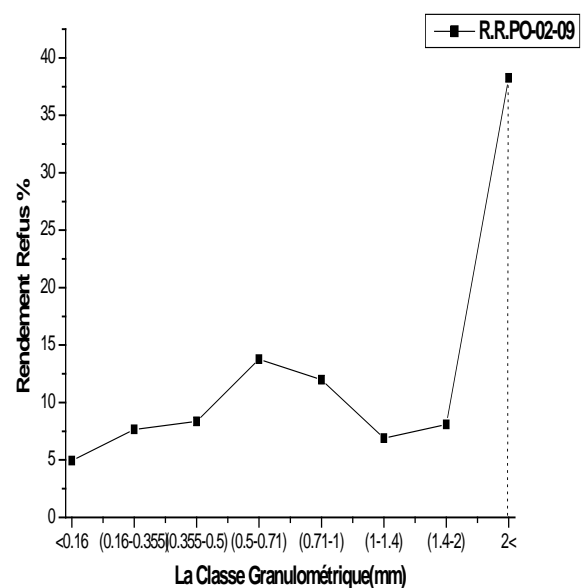
#### III.1.2.1. Variation du rendement pondérale en fonction de la granulométrie

A la lumière de ces résultats, on peut dire que: Les cinq échantillons de sols ont des profils semblables. Ils sont majoritairement composés de la fraction de taille 2 mm et plus. Donc, leurs textures d'après les données de la littérature indiquées dans (Chapitre I.1.3.3.2) correspondent à un sable grossier. La figure III.2 illustre la variation du rendement pondéral en fonction des classes granulométriques obtenues par tamisage des échantillons de sol.

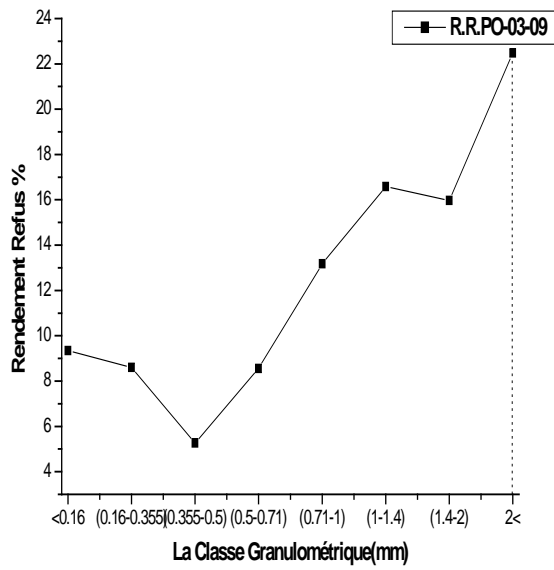
La classe granulométrique de ces échantillons la plus pondérale est inférieure à 2 mm. Elle représente 34,95% en poids du tout-venant. Toutefois, les proportions pondérales des tranches granulométriques (1,4-1 mm) et (0,5-0,355 mm) non utilisées ne sont pas négligeables. Elles représentent respectivement 7,51 % et 5,19 % en poids du tout-venant pour l'échantillon (PO-01-09).



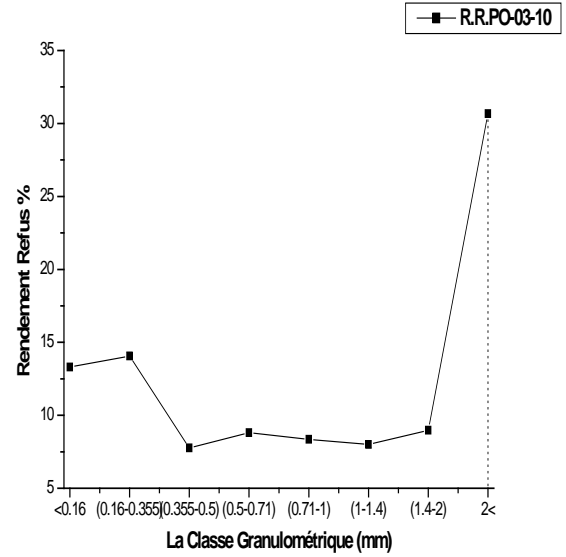
**R.R.PO-01-09**



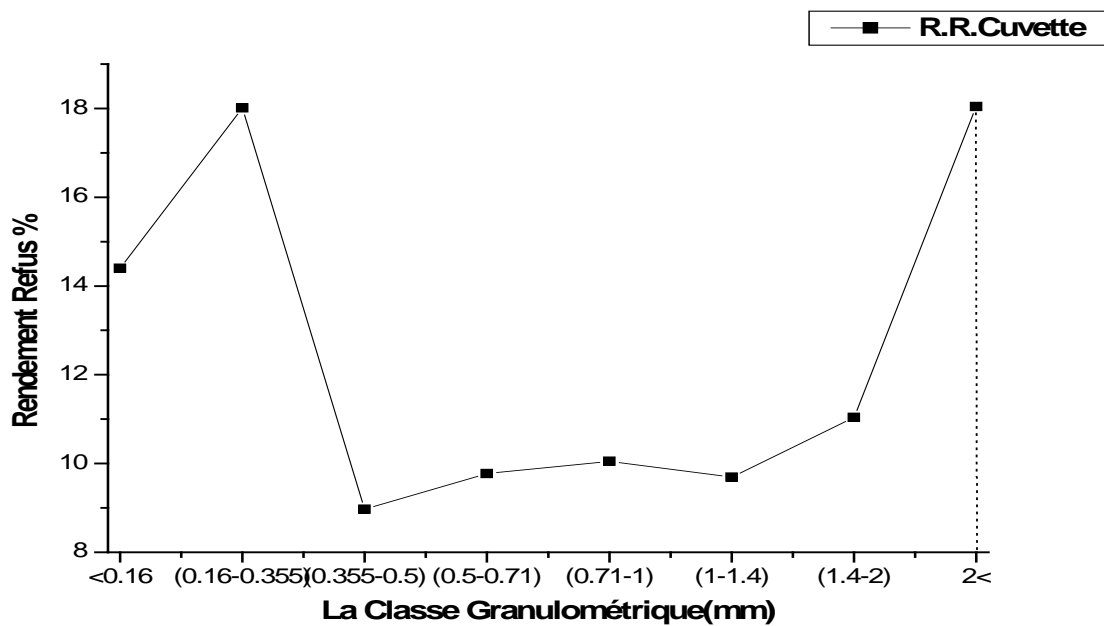
**R.R.PO-02-09**



**R.R.PO-03-09**



**R.R.PO-03-10**



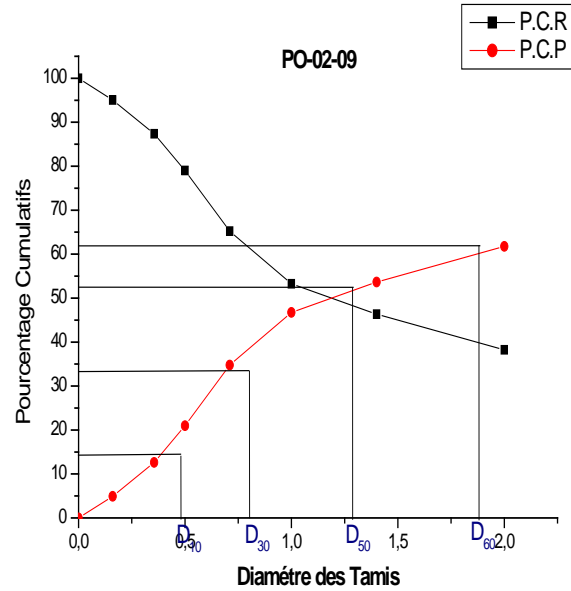
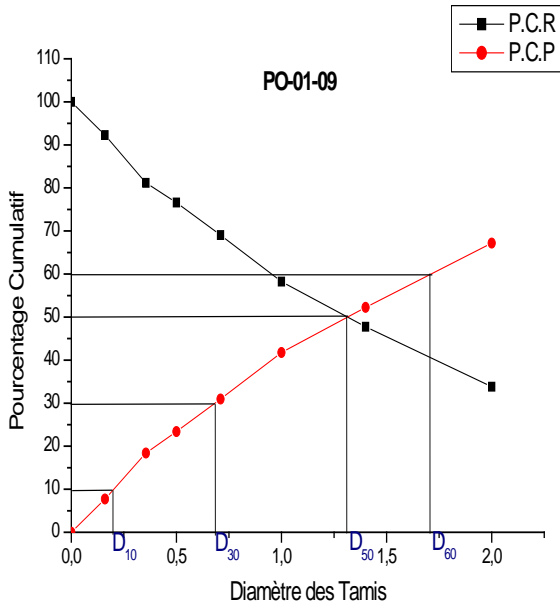
**R.R.Cuvette**

**Figure III.2.** Variation du rendement pondéral en fonction des classes granulométriques obtenues par tamisage des échantillons de sol.

**III.1.2.2. Courbe granulométrique**

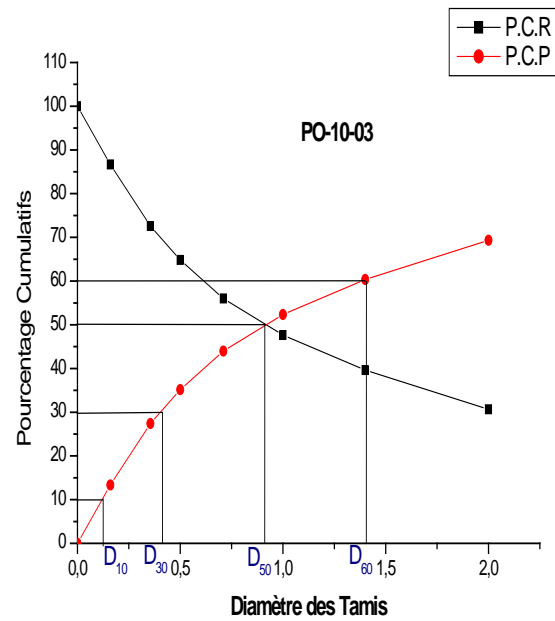
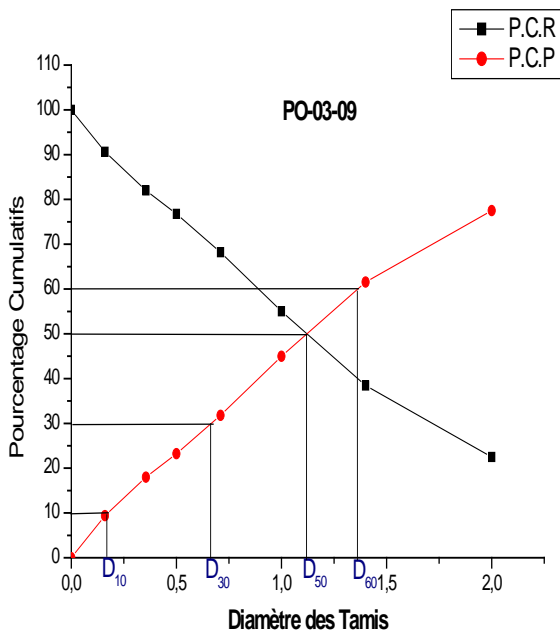
D'après les résultats obtenus, on constate que les rendements cumulatifs des tamisât sont croissants en fonction des diamètres moyens des tamis. Par contre les rendements cumulatifs des refus sont décroissants en fonction des diamètres moyens des tamis. De plus, ces deux

courbes (refus-tamisât) sont symétriques et se croisent en un point  $D_{50}$ , c'est le diamètre de la maille du tamis qui permet le passage de 50% du matériau du départ.



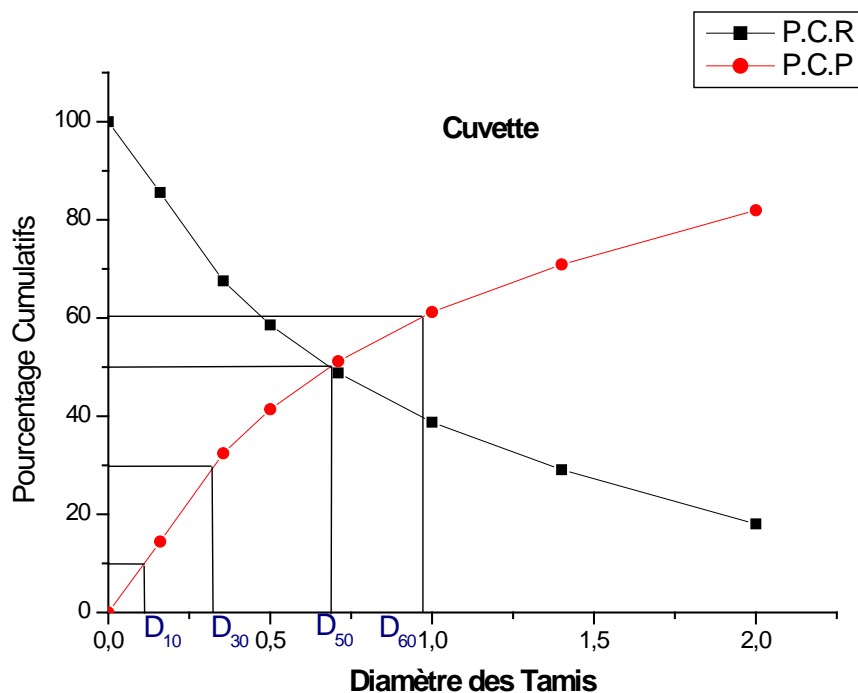
P.C.PO-01-09

P.C.PO-02-09



P.C.PO-03-09

P.C.PO-03-10



**P.C.Cuvette**

**Figure III.3.** Evolution des refus et des tamisât en fonction des ouvertures des tamis des échantillons du sol.

Le  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$ , et le  $D_{60}$  représentent respectivement les diamètres des éléments correspondant à 10%, 30%, 50% et 60% de tamisât. Ils représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de 10%, 30%, 50% et 60% du matériau du départ. D’après la courbe tamisât-refus (figure III.3-échantillon PO-01-09) on obtient:  $D_{10}= 0,190$  mm;  $D_{30} = 0,685$  mm;  $D_{50}=1,311$  mm et  $D_{60} =1,700$  mm.

**III.1.2.3.Coefficient de HAZEN (coefficient d’uniformité)**

Le coefficient de HAZEN permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (Uniforme). Ce coefficient est défini par la relation suivante :

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \dots\dots\dots III.1$$

Avec :  $C_U$  : Le coefficient de HAZEN (uniformité); D’après CAQUOT et KERISEL [88] :

- $C_U < 2$ : La granulométrie est dite uniforme ;
- $C_U > 2$ : La granulométrie est dite étalée.

Pour l'échantillon PO-01-09, on trouve:  $C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 8.5$ ;  $C_U > 2$ , on conclut que la granulométrie est étalée. Les résultats obtenus pour les quatre autres échantillons sont illustrés dans le tableau III.1.

**III.1.2.4.Coefficient de courbure**

Le coefficient de courbure vient en complément à celui de HAZEN dans la classification des sols. Afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée (un sol est mal gradué si une fraction des grains prédomine). Le coefficient de courbure est donné par l'équation suivante:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \dots \dots \dots III.2$$

$C_c$  : le coefficient de courbure :

- $1 < C_c < 3$  : La granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie) ;
- $C_c < 1$  et  $C_c > 3$ : La granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

Pour l'échantillon PO-01-09, on trouve :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}} = 1,36. C_c < 1 ; \text{ implique une granulométrie bien graduée (continuité bien répartie).}$$

Les coefficients de courbures et d'uniformités des échantillons de sol sont illustrés dans le tableau III.1, ce tableau révèle que les valeurs des coefficients d'uniformité sont supérieures à 2 pour tous les échantillons. Donc, le sol présente une granulométrie variée.

**Tableau III.1** Les coefficients de courbures et d'uniformités ( $C_c/C_u$ )

|                 | D <sub>10</sub> | D <sub>30</sub> | D <sub>50</sub> | D <sub>60</sub> | Cu / Cc      | Commentaire  |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|--|
| <b>PO-01-09</b> | 0.20            | 0.68            | 1.31            | 1.70            | 8.50 / 0.36  | Cu : La granulométrie étalée<br>Cc : La granulométrie bien graduée |
| <b>PO-02-09</b> | 0.48            | 0.80            | 1.28            | 1.88            | 3.99 / 0.51  | Cu : La granulométrie étalée<br>Cc : La granulométrie male graduée |
| <b>PO-03-09</b> | 0.17            | 0.66            | 1.12            | 1.36            | 8.00 / 1.88  | Cu : La granulométrie étalée<br>Cc : La granulométrie bien graduée |
| <b>PO-03-10</b> | 0.12            | 0.41            | 0.91            | 1.40            | 11.66 / 1.00 | Cu : La granulométrie étalée<br>Cc : La granulométrie bien graduée |
| <b>CUVETTE</b>  | 0.11            | 0.32            | 0.68            | 0.97            | 8.81 / 0.95  | Cu : La granulométrie étalée<br>Cc : La granulométrie male graduée |

### III.1.3. Analyse physico-chimique

La structure, la texture et la composition du sol lui confèrent des caractéristiques particulières qui influencent les phénomènes d'infiltration et de rétention des éléments traces métalliques. L'ensemble des résultats physico-chimiques obtenus après caractérisation du sol sont rassemblés dans le tableau III.2 ci-dessous.

**Tableau III.2.** Résultats physico-chimiques obtenus après caractérisation du sol

|                 | pH <sub>H2O</sub> | pH <sub>KCl</sub> | Conductivité<br>( $\mu\text{S}/\text{Cm}$ ) | Humidité<br>(%) |
|-----------------|-------------------|-------------------|---|-----------------|
| <b>PO-01-09</b> | 8.40              | 6.53              | 255   | 19.5            |
| <b>PO-02-09</b> | 7.81              | 7.52              | 220   | 19.6            |
| <b>PO-03-09</b> | 7.53              | 7.59              | 210   | 19.5            |
| <b>PO-03-10</b> | 8.37              | 8.18              | 255   | 19.6            |
| <b>Cuvette</b>  | 8.03              | 7.40              | 220   | 19.3            |

#### ➤ Humidité du sol

L'eau joue un rôle essentiel dans tous les phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent dans le sol. Elle pourra entrer en compétition avec les molécules organiques pour l'adsorption sur les matériaux solide, entraînant une baisse de l'adsorption des polluants lorsque le taux d'humidité du sol augmente. [89] La teneur en eau du sol est un facteur déterminant dans la répartition du polluant dans les trois phases du sol. Les taux d'humidité des échantillons de sol varient entre 19.3 % à 19.6 %. Cette valeur dépend fortement des conditions climatiques au moment des prélèvements au printemps, l'eau n'était pas totalement infiltrée ainsi que la présence des matières organiques dans le sol qui empêche l'évaporation de l'eau.

#### ➤ pH du sol

Le pH fait partie d'une des plus importantes caractéristiques physico-chimiques des sols, car la spéciation, la mobilité et la disponibilité des éléments de traces métalliques sont liées à la valeur du pH. [90]

D'après les valeurs des pH enregistrées dans le tableau III.2, il ressort que ces valeurs sont comprises entre 7.53 et 8,40. Le sol présente un pH alcalin, cette alcalinité peut être attribuée à la présence des carbonates.

Des études similaires ont montré que les sols ayant des valeurs de pH très élevées présentent de fortes teneurs en carbonates, favorisant ainsi l'ensemble des modes de fixation des métaux [91,92].

Cependant les valeurs de pH<sub>KCl</sub> sont inférieures aux valeurs mesurées pour le pH<sub>eau</sub>, ceci est dû au fait que l'acidité réelle prend en compte uniquement les ions H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> libérés dans

la solution par le sol, alors que l'acidité potentielle ( $K^+$ ) prend en compte également les ions  $H_3O^+$  échangeables et adsorbés par la matière organique contenant dans le sol. [93]

#### ➤ Conductivité

Les valeurs de la conductivité électrique, des échantillons de sols, enregistrées dans le tableau III.2 sont comprises entre 210.00 et 255,00  $\mu S/cm$ . Elles révèlent une forte force ionique. Ces valeurs élevées indiquent une présence de sels soluble et un caractère minérale dans le sol. Ces résultats préliminaires, peuvent dès lors indiqués la présence des polluants minéraux.

#### III.1.4. Valeur de bleu de méthylène (VBS), exprimé en $cm^3/g$

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la surface spécifique d'échange d'un matériau argileux, ce qui constitue un bon indicateur de sa susceptibilité au phénomène de retrait-gonflement. Il consiste à mesurer la capacité d'adsorption en bleu de méthylène, c'est-à-dire la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-élémentaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol.

**Tableau III.3** Valeur de bleu de méthylène (VBS)

|                 | Valeur de B.M ( $Cm^3$ ) | Valeur de VBS ( $Cm^3/g$ ) |
|-----------------|--------------------------|----------------------------|
| <b>PO-01-09</b> | 75                       | 3.75                       |
| <b>PO-02-09</b> | 100                      | 5.00                       |
| <b>PO-03-09</b> | 50                       | 2.50                       |
| <b>PO-10-03</b> | 20                       | 1.00                       |
| <b>Cuvette</b>  | 65                       | 3.25                       |

Tous les sols ont révélé des valeurs qui sont inclus dans la famille des sols limoneux-sableux. Confirment que nos sols sont de nature sableuse (résultats déjà trouvés dans la section granulométrie).

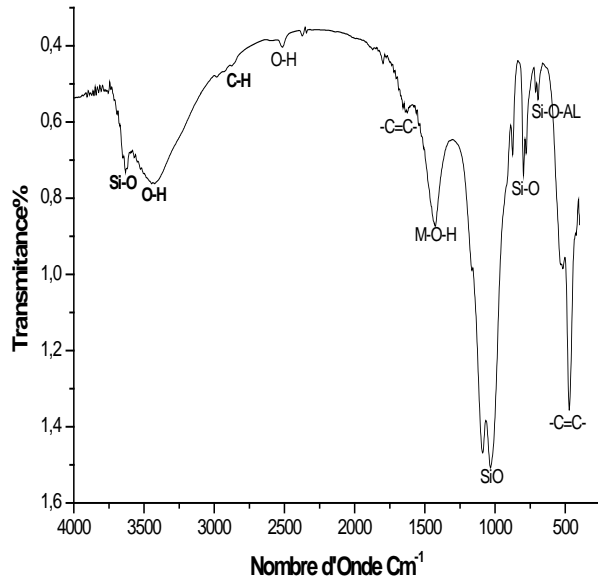
#### III.1.5. Résultats de la spectroscopie Infrarouge

L'analyse des échantillons de sol par IR nous permet d'accéder à des informations concernant les composés organiques contenus dans ce sol.

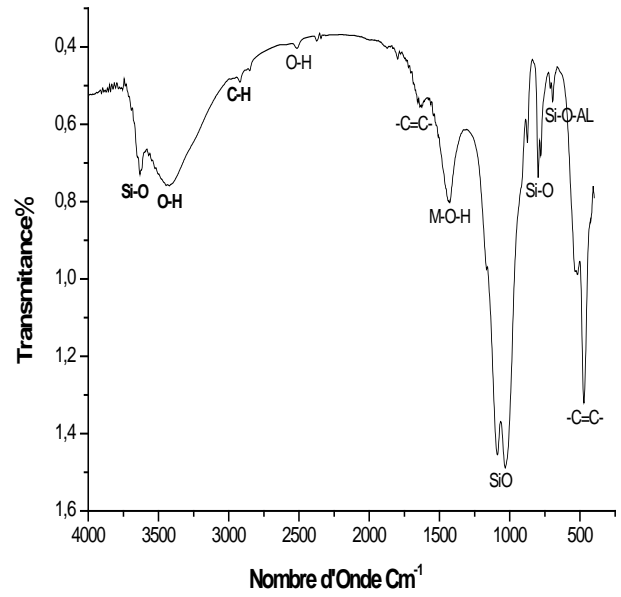
L'identification des différents signaux de vibrations a été effectuée à partir des tables d'identification infrarouge, ainsi qu'à partir des données relevées dans une recherche bibliographique.

En premier lieu, on n'a pas constaté une grande différence dans la position et la forme des bandes pour les cinq échantillons apparaît sur la figure III.4. Les différences d'intensités observées entre les spectrogrammes sont dues à l'épaisseur plus ou moins importante de la pastille analysée.

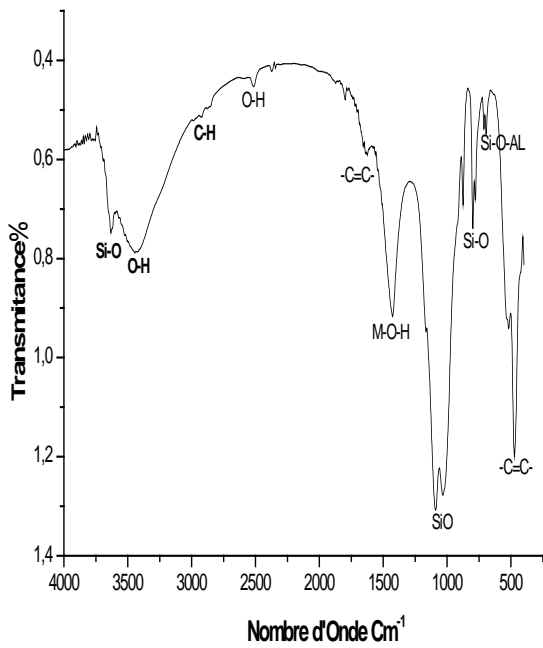




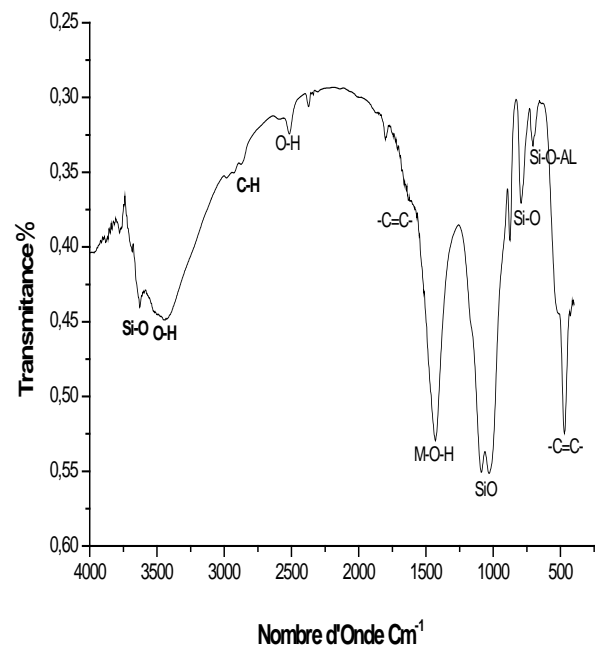
PO-01-09



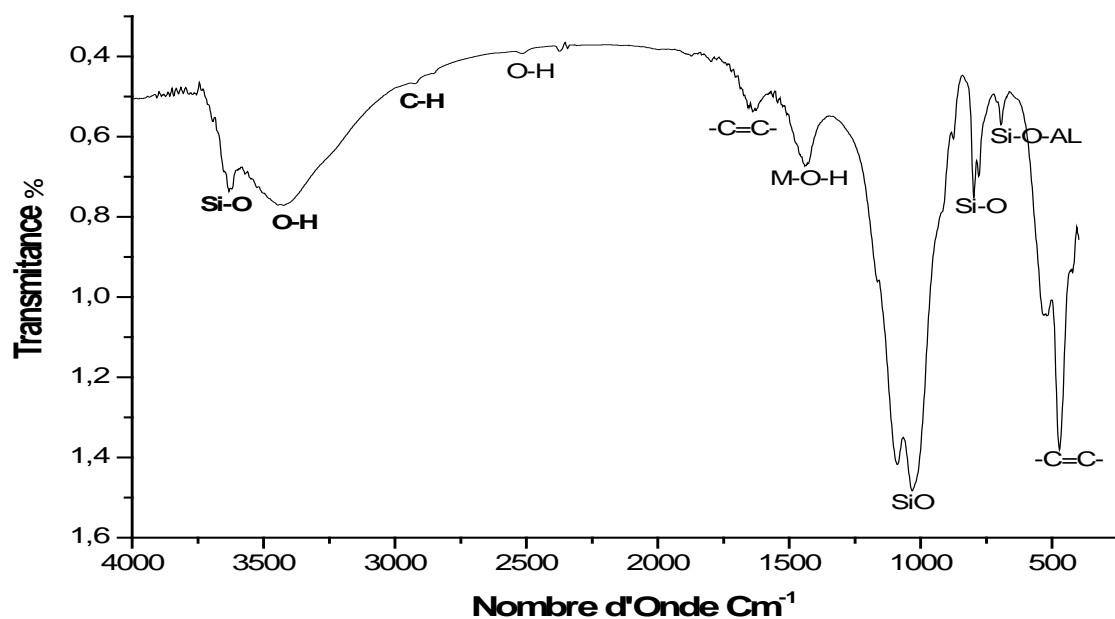
PO-02-09



PO-03-09



PO-03-10



### Cuvette

**Figure III.4.** Résultats de la Spectroscopie Infra-rouge de nos échantillons de sol

Le tableau III.4 regroupe les différents groupement fonctionnels contenus dans les cinq échantillons de sol avec leur longueurs d'onde, les résultats enregistrés dans ce tableau mettent en évidence la présence de la matière organique, dans les cinq échantillons de sol, caractérisée par les pics 472 et 1646  $\text{Cm}^{-1}$  qui correspondent à la liaison  $-\text{CH}=\text{CH}-$  d'un cycle aromatique et le quartz en quantité très importante, les bandes caractéristiques du quartz se situent aux pics 3446, 1104, 1033 et 796  $\text{Cm}^{-1}$ .

De ceci, on conclut dans un premier temps que le sol étudié est contaminé par les hydrocarbures contenus dans les eaux de purge.

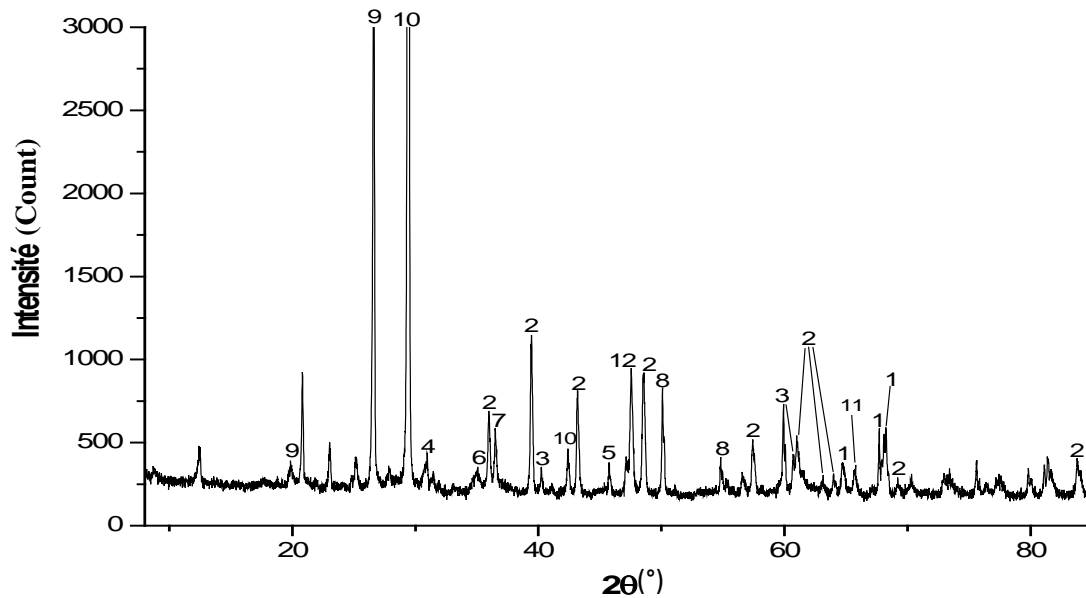
**Tableau III.4.** Analyse des spectres IR des cinq échantillons de sol étudié.

| Nombre d'ondes ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Groupement fonctionnel            | Constituant associé             | Référence |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------|
| 3446, 1104, 1033, 796               | Si-O                              | Quartz ( $\text{SiO}_2$ )       | [88,95]   |
| 1656, 472<br>1656                   | $-\text{HC}=\text{CH}-$ ou<br>C-O | Cycle aromatique<br>Carboxylate | [93,94]   |
| 1438                                | Metal-O-H                         | -                               | [96]      |

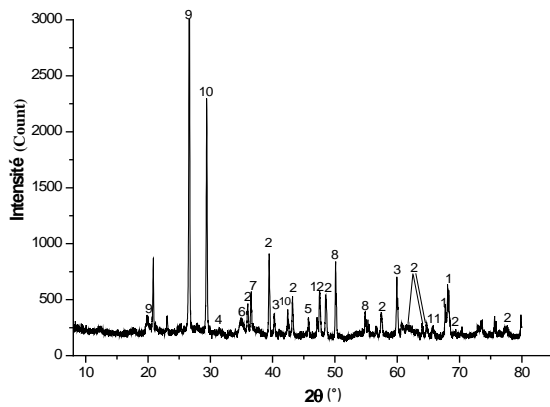
### III.1.6. Composition minéralogique du sol

La diffraction des rayons X est une technique d'étude, sans contact, utilisée couramment pour identifier les espèces minérales d'une matrice solide. Elle permet entre autres de discriminer des espèces minérales de même composition chimique mais de structures cristallines différentes, telles que l'aragonite et la calcite.

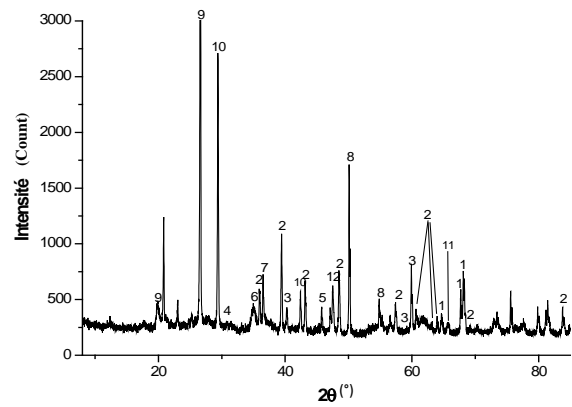
Les figures III.5 et III.6 représentent les diffractogrammes des échantillons de sol, l'analyse de ces diffractogrammes permet de mettre en évidence que les signatures minéralogiques des cinq échantillons de sol sont très similaires. Cependant quelques différences ont été observées. En effet, il peut être constaté que certains pics n'ont pas la même intensité d'un échantillon à un autre.



PO-03-10.



PO-01-09



PO-02-09

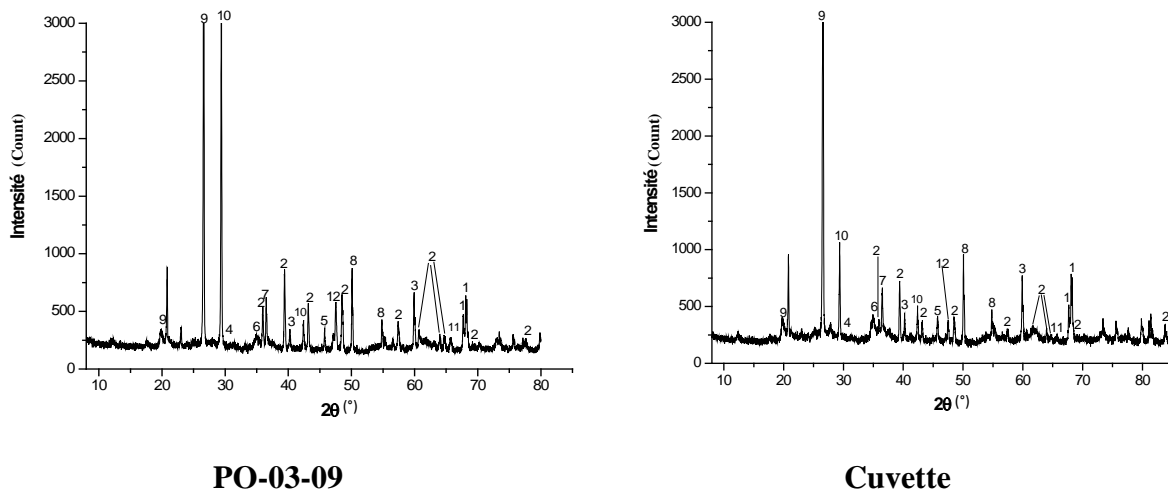


Figure III.5. Les Diffractogrammes des Echantillons De Sol

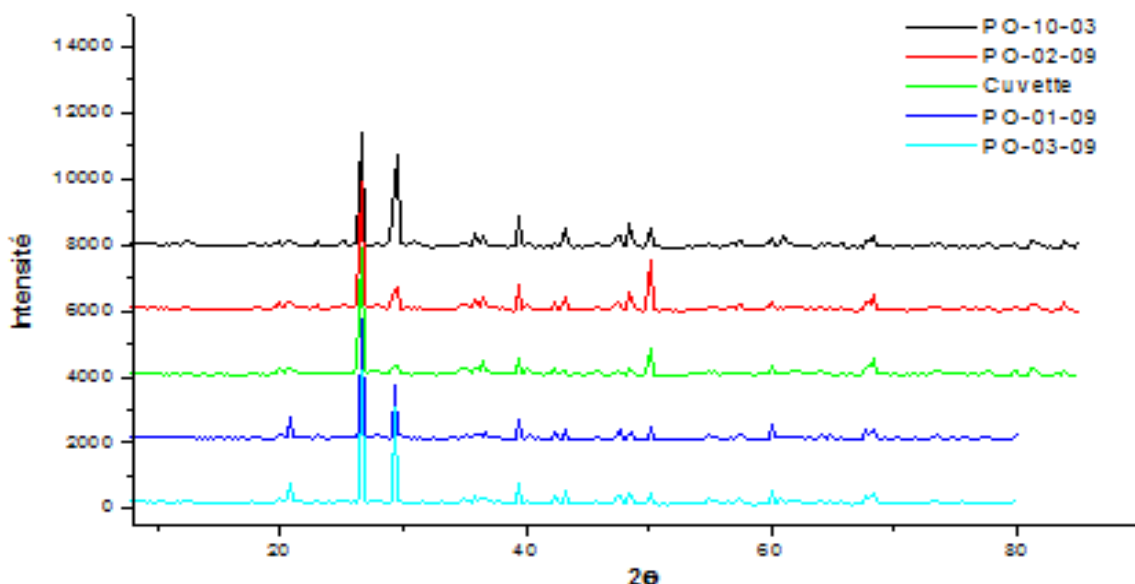


Figure III.6. La superposition des diffractogrammes des échantillons du sol.

Le tableau III.5. Synthétise les données obtenues par DRX sur l'ensemble des échantillons de sol. Les analyses minéralogiques ont permis de mettre en évidence la présence de plusieurs phases cristallines distinctes, principalement la calcite, le quartz et la présence des phases contenant des métaux lourds tels que nickel, le plomb, le zinc, le chrome et le cuivre caractérisés par les phases (Mathiasite  $(K(Ti_{13} Cr_4 Fe Zr Mg)O_{38})$ , Larosite  $(Cu, Ag)_{21}(Pb, Bi)_2S_{13}$ , Nickel Hydroxide Chloride  $(Ni_2Cl(OH)_3)$ , Zincite  $(Zn O)$ ).

On conclut, dans un deuxième temps, à travers cette caractérisation minéralogique que le sol étudié contient des métaux lourds qui peuvent être à l'origine de sa pollution.

**Tableau III.5.** Phases identifiées pour les différents échantillons de sol.

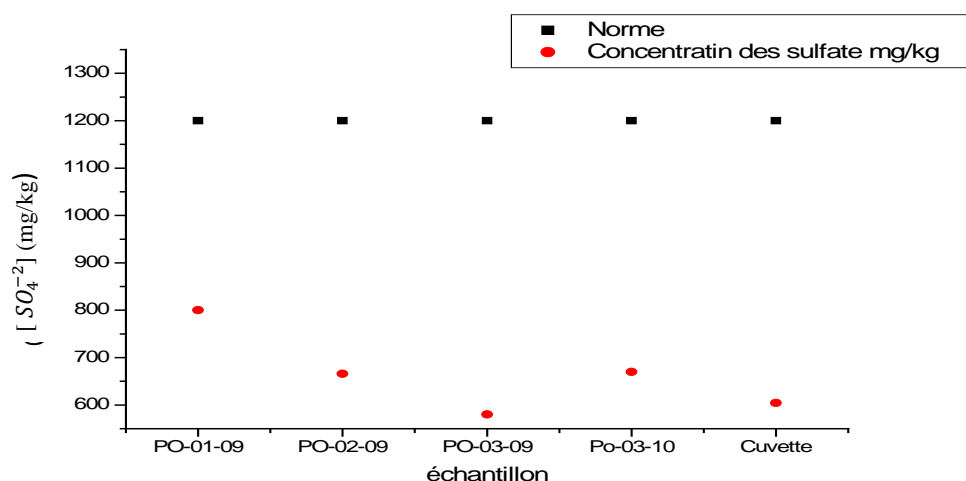
| Indice | Nom de La Phase           | Phase  |
|--------|---------------------------|--|
| 1      | Quartz                    | SiO <sub>2</sub>   |
| 2      | Calcite                   | CaCO <sub>3</sub>  |
| 3      | Brindleyite               | (Ni <sub>2</sub> , Al) (Al, Si) O <sub>5</sub> (O H) <sub>4</sub>    |
| 4      | Halite                    | K <sub>0.2</sub> Na <sub>0.8</sub> Cl                                |
| 5      | Larosite                  | (Cu,Ag) <sub>21</sub> (Pb , Bi) <sub>2</sub> S <sub>13</sub>         |
| 6      | Mimetite                  | Pb <sub>5</sub> (As O <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> Cl                 |
| 7      | Zincite                   | ZnO  |
| 8      | Violarite                 | (Fe, Ni) <sub>3</sub> S <sub>4</sub>                                 |
| 9      | Muscovite                 | KAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> |
| 10     | Mathiasite                | K(Ti <sub>13</sub> Cr <sub>4</sub> FeZrMg)O <sub>38</sub>            |
| 11     | Alumina                   | K <sub>2</sub> Al <sub>24</sub> O <sub>37</sub>                      |
| 12     | Nickel Hydroxide Chloride | Ni <sub>2</sub> Cl(OH) <sub>3</sub>                                  |

### III.1.7. Résultats des tests de lixiviations

Le but du test TCLP est de mesurer les fractions maximales mobilisables des éléments; Après caractérisation des lixiviats on a eu les résultats présenté ci-dessous ou l'analyse de l'élément Cu (Cuivre) dans les lixiviats à donner des valeurs inférieure à la limite de détection de l'appareil (SAA).

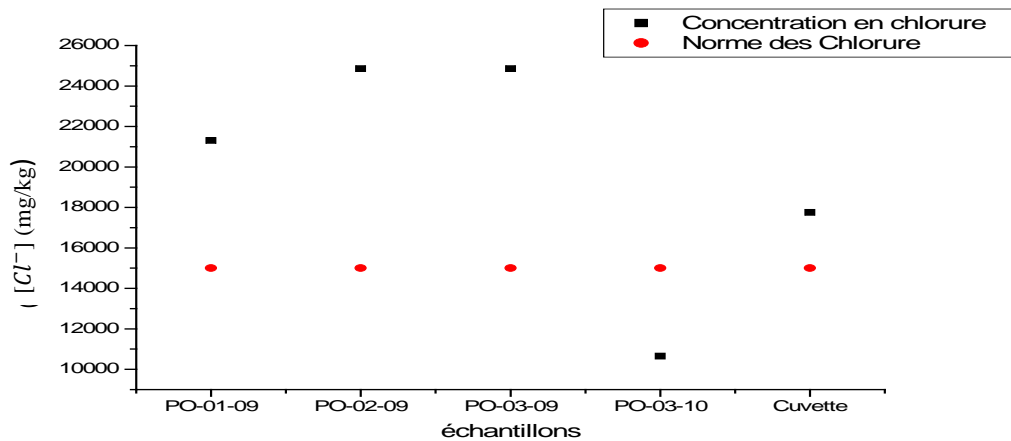
#### III.1.7.1. Teneurs en sulfates

D'après les résultats illustrés sur la figure III.7 ci-dessous, on remarque que les concentrations en sulfates sont au-dessous de la valeur limite exigé (1200mg/kg). Ce qui nous permet de dire que la présence des sulfates dans notre sol ne pose pas de risque sur l'environnement.

**Figure III.7.** Evolution des concentrations des sulfates en fonction de type d'échantillon

### III.1.7.2. Teneurs en chlorure

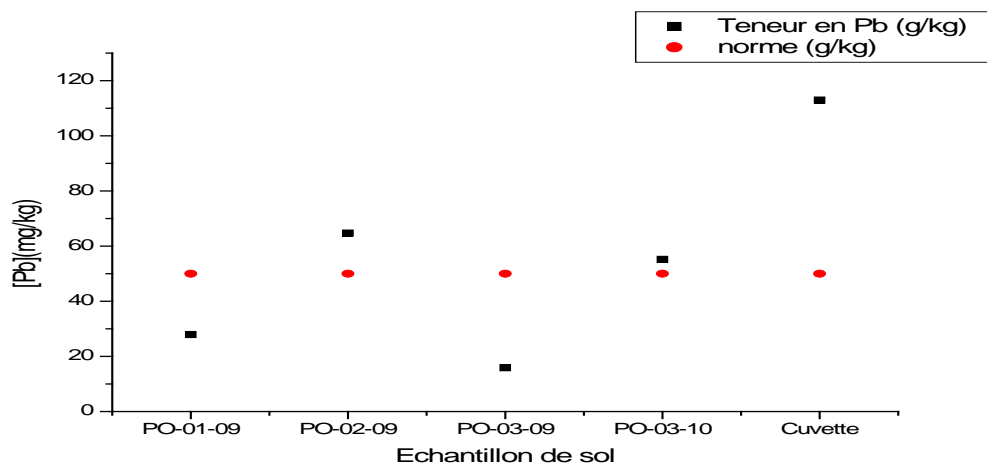
Les résultats présentés sur la figure III.8 montrent que les concentrations en chlorure de nos échantillons varient entre 10650 et 24850 mg/kg. A cet effet, les grandeurs des échantillons de sol dépassent largement la norme qui est de l'ordre de 15000 mg/kg. Ces fortes teneurs en chlorure peuvent être expliquées par des fuites dans les canalisations des rejets industriels (eau de purge), ou par le fait que le terrain de sol analysé est dans une zone côtière.



**Figure III.8.** Evolution des concentrations des chlorures en fonction de type d'échantillons.

### III.1.7.3. Teneurs en plomb

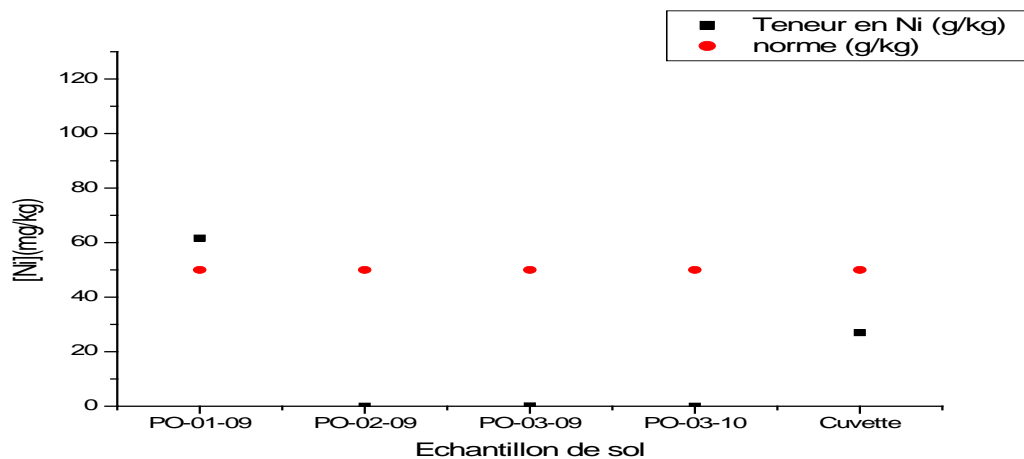
Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure III.9, cette figure montre que les teneurs en plomb varient entre 15.866 à 112.972 mg/kg, cet enrichissement en plomb peut être dû aux fuites présentes dans les canalisations des rejets industriels (eau de purge).



**Figure III.9.** Evolution des concentrations du plomb en fonction de type d'échantillon

### III.1.7.4. Teneurs en nickel

On remarque d'après les résultats illustrés sur la figure III.10 pour les différents échantillons de sol que les concentrations en nickel sont nettement au-dessous de la norme (50mg/kg), on remarque que sauf l'échantillon (PO-01-09) qui dépasse la norme avec une teneur de 60 mg/kg.



**Figure III.10.** Evolution des concentrations du nickel en fonction de type d'échantillon.

En terme de cette étude, on conclut que l'ensemble des méthodes de caractérisation utilisées converge vers les mêmes conclusions, et démontrent que le sol étudié est contaminé au minimum par le nickel et le plomb qui sont des métaux lourds nocifs pour l'environnement et la santé humaine. A cet effet, la décontamination du sol étudié est nécessaire. Pour ce faire, on propose un procédé de traitement à savoir : la stabilisation/solidification par liants hydrauliques.

## III.2. Caractérisation des matériaux stabilisés/solidifiés

### III.2.1. Essais mécaniques

L'essai de résistance mécanique a été réalisé pour étudier l'effet de liant utilisé sur les paramètres de résistance mécanique des échantillons de sol traités. Les propriétés mécaniques du matériau sont acquises par hydratation du ciment principalement au cours de la prise, laquelle correspond à la cristallisation et à l'organisation des hydrates formés en une structure mécaniquement résistante, et afin de réaliser cet étude notre travail se penche vers l'itération du pourcentage d'ajout de ciment au sol contaminé (5, 7, 10, 15) (%). Les résultats obtenus sont présentés dans les figures III.11 et III.12,

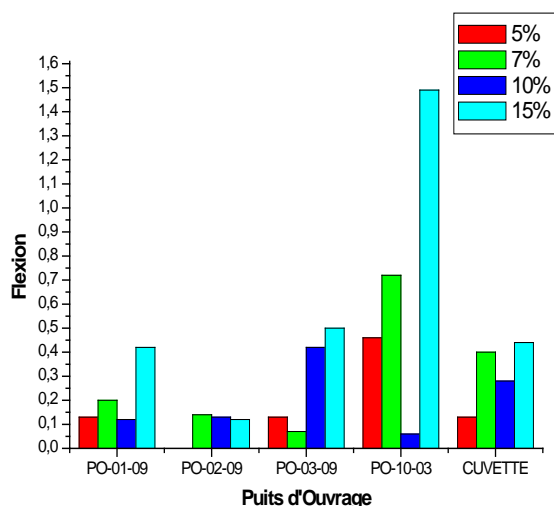


Figure III.1. Résistance à la Flexion

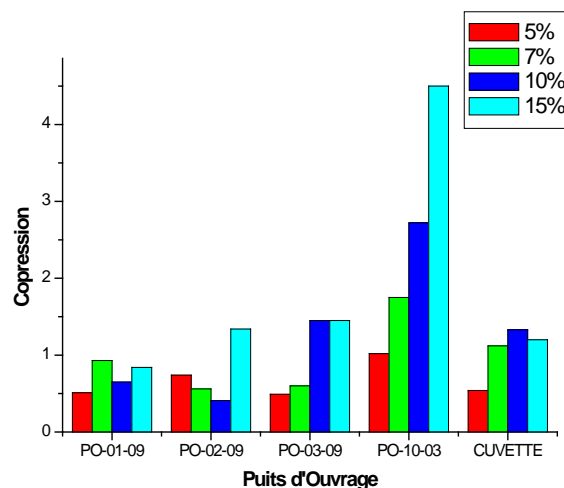


Figure III.12. Résistance à la Compression

Tableau III.6. Valeur des essais mécaniques en

|                 | 5%             |                | 7%             |                | 10%            |                | 15%            |                |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                 | $R_f$<br>(MPa) | $R_c$<br>(MPa) | $R_f$<br>(MPa) | $R_c$<br>(MPa) | $R_f$<br>(MPa) | $R_c$<br>(MPa) | $R_f$<br>(MPa) | $R_c$<br>(MPa) |
| <b>PO-01-09</b> | 0.13           | 0.51           | 0.2            | 0.93           | 0.12           | 0.65           | 0.42           | 0.84           |
| <b>PO-02-09</b> | 0              | 0.74           | 0.14           | 0.56           | 0.13           | 0.41           | 0.12           | 1.34           |
| <b>PO-03-09</b> | 0,13           | 0.49           | 0.07           | 0.6            | 0.42           | 1.45           | 0.5            | 1.45           |
| <b>PO-10-03</b> | 0.46           | 1.02           | 0.72           | 1.75           | 0.06           | 2.72           | 1.49           | 4.5            |
| <b>CUVETTE</b>  | 0.13           | 0.54           | 0.4            | 1.12           | 0.28           | 1.33           | 0.44           | 1.2            |

D'après les résultats obtenus dans les figures III.11, et III.12, on constate que : d'une part, les résistances mécaniques à la compression obtenues sont supérieures à la norme exigée qui est de l'ordre de 1MPa (dans notre cas c'est pour 15%) [97], et d'autre part les résistances mécaniques sont inversement proportionnelles au degré de contamination du sol et au pourcentage de ciment ajouté au mélange. On conclut donc, que la résistance mécanique d'un matériau se distingue et dépend fortement de la quantité des polluants incorporée dans le matériau ainsi que la quantité du ciment ajouter au mélange.

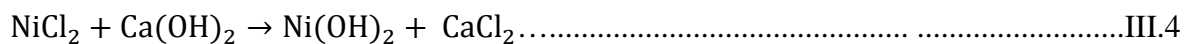
La littérature propose une large, mais contradictoire, offre concernant les effets accélérateurs ou retardateurs sur le temps de prise, ainsi que sur le développement de la résistance en compression, de ciments Portland contenant des métaux lourds. [98]

En effet, si le sol contient une importante quantité de particules fines, il en résulte une grande surface spécifique et en conséquence une grande réactivité, ce qui conduit à des valeurs de résistance à la compression élevées [99]. Ces résultats sont cohérents puisque le carbonate de calcium est l'une des matières premières entrant dans la fabrication du ciment



[100] et il peut ainsi contribuer positivement aux réactions chimiques d'hydratation du ciment en causant un durcissement plus rapide du béton frais et de meilleures résistances mécaniques. [101]

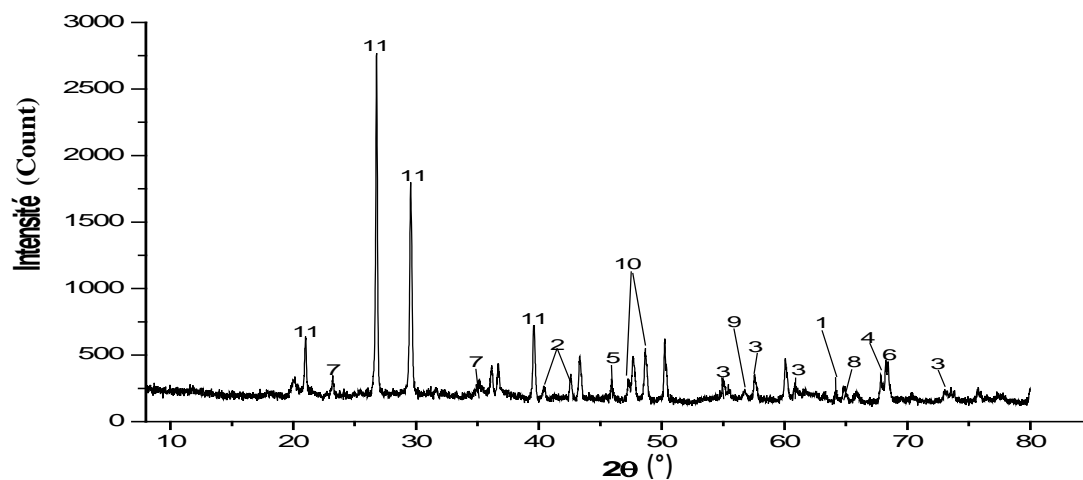
A travers l'étude précédente et d'après les résultats du test TCLP et celles de la diffraction au rayon X ; le sol est contaminé par les chlorures et le nickel [102]. Donc les valeurs élevées de la résistance mécanique peuvent être dues à deux facteurs : le premier est une accélération de l'hydratation due à la présence de chlorure de nickel, tandis que le second est la formation d'un gel  $\text{Ni}(\text{OH})_2$ , contribuant au développement des résistances mécaniques, qui se forme suite à la réaction avec la portlandite selon la réaction.[103]



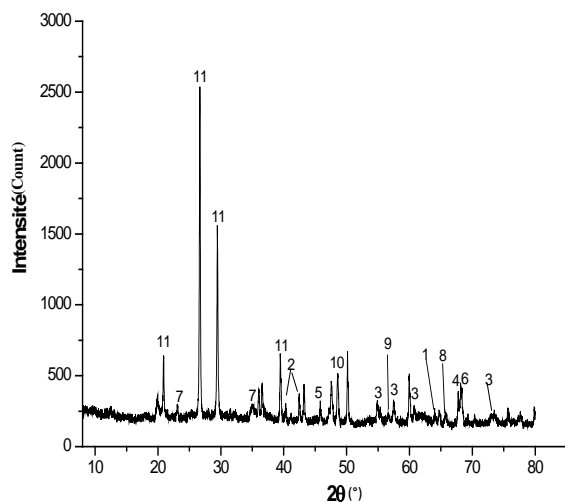
### III.2.2. Diffractogrammes DRX des matériaux S/S

La figure III.13 représente les diffractogrammes des échantillons de sol S/S, l'analyse de cette figure permet de mettre en évidence que les signatures minéralogiques des vingt échantillons de sol sont très similaires. Cependant quelques différences sont observables.

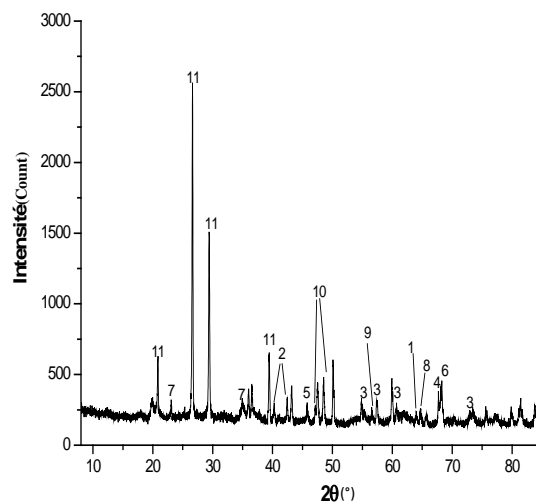
En effet, il peut être constaté que certains pics n'ont pas la même intensité d'un échantillon à l'autre.



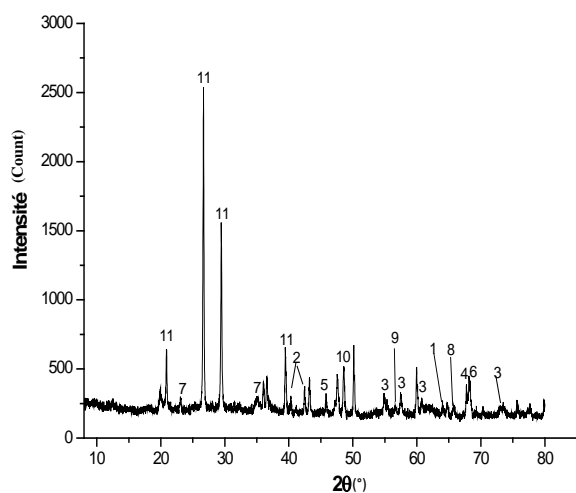
PO-03-09/15%



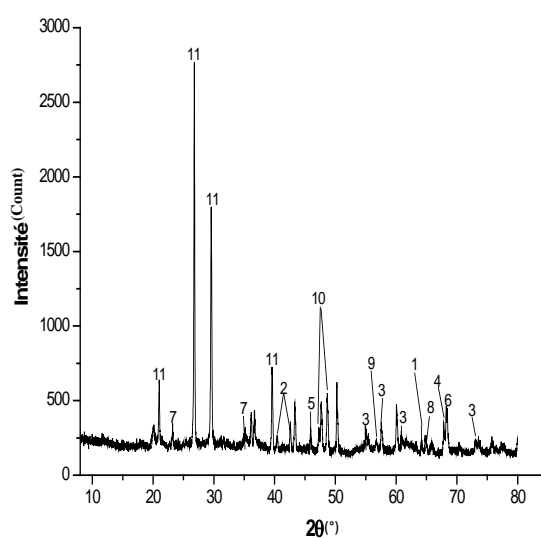
PO-01-09/15%



PO-02-09/15%



PO-03-10/15%



Cuvette/15%

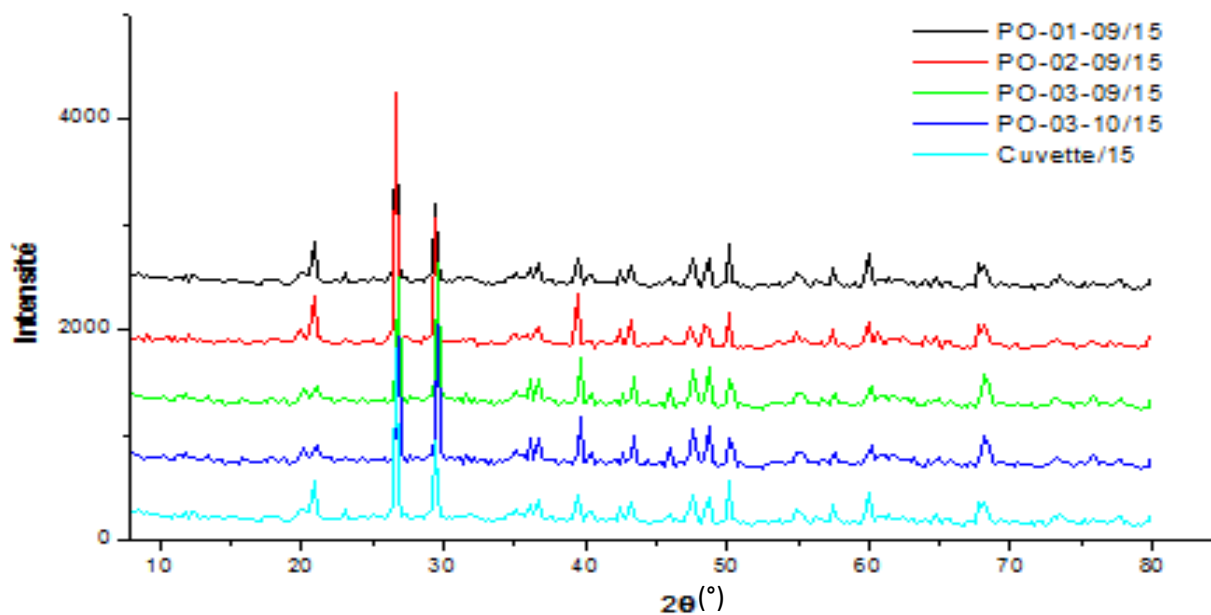
La Figure III.13. les diffractogrammes des échantillons de sol S/S

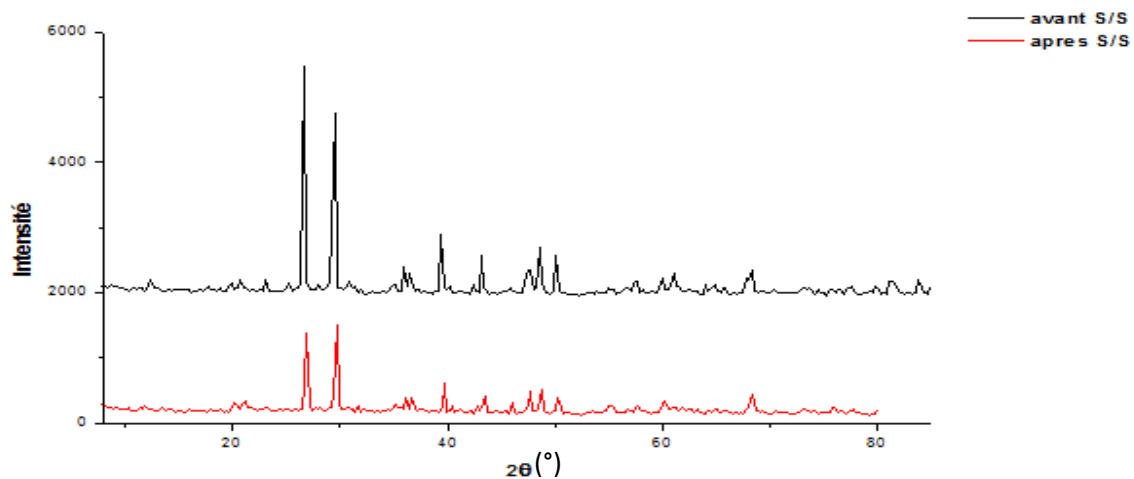
Le tableau III.7 synthétise les résultats obtenus par DRX sur l'ensemble des échantillons de sol traité par le procédé S/S. Les analyses minéralogiques ont permis de mettre en évidence qu'une différence de composition et de répartition, apparaît concernant les échantillons de sol stabilisé solidifié par rapport aux échantillons du sol bruts. En effet, il peut être observé la présence de la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), d'ettringite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$ ) et les silicates de calcium hydrate (S-C-H). Comme mentionné précédemment la présence de ces espèces minérales est liée à l'hydratation des phases cimentaires lors du procédé de stabilisation.

**Tableau III.7** Phases identifiées pour les matériaux S/S.

| Indice | Phase                    | Nom de la Phase   |
|--------|--------------------------|---|
| 1      | Portlandite              | $\text{Ca(OH)}_2$   |
| 2      | Ettringite               | $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}, 25\text{H}_2\text{O}$ |
| 3      | Calcium Silicate Hydrate | $\text{CaO}, \text{SiO}_2, \text{H}_2\text{O}$                                |
| 4      | Zincite                  | $\text{ZnO}$  |
| 5      | Muscovite                | $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$                         |
| 6      | Mimetite                 | $\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$  |
| 7      | Larosite                 | $(\text{Cu}, \text{Ag})_{21}(\text{Pb}, \text{Bi})_2\text{S}_{13}$            |
| 8      | Mathiasite               | $\text{K}(\text{Ti}_{13}\text{Cr}_4\text{FeZrMg})\text{O}_{38}$               |
| 9      | Lead Oxide               | $\text{Pb}_3\text{O}_4$   |
| 10     | Lead Sulfate             | $3\text{PbO}, \text{SO}_3$  |
| 11     | Anglesite                | $\text{PbS O}_4$  |

En terme de comparaison des diffractogrammes obtenus avant et après stabilisation/ solidification de différents échantillons de sol, on distingue une différence notable dans les intensités des pics caractéristiques de différentes phases minéralogiques de sol (quartz, calcite) qui est dû à la formation de nouvelles phases tel que l'ettringite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})$ ), la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ )...etc. Nous avons remarqué aussi la disparition de certaines phases à savoir : violarite ( $\text{Fe}, \text{Ni})_3\text{S}_4$  ...etc.

**La Figure III.14.** La superposition des diffractogrammes des échantillons du sol en question

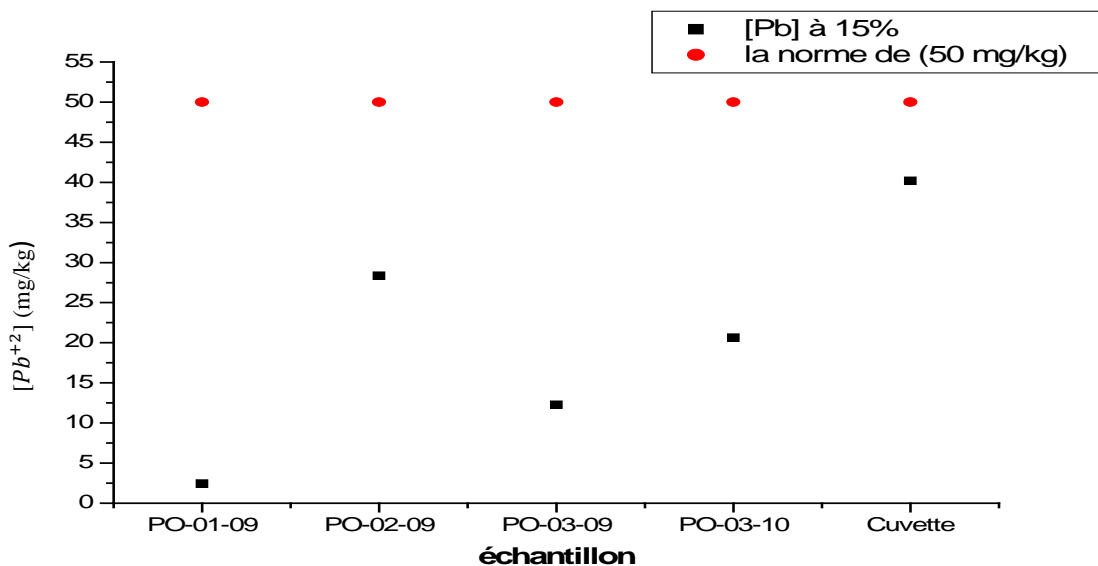


**Figure III.15.** Comparaison des diffractogrammes obtenus avant et après S/S de différents échantillons de sol

### III.2.3. Résultats du test TCLP après S/S

#### III.2.3.1. Teneur en plomb

Les résultats obtenus pour les concentrations du plomb après S/S du sol sont illustrés dans la figure III.16. On constate une diminution notable dans la concentration en ions  $Pb^{+2}$  pour tous les échantillons de sol, en raison de sa précipitation et piégeage dans des hydrates de liant hydraulique sous formes des solides confirmé par les résultats de la diffraction au rayon X. Ce qui justifie l'efficacité du procédé utilisé dans le traitement des sols.



**Figure III.16.** Les résultats obtenus pour les concentrations du plomb après S/S du sol

### III.2.3.1.1. Taux de rétention du plomb

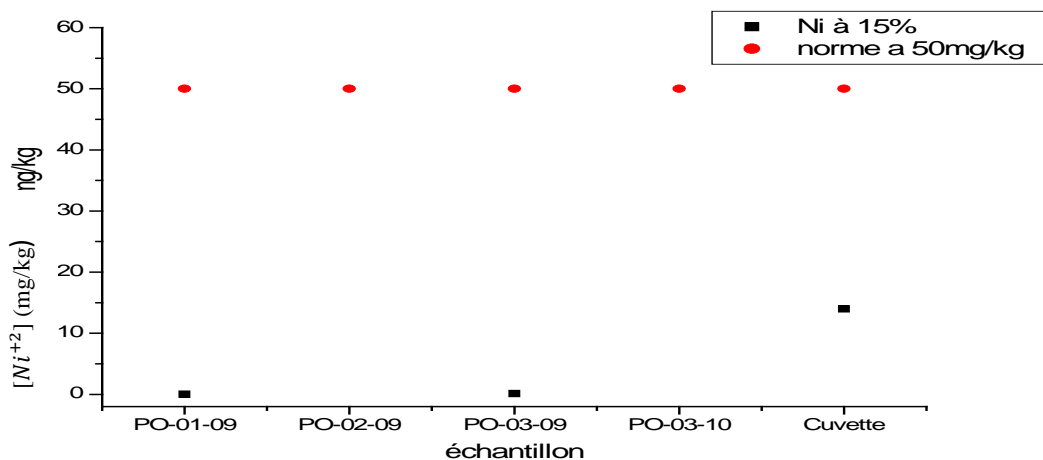
D'après la figure III.16 et le tableau III.8 on remarque que les concentrations de plomb après le procédé de solidification ont été diminuées considérablement. Cette diminution peut être justifiée par le fait que le plomb est précipité dans la matrice de ciment, sous la forme, très peu soluble, de carbonate sur la surface des silicates de calcium et d'aluminium. Cependant, on le retrouve sous plusieurs formes à savoir : oxydé ( $Pb_3O_4$ ), sulfaté ( $3PbO, SO_3$ ). Ces résultats ont été bien confirmés par les diffractogrammes DRX obtenus.

**Tableau III.8** Taux de rétention du plomb

| Echantillon<br>Extraction | TCLP<br>Avant | TCLP<br>Après | Quantité retenue | Taux de rétention(%) |
|---------------------------|---------------|---------------|------------------|----------------------|
| PO-01-09                  | 27.91         | 2.44          | 25.47            | 91.25                |
| PO-02-09                  | 64.72         | 28.36         | 36.36            | 56.18                |
| PO-03-09                  | 15.87         | 12.25         | 3.618            | 22.80                |
| PO-03-10                  | 55.20         | 20.63         | 34.57            | 62.62                |
| Cuvette                   | 112.97        | 40.18         | 72.79            | 64.43                |

### III.2.3.2. Teneur en Nickel

Les résultats obtenus pour les concentrations du nickel après S/S sont illustrés dans la figure III.17. On constate que la concentration de Ni est significativement réduite pour tous les échantillons de sol, cette concentration après S/S était au-dessous de la norme qui est de l'ordre 50 mg/kg, ce qui justifie l'efficacité du procédé utilisé dans le traitement des sols contaminés.



**Figure III.17.** Les résultats obtenus pour les concentrations du nickel après S/S du sol

### III.2.3.2.1. Taux de rétention du nickel

D'après les résultats enregistrés dans le tableau III.9, on remarque que les concentrations de nickel dans les échantillons de sol S/S ont été diminuées d'une quantité remarquable par rapport aux concentrations du sol brut. Des taux de rétention de 99.95% dans nos échantillons ont été enregistrés, à savoir l'échantillon PO-01-09, et dans l'échantillon cuvette elle est de l'ordre de 48.1 hors pour les autres ils sont quasi nul, cela s'explique par le fait qu'une partie du nickel est piégée efficacement par les phases minéralogiques formées pendant l'hydratation et l'opération de la S/S de nos échantillons bruts. Ce résultat est bien confirmé par les spectres obtenus par DRX.

**Tableau III.9** Taux de rétention du nickel

| <b>Echantillon<br/>Extraction</b> | <b>TCLP<br/>Avant</b> | <b>TCLP<br/>Après</b> | <b>Quantité<br/>retenue</b> | <b>Taux de<br/>rétention(%)</b> |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| <b>PO-01-09</b>                   | 61.65                 | 0.024                 | 61.63                       | 99.95                           |
| <b>PO-02-09</b>                   | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                        | 0.00                            |
| <b>PO-03-09</b>                   | 20.00                 | 0.12                  | 19.88                       | 99.42                           |
| <b>PO-03-10</b>                   | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                        | 0.00                            |
| <b>Cuvette</b>                    | 26.96                 | 13.99                 | 12.97                       | 48.10                           |

Suivant ces résultats obtenus après S/S on peut conclure que l'ajout du ciment portland aux sols contaminés a eu un effet positif sur la présence des métaux lourds dans les sols en question et cela par le piégeage de ces derniers et leurs emprisonnements au sein de la matrice cimentaire.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail réalisé à travers ce mémoire a eu pour objectif de valoriser l'efficacité de la méthode ainsi utilisée pour la remédiation et la décontamination du sol contaminé de la station de pétrole de Bejaia et qui est la méthode de réhabilitation par Stabilisation/Solidification.

Dans un premier temps notre étude expérimentale c'est focalisé sur une large gamme de technique de caractérisation du sol et cela dans le but de tirer des conclusions sur l'état du sol. On a abouti aux résultats suivant :

- L'analyse granulométrique à montrer que le sol traité est d'une classe granulométrique non homogène,
- L'analyse par spectroscopie infra-rouge a mis en évidence la présence de la matière organique dans le sol, caractérisé par la liaison d'un cycle aromatique  $-\text{CH}=\text{CH}-$ .
- L'analyse par Diffraction des Rayons X nous a permis d'identifier plusieurs phases cristallines distinctes, principalement la calcite, le quartz et d'autres caractérisant la présence des métaux lourds tels que le nickel, le plomb, le cuivre.
- La caractérisation des lixiviats obtenus par la méthode TCLP nous a permis de conclure :

Une concentration trop élevée en Chlorure et en Plomb et une faible concentration en nickel et Sulfate.

Dans un second temps, on a opté pour la caractérisation du sol Stabilisé/solidifié par le liant Hydraulique et cela tout en mettant en évidence la variation dans le pourcentage de ciment ajouté au sol contaminé et cela dans le but de comparer l'efficacité de ce dernier. Les résultats sont les suivants :

- Les résultats de résistance mécanique à la compression obtenus sur monolithe, sont très intéressants car ils mettent en avant que les propriétés mécaniques sont influencées par la présence (nature et teneur) des polluants inorganiques. Il apparaît que la présence du nickel et des chlorures jouent un grand rôle dans l'accélération de prise.
- L'analyse par DRX nous a permis de montrer que la composition minéralogique de nos blocs monolithiques est composée principalement des phases de portlandite, ettringite et de silicates de calcium hydratés, ainsi que la disparition de plusieurs phases et l'apparition de nouvelles phases.
- Les résultats de TCLP ainsi réalisés après S/S ont montré que les concentrations en ions  $\text{Pb}^{2+}$  pour tous les échantillons avaient un taux de rétention de l'ordre de 22.80 (%) à 91.25 (%).

**Références**

- [1]. Wang, Q. R., Cui, Y. S., Liu, X. M., Dong, Y. T., Christie, P. Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China. *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.* 38, 823-838. 2003.
- [2]. KIRPICHCHIKOVA .T. « Phytoremédiation par Jardins Filtrants d'un sol pollué par des métaux lourds » .Docteur de l'Université Joseph Fourier. Grenoble I. 2009.
- [3]. Sposito. G. 1997. *The Chemical Composition Of Soils. The Chemistry Of Soils.* Oxford University Press. New-York: P3-27
- [4]. Nortcliff. S. (2002). *Standardisation Of Soil Quality Attributes.* *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88(2) P161-168
- [5]. Glossary Of Soil Science Terms. Ed. Soil Science Society Of America. *Am. J. Potato Res.* 42, 346. 1965. [Online] <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>.
- [6]. Legros, J.P. *Les Grands Sols Du Monde.* Ed. Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes. Lausanne, 574 P. 2007.
- [7]. Duchaufour, P. *Abrégés De Pédologie.* Ed. Masson. Paris, 220 P. 1984.
- [8]. Pedro, G. *Les Grandes Tendances Des Sols Mondiaux.* *Cultivar*, 185, 1985.
- [9]. Boulaire, J. *Histoire Des Pédologues Et De La Science Du Sol.* Ed. INRA. 285 P. 1989.
- [10]. Hillel, D. *Introduction To Soil Physics.* Ed. Academic Press. New York, USA, 364P. 1982.
- [11]. Robert, M. *Le Sol : Interface Dans L'environnement, Ressource Pour Le Développement.* Ed. Masson. 244 P. 1996.
- [12]. Calvet, R. *Le Sol : Propriétés Et Fonctions. Tome 1 : Constitution Et Structure, Phénomènes Aux Interfaces.* Ed. France Agricole. 456 P. 2003.
- [13]. Sposito, G., *The Chemistry Of Soils.* Oxford University Press, New York. 2008.
- [14]. Pansu, M. And Gautheyrou, J., *L'analyse Du Sol Minéralogique, Organique Et Minérale.* Edition Springer. 2001.
- [15]. Baize D. Et Jabiol B., *Guide Pour La Description Des Sols, Collection Techniques Et Pratiques,* INRA, Paris. 1995.
- [16]. SOLTNER, D : *Distribution Liquid Et Voie Métabolique Chez Quatre Bactéries Gramnégative Hydrocarbonoclaste. Variation En Fonction De Sources De Carbone.* Docteur De L'université PARIS 6 2004



- [17]. GOBAT .J.M, ARAGNO M Et MATTHEY W : Le Livre (Le Sol Vivant : Base De Pédologie Et Biologie Des Sols). 3eme Edition Revue Et Augmentée P150-165/2010
- [18]. REDLICH G/C Et VERDURE - Le Comportement Physique Des Tourbes En Cours De Culture PHM.Revue Horticole.160 ; P 13-20 1975
- [19]. KOLLER EMILIAN. Traitement Des Pollutions Industrielles. Edition DUNOD Paris.P 277-347, 2004.
- [20]. BLANC D. Les Structures Hors Sol INRA Ed Louis.Paris.409p 1985
- [21]. Calvet, R. « Le Sol Propriétés Et Fonctions », Tome 1, France Agricole DUNOD, 455 P. (2003).
- [22]. BOUDOUCHE.O. « Étude De Dépollution Des Sols Par Extraction Sous Pression Réduite .Application Au Traitement Des Composés Organiques Volatiles ». Thèse De Doctorat. Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon. 2009.
- [23]. BASOL, [Http://Basol.Ecologie.Gouv.Fr/Home.Htm](http://Basol.Ecologie.Gouv.Fr/Home.Htm)
- [24]. Guides Méthodologiques Pour L'analyse Des Sols Pollués, R. Jeannot, B. Lemière, S. Chiron Avec La Collaboration De F. Augustin, D.Darmendrail. Éditions BRGM 2001
- [25]. Jeannot R., Lemière B., Chiron S., Augustin F. & Darmendrail D., 2001. Guide Méthodologique Pour L'analyse Des Sols Pollués. Editions BRGM, Orléans, France, 85 Pp
- [26]. Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger P., Darmendrail D. & Conil P., Guide Sur Le Comportement Des Polluants Dans Les Sols Et Les Nappes. Applications Dans Un Contexte d'Evaluation Détaillée Des Risques Pour Les Ressources En Eau. Bureau De Recherches Géologiques Et Minières, 122 Pp. 2001.
- [27]. Marc Bonnard Relations « Biodisponibilité-Genotoxicité-Ecotoxicité » Des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (Hap) Dans Les Sols De Friches Industrielles Avril 2010
- [28]. Nowak C., Mossmann J.R. & Saada A., Etat Des Connaissances Sur L'atténuation Naturelle : Mécanismes Et Mise En Oeuvre. Bureau De Recherches Géologiques Et Minières, 101 Pp. 2003.
- [29]. Christian Hocquard. Les Enjeux Des Nouveaux Matériaux Métalliques. Revue Ecomine (Ministère De l'Économie, Des Finances Et De l'Industrie), Juillet-Août 2005.

- [30]. Christian Hocquard. Le Scandium, Un Métal High-Tech Du Futur, Economiegîtologie. La Tribune, 20 Décembre 2001.
- [31]. Consortium De Recherche Pour Les Métaux De Haute Technologie (BRGM). Les Enjeux Des Éléments Du Groupe Du Platine Dans La Filière Catalyse, Juin 2003.
- [32]. Consortium De Recherche Pour Les Métaux De Haute Technologie (BRGM). Les Enjeux Du Rhénium Dans La Filière Superalliages, Juin 2003.
- [33]. Consortium De Recherche Pour Les Métaux De Haute Technologie (BRGM). Les Enjeux Du Germanium Dans La Filière Ntic, Juin 2003.
- [34]. Consortium De Recherche Pour Les Métaux De Haute Technologie (BRGM). Les Enjeux De L'indium Dans La Filière Ntic, Juin 2003.
- [35]. V. Laperche, M. C. Dictor, B. Clozel-Leloup, And Ph. Baranger. Guide Méthodologique Du Plomb, Appliqué A La Gestion Des Sites Et Sols Pollués. BRGM/RP-52881-FR, Juin 2004. Étude Réalisée Dans Le Cadre Des Actions De Service Public Du BRGM 2003-POLA06
- [36]. C. Bliefert And R. Perraud. Chimie De L'environnement. Air, Eau, Sols, Déchets. De Boeck Université, Paris, Bruxelles, 1re édition, 2008.
- [37]. Denis Baize. Petit Lexique De Pédologie. INRA Editions, Paris, 2004.
- [38]. BAIZE. D. « Teneurs Totales En Eléments Traces Métalliques Dans Les Sols » .Edition INRA, (France) P408. 1998.
- [39]. BOURRELIER, P. H. BERTHELIN, J. « Contamination Des Sols Par Les Eléments En Traces: Les Risques Et Leur Gestion ». Rapport N°42 A l'Académie Des Sciences. Paris, France: Lavoisier Tec & Doc, P440. 2008.
- [40]. O'NEILL, P. ALLOWAY, B.J. « Arsenic Heavy Metals In Soils », Editor: Blackie Academicand Professional, P 105-121. London. 2005.
- [41]. RINEHART, T.L., SCHULZE, D.G., BRICKA, R.M., BAJT, S., BLATCHEY III, E.R. «Chromium Leaching Versus Oxidation State For A Contaminated Solidified/Stabilized Soil ». Journal Of Hazardous Materials. P 213-221. 2007.
- [42]. TOUZE .S,CHARTIER. R, GABORIAU .H, « Etat De L'art Sur Les Barrières Perméables Réactives (BPR) ». Réalisations,Expériences, Critères Décisionnels Et Perspectives.BRGM/RP 52973-FR, P131.2004.
- [43]. Guide Méthodologique Pour L'analyse Des Sols Pollués, R.Jeannot, B. Lemièrre, S.Chiron Avec La Collaboration De F.Augustin, D.Darmendrail, Document Du BRGM 298, 2001.

- [44]. Site Internet Du Groupe SITA FD : [Www.Sitagroup.Com](http://www.Sitagroup.Com)
- [45]. « Conférence Mâchefers Et REFIOM, Retours D'expérience Et Perspectives De Traitement », Pollutec 96, Ademe, ATEE, 22 Octobre 1996, 191 P.
- [46]. Federal Remediation Technologies Roundtable. 2007. « The Remediation Technologies Screening Matrix ». En Ligne. < [Http://Www.Frtr.Gov/Scrntools.Htm](http://Www.Frtr.Gov/Scrntools.Htm) >. Consulté Le 4 Février 2012.
- [47]. J.P. Cerdan, « La Vitrification Des Cendres Issus De L'incinération Des Ordures Ménagères », TSM N°5, Mai 95 Cf Valenti)
- [48]. P. Fourcy, « Stabilisation / Solidification De REFIOM Par Une Cendre Volante De Lit Fluidisé : Performances Et Mécanisme De Transfert » Thèse De Doctorat De L'ust Lille, 316 P, 2000
- [49]. Deschamps, T., M. Benzaazoua, B. Bussière, T. Belem, M. Mbonimpa, P. Boudes, G. Belem, B. Sarrasin, C. Figuière Et Cbrm Ratrimoarivony. 2006. « Mécanismes De Rétention Des Métaux Lourds En Phase Solide: Cas De La Stabilisation Des Sols Contaminés Et Des Déchets Industriels ». Vertigo - La Revue Electronique En Sciences De L'environnement. En Ligne. Vol. 7, No 2. <[Http://Vertigo.Revues.Org/Index2171.Html](http://Vertigo.Revues.Org/Index2171.Html) >.
- [50]. United States Environmental Protection Agency. Technical Resource Document : Solidification/ Stabilization And Its Application To Waste Materials. EPA/530/R- 93/012. Washington, DC, 372 P. 2006.
- [51]. Conner, Jesse R., Et Steve L. Hoeffner. « A Critical Review Of Stabilization/Solidification Technology ». Critical Reviews In Environmental Science And Technology, Vol. 28, No 4, P. 397-462. 1998a.
- [52]. Knox, Robert C., David A. Sabatini Et Larry W. Canter. Subsurface Transport And Fate Processes. Boca Raton, FL: Lewis, 430 P. 2000.
- [53]. Jonathan Rémillard, Influence De L'altération Physique Sur Les Caractéristiques Physico-Chimiques De Monolithes De Sols Contaminés Traités Par stabilisation/Solidification Au Ciment Montréal, 2012
- [54]. United States Environmental Protection Agency. Technical Resource Document : Solidification/ Stabilization And Its Application To Waste Materials. EPA/530/R- 93/012. Washington, DC, 372 P. 2006.
- [55]. Van Der Sloot, H. A., Et J.J. Dijkstra. Development Of Horizontally Standardized Leaching Tests For Construction Materials : A Material Based Or Release Based Approach?,

ECN-C--04-060, Energy Research Centre Of The Netherlands. Petten, Netherlands, 56 P. 2004.

[56]. Johnson, R. L., C. D. Palmer Et W. Fish. « Subsurface Chemical Processes ». In Transport And Fate Of Contaminants In The Subsurface. (Cincinnati, OH And Ada, OK), P. 41-56. United States Environmental Protection Agency. EPA/625/4-89/019. 1991.

[57]. Rahman, K. S. M., Et M. A. V. Murthy. « Stabilization Of Chromium By Reductase Enzyme Treatment ». In Stabilisation/Solidification Treatment And Remediation: Advances In S/S For Waste And Contaminated Land, Sous La Direction De Al-Tabbaa, Abir, Et Julia A. Stegemann, P. 347-355. A.A. Balkema Publishers. (London, UK, Cambridge, 12-13 Avril 2005).

[58]. S. Maraval, « Stabilisation / Solidification De Déchets Ultimes, Etude Comparative De Divers Liants Hydrauliques Et De La Vitrification. Cas Des Cendres D'incinération Des Ordures Ménagères », Thèse INSA Lyon, 316 P, 1994.

[59]. A. Capmas, F. Sorrentino, « Etude Des Mécanismes De Solidification / Stabilisation Des Déchets Solides Par Liants Hydrauliques, Cas Des REFIOM », Environnement & Techniques, N°136, Mai 1994.

[60]. S. Maraval, « Stabilisation / Solidification De Déchets Ultimes, Etude Comparative De Divers Liants Hydrauliques Et De La Vitrification. Cas Des Cendres D'incinération Des Ordures Ménagères », Thèse INSA Lyon, 316 P, 1994.

[61]. S. Rémond, « Evolution De La Microstructure Des Bétons Contenant Des Déchets Au Cours De La Lixiviation », Thèse De Doctorat De L'ens Cachan, 243 P, 1998.

[62]. F. Sanchez, « Etude De La Lixiviation De Milieux Poreux Contenant Des Espèces Solubles : Application Au Cas De Dechets Solidifiés Par Liants Hydrauliques. », Thèse De Doctorat De L'insa De Lyon, 225p, 1996.

[63]. A. Imyim, « Méthodologie D'évaluation Environnementale Des Déchets Stabilisés / Solidifiés Par Liants Hydraulique », Thèse De Doctorat De L'insa De Lyon, 469 p 2000

[64]. S. Rémond, D.P. Bentz, P. Pimienta, J.P. Bournazel, « Cement Hydratation In The Presence Of Municipal Silid Waste Incineration Fly Ash », Material Science And Concrete Properties, First International Meeting, Toulouse, March 5-6, 1998

[65]. THESE De DOCTORAT De L'ecole NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE Et De L'institut NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, Génie Des Procédés, Antoine CAUCHETEUX Ingénieur Des Mines De Douai, Evolution Au

Cours De La Lixiviation Des Propriétés Physico-Chimiques D'un Réfiom Humide Stabilisé Aux Liants Hydrauliques, novembre 2002.

[66]. NFP 15-301, Liants Hydrauliques: Définition, Classification Et Spécifications De Ciments, AFNOR, Paris, 1998.

[67]. SPENCE, R. D. GILLIAM, T.M. MORGANE, I.L, AND OSBORNE, S. C. «Stabilization/Solidification Of Wastes Containing Volatile Organic Compounds In Commercial Cementitious Waste Forms ». Philadelphia: ASTM, Pp. 61-72. 1997.

[68]. ADASKA .W. S, TRESOUTHICK. S.W, WEST, P. B, « Solidification And Stabilization Of Wastes Using Portland Cement». Skokie: Portland Cements Association, 17 P, (2001).

[69]. TAYLOR, H.F.W. « Cement Chemistry ». 2ème Edition. London: Academic Press, (2001).

[70]. Afnor. Qualité Des Sols. Recueil De Normes Françaises. 3ème Edition Isbn : 2-12-21313-4 .Paris. 1996.

[71]. S.E. Allen, H.M Grimshaw And A.P. Rowland. Chemical Analysis. In Moore Pd, Chapman Sb, Editors. Methods In Plant Ecology. Oxford, London, J. Blackwell Scientific Publication. 1986 285-344.

[72]. B.J. Alloway And A.P. Jackson. The Behaviour Of Heavy Metals In Sewage Sludgeamended Soils, J. Sci. Total Environ. 100 1991 ,151-76.

[73]. Centre D'études Sur Les Réseaux, Les Transports, L'urbanisme Et Les Constructions Publiques, Comparaison De Méthode D'analyse Des Eléments Traces Métalliques Etm Et Des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques Hap Sur Les Sols Et Les Végétaux.

[74]. S. Dudka,And;D.C.A.;Driano.Environmental Impacts Of Metal Ore Mining And Processing: A Review, J. Environ Qual.26 590-602. 1997

[75]. L. Hernandez, A. Probst, J.L. Probst And E. Ulrich. Heavy Metal Distribution In Some French Forest Soils, Evidence Form Atmospheric Contamination. J. Sci. Total Environ. 312 (2003)195-219.

[76]. Centre D'expertise En Analyse Environnementale Du Québec Ma. 115 – Cond. 1.1 Détermination De La Conductivité : Méthode Electrométrique Edition : 2012-02-17.

[77]. EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments. Détermination des résistances mécaniques. Avril 2006.

- [78]. Petit, S., Madejova, J., Decareau, A., Martin, F. "Characterization Of Octahedral Substitutions In Kaolinites Using Near Infrared Spectroscopy." *Clays And Clay Minerals* 47(1): 103\_108. 1999.
- [79]. Centre D'expertise En Analyse Environnementale Du Québec Ma. 100 – Lix.Com. 1.1 Protocole De Lixiviation Pour Les Espèces Inorganiques Edition : 2010-09-08.
- [80]. Samake, D., *Traitement Des Eaux Usées De Tannerie A L'aide De Matériaux A Base D'argile*. Thèse Doctorat Université Josèphe Fourier De Grenoble Et De L'université De Bamako, 2009.
- [81]. Frejsek., *Analyse De L'eau: Aspect Et Réglementaire Et Technique*, P358, Edition Crdp D'aquitaine France, 2002.
- [82]. Pradyt, Patnaik .*Dean's Analytical Chemistry Handbook (Mcgraw-Hill Handbooks)*. Second Edition. 1114 P. 2004. Isbn: 0071410600.
- [83]. Rouessac. F., Rouessac, A & Cruche D., *Analyse Chimique, Méthodes Et Techniques Instrumentales Modernes*, Livre, Edition Dunod, 2004.
- [84]. Conner, Jesse R., Et Steve L. Hoeffner. 1998a. « A Critical Review Of Stabilization/Solidification Technology ». *Critical Reviews In Environmental Science And Technology*, Vol. 28, No 4, P. 397-462.
- [85]. Bob, H., Product Group Manager, Sylvania, Joe Howley, Environmental Marketing Manager, GE Lighting February 24, 2003.
- [86]. Davis, P., Matange, D & Shokouhian, M., Washing of cadmium (II) from a contaminated soil column. *Journal of Soil Contamination*, 7: 371-393. 1998.
- [87]. Voglar, G.E & Ležan, D., Solidification/stabilization of metals contaminated industrial soil from former Zn smelter in Celje, Slovenia, using cement as a hydraulic binder, *Journal of Hazardous Materials*, 2010.
- [88]. Hasnain Isa, M., lee Siewlang, Faridha. A. H. Asaari, A. Hamidi. Aziz, N. Azam Ramli & Jaya Paul A. Dhas., Low cost removal of disperse dyes from aqueous solutions using palm ash. *Dyes and Pigments* 446-453. 2007.
- [89]. Sayyad, G., Afyuni, M., Mousavi, S.-F., Abbaspour, K. C., Richards, B. K & Schulin R., Transport of Cd, Cu, Pb and Zn in a calcareous soil under wheat and safflower cultivation- A column study. *Geoderma*, vol. 154 pp. 311-320, 2010.

- [90]. Hlavackova, P., Evaluation du comportement du cuivre et du zinc dans une matrice de type sol à l'aide de différentes méthodologies. Thèse de Doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 207p, 2005.
- [91]. Chiou, C.T & Shoup, T.D., Soil Sorption of Organic Vapors & Effects of Humidity on Sorptive Mechanism & Capacity. *Env. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 4-10. 1985.
- [92]. Moral, R., Cortes A., Gomez I & Mataix-Beneyto J. Assessing changes in Cd phytoavailability to tomato in amended calcareous soils. *Bioresource Technology* vol. 85, n° 1, pp. 63-68, 2002.
- [93]. Bouras, O., Propriétés adsorbants d'argiles pontées organophiles: Synthèse et caractérisation. Thèse Doctorat, Université de Limoges. 2003.
- [94]. Hlavackova P., Evaluation du comportement du cuivre et du zinc dans une matrice de type sol a l'aide de différentes méthodologies. Thèse Doctorat. Lyon: INSA de Lyon, 207 p, 2005.
- [95]. Fantozzi-Merle, C., Etude de matériaux à base de liant hydraulique contenant des polluants organiques modèles : propriétés structurales et de transfert. Thèse Doctorat de l'école Doctorale de Chimie de Lyon, 2003.
- [96]. SHIN H. S., MOON H., YANG H. B & YUN S.S., *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 15, pp 777-781. 1994.
- [97]. Voglar, G.E & Ležan, D., Solidification/stabilization of metals contaminated industrial soil from former Zn smelter in Celje, Slovenia, using cement as a hydraulic binder, *Journal of Hazardous Materials*, 2010.
- [98]. Mollah, M. Y. A., Lu, F., & Cocke, D. L., An X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared spectroscopy (FT -IR) characterization of the speciation of arsenic (V) in Portland cement type-V. *Science of the Total Environment* 224, 57-68. 1998.
- [99]. Gineys, G., Aouad, D & Damidot., Managing trace elements in Portland cement, Part I: Interactions between cement paste and heavy metals added during mixing as soluble salts, *Cement & Concrete Composites* 32, 563-570, 2010.
- [100]. Diaz, E.I., Allouche, E.N & Eklund, S., Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. *Fuel* 89 .992-996. 2010.
- [101]. Tremblay, D., *Béton de ciment*. Outremont, Québec: Modulo, 274 p. 1983.

- [102]. Ramachandran, V. S., Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology. Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 626 p. 1984.
- [103]. Zamorani, E., Sheikh, I., Serrini, G., A study of the influence of nickel chloride on the physical characteristics and leachability of portland cement, Cement and Concrete Research 19, 259–266, 1989.



## I.1. Historique :

La Région Transport Centre (RTC) est la première unité opérationnelle chargée du transport du pétrole brute et du condensat, sa création est étroitement liée à la mise en service en 1959 du premier oléoduc (OB1-24''/22'') en Algérie, reliant Haoud El Hamra (Hassi Messaoud) au Terminal Marin de Bejaïa (TMB) (figure.1), d'une longueur de 668 km, ainsi assurer la livraison de ses produits ; pétrole brut et condensat, destinés à l'exportation via le port de Bejaïa.

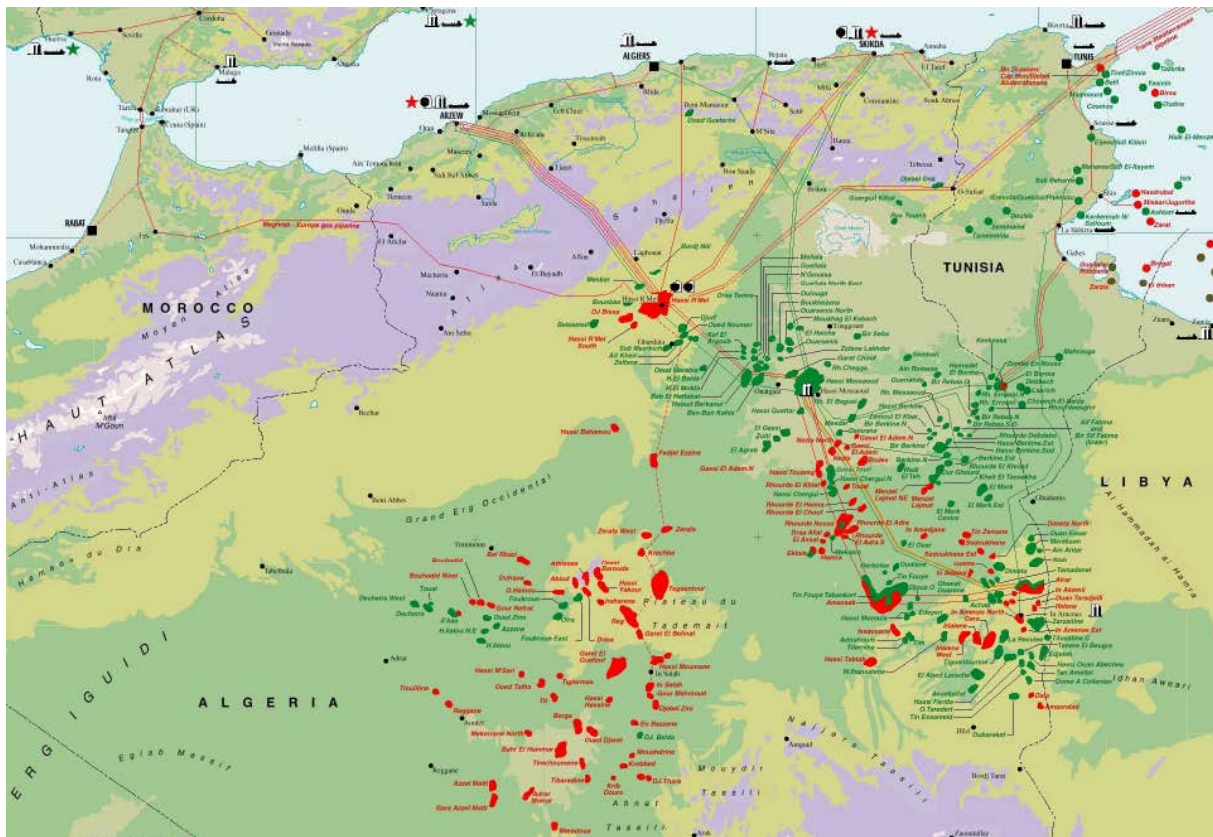


Figure I.1. Carte du réseau transport par canalisation

● Gisement de Gaz, ● Gisement d'Huile

## I.2. Description du Terminal Marin de Bejaïa (TMB) :

L'oléoduc OB1-24''/22'' est équipé de trois stations de pompage principales ; SP1 Bis (Djemââ), SP2-Biskra, SP3- M'sila. La RTC dispose de 16 bacs de stockages d'une capacité de 64 400 m<sup>3</sup>, répartis comme suit : 12 bacs au terminal nord et 8 bacs au terminal sud. Le Terminal Marin de Bejaïa (TMB) se divise en deux parcs:

### **Le Terminal Marin Nord (TM/Nord) :**

D'une surface globale de 360 510 m<sup>2</sup>, il est composé de :

- 12 bacs à toit flottant, d'une capacité de 35000 m<sup>3</sup>, d'un volume utile de 27000 m<sup>3</sup>, la hauteur et le diamètre sont respectivement de 14,4 m 56 m.
- Un bac de purge (4Y1) à toit fixe de 2900 m<sup>3</sup> pour récupérer les purges des collecteurs et du manifold et recevoir le produit à l'entrée de la ligne lors d'une surpression (décharge des soupapes).
- Un manifold : c'est un jeu de vannes, de canalisations et d'instrumentation (indicateurs de sens d'écoulement du liquide, indicateurs de pression d'aspiration et de refoulement, filtres...). Il permet de :
  - Envoyer le liquide arrivant par la ligne vers un réservoir choisi ;
  - Vidanger un bac ou plusieurs vers le poste de chargement ;
  - Transvaser le brut d'un bac à un autre.

Le manifold Nord comprend des vannes réparties comme suit :

- 08 vannes manuelles de transfert du collecteur (KA, KB, KD, KE, KF, KM, KN) ;
- 06 vannes de ligne (LA, LB, LC, LD, LE, LF), chacune est reliée à deux réservoir ;
- 06 vannes pour chaque pompe de remplissage.

Chaque bac est doté d'une vanne motorisée appelée vanne pied de bac.

### **Le Terminal Marin Sud (TM/Sud) :**

Occupant une superficie de 132 925 m<sup>2</sup>, il est composé de :

- 04 bacs de stockage à toit flottant, d'une capacité de 50 000 m<sup>3</sup>, d'un volume utile de stockage de 41 000 m<sup>3</sup> chacun, d'une hauteur et d'un diamètre respectivement de 14,65 m et 56 m.
- Le manifold sud assure les mêmes manoeuvres que celui du nord. Il possède les vannes suivantes :
  - 04 vannes de lignes (L13, L14, L20, L21), reliées à chaque réservoir ;
  - 04 vannes pour chaque pompe de remplissage.
  - Une pomperie de 03 unités de différent débit :
  - Deux pompes (Y, Z) à grands débit (3500m<sup>3</sup>/h) de marque GUINARD, de tension de démarrage de 5500 V et d'une puissance d 633 kW tournant à une vitesse de 985 tr/mn
  - Une pompe (W) à moyen débit (1280 m<sup>3</sup>/h).

### **La gare de racleur :**

Le racleur est un outil introduit dans la canalisation dont le but est de la nettoyer de toutes impuretés, lesquelles sont récupérées dans le bac de purge 4Y1.

La gare de racleur est la destination finale du racleur, on en trouve aussi deux vannes manuelles de transfert du produit, soit vers le dépôt nord à travers la vanne L2 soit le sud à travers la vanne L4. La gare de racleur possède un système de sécurité constitué de trois soupapes de décharge S1, S2, S3 tarées respectivement à 14 kg/cm<sup>2</sup>, 27kg/cm<sup>2</sup>, 83 kg/cm<sup>2</sup>.

### **I.3.Système de drainage :**

Les fluides sont supprimés de la station de pompage et des unités de comptage à travers le système de drainage de l'installation d'exportation, ces systèmes récupèrent les huiles et les eaux à travers des fossés fermés et des fossés ouverts. Des pompes sont prévues pour recycler les fluides récupérés vers le circuit du procédé.

Le système de drainage fermé comprend les équipements suivants :

- Bac de drainage ABJ-21401 ;
- Pompes du bac de drainage PBA-21410/ PBA-21411.

Le système de drainage fermé est destiné pour la récupération manuelle des huiles provenant des équipements et des tuyauteries d'exportation. L'huile est évacuée par gravité vers le bac de drainage.

Le système de drainage ouvert comprend les équipements suivant :

- Puisard des eaux huileuses ;
- Pompes du puisard des eaux huileuses PBA-21412 / PBA-21413 ;
- Séparateur des eaux huileuses SBH-21401.

Ce système est destiné pour la récupération des eaux huileuses à partir de la zone de la chambre des pompes de la station de pompage, des unités de compagne et d'étalonnage.

### **I.4.Les eaux de purge (de production pétrolière):**

Ces eaux huileuses stockées dans les bacs de stockage des hydrocarbures sont des eaux qui peuvent contenir:

1. Des particules en suspension (TSS) :
  - Minérales : argiles, silice, différents précipités minéraux de calcium, de sulfate et de fer notamment, résidus de corrosion bactérienne comme le FeS, etc;
  - Organiques : émulsions résiduelles, bactéries, asphaltènes, etc.
2. Des sels dissous (TDS) de différentes natures ;
3. Des métaux lourds et radioactifs ;
4. Des produits organiques dissous :
  - Des hydrocarbures et notamment : HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques), BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylène), phénols et naphthalènes,

- Des additifs liés au management des puits, à la production (forage, complétion, fracturation, traitement de puits), au conditionnement de l'eau d'injection et à la séparation,
- Des additifs pour l'EOR : alcalins, tensioactifs, polymères, bactéries (MEOR), etc.
  - Des bactéries et des résidus de l'activité bactérienne (biofilm, FeS, etc.) ;
  - Des gaz dissous (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc.).

Les eaux de production pétrolière ont longtemps été considérées comme un sous-produit gênant. Après un traitement plus au moins poussé en fonction de leur destination, elles sont rejetées dans l'environnement, ce qui pousse à y réfléchir.

Les préoccupations liées au changement climatique, et à la nécessité à économiser les ressources en eau, aux volumes à traiter et qui sont en constante augmentation et à la sévèrisation et l'extension des normes environnementales. Des programmes ambitieux de gestion des eaux de production ont été mis en place au sein de toutes les compagnies dans le but de faire un bon usage (Tableau I.1).

**Tableau 1.** Usages possibles selon les options de gestion.

| Option                       |           | Techniques/usages possibles   |
|------------------------------|-----------|---|
| Réduction de volumes         |           | Réduire l'eau arrivant aux puits, séparation au fond du puits, séparation en sub-surface. |
| Recyclage                    |           | Réinjection pour les besoins de la production   |
| Réutilisation                | Sur site  | Forage, complétion, nettoyage, refroidissement, fracturation, domestique.                 |
|                              | Hors site |   |
| Réinjection dans le sous-sol |           | Agriculture, loisirs, potable, etc.   |
|                              |           | Stockage, recharge des nappes   |
| Rejet                        |           | Océan, rivières, évaporation  |

**Tableau.2.** Différentes normes et références françaises de teneurs totales en métaux lourds dans les sols exprimées en mg/Kg /MS.

|   | <b>Cr</b> | <b>Cu</b> | <b>Ni</b> | <b>Pb</b> |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Seuil d'anormalité</b>                 | 150       | 100       | 50        | 100       |
| <b>Seuil d'investigation</b>              | 300       | 200       | 10        | 200       |
| <b>Seuil de traitement</b>                | 750       | 500       | 205       | 500       |
| <b>Seuil d'urgence</b>                    | 1500      | 1000      | 500       | 1000      |
| <b>Norme AFNOR NF U44-041(1985)</b>       | 150       | 100       | 50        | 100       |
| <b>Article 11 de l'arrêté du 8/1/1998</b> | 150       | 100       | 50        | 100       |

**Tableau 3.** Les paramètres limite réglementation française dans les sols agricoles (D' après la comité technique de qualité de sol, TC .190)

| <b>Paramètres</b>    | <b>Normes</b> |
|----------------------|---------------|
| <b>Les sulfates</b>  | 1200 mg/kg    |
| <b>Les chlorures</b> | 1500 mg/kg    |

**Résumé :**

Cette étude sera enrichie par deux ressources, le premier est l'appréciation des divers polluants du sol de la station par l'analyse de différents paramètres associé à ce dernier. La seconde sera l'établissement d'une solution proposé à savoir l'incorporation des sol contaminé et chargé en hydrocarbures et métaux lourds au sein d'une matrice cimentaire (liant hydraulique) afin de remédier et de réhabilité le sol en question, c'est ce que on appelle par la méthode de stabilisation/solidification.

Cette étude nous a fait montrer que le sol ressorte une forte et irrégulière pollution en termes d'hydrocarbure et de métaux lourds, hors que la solution ainsi proposé (la méthode de stabilisation/solidification) a contribué fortement dans l'emprisonnement et l'élimination des éléments contaminant à savoir le plomb et les chlorure.

**Abstract:**

This study is going be enriched bay two resources; the first step is the appreciation of the different pollutants of the station's soil by the analyzing from the different associate parameters. The second step is the establishment of solution proposed as known as the incorporations contaminate soils loaded with Hydrocarbons and heavy metals in the cementer matrix (hydraulic mortar) in order to remediate and rehabilitate soil; it's that we call by the stabilization/solidification method.

This study has shown us that the soil brings out an irregular and strong pollution either hydrocarbons or heavy metals, except that the solution thus proposed (stabilization/solidification method) was contributed heavily in the imprisonment and elimination from the contaminant's element as known as the lead and the chloride.