

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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

جامعة محمد الصديق بن يحيى جيجل

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Terre et de
l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم : علوم الارض و الكون

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique**
en Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème

**Stabilisation / Solidification des sols pollués par le ciment,
cas du Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T) de
Demina, Taher-Wilaya de Jijel (Nord-Est algérien).**

Membres de Jury

Président (e) : BAGHDAD Abdelmalek

Examineur (trice): KHERROUBA Hassiba

Encadrant : BOUROUDI Nihad

Présenté par

M^r : BOUSTILA Islam

M^r : BRIBER Aziz

Année Universitaire 2021-2022

Numéro d'ordre (bibliothèque) :.....

REMERCIEMENT

Au terme de la rédaction de ce mémoire, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes la reconnaissance que nous devons à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail.

Nous remercions ALLAH le Tout Puissant qui nous a donné tant de courage, de santé, de volonté, de patience et d'abnégation pour mener à terme ce mémoire.

La première personne que nous tenons à saisir notre profonde gratitude est notre encadrante Mme, BOUROUDI Nihad, enseignante au département des Sciences de la Terre et de l'Univers d'avoir accepté de nous encadrer, pour son aide, ses précieuses recommandations, et pour sa disponibilité durant toute la période de notre travail.

Nos vifs remerciements s'adressent aussi aux membres de jury ; Melle KHERROUBA Hassiba, et Mr. BAGHDAD Abdelmalek, pour l'intérêt qu'ils ont prêté à cette étude en acceptant de juger ce travail.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants pour leur participation à notre formation, qu'ils trouvent ici l'expression de nos sentiments les plus respectueux et notre profonde gratitude, pour leur gentillesse, disponibilité et soutien durant les années de notre formation. Nous remercions dans ce mémoire nos parents, qui sans leur soutien et leur effort envers nous, nous ne serions pas arrivés à ce que nous sommes.

L'une des personnes à qui nous voudrions exprimer notre plus profonde gratitude est notre camarade CHABBI Hanane, une ancienne étudiante du GIG au Département des sciences de la Terre et de l'Univers. Pour l'aide et les recommandations pour finir ce travail-là.

Nous tenons également à remercier toute la promotion du Master II, sans exclure nos ennemis et amis, pour les bons moments passés ensemble durant ces cinq années ainsi qu'aux amis de l'Université de Mila et de l'Université de Ouargla.

Merci à tous

Dédicace

الحمد لله والصلاة على الحبيب المصطفى وأهله ومن وفى أما بعد : الحمد لله الذي وفقنا لتتميم هذه الخطوة في مسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه ثمرة الجهد والنجاح بفضلته تعالى مهداة إلى اللذان أوصاني الله بهما برا وإحسانا

إلى التي أنارت دربي بدعائها إلى نبع الحنان وشمعة العطاء أمي الغالية التي أعطيتني الحنان والشجاعة للنجاح ، كل ما أستطيع أن أقدمه لا يمكن أن يعبر عن الحب والامتنان الذي أحمله لك ، أقدم لك هذا العمل المتواضع لأشكرك على التضحيات وعلالمودة التي لطالما أحاطت بي بها

إلى والدي الغاليا يمكن لأي تفاني أن يعبر عن الحب والتقدير والتفاني والاحترام الذي كنت أحظى به دائماً من أجلك. لا شيء في العالم يستحق الجهد المبذول ليل نهار لتعليمي ورفاهيتي

إلى أخي وأختي العزيزة: إنهما حاضران في كل لحظات امتحاناتي بدعم معنوي. أتمنى لكما مستقبلاً مليئاً بالبهجة والسعادة والنجاح والصفاء

والشكر إلى زميلي في انجاز هذه المذكرة عزيز بريبر وإلى أستاذتي وأصدقائي المقربون الذين وقفو معي خلال هذه الرحلة الطويلة من النجاح.

Jsam

Dédicace

الحمد لله الذي أنار لنا طريق العلم واعاننا ووفقنا لإتمام هذا العمل المتواضع.

أهدي عملي هذا إلبالوالدين الكريمين وإلى كل أفراد أسرتي
إلى زميلي في انجاز هذه المذكرة إسلام بوسطيلة وإلى كل زملائي في
الدراسة من دفعة 2022

كما أتقدم بالشكر والعرفان إلبالأستاذة الفاضلة نهاد بورودي التي ساعدتنا
وقدمت لنا توجيهاتها حتى آخر لحظة وأتمنى لها التوفيق في حياتها
المهنية ومزيديا من النجاحات في دراساتها العليا
كما اشكر كل اساتذة قسم علوم الارض و الكون في جامعة جيجل على
المجهودات المبدولة طيلة فترة الدراسة

Fiziz

Résumé

Une mauvaise gestion des déchets conduit à polluer l'environnement avec des substances toxiques, en particulier la pollution des sols par divers métaux chimiques lourds, qui constituent un grand danger pour la santé humaine et les organismes vivants. Par conséquent, une solution a été proposée pour remédier à ce problème, cette solution consiste à utiliser le procédé de stabilisation/solidification par liaisons hydrauliques. Dans ce projet de fin d'étude, nous avons décrit le site d'étude d'un point de vue géologique et hydrologique, puis nous avons présenté les caractéristiques du sol du centre d'enfouissement technique de Demina objet de notre étude d'un point de vue géotechnique. Par la suite nous avons prélevé des échantillons de sol contaminé à une profondeur d'un mètre. Ensuite nous avons effectué le processus de stabilisation/solidification en utilisant le ciment Portland de type CEM II/A-L 42.5R et de la poudre de verre avec différentes proportions proposées. Nous avons testé donc la résistance à la compression des éprouvettes effectués. Les résultats obtenus montrent des résistances mécaniques à la compression supérieure à 1 MPa ce qui justifie clairement l'efficacité de ce procédé.

Mots clés : Centre d'Enfouissement Technique, Demina, métaux lourds, stabilisation/solidification, ciment Portland, poudre de verre, résistance mécanique à la compression.

Abstract

Improper waste management leads to polluting the environment with toxic substances, especially soil pollution by various heavy chemical metals, which pose great danger to human health and living organisms. Therefore, a solution has been proposed to remedy this problem, this solution consists in using the process of stabilization/solidification by hydraulic connections. In this end-of-study project, we have described the study site from a geological and hydrological view, then we presented the characteristics of the soil of the technical burial center of Demina object of our from a geotechnical point of view. Subsequently, we took samples of contaminated soil at a depth of one meter. Then we carried out the stabilization/solidification process using Portland cement type CEM II/A-L 42.5R and glass powder with different proposed proportions. We therefore tested the compressive strength of the specimens made. The results obtained show mechanical compressive strengths greater than 1 MPa, which clearly justifies the effectiveness of this process.

Keywords: Technical Landfill Center, Demina, heavy metals, stabilization/solidification, Portland cement, glass powder, mechanical resistance to compression.

ملخص

تؤدي الإدارة غير السليمة للنفايات إلى تلويث البيئة بالمواد السامة، وخاصة تلوث التربة بمختلف المعادن الكيميائية الثقيلة، والتي تشكل خطراً كبيراً على صحة الإنسان والكائنات الحية. لذلك، تم اقتراح حل لمعالجة هذه المشكلة، ويتمثل هذا الحل في استخدام عملية التثبيت / التصلب عن طريق الروابط الهيدروكسيلية. في مشروع نهاية الدراسة هذا ، قمنا بوصف موقع الدراسة من وجهة نظر جيولوجية وهيدرولوجية ، ثم قدمنا خصائص تربة مركز الردم التقني للدمينة من وجهة نظر جيوتقنية. بعد ذلك، أخذنا عينات من التربة الملوثة على عمق متر واحد. ثم قمنا بتنفيذ عملية التثبيت / التصلب باستخدام الأسمنت البورتلاندي من النوع CEM II / A-L 42.5R ومسحوق الزجاج بنسب مقترحة مختلفة. لذلك قمنا باختبار قوة الضغط للعينات المصنوعة. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها قوة ضغط ميكانيكية أكبر من 1 ميجا باسكال، مما يبرر بوضوح فعالية هذه العملية.

الكلمات المفتاحية: مركز الردم التقني ، الدمينة ، المعادن الثقيلة ، التثبيت / التصلب ، الأسمنت البورتلاندي ، مسحوق الزجاج ، المقاومة الميكانيكية للضغط.

Table de matières

Remerciements.....	i
Dédicaces.....	ii
Résumé.....	iv
Abstract.....	v
ملخص.....	vi
Table des matières	vii
Liste des tableaux.....	ix
Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I : Présentation de la zone d'étude</i>	
I.1.Introduction.....	2
I.2.Situation Géographique.....	2
I.3. Reliefs.....	3
I.4. Pente.....	4
I.5.Réseau hydrologique.....	5
I.6. Réseau Routier	6
I.7.Végétation.....	7
I.8.Cadre Socio-économique.....	7
I.9. Généralités sur les Centres d'enfouissement technique C.E.T.....	7
I.9.1. Définition et classification.....	7
I.9.2. Principe de fonctionnement:.....	8

I.9.3. Mode de réalisation.....	8
I.9.4. Présentation du CET de Demina.....	10

Chapitre II : Cadre géologique et hydro-climatologique

II.1. Introduction.....	11
II.2. Description géologique du site.....	11
II.2.1. Géologie du bassin néogène de Jijel.....	11
II.2.1.1. Marnes bleues du Miocène.....	12
II.2.1.2. Dépôts conglomératiques du Pliocène.....	12
II.2.1.3. Dépôts détritiques du Quaternaire.....	12
a) Alluvions anciennes.....	12
b) Alluvions marécageuses.....	12
c) Alluvions récentes.....	14
d) Dunes anciennes.....	14
e) Dunes récentes.....	14
II.2.2. Géologie du substratum.....	14
II.2.2.1. Formations de l’Oligo- Miocène Kabyle (OMK) et les Olistostromes.....	14
a) Oligo-Miocène Kabyle.....	14
b) Olistostrome.....	14
II.2.2.2. Socle kabyle.....	14
II.3. Description hydro-climatologique.....	15
II.3.1. Introduction.....	15
II.3.2. Etude hydro-climatologique.....	15

II.3.2.1. Précipitations.....	16
a) Variations des précipitations mensuelles.....	16
b) Variations des précipitations annuelles.....	17
II.3.2. 2. Températures.....	18
a) Variations des Températures mensuelles.....	18
b) Variations des Températures annuelles.....	19
II.3. 3. Diagramme Ombro-thermique.....	19
II.3. 4. Bilan hydrologique.....	20
II.3. 4.1. Calcul de l'évapotranspiration.....	21
a) Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP).....	21
b) Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	22
II.3. 4.2. Estimation du ruissellement et de l'infiltration.....	23
a) Le ruissellement.....	23
b) l'infiltration.....	23
II.3.5. Hydrologie	24
II.3.6. Conclusion.....	24

Chapitre III : Pollution des sols et méthodes de traitement

III.1. Définition du sol.....	25
III.2. Les différentes phases du sol.....	25
III.2.1. Phase solide du sol	25
III.2.2. Phase liquide du sol	26
III.2.3. Phase gazeuse du sol	26

III.3. Principaux horizons.....	27
III.4. Caractéristiques physique de sol.....	28
III.4.1. Structure.....	28
III.4.2. Texture.....	28
III.4.3. Porosité.....	28
III.4.4. Perméabilité	28
III.4.5. Connectivité	28
III.5. Pollution des sols.....	28
III.5.1. Définition de déchet.....	29
III.5.2. Différents types des déchets.....	29
III.5.3. Impact des déchets sur l'environnement.....	30
III.5.3.1.Pollution par les matières organiques et minérales.....	30
III.5.3.2.Pollution par les métaux lourds	30
III.5.3.3.Pollution par les micro-organismes	31
III.6.Méthodes de traitements des sols contaminés.....	31
III.6.1.En fonction du lieu de traitement.....	31
a) Traitement hors site (ou ex situ)	32
b) Traitementsur site (on site)	32
c) Traitement in situ (ou en place)	32
d) Confinement	32
III.6.2.En fonction de la nature des procédés employés.....	32

III.6.2.1.Procédés physiques	32
a) Extraction double phase	32
b) Méthode pompage – écrémage	33
c) Confinement	33
d). Excavation	33
III.6.2.2. Procédés chimiques	34
a) Lavage	34
b) Oxydation chimique.....	34
c) Réduction	34
III.6.2.3. Procédés biologiques.....	35
a) Biodégradation dynamique	35
b) Bioventing	35
c) Phytoremédiation	35
III.6.2.4. Procédés thermiques.....	35
a) L'incinération	36
b) Désorption thermique	36
c) Vitrification.....	36
III.7.Traitement par stabilisation /solidification.....	36
III.7.1. Stabilisation.....	36
III.7.2. Solidification.....	36
III.7.3.Stabilisation/solidification à base de liants hydraulique.....	37
III.7.4. Différents types de ciments.....	37

III.7.5. Hydratation du ciment.....	39
a) Hydratation des silicates.....	39
b) Hydratation des aluminates.....	39
<i>Chapitre VI : Matériaux utilisés, méthodologie d'essai, présentation des résultats</i>	
IV. Introduction.....	41
IV.1. Matériaux utilisés.....	41
IV.1.1. Sol du CET.....	41
IV.1.1.1. Échantillonnage.....	41
IV.1.1.2. Caractérisation du sol	42
a) Poids volumique	42
b) Humidité du sol.....	42
c) Granulométrie	43
d) Teneur en métaux lourds	44
IV.1.2. Ciment	45
IV.1.3. Eau déminéralisé.....	45
IV.1.4. Ajouts aditifs.....	45
IV.1.4.1. Verre broyé	45
IV.2.Préparation des éprouvettes d'essai :.....	46
IV.2.1. Présentation de la méthode de formulation	46
a) Matériels utilisés :.....	47
IV.2.2.Malaxage du mortier.....	47
IV.2.3.Confection des éprouvettes d'essai	48

IV.2.4. Conditionnement des éprouvettes	48
a) Manutention et conservation avant démoulage :.....	48
b) Démoulage des éprouvettes :.....	49
IV.2.5. Conservation des éprouvettes	49
IV.3. Essais mécaniques.....	49
IV.3.1. Détermination des résistances mécaniques à la compression des matériaux stabilisés /solidifiés (EN 196-1).....	49
IV.3.1.1. But de l'essai.....	49
IV.3.1. Protocole expérimental	49
IV.4. Présentation des résultats.....	50
Conclusion générale.....	53
Bibliographie.....	

Liste des figures

Fig. I.1. Situation géographique de la zone d'étude.....	2
Fig. I.2. Carte des reliefs de la commune de Taher.....	3
Fig. I.3. Carte des pentes de la commune de Taher.....	4
Fig. I.4. Carte de réseau hydrographique de la commune de Taher.....	5
Fig. I.5. Carte de réseau routier de la commune de Taher.....	6
Fig. I.6. Carte d'occupation de sol de la commune de Taher.....	7
Fig. I.7. Schéma descriptive d'un Centre d'Enfouissement Technique.....	9
Fig. II.1. Carte lithologique de la commune de Taher extrait.....	13
Fig. II.2. Coupe géologique au sein du bassin néogène Jijel (zone sud de Taher) montrant le site d'implantation du centre d'enfouissement technique (CET) établie par Rouikha. Y.	15
Fig. II.3. Distribution des précipitations moyennes mensuelles et saisonnières ((station d'Achouat (Taher) ,2005-2015).....	17
Fig. II.4. Précipitations annuelles (station d'Achouat – Taher ,2005- 2015).....	18
Fig. II.5. Répartition des températures moyennes mensuelles (Station d'Achouat, 2005-2015).....	19
Fig. II.6. Diagramme ombro-thermique (Station d'Achouat, 2005-2015).....	20
Fig. II.7. Représentation graphique du bilan hydrologique (Station d'Achouat, 2005- 2015).....	23
Fig. III.1. Représentation conventionnelle des différentes phases du sol.....	25
Fig. III.2. Classification des particules solides d'un sol.....	26
Fig. III.3. Horizons du sol.....	27
Fig. III.4. Lieux où sont gérés les sols pollués.....	32

Fig. III.5.Schéma de principe de l'extraction double phase.....	33
Fig. III.6.Schéma de principe d'Oxydation chimique.....	34
Fig. III.7. Représentation schématique des différentes techniques de phytoremédiation.....	35
Fig. III.8. Matrice cimentaire.....	40
Fig. IV.1.Localisation des points d'échantillonnage (Google Earth).....	42
Fig. IV.2.Courbes granulométrique de sol.....	44
Fig. IV.3.Représentation des résultats de l'analyse FRX.....	44
Fig. IV.4. Malaxeur à mortiers utilisé pour la fabrication des éprouvettes.....	48
Fig. IV.5.Moule utilisé dans la préparation des éprouvettes.....	48
Fig.IV.6. Machine de compression	50
Fig. IV.7.Histogramme de Résistance mécanique à la compression7 et 14 jours de Formulation à 25% (ciment + ajout).....	51
Fig. IV.8.Histogramme de Résistance mécanique a la compression7 et 14 jours de ? Formulation à 35% (ciment + ajout).....	51

Liste des tableaux

Tab II.1. Caractéristiques de la station d'Achouat (Taher).....	16
Tab. II.2. Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières (station d'Achouat (Taher), pour la période de 2005-2015).....	16
Tab II.3. Précipitations moyennes annuelles pour la période 2005-2015(Station d'Achouat).....	17
Tab. II.4. Répartition des températures moyennes mensuelles et saisonnière (Station d'Achouat, 2005-2015).....	18
Tab. II.5. Répartition des températures moyennes annuelles (Station d'Achouat, 2005-2015).....	19
Tab. II.6. Données moyennes mensuelles des précipitations et des températures (Station d'Achouat, 2005-2015).....	20
Tab. II .7. Bilan hydrologique selon la méthode Thornthwaite.....	22
Tab. III.1. Les différents types de ciment et leur composition.....	38
Tab. IV.1. Composition chimique de ciment.....	45
Tab. IV.2. Composition minéralogique de ciment.....	45
Tab. IV.3. Propriété physique de ciment.....	45
Tab. IV.4. Composition chimique et caractéristiques physiques de la poudre de verre.	46
Tab. IV.5. Formulation à 25% (ciment + ajout).....	46
Tab. IV.6. Formulation à 35% (ciment + ajout).....	47
Tab. IV.7. Résultats de La résistance mécanique à la compression.....	50

Introduction générale

En Algérie, la gestion des déchets présente plusieurs défis, tant sur le plan technique et économique, que méthodologique et organisationnel. Les décharges sont devenues la seule méthode d'élimination des déchets. L'avantage de la recharge est la possibilité d'éliminer de grandes quantités à des coûts raisonnables. Cependant, elle se limite fréquemment dans les pays en voie de développement à une seule truite mal gérée. La technologie utilisée par l'Algérie pour le traitement des ordures ménagères est l'enfouissement. Des centaines d'installations sanitaires d'enfouissement des déchets ont été construites à travers le pays. Cependant, les CET nouvellement construits ont déjà été déclassés et plusieurs problèmes sont apparus : défaillance du lixiviat, contamination des nappes phréatiques et inadéquation des méthodes de traitement au type de déchets.

Dans ce mémoire, nous avons décidé d'étudier le centre d'enfouissement technique de Demina C.E.T. située à Taher (Wilaya de Jijel), qui, depuis sa création, souffre de malfaçons, de gestion, et de non-conformité des constructions aux normes. à la santé et à l'environnement, Nous notons également que le site C.E.T à Demina reçoit non seulement des déchets de la municipalité d'Al-Taher, mais reçoit également des déchets des zones voisines.

Pour atteindre ces objectifs de recherche, notre mémoire a été divisée en quatre chapitres répartis comme suit :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation de la zone d'étude d'un point de vue géographique.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude du cadre géologique, hydrologique et climatique de la région.

Alors que le troisième chapitre, il sera consacré à la présentation de Pollution des sols et méthodes de traitement par utilisation le ciment.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons l'ensemble des matériaux utilisés et méthodologie d'essai et présentation de nos résultats et leurs interprétations, et on termine par une conclusion générale.

Chapitre I

Présentation de la

zone d'étude

I.1.Introduction

Ce chapitre, s'intéresse particulièrement à l'étude du milieu physique ; à partir de présentation de la zone d'étude, les différentes caractéristiques : la situation géographique, l'orographie, l'hydrologie, la végétation, et le cadre socio-économique. Ensuite nous donnons un aperçu général sur le C.E.T. Ces éléments sont indispensables pour clarifier notre étude.

I.2.Situation Géographique

Le centre d'enfouissement technique (C.E.T.), objet de notre étude est situé dans la région de Machtat Demina (Demina inter communal de Taher) (Fig. I.1), qui se trouve à environ 5 Km au sud de l'agglomération de Taher.

Taher est une commune algérienne de la wilaya de Jijel (Nord-Est algérien), située à 18 km à l'Est du chef-lieu (Fig. I.1). La commune de Taher est une ville à caractère résidentiel qui s'étend sur une bande côtière de 7,36 Km, avec une superficie de 64,86 ha. Elle est limitée administrativement par au Nord par la mer Méditerranée ; au Sud par Chahna et Oudjana ; à l'Est par la commune de Chekfa et Chahna ; à l'Ouest par la commune Émir Abdelkadar.

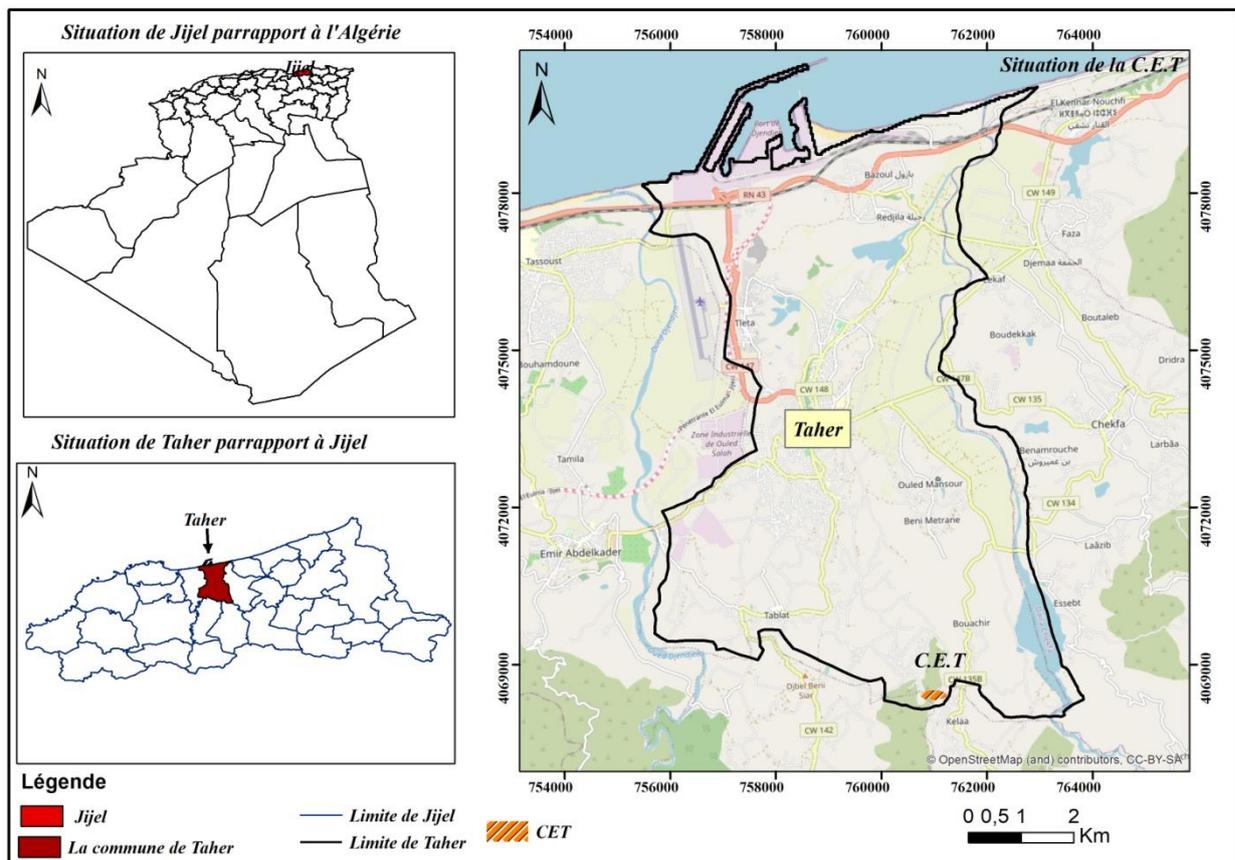


Fig. I.1.Situation géographique de la zone d'étude.

I.3. Reliefs

Les reliefs de la commune de Taher sont caractérisés par une altitude allant jusqu'à 250m (Fig. I.2). La commune de Taher est constituée de deux grands ensembles :

- **Les plaines** : constituées par la moitié de la superficie globale des terrains de la commune, elles s'étendent de l'Ouest à l'Est altérées par des plateaux, avec un relief faible marqué par des altitudes ne dépassant pas les cinquante mètres (Fig. I.2).
- **Les plateaux** : constitués par la deuxième moitié de la superficie de la commune où le relief est relativement fort dont l'altitude atteint 250 mètres et plus (Fig. I.2). Le CET en question est situé dans une zone peu élevée.

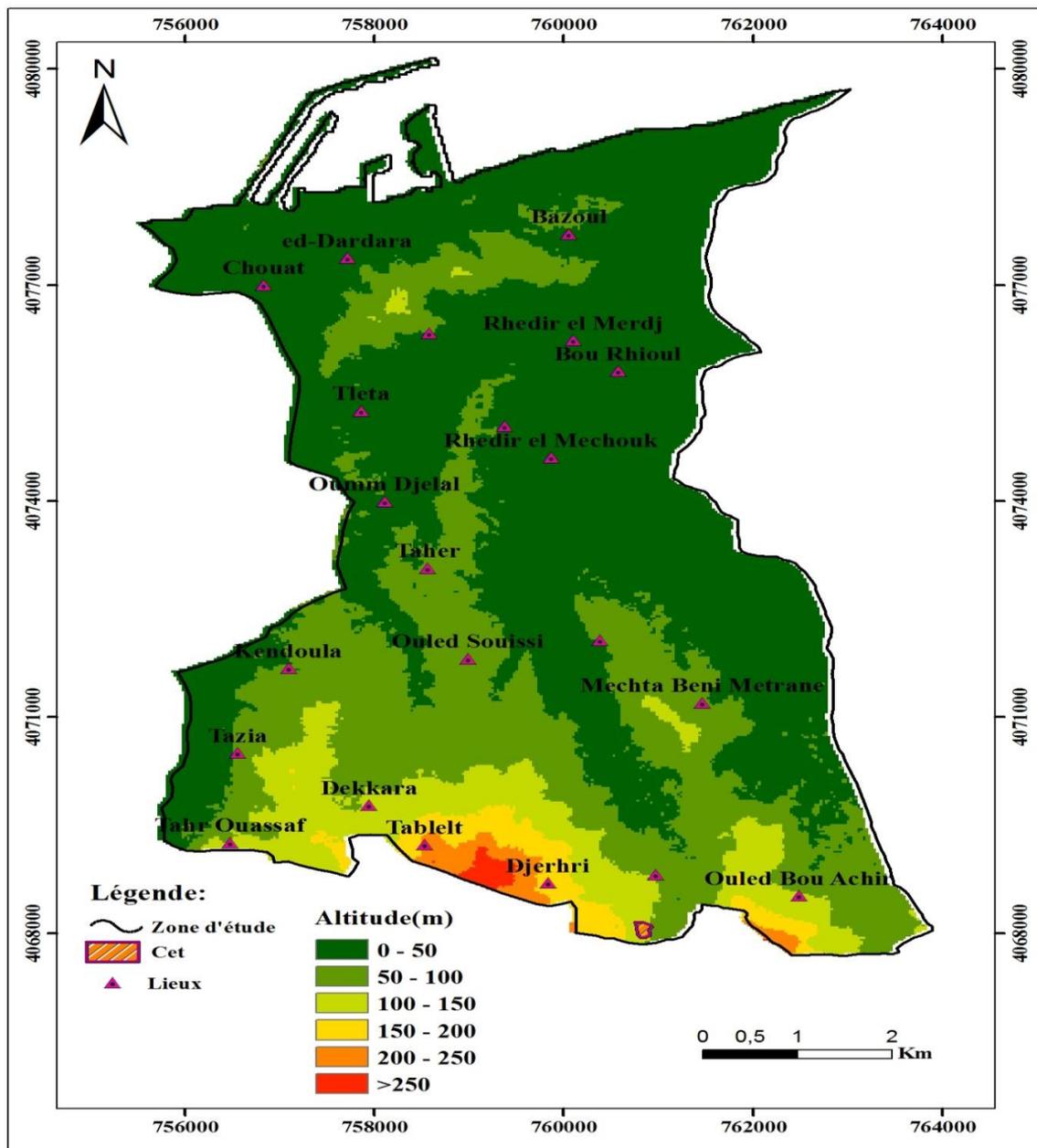


Fig. I.2. Carte des altitudes de la commune de Taher.

I.4. Pente

Le site en question présente un relief hétérogène, où les pentes varient de 0 à 32% et plus. La carte des pentes a permis de mettre en évidence trois classes de pentes :

- Pentes faibles (0-8%) : Elles sont peu fréquentes et figurent dans la majorité du site (Fig. I.3).
- Pentes moyennes (8-16%) : d'extension relativement faible ;
- Pentes fortes (>24%) : Elles sont localisées essentiellement à l'Ouest et au Sud de Taher, (Fig. I.3).

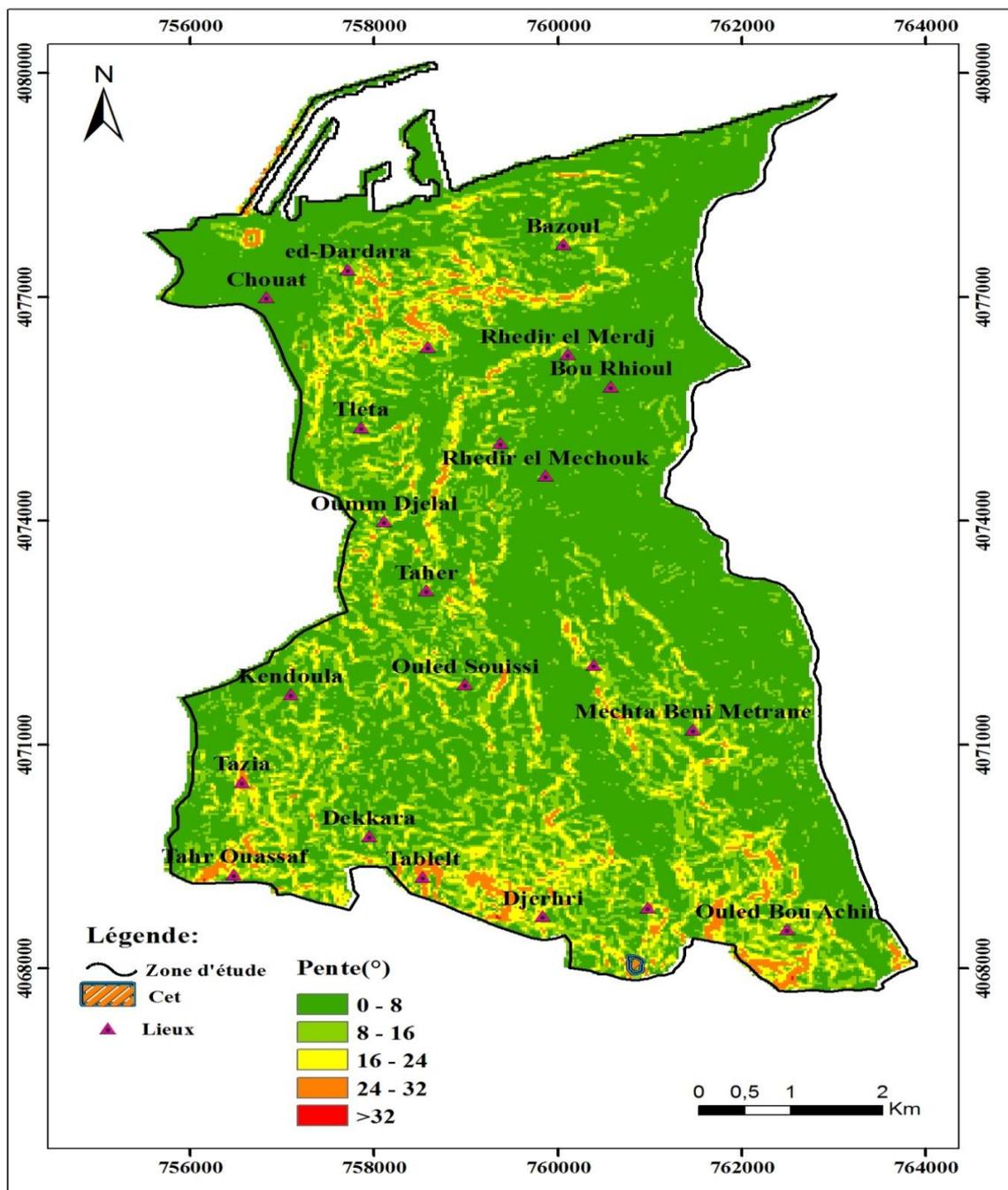


Fig. I.3. Carte des pentes de la commune de Taher.

I.5. Réseau hydrologique

Le réseau hydrologique de la commune de Taher est très riche. Les plus importants d'Ouest en Est sont : Oued Djendjen, Oued Nil, Oued Boukraa, qui sont caractérisées par un écoulement permanent. Et Oued Tassift, Oued Saayoud avec un écoulement temporaire (Fig. I.4). Ces oueds qui proviennent de l'encadrement montagneux disposent de bassins versants relativement petits. Ces oueds et leurs affluents se déversent dans la mer méditerranéenne.

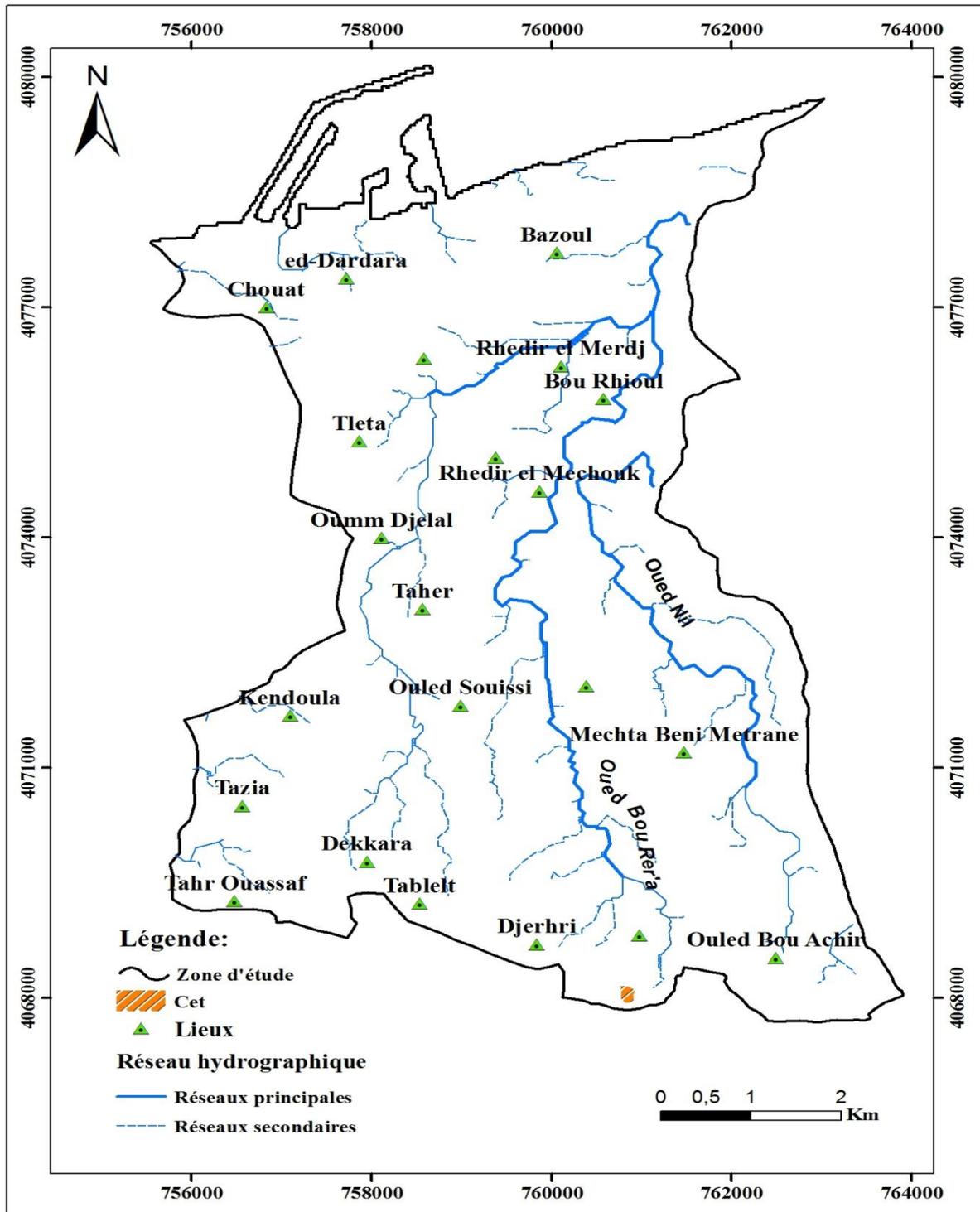


Fig. I.4. Carte de réseau hydrographique de la commune de Taher.

I.6. Réseau Routier

Le réseau routier de la commune de Taher comprend trois types des routes (Fig. I.5) :

- Les routes nationales : RN 43, Pénetrante El Eulma-Jijel.
- Les sous routes : Le chemin de wilaya 135 reliant Taher à Chekfa, chemin de wilaya 147 et 148.
- Les routes secondaires : les routes de bus, les routes inter communal.

La région de Demina est accessible par biais d'un chemin carrossable en très mauvais état d'une longueur approximative de 3à4 Km qui aboutit à la route bitumée reliant Taher à Oudjanna au Sud.

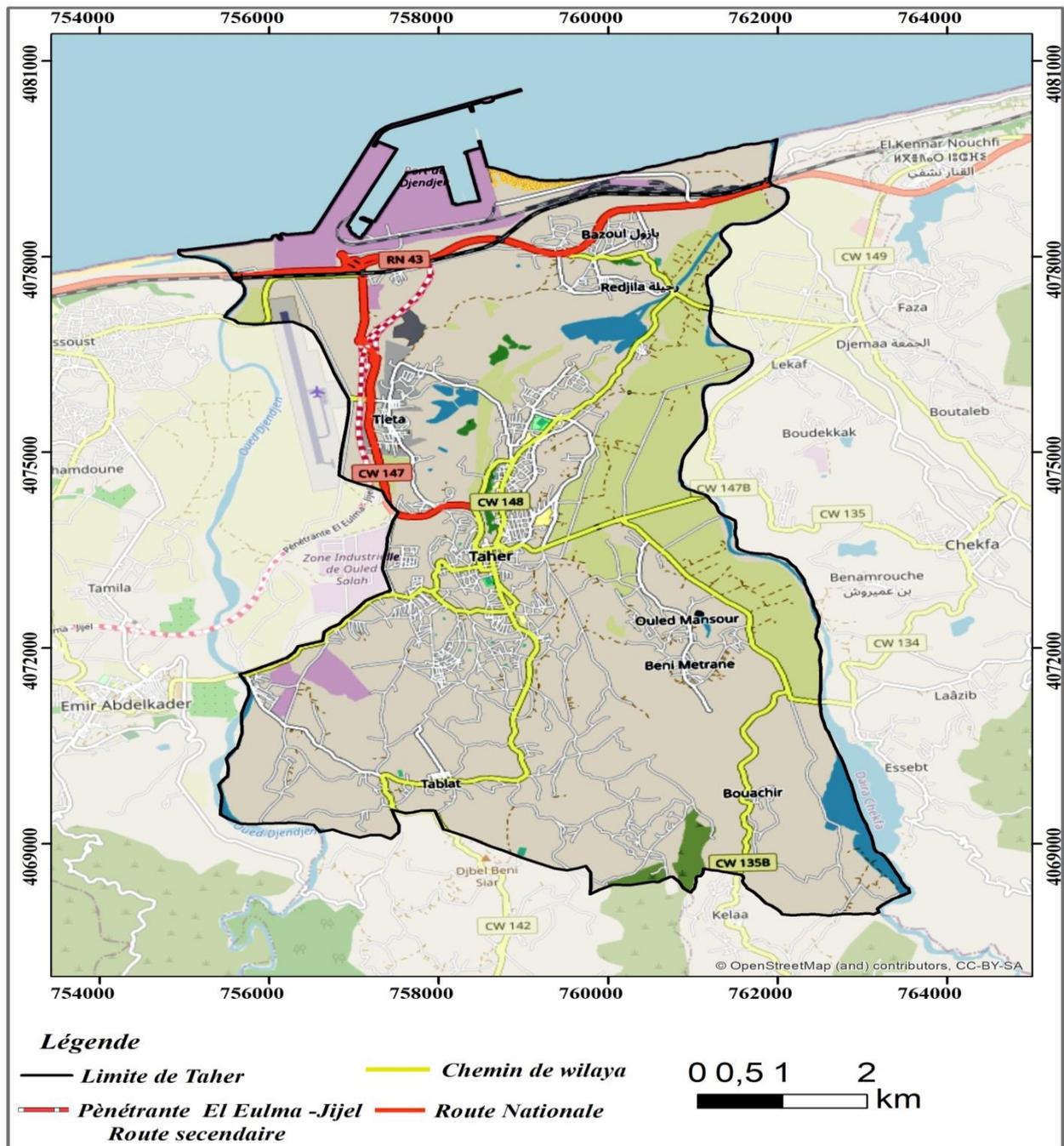


Fig. I.5. Carte de réseau routier de la commune de Taher.

I.7. Végétation

La région d'étude est caractérisée par une couverture végétale assez faible, elle est représentée par 30% de la surface total, Répartis entre champs, pâturages, forêts et terres agricoles.

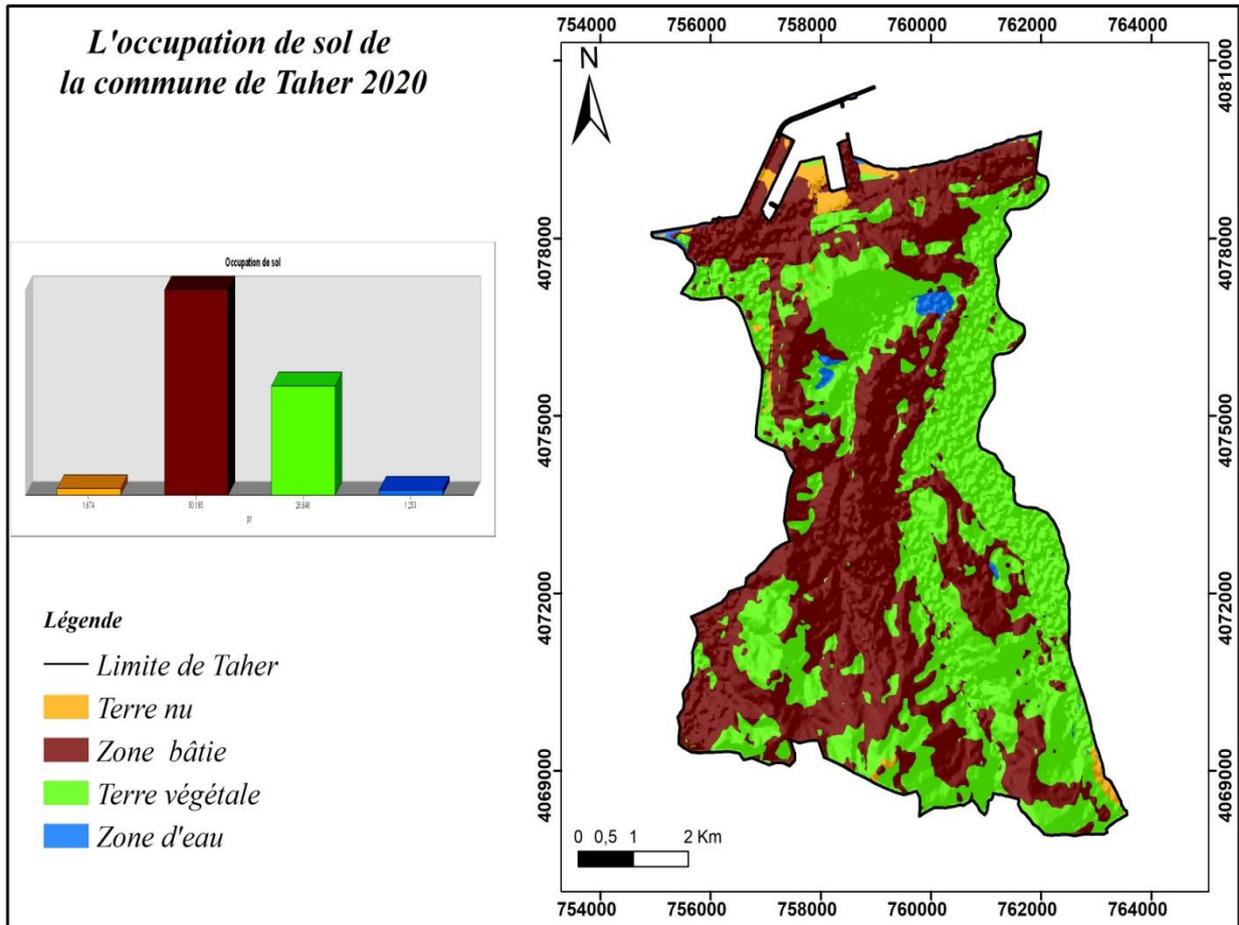


Fig. I.6. Carte d'occupation de sol de la commune de Taher.

I.8. Cadre Socio-économique

La commune de Taher présente la deuxième ville de la wilaya après Jijel. Elle occupe une superficie de 64,86 km² et compte 77 367 habitants depuis le dernier recensement (RPGH) de l'année 2008. La densité de population de l'est donc de 1193 hab. /km². Face à l'évolution socio-économique, la wilaya de Jijel ne dispose que de trois centres d'enfouissements techniques réellement opérationnels, le premier est celui de Beni Ahmed, situé à Kaous, le deuxième est celui de Demina et enfin celui de Zarzour situé à El-Milia.

I.9. Généralités sur les Centres d'enfouissement technique C.E.T

I.9.1. Définition et classification

On définit le centre d'enfouissement technique comme « un site d'élimination des déchets par dépôt des déchets sur ou dans la terre (sous-sol) ». (Chograni, 2017).

En règle générale, le centre d'enfouissement technique (C.E.T) est réalisé pour une population de 100 000 habitants et plus. La durée de vie d'un centre d'enfouissement technique est au moins 20 ans. (Bouarfa ,2018).

Il existe actuellement trois classes de C.E.T :

- Les C.E.T. de classe I : pour déchets dangereux, toxiques (déchets industriels spéciaux traités et stabilisés, les cendres volantes des usines d'incinération, etc..).
- Les C.E.T. de classe II : pour déchets ménagers et assimilés (ordures ménagères, encombrants, déchets verts, déchets industriels banals, etc.)
- Les C.E.T. de classe III : Pour les déchets inertes (déchets, déblais, gravats, etc...) issus d'entreprises du bâtiment et des travaux publics et de travaux de bricolage de particuliers.

I.9.2. Principe de fonctionnement

Un C.E.T est un aménagement mettant en œuvre des techniques performantes en termes :

a) De surveillance et de contrôle : la vérification des matières entrantes est effectuée à partir des fiches de transport accompagnant chaque livraison.

b) D'aménagement technique : le fond du casier est tapissé d'une géomembrane destinée à constituer une barrière de sécurité passive étanche et permettre la récupération des lixiviats qui sont définis comme le résultat de la percolation des eaux de pluie et des productions liquides générées par les déchets eux-mêmes. Ces lixiviats contiennent des matières organiques fermentées, des composés minéraux, des métaux lourds, des produits chimiques divers...etc. qu'il est nécessaire de récupérer grâce à un système drainant installé en fond du casier, les lixiviats sont alors stockés puis traités.

Quand un casier est plein, il est recouvert d'une membrane géotextile et d'une couche d'argile.

c) De matériel et d'unité de traitement (biogaz et lixiviats) : Un système de réception des biogaz, générés par les réactions internes, est le plus souvent installé. Ainsi les gaz de fermentation sont captés et récupérés après la fermeture d'un casier (Desachy, 2001).

Un site est exploité environ 20 ans. Une fois qu'il a atteint son potentiel d'enfouissement, les casiers sont contrôlés pendant 30 ans traitement des lixiviats). Ensuite le site est réhabilité Avec aménagement paysager.

I.9.3. Mode de réalisation

Pour un CET, le plus important est de l'implanter sur un site approprié et de l'exploiter conformément à un plan de construction et d'exploitation fixé et approuvé à l'avance. Car, il faut

prendre en compte la réintégration du site dans son environnement naturel après fermeture. (Bouarfa ,2018).

On classe les CET par la forme à concevoir qui est déterminée par les caractéristiques du site, notamment sa topographie, c'est-à-dire par la nature du terrain. En principe, on peut distinguer ici trois cas :

- **C.E.T en tas** : la construction en forme de cumulus est souvent la seule solution réalisable dans les terrains plats.
- **C.E.T en pente** : cette forme peut se justifier par la topographie du terrain.
- **C.E.T en fosse** : par exemple dans une ancienne excavation industrielle ou carrière désaffectée. (Bouarfa ,2018).

Le CET est composé de :

- 1) Une zone de service et direction où le contrôle, l'admission et la pesée des déchets se font. Cette zone abrite également les bureaux, vestiaires et autres locaux.
- 2) La zone d'enfouissement qui comporte les casiers d'enfouissement et la station de traitement des lixiviats (liquides émanant des déchets).

Le casier d'enfouissement est la partie la plus importante de CET, il est construit d'une fosse étanche où l'en stocke les déchets ménagers. Le casier est doté d'un système de récupération des lixiviats et des biogaz pour leurs traitements

- 3) Un réseau de voiries (bitumé) relie l'ensemble des éléments composant le C.E.T.

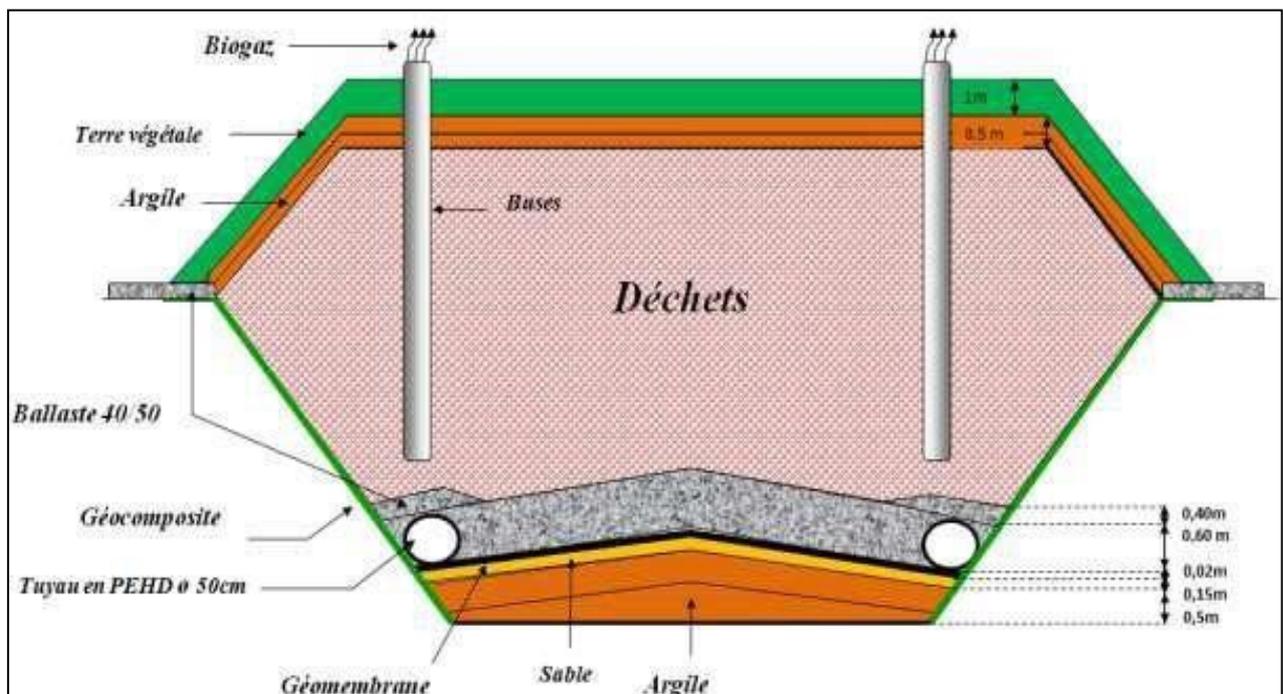


Fig. I.7. Schéma descriptive d'un Centre d'Enfouissement Technique.

Il est également possible d'installer un centre de tri au niveau d'un CET.

Après le bon choix du site qui peut se fonder sur certains caractères spéciaux, (géologiques, climatiques, hydrogéologiques ...) commencent les œuvres de la réalisation.

I.9.4. Présentation du CET de Demina

Le Centre d'Enfouissement Technique de Taher est une installation de stockage des déchets ménagers et assimilés non dangereux. Il est situé à Machtat Demina, qui se trouve à environ 5 Km au sud de l'agglomération de Taher. Cette dernière est caractérisé par un réseau hydrologique très riche, les pentes varient de 02 à 25%, et une végétation faible.

Ce C.E.T mise en service le 13/11/2011, son superficie présente 17 Ha (5,5 ha clôturé), comprendre un seul casier sa capacité 100 000 M3. Les communes desservies sont Taher, Emir Abdel Kader, Ouadjana et Chahna. Il est accessible par le biais d'un chemin carrossable en très mauvais état qui aboutit à la route bitumée reliant Taher à Oudjana au Sud.

Chapitre II

Cadre géologique et hydro-climatologique

II.1. Introduction

Le choix du site d'implantation d'un CET ne peut se faire par hasard. Différents paramètres doivent être étudiés afin de s'assurer que le CET, une fois en exploitation et après fermeture, aura une incidence la plus faible possible sur l'environnement. Il est souvent important de considérer d'emblée plusieurs sites potentiels et d'en étudier en profondeur les caractéristiques, avant de sélectionner le plus approprié qui accueillera le CET. Au premier abord, la recherche des sites potentiels doit considérer quelques priorités bien établies (Thonart et al. ,2005) :

- Favoriser la stabilité (du point de vue géologique et hydrogéologique) à long terme des dépôts ;
- Tenir compte qu'une activité biologique est susceptible de se développer dans le CET. Éviter par conséquent les conditions qui pourraient entraîner des dérèglements de cette activité ;
- Éviter toute interaction entre le CET et l'environnement en protégeant notamment le réseau hydrographique et les réserves d'eau et en évitant la dispersion de gaz nocifs dans l'atmosphère ;
- Tenir compte de l'accessibilité du site ;
- Tenir compte de l'impact sur l'environnement humain et écologique ;
- Tenir compte du volume disponible et utilisable.

A ce titre, Nous dédions ce chapitre pour faire une description géologique, et une étude hydro-climatologique du site de C.E.T de Taher (Demina).

II.2. Description géologique du site

Le centre d'enfouissement technique (C.E.T.) objet de cette étude appartient au bassin néogène de Jijel qui est située au Nord-Est de l'Algérie, elle est limitée au Sud par l'arête montagneuse du massif de Béni Khettab, à l'Est par l'arête montagneuse de Seddat, à l'Ouest par le massif volcanique D'ElAouana, et au Nord par la mer Méditerranéenne.

II.2.1. Géologie du bassin néogène de Jijel

Le substratum du bassin néogène de Jijel est constitué des formations cristallophylliennes de Socle Kabyle sur lesquelles reposent en discordance des conglomérats de base suivis des grès micacés dont l'épaisseur dépasse les 200 m. La mollasse olistostromique termine le comblement du bassin surmontée par les formations « post-nappes », (Bouanika,et al, 2013),qui sont principalement représentées principalement par :

II.2.1.1. Marnes bleues du Miocène

Les marnes bleues à grises sont datées du Burdigalien inférieur (Durand Delga, 1955) ou du Tortono-Messinien (Djellit, 1987). Elles constituent la majorité des zones situées dans les régions de Taher, Emir Abdelkader et Kaous. Elles montrent des intercalations de niveaux carbonatés jaune ocre (miches calcaires) qui soulignent la stratification, avec parfois de minces lits gypseux. L'épaisseur de ces marnes peut aller jusqu'à 300 m (Durand Delga, 1955).

A leur base, les marnes bleues du Miocène deviennent plus détritiques avec un niveau conglomératique du Miocène inférieur marquant la discordance entre ces marnes et les formations Olistostromiques sous-jacentes. (Djellit, 1987).

II.2.1.2. Dépôts conglomératiques du Pliocène

Ces formations sont constituées de dépôts continentaux détritiques, qui comblent la dépression du bassin néogène de Jijel, avec des éléments divers provenant de roches plus anciennes préexistantes (conglomérats, des microconglomérats, graviers, sables et argiles sablo-limoneuses). Elles sont discordantes sur les marnes du Miocène et présentent des épaisseurs réduites variant entre 30 et 50 m. Elles ont été datées du Pliocène (Djellit, 1987).

II.2.1.3. Dépôts détritiques du Quaternaire

Les formations quaternaires sont représentées par :

a) Alluvions anciennes

Les alluvions ou terrasses anciennes se limitent principalement aux anciennes vallées de l'oued Djendjene et l'oued Mencha. Elles sont constituées de dépôts détritiques essentiellement des galets, des graviers et des cailloux, à matrice sableuse, avec parfois des intrusions limoneuses et argileuses. Elles peuvent être confondues aux mollasses du Pliocène lorsqu'elles sont légèrement consolidées (Bouroudi et Boussioud, 2011).

b) Alluvions marécageuses

Les alluvions marécageuses sont les dépôts de dépressions fermées de la région de Kennar (Bouroudi et Boussioud, 2011).

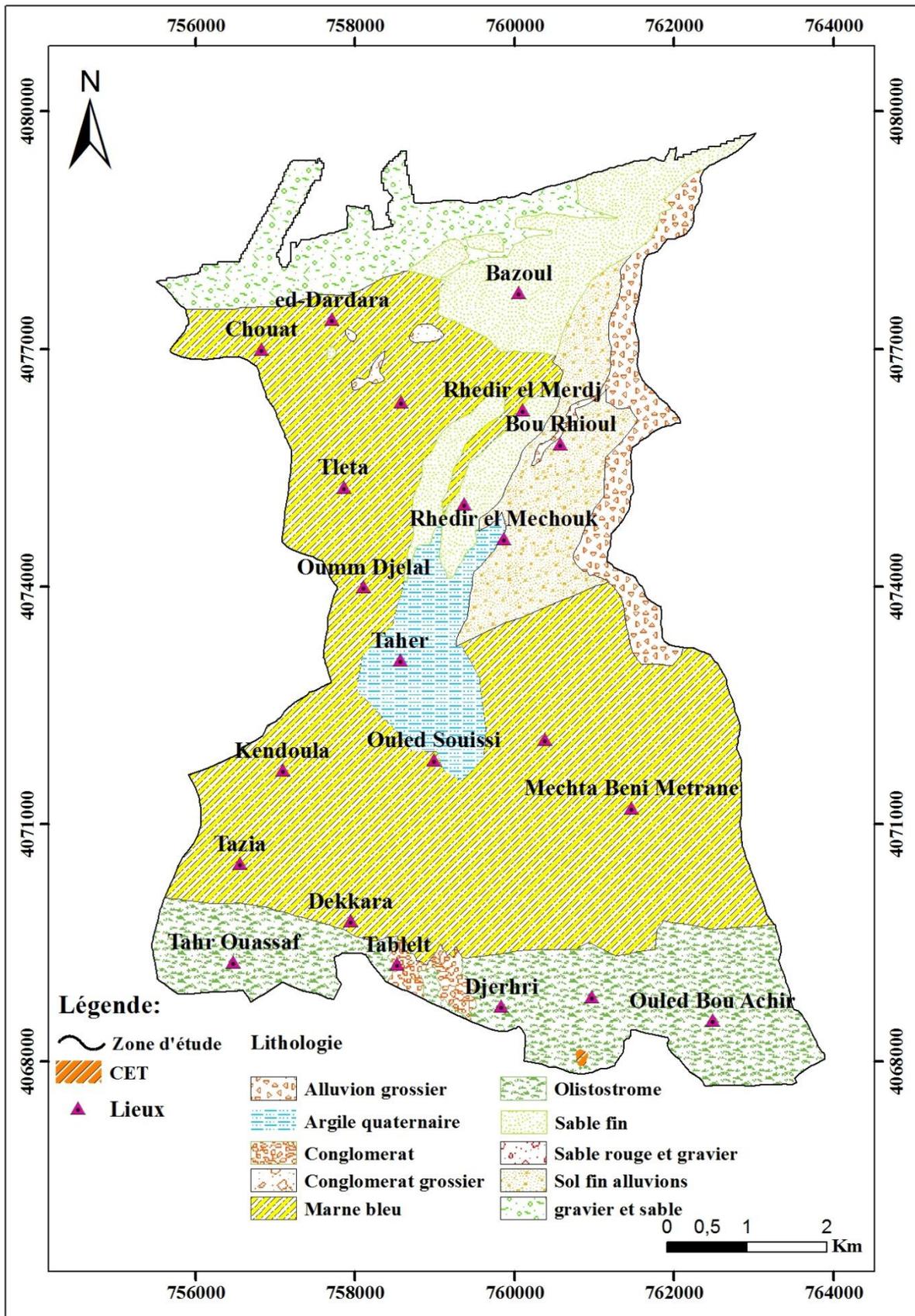


Fig. II.1. Carte lithologique de la commune de Taher. (Amira et Boudanouf, 2017).

c) Alluvions récentes

Elles forment les dépôts des oueds actuels, (Oued Saïoud, Oued Nil, Oued Boukaraa, oued Djendjene, Oued Mencha, et Oued Kentara). Elles sont constituées principalement de graviers, galets, sables, argiles, ... etc (Bouroudi et Boussioud, 2011).

d) Dunes anciennes

Elles constituent des affleurements discontinus tout au long du littoral. Elles peuvent être observées dans les régions de Tassoust et Kennar. Ces dunes anciennes sont formées de sables jaunes à rouges souvent consolidés (Bouroudi et Boussioud, 2011).

e) Dunes récentes

Elles longent le littoral et constituent un cordon continu. Elles sont formées de sables grossiers gris (Bouroudi et Boussioud, 2011).

II.2.2. Géologie du substratum**II.2.2.1. Formations de l'Oligo- Miocène Kabyle (OMK) et les Olistostromes**

Le substratum englobe les formations du socle et sa couverture Olistostromique représentée par les formations appartenant à l'Oligo-Miocène Kabyle.

a) Oligo-Miocène Kabyle

Constitué de formations détritiques comportant trois termes (Raoult, 1974, Bouillin, 1977 in Djellit, 1987). De base en haut :

- ✓ Conglomérats grossiers polygéniques reposant en discordance sur le Socle Kabyle.
- ✓ Grés micacés.
- ✓ Silexites

b) Olistostrome

Ce sont des formations Tectono-sédimentaires à débris de flysch maurétanien, massylien, numidien et des blocs du tellien et du flysch dissocié). Ces formations Olistostromiques sont reposantes sur les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle (Djellit, 1987).

II.2.2.2. Socle kabyle

Le substratum du bassin néogène de Jijel est constitué par les formations cristallophylliennes du socle Kabyle sur lesquelles reposent en discordance des conglomérats, elles sont constituées des schistes satinés et de quartzo-phyllades à intercalation calcaires centimétriques à métriques, ils apparaissent localement dans le lit d'Oued Djendjen. Elles comprennent deux ensembles : un

ensemble inférieur gneissique et un ensemble supérieur Phylladique moins métamorphique (Djellit, 1987).

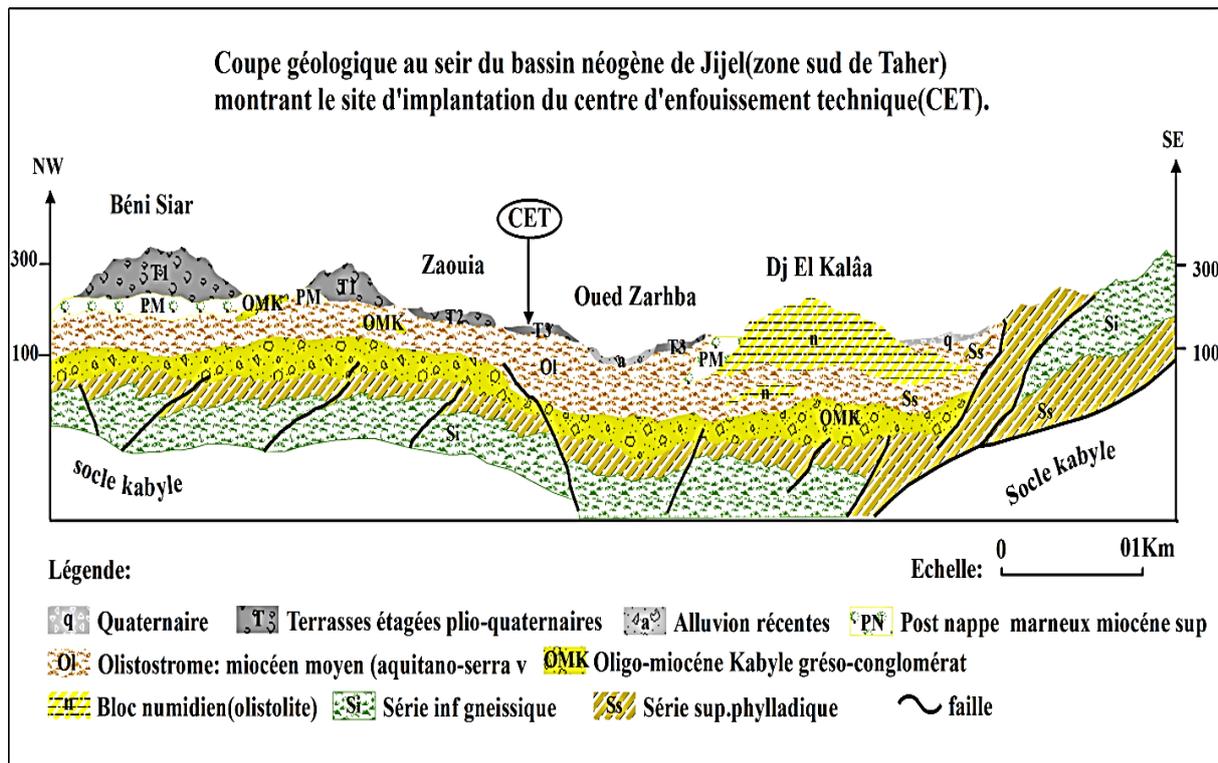


Fig. II.2. Coupe géologique au sein du bassin néogène Jijel (zone sud de Taher) montrant le site d'implantation du centre d'enfouissement technique (C.E.T) (Chabbi et Benzaid, 2021).

II.3. Description hydro-climatologique

II.3.1. Introduction

La nature des déchets et sa gestion nécessite de connaître plus précisément les facteurs hydro-climatiques qui règnent sur la région dans laquelle le CET est implanté. Il est essentiel d'avoir un aperçu sur les caractéristiques climatiques lorsqu'il s'agit de la gestion des déchets ; En effet, l'efficacité et la vitesse de la biodégradation des déchets organiques provenant des ménages dépendent de l'humidité et de la température. (Abdelhakim, 2010).

Pour ce faire on a étudié la pluviométrie, et les températures du site de C.E.T de Taher.

II.3.2. Etude hydro-climatologique

La région de Taher fait partie de la zone littorale. Elle est caractérisée par un climat méditerranéen, pluvieux et froid en hiver, chaud et humide en été.

Dans cette étude, nous avons utilisé les données de précipitations et de températures de la station météorologique d'Achouat (Taher), pour la période allant de 2005 à 2015, dont les caractéristiques de la station sont mentionnées dans le tableau II.1

Tab. II.1. Caractéristiques de la station d'Achouat (Taher).

Station	Altitude (m)	Longitude (Km)	Latitude (Km)	Période d'observation (années)
La station météorologique d'Achouat (Taher)	4 m	776.30	394	2005-2015 (11 ans)

II.3.2.1. Précipitations

L'étude de la pluviométrie est considérée comme un bon indicateur suffisant et nécessaire pour l'évaluation du volume du lixiviat et par conséquent les moyens techniques misent en place pour le traitement et la gestion de cet effluent liquide. (Elghezouani, 2010).

a) Variations des précipitations mensuelles

Le tabl.II.2. Donne les précipitations moyennes mensuelles et saisonnières, enregistrées au niveau de la station d'Achouat (Taher), pour la période de 2005-2015.

Tab. II.2. Précipitations moyennes mensuelles et saisonnières (station d'Achouat (Taher), pour la période de 2005-2015).

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Total
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
Précipitations Moyennes Mensuelles (mm)	69,75	105,86	165,82	155,32	134,06	154,89	118,59	71,61	46	17,53	1,58	21,21	1062,22
Précipitations saisonnières (mm)	341,43			444,27			236,2			40,32			
Précipitations saisonnières (%)	32,14			41,82			22,24			3,8			100%

La représentation graphique des données de précipitations moyennes mensuelles et saisonnières, enregistrées au niveau de la station d'Achouat (Taher), est donnée sur la figureII.2.

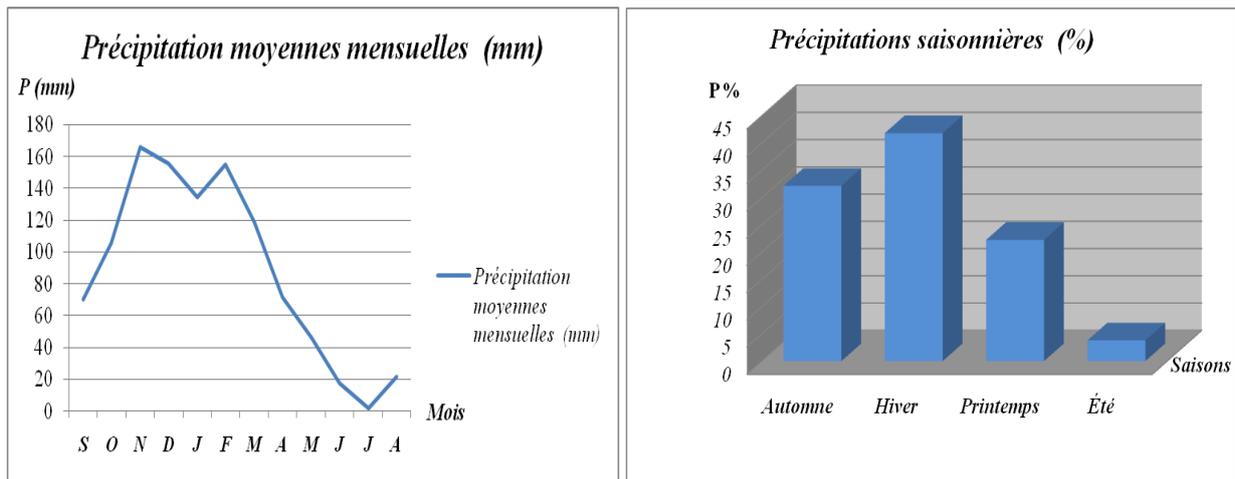


Fig. II.3. Distribution des précipitations moyennes mensuelles et saisonnières ((station d'Achouat (Taher) ,2005-2015).

L'analyse des histogrammes de la Fig.II.2permettent de constater que :

- Le maximum des précipitations est enregistré au mois de Novembre (165,82 mm), et le minimum pluviométrique est enregistré au mois de Juillet (1,58mm).
- La saison la plus pluvieuse est l'hiver avec des précipitations de l'ordre de 444,27 mm soit 41,82% des précipitations totales.
- La saison la plus sèche est l'Été avec des précipitations de l'ordre de 40,32 mm soit 3,8% des précipitations totales.

b) Variations des précipitations annuelles

Les variations des précipitations moyennes annuelles de l'année 2005 à 2015 pour la station d'Achouat sont représentée dans le tableau ci-dessous :

Tab II.3. Précipitations moyennes annuelles pour la période 2005-2015(Station d'Achouat).

Années	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Précipitations moyennes annuelles en mm	1090,3	831,2	1191,2	775,5	1116,7	1051,2	1006,4	1266,4	1312,5	1006,1

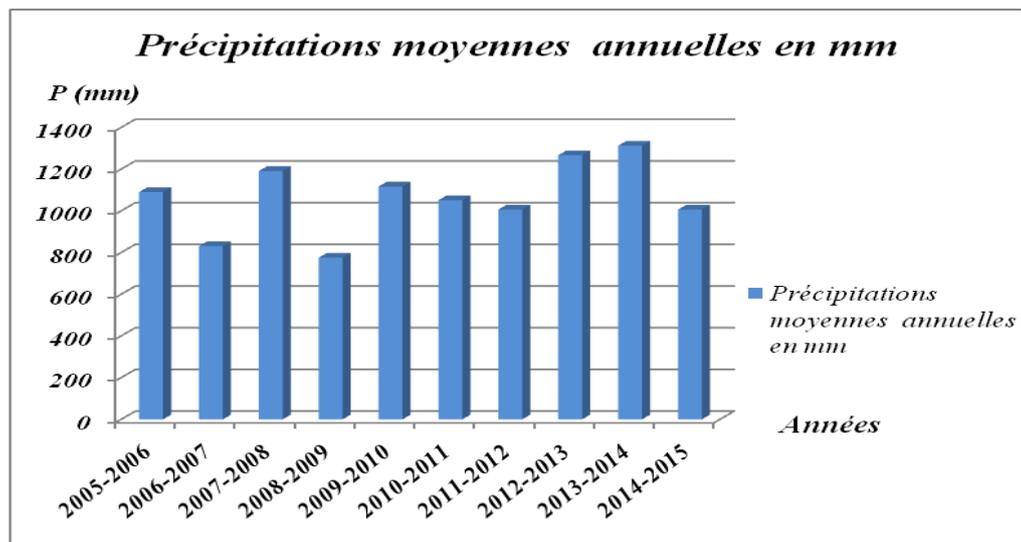


Fig. II.4. Précipitations annuelles (station d'Achouat – Taher ,2005- 2015)

D'après la figure II.3 on observe que la hauteur annuelle des précipitations pour la période considérée varie de 775, 5 mm pour l'année 2008-2009 à 1312,5 mm pour l'année 2013-2014

II.3.2.2. Températures

Dans un C.E.T, la température quant à elle est un bon indicateur pour la formation du biogaz, en plus elle donne des informations nécessaires en matière de lutte anti incendie. (Abdelhak, 2010).

a) Variations des Températures mensuelles

Le tab.II.4 présente la répartition des températures moyennes mensuelles et saisonnières enregistrées au niveau de la station d'Achouat (Taher), pour la période de 2005-2015.

Tab. II.4. Répartition des températures moyennes mensuelles et saisonnière (Station d'Achouat, 2005-2015).

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Moyenne
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
Températures moyennes mensuelles (°C)	23	21	16	12	11	11	13	16	19	22	26	26	18,58
Températures moyennes saisonnières (°C)	20			12,13			16			25			

Le tableau permet de donner les constatations suivantes :

- La température moyenne est de l'ordre de 18 °C avec un maximum au mois d'août (26°C), et un minimum au mois de février (11°C).
- La saison la plus froide correspond à l'Hiver avec une moyenne de 12°C, par contre la saison la plus chaude correspond à l'Été avec une moyenne de 25°C.

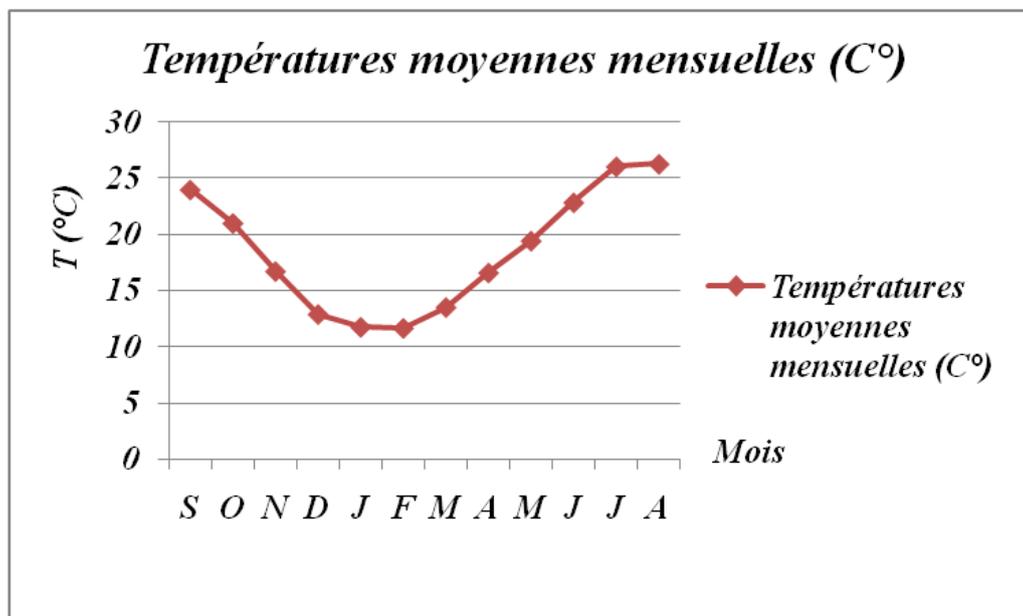


Fig.II.5. Répartition des températures moyennes mensuelles (Station d'Achouat, 2005-2015).

b) Variations des Températures annuelles

Les variations des températures moyennes annuelles de l'année 2005 à 2015 pour la station d'Achouat est dans le Tableau ci-dessous :

Tab. II.5. Répartition des températures moyennes annuelles (Station d'Achouat, 2005-2015)

Années	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Températures moyennes annuelles (°C)	18,51	18,51	17,9	18,51	18,53	18,88	18,65	18,59	18,8	17,35

II.3.3. Diagramme Ombro-thermique

Un diagramme ombro-thermique est un type particulier de diagramme climatique représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures ($P \leq 2T$). Il a été développé par H. Gaussen et F. Bagnouls, botanistes célèbres, pour mettre en évidence les périodes de sécheresses définies par une courbe des précipitations se situant en dessous de la courbe des températures.

Tab. II.6. Données moyennes mensuelles des précipitations et des températures (Station d'Achouat, 2005-2015).

mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<i>P(mm)</i>	134,06	154,89	118,59	71,61	46	17,53	1,58	21,21	69,75	105,86	165,82	155,32
<i>T (°C)</i>	11,78	11,69	13,54	16,61	19,45	22,86	26,06	26,28	23,99	21,02	16,74	12,92
<i>P /2T</i>	5,69	6,62	4,38	2,16	1,18	0,38	0,03	0,40	1,45	2,52	4,95	6,01

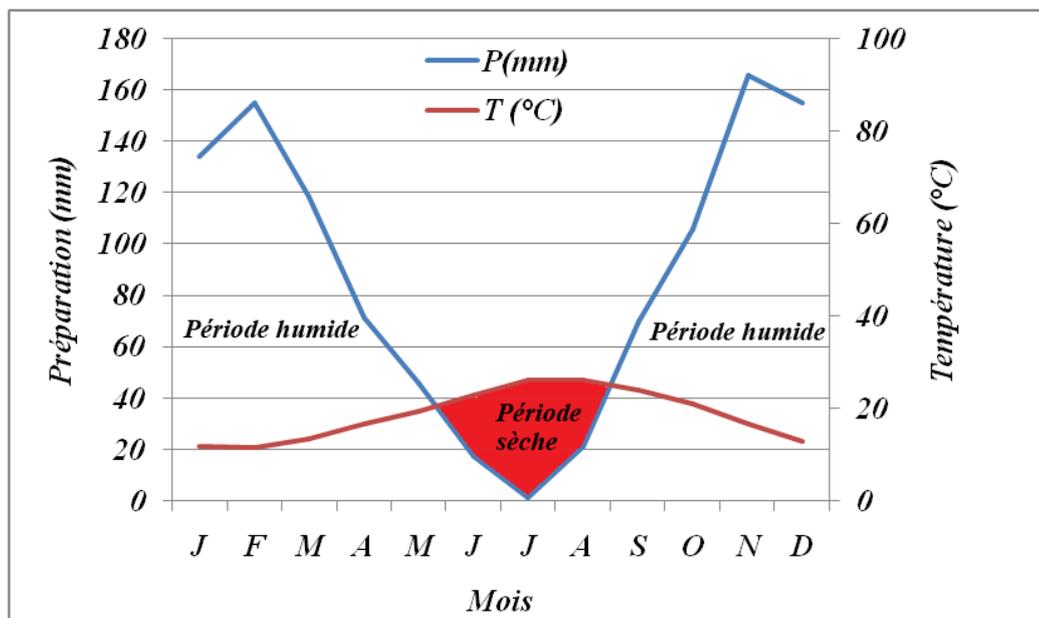


Fig. II.6. Diagramme ombro-thermique (Station d'Achouat, 2005-2015).

*Interprétation sur le diagramme ombro-thermique

Le diagramme ombro-thermique représente sur la figure II.5, permet de déduire que :

- La période hivernale (humide) s'étale entre le début du mois de septembre jusqu' au mois de mai.
- La période déficitaire (sèche) s'étale entre le début du mois de mai et va jusqu'au début du mois de septembre.

II.3.4. Bilan hydrologique

L'établissement du bilan hydrologique selon Thornthwaite est primordial pour l'évaluation des réserves d'eau transmises ou emmagasinées dans une région. Ce bilan s'effectue sur une année hydrologique, période d'environ 12 mois choisie pour que les variations des réserves soient minimales. Il est exprimé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I + Wa$$

Avec :

P : Précipitations moyennes annuelles en mm.

ETR : Evapotranspiration réelle en mm.

R : Ruissellement en mm.

I : Infiltration moyenne en mm.

Wa : Variation des réserves (terme souvent négligeable).

II.3.4.1. Calcul de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est le processus biophysique de transfert d'une quantité d'eau vers l'atmosphère, par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. Elle a pour but de quantifier les pertes en eau par retour à l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau.

a) Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques.

A cet effet, Thornthwaite a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration potentielle mensuelle. La formule utilisée pour le calcul d'ETP selon Thornthwaite est donnée comme suit :

$$ETP (mm) = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a$$

$$ETP_C = ETP \cdot K$$

Avec :

ETP_C : Evapotranspiration potentielle mensuelle corrigée en mm.

K : Coefficient de correction.

ETP : Evapotranspiration potentielle en mm.

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré exprimé en °C.

I : Indice thermique annuel égal à la somme des indices mensuels des 12 mois, avec :

$$I = \sum i$$

i : Indice thermique mensuelle d'où : $i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1,514}$

a : Exposant climatique d'où : **a = 0,016 · I + 0,5**

D'après les données de la station (Station d'Achouat, période 2005-2015) on a trouvé :

$$I = 90,25 \text{ et } a = 1,92$$

b) Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)

Par définition l'évapotranspiration réelle (ETR) est la quantité d'eau évaporée ou transpirée selon les conditions climatiques réelles l'ETR est une fonction de l'ETP et de la quantité d'eau présente dans le sol.

L'évapotranspiration réelle désigne la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur d'eau par le couvert végétal. Alors, L'ETR traduit l'ensemble des interactions : sol, plante, climat. L'ETR peut calculer selon la méthode de Thornthwaite comme suit :

➤ Si les précipitations du mois (P) sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle : $ETR = ETP$. La quantité d'eau qui reste (P-ETP) va alimenter la RFU jusqu'à son maximum (100 mm) et si elle dépasse cette valeur il y aura un excès qui va partir soit sous forme d'infiltration efficace vers la nappe, soit sous la forme de ruissellement.

➤ Si les précipitations du mois (P) sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle, la valeur de $ETR = P + RFU$, jusqu'à égalisation avec ETP. Si la RFU est nulle, il va se produire un déficit agricole $Da = ETP - ETR$, ce dernier paramètre représente alors le besoin des cultures à l'irrigation.

Tab. II .7. Bilan hydrologique selon la méthode Thornthwaite

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aou	Total
P (mm)	69,75	105,86	165,82	155,32	134,06	154,89	118,59	71,61	46	17,53	1,58	21,21	1062,22
T (°C)	23,99	21,02	16,74	12,92	11,78	11,69	13,54	16,61	19,45	22,86	26,06	26,28	/
i	10,74	8,79	6,23	4,21	3,66	3,62	4,52	6,16	7,82	9,99	12,18	12,33	90,25
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,26	/
ETP	107,69	78,69	45,06	26,77	23,22	22,35	35,91	56,78	84,57	116,27	151,98	156,94	/
ETPc	110,92	76,33	38,75	22,48	20,20	19,00	36,99	62,46	102,32	141,85	188,45	197,75	1017,50
P-ETPc	-41,17	29,53	127,07	132,84	113,86	135,89	81,60	9,15	-56,32	-124,32	-186,87	-176,54	/
RFU	0	29,53	100	100	100	100	100	100	43,68	0	0	0	/
DA	41,17	0	0	0	0	0	0	0	0	80,64	186,87	176,54	485,22
EX	0	0	27,07	132,84	113,86	135,89	81,60	9,15	0	0	0	0	500,41
ETR	69,75	76,33	38,75	22,48	20,20	19,00	36,99	62,46	101,06	61,15	1,58	21,21	530,96

La représentation graphique du bilan hydrologique de la région est donnée sur la figure II.7.

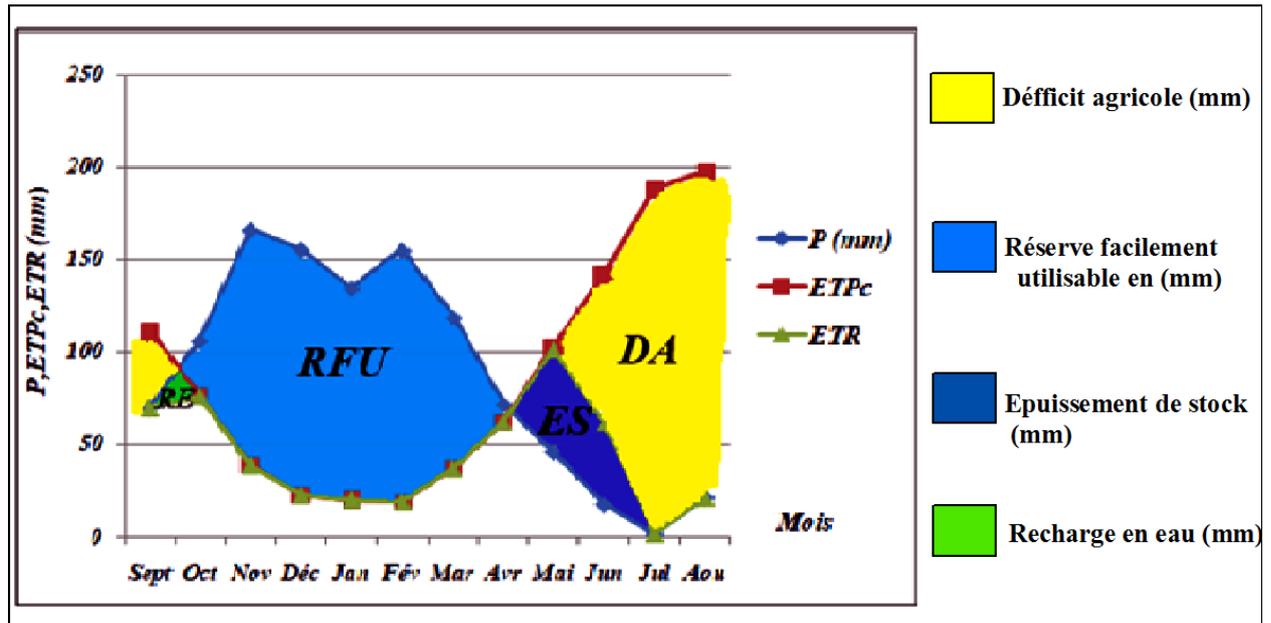


Fig. II.7. Représentation graphique du bilan hydrologique (Station d'Achouat, 2005-2015).

II.3. 4.2. Estimation du ruissellement et de l'infiltration

a) Le ruissellement

Puisque la précipitation est supérieure à 600 mm, la formule de Romantchouk, (1974) a été utilisée.

$$R = \frac{P^3}{3}$$

Avec :

R : Ruissellement en (mm).

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

$$R = (1062,22)^3 / 3$$

$$R = 0,399$$

$$R = 399 \text{ mm}$$

$$R (\%) = (R \cdot 100) / P \Rightarrow R (\%) = 37,56\%$$

➤ La valeur du ruissellement (R) obtenue est de 399 mm, correspondant 37,56% des précipitations.

b) l'infiltration

Elle est estimée à partir du bilan hydrologique par la formule :

$$P = ETR + R + I + Wa$$

Où:

Wa : variation des réserves souvent négligeables.

Alors : L'infiltration est exprimée par :

$$I = P - (ETR + R) = EX - R$$

$$I = 1062,22 - (530,96 + 399)$$

$$I = 132,26 \text{ mm}$$

$$I\% = I \cdot 100 / P \Rightarrow I (\%) = 12,45 \%$$

- Donc l'infiltration représente **12,45 %** des précipitations.

II.3.5. Hydrologie

L'alimentation des ressources hydrologiques d'une région et son système aquifère est fournie par la pluviosité, et les eaux superficielles liée au changement climatique et la perméabilité du sol. Le climat de la commune de Taher est tempéré due à l'influence méditerranéenne, caractérisé par des précipitations de l'ordre de 1062,22 mm/an, cette commune est drainée par deux plaines alluviales :

- Oued Nil : se caractérise par une eau souterraine abondante, Son écoulement du sud vers le nord, leurs principaux affluents sont : oued Boulkraa, oued Sayoud, et oued Tassift.
- Oued Djendjen : L'écoulement des eaux souterraines converge vers l'axe central de la plaine parcouru par l'oued Djendjen.

Leur régime est irrégulier puisqu'ils sont presque à sec en été et ils se remplissent rapidement en hiver et leurs affluents se déversent dans la mer méditerranée.

II.3.6. Conclusion

L'étude des caractéristiques géologiques, ainsi que la prise en compte des conditions hydro-climatiques du site de C.E.T de Demina (la commune de Taher), nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Sur le plan géologique, la zone d'étude appartient aux formations géologiques du type molasses olistostromiques, qui sont représentés par des argiles et des limons sableux dans lesquels ce sont emballés divers blocs hétérotypes et hétérométriques.
- De point de vue climatologie, le climat de la commune de Taher est un climat méditerranéen tempéré avec un hiver pluvieux et froid et un été chaud et sec. Les précipitations durant la période (2005-2015) sont de l'ordre de 1062,22 mm en moyenne annuelle, la température moyenne annuelle est de l'ordre de 18,58 °C.
- Parmi les précipitations enregistrées, seuls 12,45% s'infiltrent. Et 37,56% des eaux tombées partent dans les principaux oueds par ruissellement.

Chapitre III

Pollution des sols et méthodes de traitement

III.1. Définition du sol

Le sol est défini comme un corps naturel comprenant des horizons (couches) qui sont constituées de matériaux altérés minéraux, de matières organiques, les interstices entre ces éléments (pores) sont occupés par de l'eau et de l'air. Il résulte de l'effet combiné du climat, de la topographie et des organismes vivants (plantes, animaux et humains) sur les matériaux de base (roches et minéraux indigènes) au fil du temps. Le sol se distingue également par sa texture, sa structure, sa consistance, sa couleur et ses propriétés chimiques, biologiques et physiques. (Yakoub et Bousekkine, 2013).

III.2. Les différentes phases du sol

Le sol est un milieu poreux, organisé, complexe et tri-phasique comporte trois phases : une phase solide (argiles, limons, sables, matière organique, cailloux, concrétions variées), une phase liquide (eau, substances dissoutes), et une phase gazeuse (oxygène, azote, gaz carbonique ...), en proportions variables.

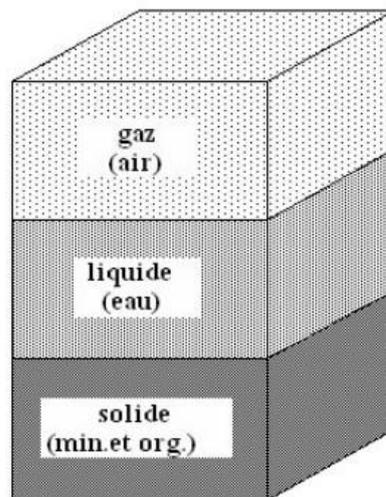


Fig III.1. Représentation conventionnelle des différentes phases du sol (Mermoid , 2006).

III.2.1. Phase solide du sol

La phase solide est composée de minéraux et de matière organique. La composition en minéraux de la phase solide est variable d'un sol à l'autre et dépendent de la roche mère sur laquelle ils se sont formés et des conditions de cette formation, à savoir principalement le climat, la végétation et les modifications d'utilisation du sol. (Yakouben et Bousekkine , 2013).

La phase solide du sol comprend Suivant la taille des grains deux catégories de sols :

➤ **Les sols fins** (ou sols cohérents) $d < 20 \mu\text{m}$ avec cohésion (argile, limon) : comportement très différent en fonction des teneurs en eau (état solide, plastique ou liquide)

➤ **Les sols grenus** $d > 20 \mu\text{m}$ sans cohésion (sable, gravier, etc.) : comportement régi par les propriétés du squelette solide (peu influencé par l'eau).

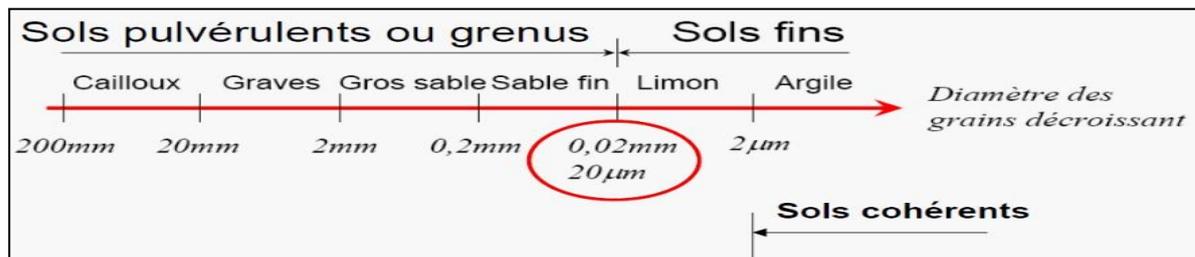


Fig. III.2. Classification des particules solides d'un sol. (<http://ressources.unit.eu>).

Elle comprend aussi deux fractions intervenant principalement dans la sorption des polluants à savoir les fractions organiques et minérales (Sahnoune , 2014) :

➤ **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); Chaîne (pyroxène); 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, La goethite et l'hématite (oxydes de fer, 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). 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.

➤ **Fractions organiques**

Représente une accumulation de résidus végétaux ou animaux partiellement décomposés, ce matériau étant dans un stade actif de décomposition suite à l'attaque des microorganismes (Constituant transitoire).

III.2.2. Phase liquide du sol

Appelée solution du sol, Elle est contenue dans les pores du sol plus ou moins fortement en fonction du taux d'humidité dans le sol. Sa composition 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.). (Sahnoune , 2014).

III.2.3. Phase gazeuse du sol

L'air du sol : cette phase occupe dans le sol la porosité qui n'est pas remplie par la phase liquide, sa composition de cette phase est déterminée donc par : Les échanges avec l'atmosphère

par diffusion moléculaire couplée à la volatilisation et à la dissolution, la respiration des organismes vivants et les échanges avec la solution du sol. (Yakouben et Bousekkine, 2013).

III.3. Principaux horizons

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 (Sahnoune, 2014).

De manière simplifiée, on distingue les principaux horizons suivants :

- **L'horizon O** : (ou humus) est essentiellement composé de matière organique, comme des feuilles ou des insectes en décomposition. En fonction du sol, la couche O peut être très épaisse (0-30 cm) ou inexistante.
- **L'horizon A** : (ou couche arable ou sol de surface) est essentiellement constitué de minéraux et de matières organiques décomposées.
- **L'horizon E** : est aussi appelé horizon éluvial. L'argile, les minéraux et les matières organiques s'échappent de cette couche. Le sable et les particules de quartz du limon restent.
- **L'horizon B** : (ou sous-sol) est constitué d'argile et de dépôts minéraux ainsi que de matières organiques, mais en quantité moindre que les couches supérieures.
- **L'horizon C** : (ou couche de matériau originel) est constitué de roches quasiment non altérées et de très peu de matières organiques. C'est à partir de lui que le sol se développe.
- **L'horizon R** : (roche mère ou substrat rocheux) est constitué d'une masse de roches comme le granit, le calcaire ou le grès, qui forme le matériau d'origine de certains sols.

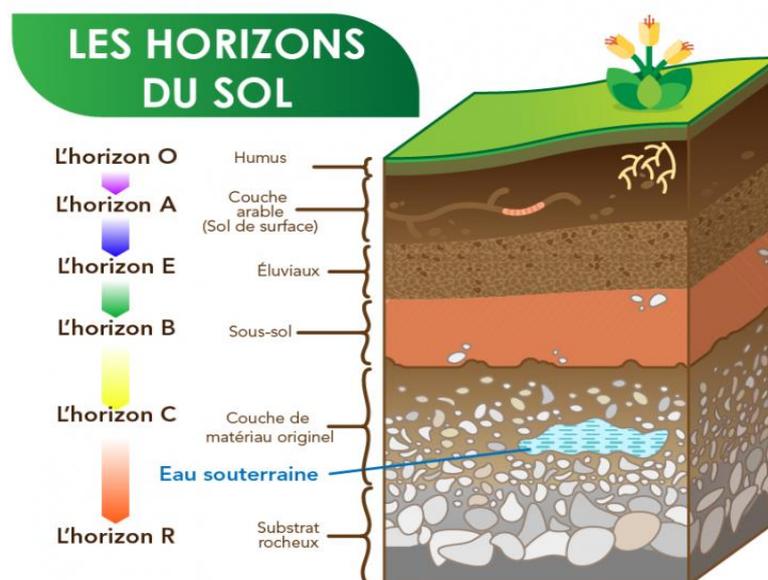


Fig. III.3. Horizons du sol. (Society of America. (n.d.). Soil horizons).

III.4. Caractéristiques physique de sol

III.4.1. Structure

La structure du sol est l'arrangement des particules du sol en groupements. Ces groupements sont appelés agrégats, qui forment souvent des formes distinctives que l'on trouve généralement dans certains horizons du sol. Par exemple, les particules de sol granulaires sont caractéristiques de l'horizon de surface (Boudouch O, 2009).

La structure du sol se réfère à la forme et à la taille des agrégats qui le constituent. Avec la texture du sol, la structure du sol est un paramètre très important puisqu'elle influe sur la porosité du sol. Les informations concernant la structure du sol peuvent être utilisées pour délimiter la forme et la distribution des contaminants dans le sol. La structure du sol peut aussi affecter le transport et la rétention des contaminants. (Boudouch, 2009).

III.4.2. Texture

La texture ou la granulométrie fait référence à la taille et de la proportion relative des particules minérales dans le sol. C'est une propriété fixe du sol qui est de loin la propriété la plus importante. La texture a une influence dominante sur les propriétés physiques et chimiques des sols. Les particules qui composent le sol sont classées en trois groupes : sable, limon, argile, le pourcentage de ces particules détermine le type de sol. (Sahnoune, 2014 ; Yakoub et Bousekkine, 2013).

III.4.3. 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 'un volume apparent unitaire qui n'est pas occupée par la phase solide. (Calvet , 2003).

III.4.4. Perméabilité

La perméabilité du sol indique la propriété qu'a le sol de transmettre l'eau et l'air, elle est étroitement dépendante de la texture et de la structure du sol. Le critère retenu pour mesurer la perméabilité est la vitesse de percolation de l'eau exprimée en Cm³/h. (Sahnoune, 2014).

III.4.5. 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. (Sahnoune, 2014).

III.5. Pollution des sols

L'accroissement des populations et le développement des techniques industrielles et agricoles ont entraîné la contamination et la pollution des sols.

La pollution des sols désigne une concentration anormale de substances toxiques dans les sols due généralement aux activités humaines. Cette pollution peut être diffusée ensuite dans l'environnement via l'eau, l'air ou les organismes vivants du sol (bactéries, plantes, champignons), entraînant des dangers non négligeables pour la santé.

III.5.1. Définition de déchet

Le déchet est défini, d'après la loi algérienne N°01-19 du 12/12/2001, comme « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer ». (PNUD-MATE, 2008).

III.5.2. Différents types des déchets (Chograni Yassine 2016)

Déchets ménagers et assimilés : tous déchets issus des ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles, commerciales, artisanales et autres qui, par leur nature et leur composition, sont assimilables aux déchets ménagers.

Déchets industriels : tout déchet résultant d'une activité industrielle agroindustrielle, artisanale ou d'une activité similaire.

Déchets médicaux et pharmaceutiques : curatif dans les domaines de la médecine humaine ou vétérinaire et tous les déchets résultant des activités des hôpitaux publics, des cliniques, des établissements de la recherche scientifique, des laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines et de tous établissements similaires.

Déchets dangereux : inflammable, biologique ou bactériens, constituent un danger pour l'équilibre écologique tel que fixé par les normes internationales dans ce domaine.

Déchets inertes : tout déchet qui ne produit pas de réaction physique ou chimique tels les déchets provenant de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués ou contaminés par des substances dangereuses ou par d'autres éléments générateurs de nuisances.

Déchets agricoles : tout déchet organique généré directement par des activités agricoles ou par des activités d'élevage ou de jardinage.

Déchets ultimes : tout résidu résultant de déchets traités ou ceux qui ne sont pas traités selon les conditions techniques et économiques actuelles.

Déchets biodégradables : tout déchet pouvant subir une décomposition biologique naturelle, anaérobie ou aérobie, comme les déchets alimentaires, les déchets de jardins, de papiers et de cartons ainsi que les cadavres d'animaux.

III.5.3. Impact des déchets sur l'environnement

Sur les sites de décharges, on rencontre essentiellement trois types de pollutions (Kehila et al., 2007) :

- Pollution par les matières organiques et/ou minérales,
- Pollution par les métaux lourds,
- Pollution par les microorganismes.

III.5.3.1. Pollution par les matières organiques et minérales

La composition des lixiviats est une photographie de l'état des déchets à un certain moment de leur dégradation. Christensen et al. (2001), en étudiant plusieurs sites ont défini les fourchettes de fluctuations de la composition physico-chimique des lixiviats d'ordures ménagères. La fraction minérale des lixiviats est essentiellement constituée de chlorures, sulfates, bicarbonates, potassium, sodium, et ammonium. La partie organique très forte est liée à l'âge des déchets. Ce fort taux de matière organique peut se retrouver dans les eaux de surface et souterraines quand les conditions minimales d'enfouissement de déchets ne sont pas respectées. Et c'est malheureusement le cas dans les pays en développement. Cependant, même si dans certains PED, on assiste à la mise en place des géomembranes, la durée de vie de ces matériaux soumis à l'agressivité chimique des lixiviats est mal connue et la possible présence de fuites peut occasionner la contamination de la nappe. C'est pourquoi la collecte ou le drainage des lixiviats reste fondamentale. Un risque de colmatage biologique des structures de drainage peut apparaître, mais un dimensionnement adéquat permet de retarder son apparition.

Selon une étude de Cemagref (2005), lorsque le système drainant est colmaté, le lixiviat s'accumule au fond du CSD et la hauteur de lixiviat s'élève. La pression s'accroît sur la géomembrane, ce qui renforce les risques de fuite.

III.5.3.2. Pollution par les métaux lourds

Dans la quasi-totalité des pays en développement, aucune précaution n'est prise et les populations sont exposées au risque de contaminations massives. La contamination des sols par les métaux lourds, constitue un enjeu fondamental d'abord, parce qu'elle affecte notre environnement proche, chargé en symboles (la terre nourricière), mais surtout parce que l'enjeu de la pollution des sols est lié directement à l'alimentation en eau potable. La migration des métaux lourds dans les sols et l'infiltration vers les eaux, met en jeu un grand nombre de phénomènes : solubilisation à pH acide, complexation par la matière organique de type humique, précipitation à pH basique, rétention des MES sur des particules des sols, adsorption des ions ou des molécules à la surface des grains de matrice poreuse, phénomène d'échange d'ions etc. Par conséquent le mouvement de ces métaux est essentiellement en relation avec les différents

compartiments minéral, organique et biologique des milieux récepteurs. En outre, ces fractions métalliques ont vis-à-vis de certains ligands minéraux et organiques présents dans l'eau interstitielle des potentiels de remobilisation différents, ce qui peut expliquer les différents comportements de migration des métaux au sein du massif de déchets et dans les sols des décharges. (Kehila et al., 2007).

Plusieurs métaux lourds existants dans les déchets comme le Mg, Fe, As, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni et le Zn.

III.5.3.3. Pollution par les microorganismes

Plusieurs maladies hydriques sont causées par la consommation des eaux contaminées par les lixiviats qui contiennent des microorganismes pathogènes. La pleine image des maladies associées à l'eau est complexe pour un grand nombre de raisons. Durant la dernière décennie, les problèmes relatifs à l'eau sont devenus de plus en plus vastes, avec l'émergence de nouvelles maladies d'infection relatives à l'eau et la réémergence d'autres déjà connues, (salmonelle, choléra, shigellose) (Kehila et al., 2007).

III.6. Méthodes de traitements des sols contaminés

Le but de la dépollution des sols est de restituer les sites dans un état aussi proche que possible de l'état antérieur à la pollution. En outre, la ou les techniques de traitement des sols ne doivent pas être plus polluantes que le résultat de la dépollution. C'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de transfert de pollution (Nouri et al, 2016). La liste des critères auxquels doivent répondre les techniques de dépollution

- ✓ Enlever ou neutraliser les matières incriminées ;
- ✓ Peser aussi peu que possible sur les ressources mises en œuvre (eau, air, énergie, capital...);
- ✓ Ne pas provoquer d'émissions secondaires (eau et air du processus) contenant des polluants
- ✓ Obtenir un taux important de recyclage du matériau traité ;
- ✓ Minimiser la quantité et le danger potentiel des matières résiduelles ;
- ✓ Ne pas produire de nouvelles substances toxiques par l'enlèvement ou le transfert de celles déjà existantes. (Nouri et al., 2016).

Les différentes techniques de dépollution des sols peuvent être classées :

III.6.1. En fonction du lieu de traitement

Selon Van Beilen et al., (2003), on distingue les traitements suivants (fig III.4) :

a) **Traitement hors site (ou ex situ)** : Ils supposent l'excavation/extraction du milieu pollué (déchets, terre, eau) et son évacuation vers un centre de traitement adapté (incinérateur, centre d'enfouissement technique... etc.).

b) **Traitement sur site (on site)** : Ils consistent à excaver les terres ou les eaux polluées et à les traiter sur le même site.

c) **Traitement in situ (ou en place)** : Ils correspondent à un traitement sans excavation : le sol et les eaux souterraines sont laissés en place. Il s'agit alors soit d'extraire le polluant seul, soit de le dégrader ou de le fixer dans le sol.

d) **Confinement** : Il consiste à empêcher / limiter la migration des polluants.

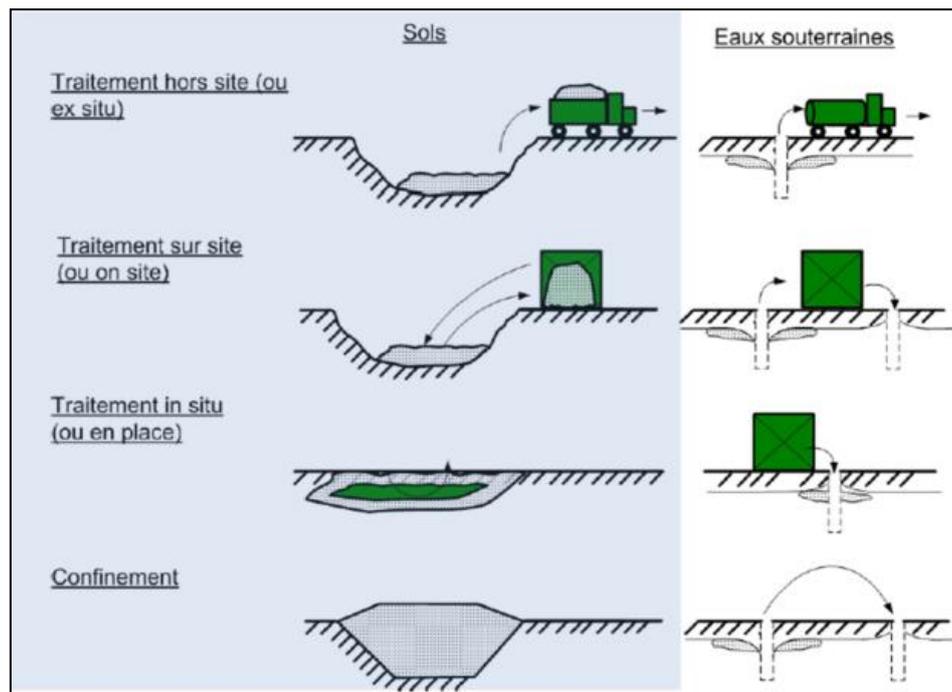


Fig. III.4. Lieux où sont gérés les sols pollués.

III.6.2. En fonction de la nature des procédés employés

On distingue les procédés suivants :

III.6.2.1. Procédés physiques

Le principe consiste à utiliser des fluides (eau ou gaz), présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser. (Tokalioglu et al, 2000).

a) **Extraction double phase** : consiste à exercer une dépression importante dans la zone non saturée, au niveau de la frange capillaire et au niveau de la partie supérieure de la zone saturée (fig III.5), ce qui a pour but d'extraire les gaz des sols, le surnageant (cas des produits flottants) et la phase dissoute. Les liquides et gaz extraits font l'objet d'une séparation et d'un traitement spécifique. (Boisson et al., 2000).

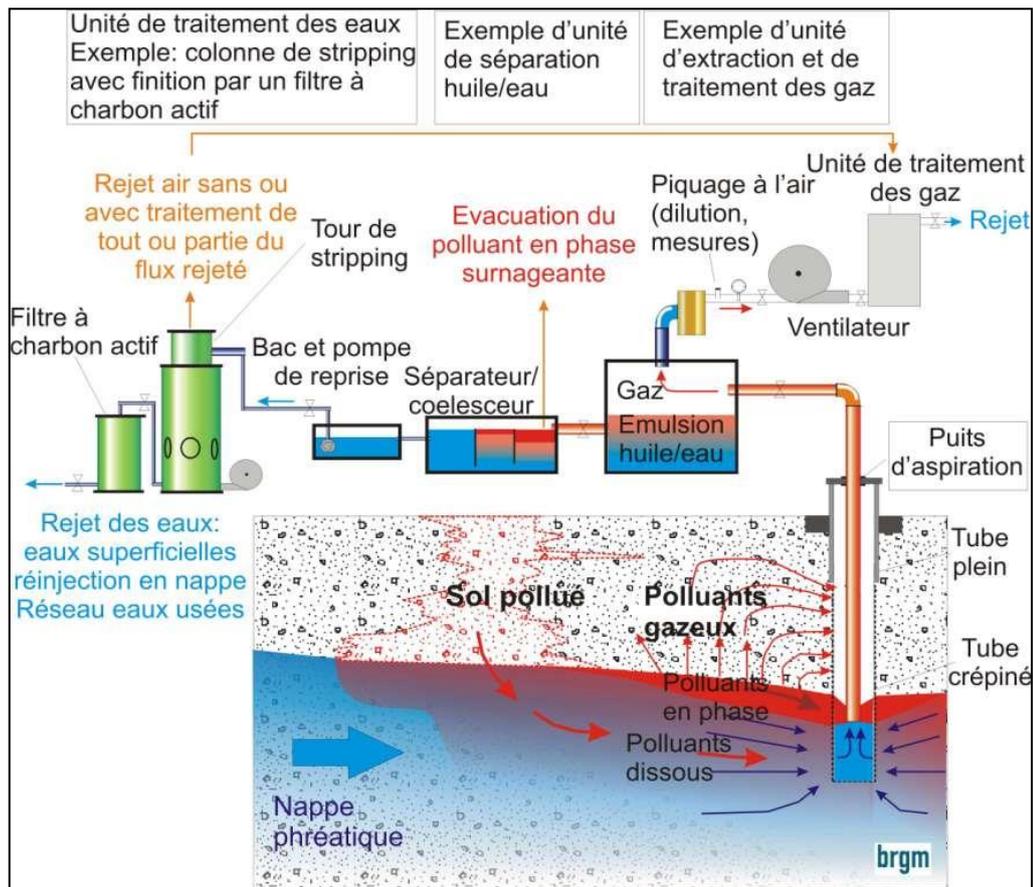


Fig. III.5. Schéma de principe de l'extraction double phase.

b) Méthode pompage – écrémage : est la technique la plus utilisée pour récupérer le flottant dans les nappes phréatiques perméables. Cette technique s'applique donc pour des produits organiques en phase flottante au toit de la nappe, comme des hydrocarbures. (Aubertin et al., 2002).

c) Confinement : le confinement, qui fait partie des techniques de réhabilitation des sites pollués, se décline en trois grandes familles, le confinement de surface, le confinement vertical et le confinement horizontal profond. La technique de confinement des sites. Elle Consiste à isoler les contaminants de façon à prévenir d'une manière pérenne leur propagation, s'assurer du maintien des mesures mises en place, et suivre, c'est-à-dire s'assurer de l'efficacité de ces mesures. (Jose Miguel, 2003).

d) Excavation : C'est une méthode la plus simple à mettre en œuvre et qui permet de supprimer rapidement une source de pollution locale. De l'eau est ajoutée, le mélange sol-eau est homogénéisé puis tamisé en plusieurs fractions. Les sables sont séparés des limons et des argiles par des opérations successives. Les polluants se concentrent dans les fractions les plus fines que l'on fait flocculer puis passer à l'épaississeur et dans un filtre presse pour être finalement traités. (Jose Miguel, 2003).

III.6.2.2. Procédés chimiques

Mettent en jeu un réactif pour dégrader ou extraire la pollution. Il s'agit par exemple d'oxydation, de réduction, de lavage par solvants ou tensioactifs.

a) Lavage : Ce procédé consiste à lessiver les sols sans excavation (zones saturée et non saturée) par injection d'eau (et d'agents mobilisateurs en solution) en amont ou au droit de la source de pollution. Par la suite, les eaux polluées sont pompées, traitées en surface puis rejetées dans les réseaux d'eaux usées, les eaux superficielles ou dans certains cas réinjectées dans la nappe. (Cloirec, 2001).

b) Oxydation chimique : Consiste à injecter un oxydant dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation (fig III.6). Cet oxydant va détruire totalement ou partiellement les polluants. Ce procédé permet donc d'aboutir à la destruction des polluants (aboutissant à la transformation en eau, gaz carbonique et sels). (Campy, 2000).

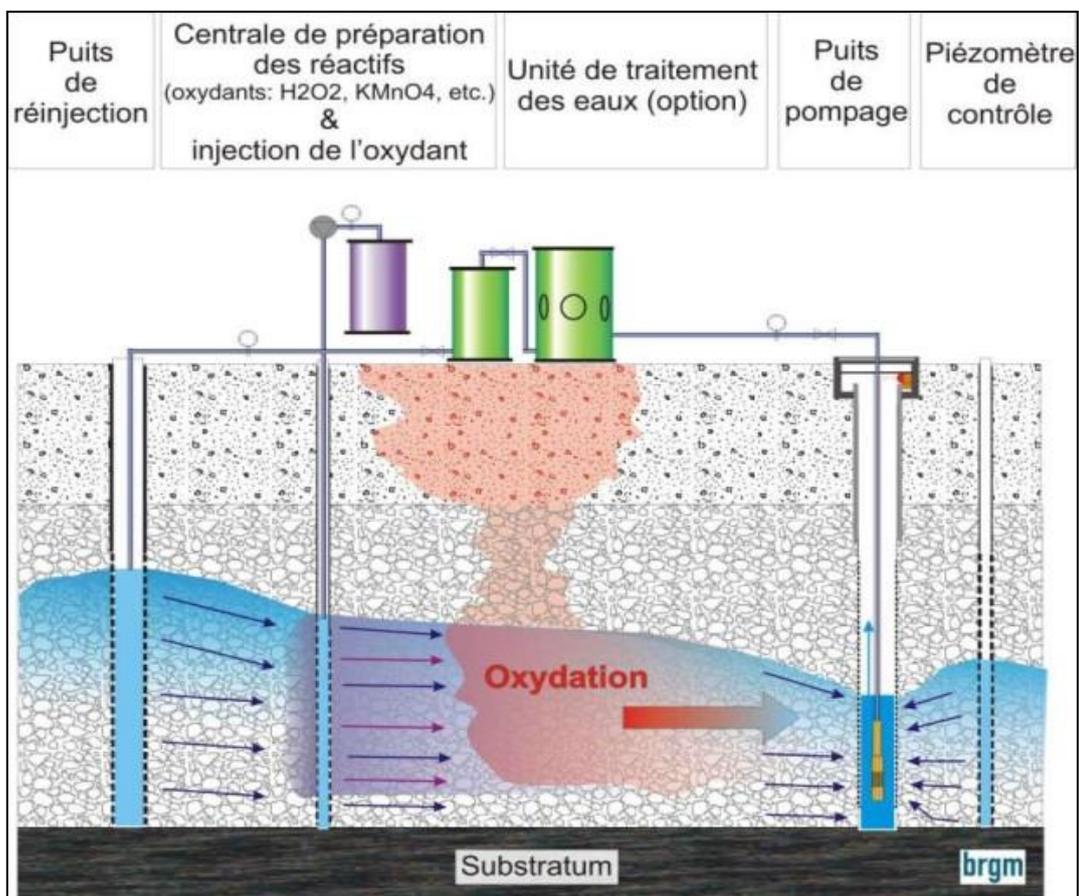


Fig. III.6. Schéma de principe d'Oxydation chimique.

c) Réduction chimique : Consiste à injecter un réducteur dans les sols sans excavation. Ce réducteur est utilisé dans le but :

✓ Soit de détruire totalement ou partiellement des polluants organiques (aboutissant à la minéralisation totale des polluants ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables) ;

✓ Soit de réduire les polluants inorganiques afin de les stabiliser ou les rendre moins toxiques. (Cloirec, 2001).

III.6.2.3. Procédés biologiques

La majorité des traitements biologiques mettent en jeu des micro-organismes, principalement des bactéries, afin de dégradé totalement ou partiellement les polluants.

a) **Biodégradation dynamique** : nécessite l'ajout de composés spécifiques dans les sous-sols afin de créer des conditions favorables à l'activité des micro -organismes responsables de la biodégradation des polluants. Cette approche est fréquemment utilisée sur les sites avec des hydrocarbures biodégradables volatils à semi-volatils, ainsi que pour les solvants chlorés. (Boivin, 2005).

b) **Bioventing** :il s'agit d'accélérer la biodégradation des polluants par les microorganismes indigènes, en induisant une circulation d'air à faible débit dans la zone polluée (insaturée) afin de limiter l'élimination des polluants par volatilisation. Cette technique est utilisée pour des sites fortement pollués par des hydrocarbures rapidement biodégradables. (Slocik et al., 2003).

c) **Phytoremédiation** : consiste en l'utilisation de la capacité de certains végétaux à se développer en milieux contaminés, pour le traitement de sols, de boues, de sédiments, d'effluents liquides voire gazeux (fig III.7). Cette méthode repose sur la faculté des plantes (et de leurs microorganismes associés) à bloquer, extraire, accumuler, transformer ou détruire un polluant donné. (Saada et Nowak ,2005).

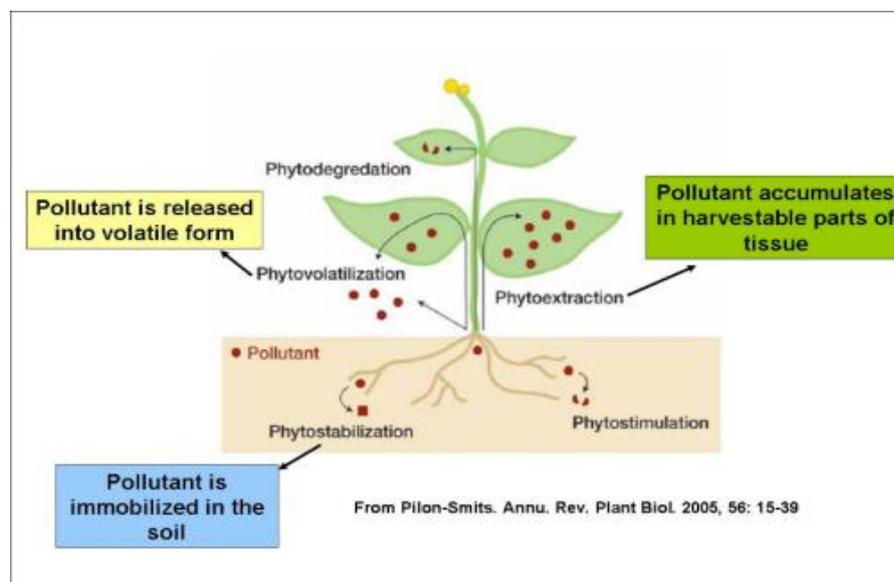


Fig. III.7. Représentation schématique des différentes techniques de phyto-remédiation.

III.6.2.4.Procédés thermiques

Ils utilisent la chaleur pour détruire le polluant (incinération, désorption thermique, thermolyse, etc.), ou le rendre inerte (vitrification, ... etc.). (Tokalioglu et al., 2000).

a) **L'incinération** C'est une des techniques de traitement les plus anciennes. Son principe repose sur une combustion aérobie (en présence d'air) dans un four où les températures sont importantes (870 à 1 200 °C). Ces hautes températures détruisent les polluants ou les volatilisent. (Cloirec, 2001).

b) **Désorption thermique** Consiste à appliquer de la chaleur pour extraire par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils des sols excavés. La température utilisée est inférieure à celle nécessaire pour l'incinération. (Mench, 2000).

c) **Vitrification** consiste à solidifier/stabiliser les sols par élévation de la température afin de le transformer en un matériau fondu qui se vitrifie en se refroidissant.

III.7. Traitement par stabilisation /solidification

Les procédés de solidification et de stabilisation ont pour but de piéger les polluants afin de réduire leur mobilité. Les polluants sont soit liés physiquement, soit inclus dans une matrice stabilisée, soit liés chimiquement.

La stabilisation et la solidification font partie des techniques les plus utilisées pour les sols pollués par les métaux lourds. (BRGM, 2010).

Les procédés de stabilisation/solidification doivent répondre aux objectifs suivants (Khouan et Lebdiri, 2016) :

- La transformation de déchet en un solide plus facile à transporter et à stocker.
- La diminution de la surface d'exposition à l'environnement des contaminants.
- La limitation de la solubilité des contaminants en cas de contact avec un fluide lixiviant.

III.7.1. Stabilisation

Elle se traduit par une fixation chimique des polluants. Elle désigne l'ensemble des mécanismes permettant de mettre les polluants contenus dans le résidu sous une forme stable, peu soluble et peu mobilisable par l'environnement. (Freeman et Harri, 2005).

III.7.2. Solidification

Elle se traduit par la transformation du résidu traité (pulvérulent, pâteux, granuleux... etc.) en une matrice peu poreuse et peu perméable, par réaction (ou non) avec un ou plusieurs réactifs intervenant dans le procédé.

La solidification, si elle est dissociée d'une stabilisation, peut être considérée comme une encapsulation, qui a pour principal effet de limiter l'interface entre le déchet et le milieu extérieur, donc de réduire le passage en solution des polluants, tant que la structure du matériau reste intègre. Elle a en outre pour effet d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques du déchet, si bien que le déchet traité se présente sous la forme d'un solide massif. (Moyeux, 2001).

III.7.3. Stabilisation/solidification à base de liants hydraulique

Les liants hydrauliques sont des poudres fines constituées de sels minéraux anhydres réactifs en présence de l'eau. Ils s'hydratent en présence d'eau pour former un matériau solide, véritable roche artificielle. Parmi ces liants hydrauliques on trouve le ciment : le plus couramment utilisé est le ciment Portland artificiel (CPA-CEMI). Il résulte du broyage du clinker, obtenu par la cuisson (à 1450°C) d'un mélange approprié de calcaire (80%) et d'argile (20%), avec environ 5% de gypse (CaSO₄) pour régulariser la prise. (Spence et al, 2000).

La stabilisation-solidification (SS) au ciment est une méthode qui permet la réhabilitation des sols contaminés en combinant deux procédés. L'incorporation de ciment Portland à la masse de sols contaminés provoque en effet deux types de réactions. La stabilisation modifie chimiquement les propriétés de certains contaminants en les rendant moins nocifs et la solidification empêche ces contaminants de se disperser dans l'environnement. Le jumelage de ces deux procédés fait de la SS au ciment une technologie efficace pour réhabiliter les sols contaminés d'origine inorganique ou organique. Elle est particulièrement efficace pour traiter les métaux lourds.

Avec la SS au ciment, on peut restaurer les sols contaminés in situ, c'est-à-dire sur les lieux mêmes et sans excavation, ou encore ex situ, soit après l'excavation complète des sols contaminés. Il y a un avantage certain à réhabiliter les sols contaminés sur place, car on évite ainsi les risques liés au transport et à la manutention de produits nocifs. Dans la perspective du développement durable, la SS au ciment in situ est bénéfique car elle permet la réutilisation des sols. (<https://cimentquebec.com>).

III.7.4. Différents types de ciments

Le ciment est une poudre dont on peut mesurer la masse volumique absolue, la granulométrie, et la surface spécifique. La masse volumique absolue varie de 2.90 à 3.20 g/cm³ suivant les constituants du ciment. L'intervalle granulaire va de 0 à 200 µm. La détermination de la surface spécifique est une façon de mesurer la réactivité des ciments elle est d'environ 3000 cm²/g. Plus la surface spécifique est grande, plus il y a de grains fins et plus le ciment réagit vite. (Agence Française de Normalisation, 2002).

Les différents grands types de ciments commercialisés sont normalisés en France et caractérisés par leur composition (Yakouben et Bousekkine, 2013):

- **CPA-CEM I** 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** contiennent du clinker (5-64 %) et de fortes teneurs (36 à 95 %) de laitiers de haut-fourneau.
- **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 %).

Tab. III.1. Les différents types de ciment et leur composition.

Désignation	Notation	clinkerK	Laitier de hautfourneauS	FuméesdesiliceD	Pouzzolanesnatu rellesZ	Cendres volantes		Schistescalcinés T	CalcairesL	Constituantssec ondaire
						Siliceuse sV	CalciquesW			
Ciment Portland	CPA-CEMI	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CimentPortland composé	CPJ-CEMII/A	80-94	6-20							
	CPJ-CEMII/B	65-79	21-35							
Ciment de hautfourneau	CHF-CEMIII/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0-5
	CHF-CEMIII/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0-5
	CLK-CEMIII/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0-5
Cimentpouzzolanique	CPZ-CEMIV/A	65-90	-	10-35			-	-	-	0-5
	CPZ-CEMIV/B	45-64	-	36-65			-	-	-	0-5
Cimentau Cendres	CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	0-5
	CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	0-5

III.7.5. Hydratation du ciment

La plupart des propriétés du béton, et plusieurs aspects de sa durabilité dépendent des caractéristiques de la pâte de ciment durci. Il est donc important de comprendre la structure de la pâte de ciment hydraté (<http://doc.lerm.fr> › Dossiers techniques › Ciments)

La prise du ciment n'est pas un séchage de la pâte après ajout de l'eau ; il s'agit d'un ensemble de réactions chimiques d'hydratation permettant le passage de la pâte de ciment (ciment additionné d'eau) de l'état liquide à l'état solide.

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment C3S, C2S, C3A, et C4AF réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau.

a) Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques (Ca_3SiO_5) et les silicates bicalciques (Ca_2SiO_4) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C2S, la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible. Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, Leur composition moyenne est proche de $(\text{CaO})_{1.7}(\text{SiO}_4)(\text{H}_2\text{O})_4$. L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment : les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices capillaires entre les grains.

Au bout de quelques heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de ciment devient assez épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. L'hydratation ralentit de plus en plus, mais peut se poursuivre pendant des mois voire des années.

b) Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

➤ Étape 1 : Formation d'ettringite (phase AFt)

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite TSA (trisulfoaluminate de calcium hydraté) : $((\text{CaO})_6(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SO}_3)_3, 32\text{H}_2\text{O})$. Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

➤ Étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté

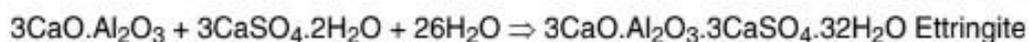
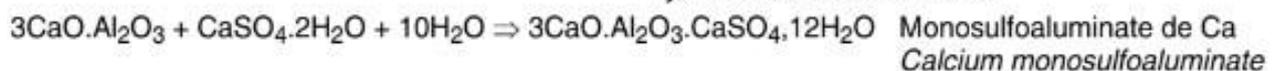
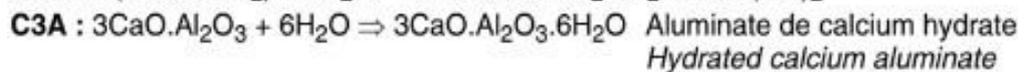
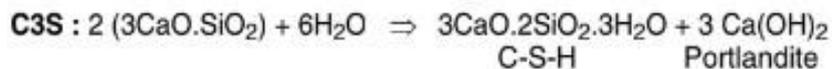
Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) : $((\text{CaO})_3(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{CaSO}_4), 12\text{H}_2\text{O})$. Les réactions chimiques s'intensifient.

➤ Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels

Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfoaluminat. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminat (C3A) et l'aluminoferrite (C4AF) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du C3A, l'aluminoferrite tétracalcique (C4AF) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé.



Figure 2 – Matrice cimentaire (MEB) / Cement matrix (SEM)



1 : portlandite, 2 : C-S-H, 3 : aluminat de Ca hydraté / *hydrated calcium aluminat*, 4 : ettringite

Fig. III.8. Matrice cimentaire.

Chapitre VI

Matériaux utilisés,
méthodologie d'essai,
présentation des
résultats

IV. Introduction

Ce chapitre sera consacré à la présentation des matériaux d'études, de la méthode d'échantillonnage, de l'expérience expérimentale afin d'évaluer l'influence de l'ajout du ciment et de la poudre de verre broyée au sol du centre d'enfouissement technique de Demina- Taher ainsi qu'une évaluation de l'efficacité du procédé de stabilisation/solidification.

Des éprouvettes de mortier ont été effectuées au niveau du laboratoire LTPE. Les essais de résistance mécanique à la compression ont été réalisés au niveau du laboratoire de Rizzani De Eccher. A la fin de ce chapitre, nous exposons les résultats obtenus de la résistance à la compression à 7 jours et à 14 jours.

IV.1. Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans ce programme expérimental sont des échantillons de sol prélevés à partir du CET de Demina, du ciment, de la poudre du verre et de l'eau déminéralisée.

IV.1.1. Sol du CET

IV.1.1.1. Échantillonnage

L'étude des sites pollués nécessite souvent l'échantillonnage et l'analyse des sols permettant d'identifier les polluants présents. L'échantillonnage est le prélèvement d'échantillons selon une procédure spécifiée. L'objectif de l'échantillonnage est d'être le plus représentatif du milieu qu'il est censé de représenter, dont le but est d'analyser et de générer un échantillon aussi reproductible que possible.

Notre échantillonnage a été effectué au niveau du centre d'enfouissement technique C.E.T. de Demina. Nous nous sommes fixés des règles strictes de prélèvement.

Vu que le C.E.T. objet de notre étude est situé sur une pente d'un talus, dont la valeur de la pente moyenne est estimée égale à 15%. Nous avons alors choisi d'effectuer une station d'échantillonnage à l'aval du talus. Après décaissage à la pelle d'une surface de 1m² et évacuation de la terre végétale situé à environ 5 cm de la surface, le prélèvement a été effectué sur une profondeur de 1 mètre.

Une fois prélevés, les échantillons de sols étaient emballés adéquatement et conservés dans des contenants conformes et hermétiques de façon à assurer l'intégrité de l'échantillon et, dans la mesure du possible, à l'abri de la lumière, puis transportés au laboratoire.

Après réception des échantillons au laboratoire, un quartage a été effectué, afin d'obtenir un échantillon le plus représentatif que possible.



Fig. IV.1. Localisation des points d'échantillonnage (Google Earth).

IV.1.1.2. Caractérisation du sol

a) Poids volumique

Est défini comme le quotient du poids total (wt) du sol par le volume (Vt) qu'il occupe (y compris les fluides qu'il contient). $\gamma_h = \frac{mh}{v_t}$

L'essai consiste à mesurer successivement les paramètres poids et volume qui caractérisent un même échantillon de sol.

Les poids volumiques humides trouvés pour les deux points d'échantillonnage sont égale à 20 KN/cm³ ; Alors, le sol est classé comme un sol dense.

b) Humidité du sol

On désigne par l'humidité du sol ou la teneur en eau la quantité d'eau liquide contenu dans un échantillon de sol.

L'humidité du sol est définie comme étant la proportion pondérale de l'eau contenue dans un échantillon. Elle se détermine simplement par deux pesées, une pesée à l'état humide et une deuxième à l'état sec après séchage à 105°C.

La teneur en eau du sol est un facteur déterminant dans la répartition du polluant dans les trois phases du sol. En effet, lorsque la teneur en eau du sol augmente, cela entraîne une baisse de l'adsorption des polluants (Sayyad, G., et al 2010).

Les taux de la teneur en eau des échantillons de sol varient entre 18 % à 20 %. Selon la classification des sols basée sur le taux de la teneur en eau, le sol est dit alors légèrement humide. Cette valeur dépend fortement des conditions climatiques au moment des prélèvements au printemps, ainsi que la présence des matières organiques dans le sol qui empêche l'évaporation de l'eau.

c) Granulométrie

C'est la détermination de la distribution dimensionnelle des particules du sol dont le diamètre des grains est supérieur à 80 μm par analyse granulométrique par tamisage par voie sèche. Puis l'essai est poursuivi d'une analyse granulométrique par sédimentométrie afin de déterminer la répartition selon le diamètre des grains de la fraction fine de sol inférieur à 80 μm .

Le tamisage par voie sèche consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau séché en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. La pesée des refus des tamis permet de tracer la courbe granulométrique.

La sédimentométrie basée sur la loi de Stokes, consiste à mesurer le temps de sédimentation dans un liquide visqueux, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules de diamètre (D), et de poids volumique (γ_s).

D'après l'étude de caractérisation du sol de CET de Demina, réalisée sur deux échantillons dans le travail de Chabbi H, Benzaid G. (2021) et à la lumière des résultats obtenus dans la figure (fig IV.2), on peut dire que les deux échantillons de sols ont des profils semblables. Ils sont majoritairement composés de la fraction de taille 0.002 mm et plus avec 65% du sol est constitué de la fraction inférieure à 0.08 mm.

La classe granulométrique de ces échantillons, la plus pondérale est la classe des sables fins (fraction 0.02-0.2 mm). Elle représente 45% en poids de l'échantillon P1, et 40% en poids de l'échantillon P2.

Tandis que, les proportions pondérales des tranches granulométriques 0.002-0.02 mm (celle des limons) et 0.2-2 mm (celle des gros sables) représentent respectivement des pourcentages de 8 % et 15 % en poids pour l'échantillon P1 et des pourcentages de 25% et 12 en poids pour l'échantillon P2.

Les argiles représentent respectivement pour les points P1 et P2 un pourcentage de 22 % et 12%. Donc leurs textures d'après les données de la littérature correspondent à un sable limoneux.

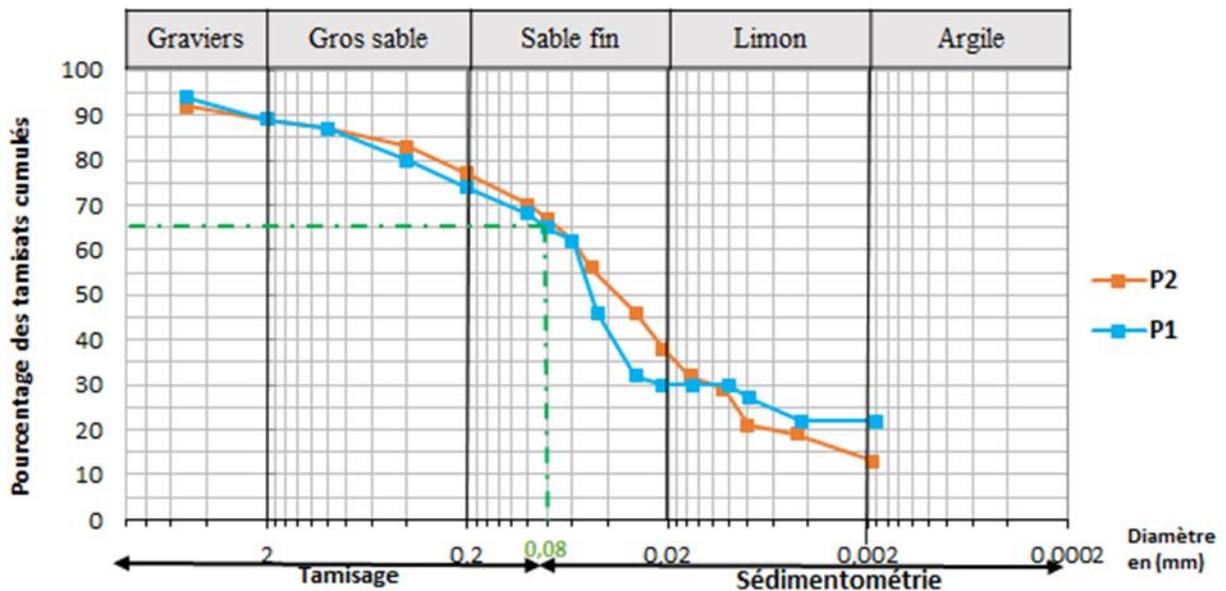


Fig. IV.2. Courbes granulométrique de sol. (Chabbi et Benzaid, 2021).

d) Teneur en métaux lourds

La caractérisation des sols du CET de Demina a été faite dans le travail de Chabbi H., Benzaid G., à l'état brut (granulométrie < 100 μm) par la technique de fluorescence X (FRX).

Les résultats enregistrés (fig.IV.3) montrent que le sol est constitué principalement de la silice SiO_2 et de CaO , ces pourcentages montrent que le sol étudié est de nature hétérogène. L'interprétation des résultats montre la présence des métaux lourds (Zn, Cr et Pb), le zinc en grande proportion puis par ordre décroissant le chrome et le plomb. Ces métaux lourds dépassent de très loin les normes exigées par la réglementation en vigueur.

De ce fait, ce sol est alors classé comme un sol pollué et doit subir un traitement par stabilisation/solidification.

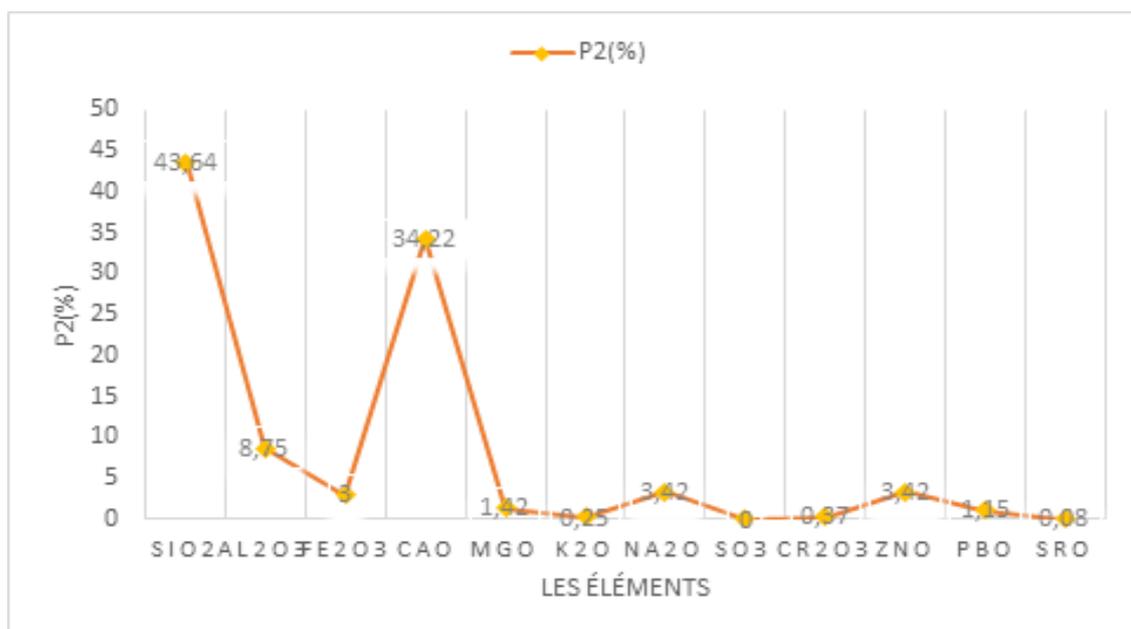


Fig. IV.3. Représentation des résultats de l'analyse FRX. (Chabbi et Benzaid, 2021).

IV.1.2. Ciment

Le ciment que nous avons utilisé pour ce programme expérimental est un ciment portland de classe CEM II/A-L 42,5 R|. Les différentes caractéristiques que ce soit Chimiques, minéralogiques ou physiques du ciment utilisé sont données dans les tableaux.

Tab. IV.1. Composition chimique de ciment. (Cherif et al., 2021).

Composition chimique								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂	CAO	MgO	SO ₃	Na ₂ O+K ₂ O	Cl	I.O.I
27.83	6.21	3/12	57.22	0.94	2.02	0.14	-	2.41

Tab. IV.2. Composition minéralogique de ciment. (Cherif et al., 2021).

Composition minéralogique			
C3S	C2S	C3A	C4AF
56.60	22.98	9.87	8.25

Tab. IV.3. Propriété physique de ciment. (Cherif et al., 2021).

Propriété physique					
Temps de pris		Agrandissement du chatelier		Surface spécifique SSA	densité
initial	final	chaud	a froid	3891 cm ² /g	3150 Kg/m ²

Toute la quantité de ciment utilisée lors des séries d'expérimentation a fait l'objet d'une seule commande et conservé dans un milieu sec et à l'abri des écarts de température.

IV.1.3. Eau déminéralisé

Les mortiers sont préparés, en plus du ciment et du sol par de l'eau déminéralisée. Elle a été utilisée pour éviter l'ajout éventuel des espèces polluantes (métaux lourds) en traces supplémentaires dans les échantillons.

IV.1.4. Ajouts aditifs

Les ajouts utilisés dans notre programme expérimental sont du verre finement broyé, dans le but d'exploiter et de valoriser les déchets du verre

IV.1.4.1. Verre broyé

Du verre broyé finement a été utilisé dans cette expérience à différents pourcentages. Sa composition chimique est donnée dans le tableau IV.

Tab. IV.4. Composition chimique et caractéristiques physiques de la poudre de verre. (Cherif et al., 2021).

Composition chimique									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	Cl	K_2O	$P.A.F$
69.20	1.34	1.15	9.29	1.81	0.01	15.60	0.01	0.26	2.41

IV.2. Préparation des éprouvettes d'essai

IV.2.1. Présentation de la méthode de formulation

Plusieurs formulations ont été élaborées, les constituants principaux de cette formulationsont :

- Le sol
- Le ciment portland de type CEM II/A-L 42.5R
- L'eau déminéralisée
- Verre broyé

La formule générale pour préparation du mortier selon la norme EN 196-1

450 grs \pm 2 ciment ; 1350 grs \pm 5 sabel fin normalisé ; 225 \pm 1 grs eau distillé (avec un rapport $\frac{E}{C} = 0.5$).

Dans le cas de traitement de sol par procédé s/s on va proposer les formulations suivantes :

Tab. IV.5. Formulation à 25% (ciment + ajout)

échantillon	Sol (grs)	Ciment (25 % du sol) (grs)	Ajout (Verre broyé) (grs)	Eau (grs)	Ciment +ajout (grs)
E1 0% ajout	1350	337.5	0	168.75	337.5
E2 10% ajout	1350	303.75	33.75	168.75	337.5
E3 20% ajout	1350	270	67.5	168.75	337.5

Tab. IV.6. Formulation à 35% (ciment + ajout)

échantillon	Sol(grs)	Ciment (35 % du sol)(grs)	Ajout(Verre broyé) (grs)	Eau(grs)	Ciment +ajout(grs)
E4 0% ajout	1350	472.5	0	236.25	472.5
E5 10% ajout	1350	425.25	47.25	236.25	472.5
E6 20%ajout	1350	378	94.5	236.25	472.5

a) Matériels utilisés :

- Moules d'éprouvette (4×4×16) cm.
- Malaxeur.
- Appareil a chocs.
- Main écope.
- Truelle.

IV.2.2. Malaxage du mortier

Ces mortiers sont malaxés pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme EN 196-1 :2005 :

- On introduit l'eau en premier dans la cuve du malaxeur (figure III.2), y on verse ensuite le ciment, aussitôt après, on met le malaxeur à vitesse lente.
- Après 30 s de malaxage, on introduit régulièrement le sol, pendant les 30 s qui suivent. On met alors le malaxeur à sa vitesse rapide et on continue le malaxage pendant 30s supplémentaires.
- On arrête le malaxeur pendant 1min 30s. Pendant les 15 premières secondes, on enlève au moyen d'une raclette tous le mortier adhère aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le de celui-ci.
- On reprend ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60s



Fig. IV.4. Malaxeur à mortiers utilisé pour la fabrication des éprouvettes

IV.2.3. Confection des éprouvettes d'essai

Les moules d'éprouvettes pour les essais de compression, sont des corps d'éprouvette de forme de dimensions normalisés ($4 \times 4 \times 16$ cm³). Le remplissage des moules se fait avec délicatesse particulièrement pour les éprouvettes de compression. Les moules remplis sont par la suite vibré sur par un vibreur pour évacuer les bulles d'air et éviter les cavités dans le mortier.

Le moule utilisé dans la préparation des monolithes est présenté sur figure IV.5.

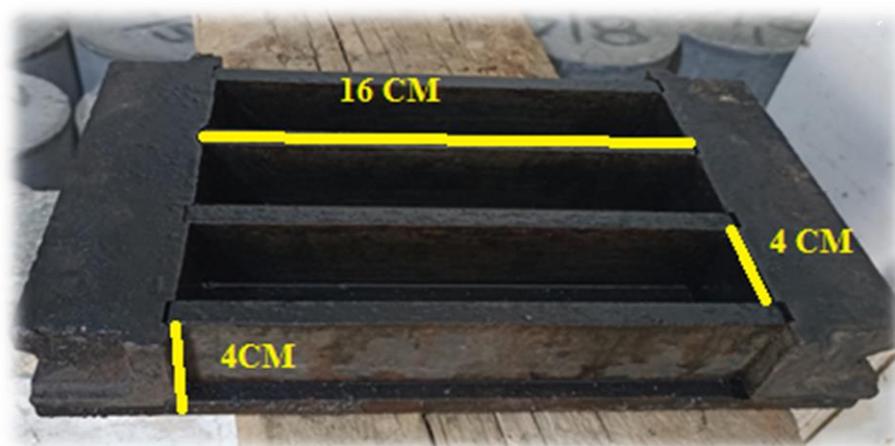


Fig.IV.5. Moule utilisé dans la préparation des éprouvettes ($4 \times 4 \times 16$ cm³).

IV.2.4. Conditionnement des éprouvettes

a) Manutention et conservation avant démoulage

Nous plaçons une plaque de 210 mm 185 mm 6 mm de verre, d'acier ou d'un autre matériau imperméable qui ne réagit pas avec le ciment sur le moule. Ensuite, nous posons chaque moule

couvert sur une base horizontale dans la chambre à air humide ou l'armoire dès que possible. L'air humide doit pouvoir atteindre toutes les surfaces du moule. Les moules ne doivent pas être empilés les uns sur les autres. Chaque moule doit être sorti du stockage après 24 heures.

b) Démoulage des éprouvettes :

Le mortier est enlevé après 24 heures et manipulées sans risque de détérioration.

IV.2.5. Conservation des éprouvettes

Après démoulage les échantillons seront stockés, pour notre étude nous avons gardé les échantillons à l'extérieur pendant 7, 14 jours

IV.3. Essais mécaniques

L'essai réalisé est un essai de résistance mécanique à la compression des éprouvettes de dimension (4x4x16 cm³). L'effort est appliqué par une presse hydraulique.

IV.3.1. Détermination des résistances mécaniques à la compression des matériaux stabilisés /solidifiés (EN 196-1)

IV.3.1.1. But de l'essai

Définir les qualités de résistance à la compression d'un mortier.

Les matériaux et matériels utilisés :

- 6 demi éprouvettes (4×4×16) cm obtenus après l'essai de traction-flexion.
- Machine d'essai de résistance à la compression.

IV.3.1. Protocole expérimental

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 machine on presse l'éprouvette à vitesse constante, en lui appliquant une charge progressive jusqu'à rupture de l'éprouvette. On lit sur la machine la charge de rupture F_c contrainte de rupture R_c . Cette contrainte est appelée résistance à la compression et si F_c exprimée en Newton, R_c est exprimée en MPa.



Fig. IV.6. Machine de compression.

IV.4. Présentation des résultats

Des essais mécaniques sont effectués sur les six échantillons préparés selon la méthode décrite dans ce chapitre après 7 et 14 jours de traitement. La résistance mécanique à la compression des matériaux préparés, est indiquée dans le tableau IV.5 et les figures IV.6, IV.7

Tab. IV.7. Résultats de La résistance mécanique à la compression.

échantillon	Rc (MPa) âpre 7jours	Rc (MPa) âpre 14 jours
à 25% (ciment + ajoutde poudre de verre)		
E1 (0% ajout)	5,3	5,8
E2 (10% ajout)	3,1	4,3
E3 (20% ajout)	2,3	3,3
35% (ciment + ajoutde poudre de verre)		
E4 (0% ajout)	7	8,6
E5 (10% ajout)	4,9	5,8
E6 (20% ajout)	3,7	5,3

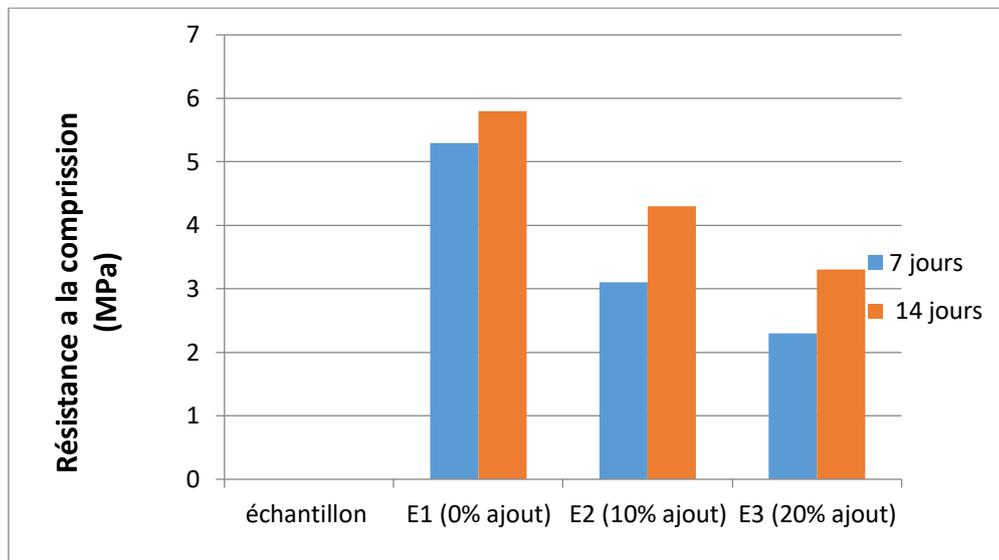


Fig. IV.6. Histogramme de Résistance mécanique à la compression 7 et 14 jours de Formulation à 25% (ciment + ajout).

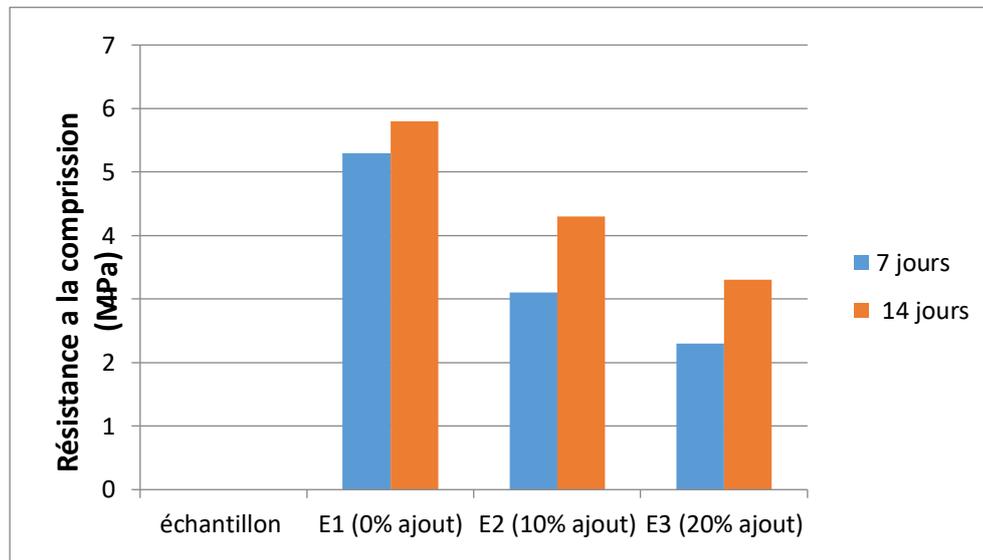


Fig. IV.7. Histogramme de Résistance mécanique à la compression 7 et 14 jours de Formulation à 35% (ciment + ajout).

Les figures IV.6 et IV.7 montrent l'évolution de la résistance mécanique à la compression des matériaux stabilisés/solidifiés au ciment et à la poudre de verre. Les résistances mécaniques ont été divisées à 7 jours et 14 jours de cure.

D'après les résultats illustrés, la première conclusion à tirer est que toutes les éprouvettes confectionnées présentent des résistances mécaniques à la compression supérieure à celle recommandée par la norme XP X31-212 qui est de 1MPa.

La résistance à la compression augmente avec le temps de durcissement pour toutes les formulations. Cette observation est confirmée par plusieurs études (Hui et al., 2013 ; Belebchouche et al., 2015).

Les résistances mécaniques sont directement proportionnelles à la quantité de ciment mélangé au sol. Nous constatons donc que la résistance mécanique du matériau est caractéristique et dépend fortement de la quantité de ciment ajoutée.

Cependant la résistance à la compression diminue avec le pourcentage de la poudre de verre substitué.

En général les mortiers préparés avec un mélange de ciment et de la poudre de verre ont aussi montré des résistances à la compression qui dépassent le seuil recommandé de 1 MPa.

Notons que les essais de résistance mécanique à la compression doivent être poursuivis d'une série de tests de lixiviation afin d'étudier le comportement des matériaux stabilisés/solidifiés à la lixiviation.

Conclusion Générale

L'objectif fixé à travers ce mémoire était le traitement des sols contaminés par le procédé de la stabilisation/solidification, cas du Centre d'Enfouissement Technique de Demina, situé à la commune de Taher, Wilaya de Jijel.

Le site en question présente un relief hétérogène, et situé sur une pente moyenne de l'ordre de 15%.

La description géologique demeure incontournable, car la contamination des sols par les nombreux déchets est en étroite relation avec la nature géologique des sols. En effet les sols détritiques et poreux reçoivent et diffusent plus rapidement les polluants vers les nappes phréatiques, tandis que les sols calcaires sont autant plus aptes à fixer la pollution.

A l'issue de cette étude nous avons constaté que les sols du Centre d'Enfouissement Technique de Demina appartiennent aux formations géologiques du type molasses olistostromiques d'âge Oligo-Miocène Kabyle OMK, qui sont représentés par des argiles et des limons sableux dans lesquels ce sont emballés divers blocs hétérotypes et hétérométriques.

L'étude hydro-climatologique est nécessaire dans une telle étude car, c'est l'évaluation de la pluviométrie qui détermine le taux de lixiviation des sols, ainsi la température constitue un bon indicateur sur la dégradation des déchets et la formation du biogaz.

Parmi les eaux de pluies enregistrées au niveau de la station d'Achouat (1062.22 mm/an pour la période 2005-2015), les infiltrations sont estimées selon la méthode de Thornthwaite de l'ordre de 12.45%, tandis que les ruissellements sont de l'ordre de 37.56%. Notons que le maximum des températures est enregistré durant le mois d'août pour une moyenne de 26.28°C.

L'étude bibliographique réalisée sur la pollution des sols et les méthodes de traitement nous a éclairé, d'une part, sur les types et l'impact des déchets sur l'environnement et, d'autre part, elle a aussi permis de rassembler le maximum d'informations sur les différentes méthodes de traitement de sols pollués à savoir la technique de la stabilisation/solidification par les liants hydrauliques. L'ensemble de ces connaissances a conduit à mettre en place une campagne expérimentale adaptée aux exigences de notre étude.

La caractérisation du sol effectué auparavant a indiqué que le taux d'humidité du sol ou ce qu'on appelle la teneur en eau montre que le sol est légèrement humide. La mesure du poids volumique humide a montré que le sol étudié est de nature dense. L'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie a indiqué que le sol traité est d'une classe granulométrique non homogène. D'après les données de la littérature, le sol est classé comme des sables argileux.

A partir de l'analyse effectuée par spectrométrie de fluorescence des rayons X (FRX) le sol étudié est de nature hétérogène. Il est constitué de pourcentages élevés de la silice SiO_2 et de carbonates CaO . Cette étude a révélé aussi la présence de métaux lourds dans le sol ce qui a indiqué un potentiel de pollution

L'étude expérimentale adaptée a été consacrée à l'application du traitement par procédé de stabilisation/solidification par le ciment. La substitution du ciment par la poudre de verre avait pour raison une valorisation du verre en tant que déchet dans le traitement du sol en question.

En général, toutes les éprouvettes de mortier confectionnées présentent des résistances mécaniques à la compression supérieure à celle recommandé par la norme XP X31-212 qui est de 1MPa.

La résistance à la compression augmente avec le temps de durcissement pour toutes les formulations.

Les résistances mécaniques sont directement proportionnelles à la quantité du ciment mélangé au sol. Mais la résistance à la compression diminue avec le pourcentage de la poudre de verre substitué.

Cependant suite à notre étude on recommande de réaliser une série de tests de lixiviation afin d'étudier le comportement des matériaux stabilisés/solidifiés à la lixiviation.

Bibliographie

- Abdelhak D., (2010). Les risques liés à la gestion du centre d'enfouissement technique de Chetouane (Tlemcene_Nord Ouest Algerien), mém. de magister.Univ. Oran. 139p.
- Agence Française de Normalisation, (2002). « Essai de lessivage d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. Normalisation Française. N° X31-211. Paris : AFNOR, 13p.
- ANRH, (2005-2015). Les données climatiques (précipitations et températures) de la station météorologique d'Achouat (Taher), pour période, 2005-2015.
- Baron J., Ollivier J.P. et Weiss J.C., (1999). Les bétons, bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Troisième tirage.
- Bebebchouche Ch., Moussaceb, K., Tahakourt, A., et al. Parameters controlling the release of hazardous waste (Ni 2+, Pb 2+, and Cr 3+) solidified/ stabilized by cement –CEM I. Materials and structures, vol.48, no 7, P. 2333-2338, 2015.
- Boisson J., Ruttens A., Mench M., Vangronsveld J., (2000).« Evaluation of hydroxyapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soil». Journal of hazardous materials, Part1. 22p.
- Boivin J.P. Et Ricour J., (2005).« Sites et sols pollués – Outils juridiques, techniques et financiers de la remise en état des sites pollués », Editions Le Moniteur, Paris, 123p.
- Bouanika N., Chlighem O. et Saadi M., (2013). Typologies des mouvements de terrain dans la région d'Oudjana et le confortement du site des 24 logement. Univ.M.S.B.Y-Jijel. 78p.
- Bouarafa S., (2018). Le centre d'enfouissement technique. Réalisation et fonctionnement.
- Boudouch O., (2009). « 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.
- Bouillin, J.P., (1977). Géologie Alpine de la Petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El-Milia (Algérie), thèse Doct. Univ. P. & M. Curie, 511p.
- Bouroudi N. et Boussioud A., (2011). Diagnostic des glissements de terrain du chemin de wilaya (135) entre Chekfa et Taher-Jijel- (Algérie nord orientale). Univ. M.S.B.Y-Jijel. 70p.
- BRGM/RP-58609-FR, (2010), Quelles techniques pour quels traitements –Analyse coûts – bénéfices.
- Calvet R., (2003). « Le Sol Propriétés Et Fonctions », Tome1, France Agricole DUNOD, 455 p.
- Campy M., (2000). « L'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés ». Thèse de doctorat, Univ.de Metz, 326p.

- Chabbi H., Benzaid G., (2021). Caractérisation des sols du Centre d'Enfouissement Technique (C.E.T.) de Demina, Taher-Wilaya de Jijel (Nord-Est algérien), Mém. Master. Univ. Jijel 75p.
- Chograni Yassine, (2016). Gestion du C.E.T. II (Centre d'enfouissement Technique des déchets ménagers) de Hammame Boughrara et risque environnementaux, univ. De Tlemcen, mém. de master, 64p.
- Christelle S., (2000). « Etude des procédés de stabilisation/solidification (des déchets solides poreux) à base de liants hydrauliques ou de liants bitumeux », Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 23p.
- Cloirec P., (2001). « Les composés organiques volatils (COV) dans l'environnement ». Thèse doctorat, université de Lyon.
- Desachy C .2001 : Les déchets solides : sensibilisation à une gestion écologique. 2^{ème} Edit. TEC et DOC.70P.
- Djellit H., (1987). Évolution Tectono-Métamorphique de socle kabyle et polarité de mise en place des nappes de flysch en Petite Kabylie Occidentale (Algérie). Thèse doct., Univ. ParisSud, Centre d'Orsay. 206p.
- Durand Delga, M., (1955). Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique. Thèse d'Etat. Paris, Publ.serv.Carte géol. Algérie, 24, 533p.
- Hui, Zhao, Poon, Chi Sun, et ling, Tung Chai. Properties of mortar prepared with recycled cathode ray tube funnel glass sand at different mineral admixture. Construction and Building Materials, vol.40, P. 951-960, 2013.
- Jose Miguel S., (2003). « Identification des paramètres hydrodynamiques du sol par modélisation inverse des flux d'infiltration : application aux échelles locale et hydrologique» thèse doctorat, université libre de Bruxelles.
- kehila y. et mezouari f., (2011). Intérêt des matériaux geo-synthétiques dans la conception des centres d'enfouissement technique (C.E.T.) en Algérie.
- Kehila Y., Aina M., Mezouari F., Matejka G. et Mamma D., (2007). Quelles perspectives pour l'enfouissement technique et le stockage éco-compatible des résidus solides dans les PED vis-à-vis des impacts sur l'hydrosphère urbaine. Acte des JSIRAUF, Hanoi, 10p.
- Khouan F., et Lebdiri Z., (2016). Caractérisation et utilisation de poussières de four de ciment CKD dans la Stabilisation/Solidification des déchets de l'unité B.C.R Bordj-MénaielBoumerdès. Mémoire de Master Univ. Bejaia. 113p.

- KhouanFaiza, LebdiriZahia, Bouzeroura Mansour, Caractérisation et utilisation de poussières de four de ciment CKD dans la stabilisation/solidification des déchets de l'unité B.C.R Borj-MénailBoumerdes.
- Mench. M.J., Manceau A., Vangronsveld J., Clijsters B., (2000). « Capacity of soil amendments in lowering the phytoavailability of sludge-borne Zinc ». *Agronomics*, 20, 67p.
- Mermoid A., (2006). Propriétés de base du sol et de la phase liquide. cours de physique du sol.
- Moyeux V., (2001).« Evaluation des procédés de stabilisation », la démarche française. In : Actes du congrès international sur les procédés de solidification et de stabilisation des déchets ; Grenoble ; Société Alpine de Publications, 49p.
- Nouri M., Haddioui A., (2016). Les techniques de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds: une revue (The remediation techniques of heavymetalscontaminatedsoils:areview), *Maghr. J. Pure &Appl. Sci.*, 2 N° 2. 47- 58.
- PNUD-MATE, (2008). Guide des techniciens communaux pour la gestion des déchets ménagers
- Raoult J.F., (1974). Géologie du centre de la chaîne Numidique (Nord du Constantinois, Algérie). *Mém. Soc. Géol. France*, 53, 121, 163p.
- Saada A. Et Nowak. C., (2005). « Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures », Rapport intermédiaire. Rapport BRGM/RP-53739-FR, 45p.
- Sahnoune R., (2014). Analyse et Caractérisation Physico-Chimique des sols d'entreposage de la station de pétrole (Bejaia). *Mém. de Master Univ. Bejaia*. 57p.
- Sayyad G., Afyuni M., Mousavi S. F., Abbaspour K. C., Richards B. K. et Schulin R. (2010). Transport of Cd, Cu, Pb and Zn in a calcar eousoilunder wheat and safflowercultivation-A column study. *Geoderma*. 320p.
- Slocik J. M., Wright D. W., (2003). « Biomimetic mineralization of noble metal nanoclusters. Biomacromolecule », *journal of environmental management* 74, P125-139p.
- Society of America. (n.d.). Soil horozons.
- Spence R. D., Gilliam T. M., Mrgane I.L. Et Osborne S., (2000) « Stabilization/solidification of wastes containing volatile organic compounds in commercial cementitious waste forms » *Philidephia: ASTM*, 61p.
- Thonart P., Diabate S., Hiligsmann S. Et Lardinois M., (2005), Guide pratique sur la gestion des déchets ménagers et des sites d'enfouissement technique dans les pays du Sud. 7ème éd. Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (I.E.P.F), Canada, 164 p.
- Tokalioglu S., Kartal S., Elci L., (2000).« Determination of heavy metals and speciation in lake sediments by flame absorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure. *AnalyticalChimical* ». *Acte.*, 33P-40p.

- Traina S. J., Laperche V., (2009).« Contaminant bioavailability in soils, sediments, and aquatic environments ». Proc. Natl. Acad. SCI. USA., vol. 96, 33p.
- Van Beilen J. B., Li. Z., Duetz. W. A., Smits. T. H. Et Witholt. B., (2003). «Diversity of alkanet hydroxyls systems in the environment». Oil Gas Sci. Technol. Rev.
- Voglar G.E. et Lestan D., (2010). Solidification/stabilization of metals contaminated industrial soil from former Zn smelter in Celje, Slovenia, using cement as a hydraulic binder, Journal of Hazardous Materials.
- Yakouben T. et Bousekkine F., (2013). Caractérisation et réhabilitation du site pétrolier sis aux quatre chemin-Bejaïa par le procédé de stabilisation/ solidification. Mém. de Master Univ. Bejaia. 125p.
- Ziat N., Merakchi A., (2020). Etude des caractéristiques physiques et mécaniques du ciment portland.

Liste des sites web

<https://fr.wikipedia.org>.

<http://doc.lerm.fr> > Dossiers techniques > Ciments)

<https://cimentquebec.com>

Liste des normes

Norme en 196-1, méthodes d'examiner le ciment- patrie : Détermination de force.

NF X31-211. Caractérisation du déchet, Essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification. AFNOR 2012.

Résumé

Une mauvaise gestion des déchets conduit à polluer l'environnement avec des substances toxiques, en particulier la pollution des sols par divers métaux chimiques lourds, qui présentent un grand danger pour la santé humaine et les organismes vivants. Dans ce projet de fin d'étude, nous avons décrit le site d'étude d'un point de vue géologique et hydrologique, puis nous avons présenté les caractéristiques du sol du centre technique d'enfouissement de Demina objet de notre d'un point de vue géotechnique. Ensuite, nous avons réalisé le processus de stabilisation/solidification en utilisant du ciment Portland type CEM II/A-L 42.5R et de la poudre de verre avec différentes proportions proposées.

Mots clés : Centre d'Enfouissement Technique, Demina, métaux lourds, stabilisation/solidification, ciment Portland, poudre de verre.

Abstract

Improper waste management leads to polluting the environment with toxic substances, especially soil pollution by various heavy chemical metals, which pose great danger to human health and living organisms. In this end-of-study project, we have described the study site from a geological and hydrological view, then we presented the characteristics of the soil of the technical burial center of Demina object of our from a geotechnical point of view. Then we carried out the stabilization/solidification process using Portland cement type CEM II/A-L 42.5R and glass powder with different proposed proportions. We therefore tested the compressive strength of the specimens made.

Keywords: Technical Landfill Center, Demina, heavy metals, stabilization/solidification, Portland cement, glass powder.

ملخص

تؤدي الإدارة غير السليمة للمخلفات إلى تلويث البيئة بالمواد السامة ، وخاصة تلوث التربة بمختلف المعادن الكيميائية الثقيلة التي تشكل خطراً كبيراً على صحة الإنسان والكائنات الحية. في مشروع نهاية الدراسة هذا ، وصفنا موقع الدراسة من وجهة نظر جيولوجية وهيدرولوجية ، ثم قدمنا خصائص تربة مركز الردم التقني للدمينة ، موضوعنا من الناحية الجيوتقنية. رأينا بعد ذلك ، قمنا بتنفيذ عملية التثبيت / التصلب باستخدام الأسمنت البورتلاندي من النوع CEM II / A-L 42.5R ومسحوق الزجاج بنسب مقترحة مختلفة.

الكلمات المفتاحية: مركز الردم التقني ، الدمينة ، المعادن الثقيلة ، التثبيت / التصلب ، الأسمنت البورتلاندي ، مسحوق الزجاج