

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

**THESE**

Présenté Par :

**Malaoui Rachida**

Pour l'obtention du diplôme de

**Doctorat En-Sciences**

En : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique



**Caractérisation des stériles miniers en techniques  
routières (rejets des mines de Tébessa)**

Soutenu, le 16/07/2023 devant le jury composé de :

Boutagouga Djamel	Professeur	Université de Tébessa	Président
Harkati El-Haddi	Professeur	Université de Tébessa	Rapporteur
Boumezbeur abderrahmane	Professeur	Université de Oum El Bouaghi	Examineur
Bouacha Nadjat	MCA	Université de Souk Ahras	Examineur
Mazouz Badis	MCA	Université de Batna 2	Examineur
Boufarh Rafik	MCA	Université de Tébessa	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

قال الله تعالى:

« وَتَرَى الْجِبَالَ تَحْسَبُهَا جَامِدَةً وَهِيَ تَمُرُّ مَرَّ السَّحَابِ صُنِعَ اللَّهُ الَّذِي أَنْتُمْ كُلُّ شَيْءٍ آئِنُهُ خَيْرٌ بِمَا تَفْعَلُونَ »

القرآن الكريم - سورة النمل ﴿٨٨﴾

*« Et tu verras les montagnes – tu les crois figées – alors qu’elles passent comme des nuages. Telle est l’œuvre d’Allah qui a tout façonné à la perfection. Il est Parfaitement Connaisseur de ce que vous faites ! »*

Le Coran - An Naml-27-88-

*«And you see the mountains, thinking them rigid, while they will pass as the passing of clouds. [It is] the work of Allah , who perfected all things. Indeed, He is Acquainted with that which you do»*

The Quran - Chapter (27), 88th verse sūrat l-naml (The Ants)

## Dédicace

### **Quand le cœur bat pour la première fois, ce battement...**

Aujourd'hui, quand je lève mon chapeau avec succès, je marche d'un pas  
confiant qui embrasse ce **succès...**

**A ma mère...** qui a le droit d'être exaltée aujourd'hui, même si elle est absente,

elle est dans le cœur la première à y assister...

Qui a fait les premiers pas vers ce moment...

A celui qui a rendu mon nom fier de son nom

**A mon père...** au maître de mon nom et à l'auteur de mon titre.....

**A tous ceux qui m'aimaient dans leur cœur...** ont mentionné mon nom par  
amour...

Ils ont cherché de l'aide pour mon cœur

A vous tous... Je dédie cette réalisation.....

**Enfin, à moi-même...** à celle qui a été inébranlable dans son cheminement pour  
devenir une icône de la beauté, de la diligence et de la connaissance

**À moi-même premier et deuxième....**

Grâce à Dieu, mon Seigneur, il m'a guidé vers cela et m'a permis de le faire ...

Loué soit-il d'avoir été avec moi à chaque instant et à chaque fois

Ma réussite n'est due qu'à Allah.....

# Remerciements

---

## *Je dis Merci à ...*

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse le professeur **Harkati Elhadi**, pour le soutien qu'il a apporté au cheminement scientifique de ma recherche. Je lui suis reconnaissant de m'avoir fait bénéficier de son expertise exceptionnelle, de sa rigueur intellectuelle, de son énergie et de son efficacité indéniable tout au long de ce travail, qualités que je n'oublierai jamais. Soyez assuré de mon dévouement et de ma sincère reconnaissance.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers **Dr.Soltani Mohamed Redha**, mon co-encadreur de thèse, pour sa précieuse contribution à la réalisation de cette recherche. Son expertise, ses conseils avisés et son dévouement ont été des éléments essentiels pour mener à bien ce projet

J'apprécie sincèrement que le président et les membres du jury aient accepté d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier le **Dr Adel Djellali** de l'Université de Tebessa pour toute l'aide qu'il m'a apportée au cours de ma carrière professionnelle. Vous avez été un communicateur compétent et vous m'avez aidé à naviguer dans le monde de la recherche scientifique. J'apprécie la confiance que vous m'avez accordée.

Je tiens à remercier l'ensemble des partenaires qui ont participé à la réalisation de ce projet, principalement à Monsieur **Rabah Kechiched**, professeur à l'université de Kasdi Merbah ,Ouargla ,je vous remercie de tous les conseils que vous m'avez apportés et aussi je tiens à vous exprimer toute ma gratitude pour les heures investies dans la correction du présent manuscrit. Je profite de cette occasion pour remercier également, Monsieur **Abderraouf Soukeur** docteur à l'université de Houari Boumediene, Bab Ezzouar (USTHB) pour l'aide précieuse qui a rendu ce travail possible.

Je tiens à exprimer ma gratitude à **M. Smaali Bouziane** et à **Mlle Achi Souad** (Responsables des laboratoires chez université de Tébéssa) pour leur accueil chaleureux au laboratoire durant cette thèse. Sans leur soutien et leur assistance, cette thèse n'aurait pas pu avancer. J'apprécie leurs encouragements et leur esprit scientifique. Ils ont reçu ma gratitude pour leur intérêt et leurs contributions significatives à ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement tous les professeurs et chercheurs qui ont contribué de près ou de loin pour m'aider à réaliser ce travail. Cette thèse est le résultat de nombreuses années d'études, et je suis particulièrement reconnaissant à mes professeurs des départements de génie civil des universités de Tebessa et de Skikda. Ils nous ont offert une excellente formation pendant la graduation et la post-graduation, et je leur en suis reconnaissant.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à **la Société des Mines de Phosphates (SOMIPHOS)** pour l'accueil qu'elle a réservé aux unités d'exploitation minière, de traitement et de laboratoire de Bir El Ater. Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à l'ensemble du personnel : directeurs, cadres, ingénieurs et mineurs.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à mes anciens étudiants en master, qui ont contribué de manière significative à ce travail, Je remercie **M. Med El-Nadir Ktir, M. Med Saleck Ahmed, M. Douh Chaouki,**

Merci à mes amis **Leila Arabet, Asma Benbouza** et à **mes collègues** d'être ce qu'ils sont et pour les moments inestimables qu'ils m'ont permis de partager.

Je remercie tout particulièrement **ma mère et mon père** (que Dieu les accueille dans son vaste paradis) ainsi que mes frères, mes sœurs et ma famille, je n'oublierai jamais l'aide et les mots d'encouragement de feu **Moslih Elgamedi**, que Dieu lui pardonne et lui accorde le paradis.

## Sommaire

	Pages
Remerciements	
Résumés	
Sommaires	
Introduction générale	
1. Introduction	1
2. Problématique	2
3. Objectifs	3
4. Méthodologie	3
 <b>Chapitre I Aperçu Bibliographique : Géologie du Djebel El-ONK</b>  	
I.1. Introduction	5
I.2. Géologie Régionale Du Djebel El-Onk	5
I.2.1. Situation géographique du Djebel El-Onk	5
I.2.2. Stratigraphie	7
I.2.2.1. Crétacé	7
Maestrichtien	7
I.2.2.2. Paléocène	7
a. Danien	7
Danien inférieur	7
Danien supérieur	7
b. Montien	7
c. Thanétien	7
Thanétien inférieur	8
Thanétien supérieur	8
I.2.2.3. Eocène	8
a. Yprésien	8
Yprésien inférieur	8
Yprésien supérieur	8
b. Lutétien	9
Lutétien inférieur	9
Lutétien supérieur	9
I.2.2.4. Miocène	9
Miocène inférieur	9
Miocène moyen	9
Miocène supérieur	9
I.2.2.5. Quaternaire	9
I.3. Gisement de Kef-Essnoun	10
I.3.1. Situation géographique local de Kef-Essnoun	10
I.3.2. Stratigraphie	11
I.3.2.1 Paléocène	12
A/Montien	12
B/ Thanétien	13
B-1/ Thanétien inférieur	13
B-2/ Thanétien supérieur	13
C/ Yprésien	13
I.3.2.2. Miocène	13

# Table des matières

---

I.3.2.3. Quaternaire	14
I.4. Climat de la région	14
I.4.1. Précipitations moyennes mensuelles	15
I.4.2. Températures moyennes mensuelles	16
I.4.3. La vitesse du vent	17
I.4.4. L'humidité relative de l'air	18
I.5. Conclusion	19

## **Chapitre II Utilisation des matériaux alternatifs pour la construction routière**

II.1. Introduction	20
II.1.1. Matériaux rocheux naturels	21
II.1.2. Agrégat fabriqué	22
II.1.3. Laitier de haut fourneau expansé	23
II.1.4. Granulats à base de cendres volantes	23
II.1.5. Sable fabriqué	23
II.1.6. Granulat de polystyrène	24
II.1.7. Argiles expansées, schistes et ardoises	24
II.1.8. Sous-produit réutilisé	25
II.1.8.1. Laitier de haut fourneau refroidi à l'air	25
II.1.8.2. Laitier de haut fourneau granulé	26
II.1.8.3. Laitier de fourneau à acier	26
II.1.8.4. Cendres de fond d'incinérateur	27
II.1.9. Agrégats synthétiques	28
II.1.9.1. Traitement thermique des matériaux naturels à grain fin	29
II.1.9.2. Traitement thermique des sous-produits ou des déchets	29
II.1.10. Matériaux composites	30
II.1.11. Pierre concassée	31
II.1.12. Déchets de plastique	32
II.1.13. Déchets de construction	32
II.1.14. Bardeaux d'asphalte recyclé	33
II.1.15. Revêtement en asphalte récupéré	34
II.1.16. Caoutchouc en miettes "Pneus usagés"	35
II.1.17. Sables de fonderie	36
II.1.18. Produits de la combustion du charbon / Matériau cimentaire supplémentaire	36
II.1.19. Déchets industriels pour la construction de routes	37
II.1.20. Conclusion	39

## **Chapitre III Les différents types des liants hydrauliques et Technique de Traitement**

III.1. Introduction	40
III.2. Aperçu historique	40
III.3. Types de traitement	41
III.3.1. Amélioration	41
III.3.2. Stabilisation	48
III.4. Différents Produits de traitement	48
III.4.1. Ciments	48

	49
Action de ciment sur les sols	
III.4.2. Liants spéciaux routiers LSR (ou liants hydrauliques routiers LHR)	50
Types de LHR	50
Choix du type de LHR	50
III.4.3. Chaux	51
Action de la chaux sur les sols	51
III.5. Avantages du retraitement en place	53
III.6. Technique de traitement et Matériels d'exécution	54
III.6.1. Principales opérations de traitement	55
III.6.2. Exécution des travaux	55
III.6.3. Matériels d'exécution	58
Matériels de stockage	59
Épandeurs	60
Malaxeurs	60
Arroseuses	61
Compacteurs	62
III.7. Retraitement en place des chaussées aux liants hydrauliques	62
III.8. Conclusion	64

## **Chapitre IV Caractérisation géotechnique des stériles minières**

IV.1. Introduction	65
IV.2. Zone de prélèvement des stériles minières type calcaire phosphaté et calcaire (DJEBEL EL-ONK)	65
IV.3. Méthodes et matériels d'échantillonnage	67
IV.3.1. Préparation de l'échantillon	70
IV.3.1.1. Le quartage	70
IV.3.1.2. Emploi d'échantillonneur	71
IV.4. Classification des sols selon LPC modifié (1974/1980)	71
IV.5. Paramètres retenus pour la classification des sols GTR 2000 (Norme NFP 11-300)	72
IV.5.1. Paramètres de nature	72
IV.5.2. Paramètres de comportement mécanique	72
IV.5.3. Paramètres d'état	73
IV.6. Programme expérimental et procédures d'essai	73
IV.6.1. Essais initiaux et sélection des matériaux d'étude	73
IV.6.2. Caractéristiques chimiques et minéralogiques	75
IV.6.3. Paramètres physiques	75
IV.6.4. Propriétés mécaniques des déchets	77
IV.6.4.1. Essai Proctor modifié	77
IV.6.4.2. Essai CBR (California Bearing Ratio)	78
IV.6.4.3. Los Angeles ,Micro-Deval et Friabilité	79
IV.6.5. Essai de résistance à la compression simple	79
IV.7. Résultats	81
IV.7.1. Chimique et minéralogique	81
IV.7.1.1. Analyse Chimique	83
IV.7.2. Caractéristiques de base des matériaux étudiés	84
IV.7.3. Comportement mécanique des matériaux	84
IV.7.3.1. Caractéristiques de compactage	84

IV.7.3.2. California Bearing Ratio (CBR)	86
IV.7.3.3. Los Angeles et Micro-Deval	87
IV.7.3.4. Résistance à la compression simple	87
IV.8. Classifications des sols	88
IV.9. Possibilité d'utiliser les déchets miniers dans la construction de routes	89
IV.10. Conclusion	90

### **Chapitre V Traitement des stériles minières**

V.1. Introduction	92
V.2. Sol étudié et programme expérimental	92
V.3. Conditions d'utilisation des matériaux en remblai et en couche de forme	93
V.4. Produit de traitement	94
V.5. Etude expérimentale (essais géotechniques au laboratoire)	94
V.5.1. Essais de Proctor modifié	94
V.5.2. Les courbes de saturations	98
V.5.3. Essai CBR (California Bearing Ratio)	99
V.5.4. Essai du pH	107
V.5.5. Essais de compression simple	109
V.6. Conclusion	116
Conclusion Générale	117
Point économique	119
Perspectives et recommandations	120
<b>Références bibliographiques</b>	
<b>Annexe</b>	

### Chapitre. I

Figure I.1	Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk	6
Figure I.2	Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk (Algérie orientale)	10
Figure I.3	Carte de croquis géologique de la zone d'étude.	11
Figure I.4	Coupes géologiques à travers le gisement de Kef-Essnoun	12
Figure I.5	Précipitations annuelles normales entre 1965 et 1995	14
Figure I.6	Variations des précipitations moyennes mensuelles entre 2016/2017 (en mm)	15
Figure I.7	Variations des températures moyennes mensuelles entre 2016/2017	16
Figure I.8	Variations de la Vitesse moyenne mensuelle des vents 2016/2017 (m/sec)	17
Figure I.9	Variations de l'humidité relative moyenne mensuelle 2016/2017 (%)	18

### Chapitre. II

Figure II.1	Matériaux rocheux naturels (pierre concassée)	22
Figure II.2	Sable fabriqué	23
Figure II.3	Granulat de polystyrène	24
Figure II.4	Argiles expansées, schistes et ardoises	25
Figure II.5	Laitier de haut fourneau à granulation sèche	25
Figure II.6	Laitier granulé de haut-fourneau broyé	26
Figure II.7	Le laitier en tant que sous-produit du four de fabrication de l'acier	27
Figure II.8	Les cendres d'incinération	27
Figure II.9	Agrégats synthétiques	29
Figure II.10	Types de matériaux composites dans la construction	31
Figure II.11	Pierres concassées pour la construction de routes	31
Figure II.12	Utilisation de déchets plastiques dans la construction de routes	32
Figure II.13	Déchets de construction recyclables	33
Figure II.14	Recyclage de bardeaux d'asphalte	34
Figure II.15	Matériaux recyclés en asphalte	35
Figure II.16	Le caoutchouc émietté	35
Figure II.17	Sables de fonderie	36
Figure II.17	Matériaux cimentaires supplémentaires	37

### Chapitre. III

Figure III.1	Historique du développement du traitement des sols	41
Figure III.2	Sol avant traitement <i>et</i> après traitement	51
Figure III.3	Influence de traitement à la chaux sur les caractéristiques d'un sol	52
Figure III.4	Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoqué par l'introduction de chaux vive	53
Figure III.5	Opérations élémentaires intervenant dans l'exécution d'une couche de forme en sol traité	57
Figure III.6	Ordonnancement des opérations pour quatre cas de chantiers types	58
Figure III.7	Traitement en centrale : installation fixe et traitement en place	59

Figure III.8	Epandeur à liants	60
Figure III.9	Matériels de malaxage	61
Figure III.10	Arroseur enfouisseuse avec citerne attelée sur tracteur et arroseuse	61
Figure III.11	Compacteurs	62

### Chapitre. IV

Figure IV.1	Déchets de mines de phosphate à proximité du site minier de Kef- Essenoun	66
Figure IV.2	Quantités estimées de stériles générés par Kef-Essenoun ( <b>CERAD 2017</b> )	66
Figure IV.3	Résidus de la mine de Kef Essenoun : (a) calcaire phosphaté, (b) calcaire.	67
Figure IV.4	Photo montrant la zone de prélèvement (gisement de Kef-Esnoun -Google Earth)	70
Figure IV.5	Représentatif du quartage.	71
Figure IV.6	Résumé de la méthodologie suivie.	74
Figure IV.7	Les grandes familles de la classification LPC modifié (1974/1980).	76
Figure IV.8	Diagramme de classification pour les sols grossiers dans la classification LPC modifié (1974/1980).	76
Figure IV.9	Courbes granulométriques du calcaire phosphaté et de calcaire	77
Figure IV.10	Essai Proctor modifié pour Type 1: calcaire phosphaté et Type 2: calcaires	78
Figure IV.11	Analyse par diffraction des rayons X des déchets de la mine Kef-Essenoun : (a) calcaire phosphaté, (b) calcaire	82
Figure IV.12	Courbes de compactage Proctor modifiées correspondantes pour les déchets miniers : (a) calcaire phosphaté, (b) calcaire.	85
Figure IV.13	Valeurs <i>CBR</i> de déchets du calcaire phosphaté et calcaire en rapport avec le <i>DSM</i>	86
Figure IV.14	Les valeurs de ( <i>Rc</i> ) des échantillons durcis pendant 1, 14 et 28 jours	88
Figure IV.15	Classification des échantillons de déchets étudiés selon leur nature ( <i>GTR, 2000</i> )	89

### Chapitre V

Figure V.1	Courbes Proctor modifié pour type 1(calcaire phosphaté)	97
Figure V.2	Courbes Proctor modifié pour type 2(calcaire)	97
Figure V.4	Courbes des saturations avec 0% 2% 4% 6% ciment de calcaire	98
Figure V.6	Diagrammes Effort-Enfoncement pour type1 : calcaire phosphaté	104
Figure V.7	Diagramme d'indice CBR en fonction des différents pourcentages de ciment pour type 1 : Calcaire Phosphaté	104
Figure V.8	Courbes contrainte –déformation à base de l'essai <i>CBR</i> .	106
	Echantillons de type calcaire phosphaté mis en test d'un indicateur coloré.	108

## Liste des Figures

---

Figure V.9		
Figure V.10	Echantillons de type calcaire mis en test d'un indicateur coloré.	108
Figure V.11	Préparation des éprouvettes et rupture des échantillons sous un test de compression simple	110
Figure V.12	Évolutions de la résistance à la compression pour type 1 en fonction du temps et l'ajout du ciment.	115
Figure V.13	Évolutions de la résistance à la compression pour type 2 en fonction du temps et l'ajout du ciment	115

### Chapitre III

<b>Tableau III.1</b>	Possibilités d'emploi des ciments courant avec différents types des sols	49
<b>Tableau III.2</b>	Les matériels de traitement en place	63

### Chapitre IV

<b>Tableau IV.1</b>	Principaux types d'échantillonneurs de sols	69
<b>Tableau IV.2</b>	Propriétés physiques et géotechniques des matériaux collectés	80
<b>Tableau IV.3</b>	Composition chimique des déchets de calcaire phosphaté ( <i>type1</i> ) et de calcaire ( <i>type2</i> )	83

### Chapitre V

<b>Tableau V.1</b>	Caractéristiques physico-chimiques du ciment	94
<b>Tableau V.2</b>	Résultats de l'ajout de ciment sur les caractéristiques de Proctor modifié pour type1	96
<b>Tableau V.3</b>	Résultats de l'ajout de ciment sur les caractéristiques de Proctor modifié pour type1	96
<b>Tableau V.4</b>	Résultats de l'ajout de ciment sur les caractéristiques de Proctor modifié pour type 2	96
<b>Tableau V.5</b>	Résultats des caractéristiques obtenues de l'essai Proctor modifié avec pourcentages de ciment différents pour type 2	97
<b>Tableau V.6</b>	Résultats d'essai CBR immédiat pour type 1 : calcaire phosphaté	102
<b>Tableau V.7</b>	Résultats d'essai CBR immédiat pour type 2 : calcaire	102
<b>Tableau V.8</b>	Résultats d'essai CBR immersion pour type 1 : calcaire phosphaté	103
<b>Tableau V.9</b>	Résultats d'essai CBR immersion pour type 2 : calcaire	103
<b>Tableau V.10</b>	Résultats de l'indice CBR pour chaque type du matériau	104
<b>Tableau V.11</b>	Classification des sols en fonction du CBR	105
<b>Tableau V.12</b>	Valeurs du gonflement libre pour chaque type du matériau	105
<b>Tableau V.13</b>	Valeurs de la déformation à base de l'essai <i>CBR</i>	106
<b>Tableau V.14</b>	Valeurs de Module d'Yong à base de l'essai <i>CBR</i>	106

## Liste des Tableaux

---

<b>Tableau V.15</b>	Couleur d'indicateur phénolphtaléine en fonction du pH	107
<b>Tableau V.16</b>	Valeurs du ph pour chaque type du matériau non traité et traité	108
<b>Tableau V.17</b>	Variation de la résistance à la compression pour -type 1- en fonction du temps et l'ajout du ciment	111
<b>Tableau V.18</b>	Variations des paramètres Proctor modifiée pour type 1 à différent délai du traitement	112
<b>Tableau V.19</b>	Variations de la résistance à la compression pour -type 2- en fonction du temps et l'ajout du ciment	113
<b>Tableau V.20</b>	Variations des paramètres Proctor modifiés pour type 2 à différents délais du traitement	114

## Liste des Symboles

---

<i>Symbole</i>	<i>signification</i>
<b>Cc</b>	coefficient de courbure.
<b>Cu</b>	coefficient d'uniformité.
<b><math>\rho_s</math></b>	poids spécifique.
<b><math>\rho</math></b>	densité apparente.
<b><math>W_N</math></b>	teneur en eau naturelle.
<b><math>W_L</math></b>	limite de liquidité.
<b><math>W_P</math></b>	limite de plasticité.
<b><math>I_P</math></b>	indice de plasticité.
<b>ES</b>	équivalent de sable.
<b>w (%)</b>	teneur en eau.
<b><math>\gamma_d</math></b>	poids volumique sec.
<b><math>W_{OPM}</math></b>	teneur en eau optimale.
<b>Sr</b>	degré de saturation.
<b>I.CBR</b>	indice CBR portant après immersion.
<b>IPI</b>	indice portant immédiat.
<b><math>\Delta h</math></b>	différence d' hauteur d'éprouvette avant et après immersion.
<b>h</b>	hauteur initiale de l'éprouvette avant immersion.
<b>GL</b>	indice de gonflement.
<b>MDE</b>	indice de micro Deval.
<b>LA</b>	indice de los Angeles.
<b>FS</b>	coefficient de friabilité de sable.
<b>VBS</b>	valeur de bleue de méthylène.
<b><math>\gamma_{d OPM}</math></b>	poids volumique sec optimale
<b>DRX</b>	diffraction des rayons X

## Résumé

---

Les matériaux à base de stériles sont de plus en plus utilisés dans les revêtements routiers et les constructions de bâtiments dans de nombreux pays où ces matériaux sont abondants afin de réduire le coût des matériaux et la pollution de l'environnement. Dans ce travail, des essais expérimentaux en laboratoire ont été réalisés sur les déchets rocheux issus de l'extraction du phosphate dans la mine de Kef-Essenoun, située du côté algérien de la frontière algéro-tunisienne, afin d'étudier la performance des fondations des chaussées routières construites avec ce type de matériaux. Deux types de déchets, à savoir le calcaire phosphaté (type 1) et le calcaire (type 2), ont été testés dans un premier temps afin de déterminer le plus approprié pour être utilisé dans les structures de chaussée. Les tests de caractérisation ont montré que la présence de carbonate-fluorapatite et de carbonate-fluorapatite, de calcite, de dolomite et de quartz est prédominante dans le calcaire phosphaté et le calcaire respectivement. Les valeurs d'abrasion Los Angeles (LA) et de micro-Deval (MD) varient de 59,9% à 90,4% et de 42,05% à 86,31% pour le calcaire phosphaté et de 43,64% à 95,88% et de 38,25% à 75% pour le calcaire. Il est également à noter que les valeurs de CBR des déchets de type 1 et de type 2 ont été trouvées à 10,5% et 18,7% respectivement. Les valeurs de la résistance à la compression simple (RC) de ces matériaux étaient de 715 et 2807 kN/m<sup>2</sup> respectivement et elles augmentaient avec l'augmentation de la densité sèche maximale. Les résultats montrent que ces matériaux, classés respectivement comme B42ts et B42s, doivent être utilisés avec précaution dans les couches de recouvrement et les matériaux de remblai des routes des chaussées. De ce fait, une étude expérimentale sur ces deux types de stériles miniers, ont été traités par un liant hydraulique de 2%, 4%, et 6%, l'influence du traitement a été mesuré au moyen des paramètres mécaniques, en effectuant une série d'essais, y compris, essais de compactage Proctor, essais CBR, essais de mesure de PH, essais de résistance à la compression simple pour objectif d'évaluer la capacité portance et monter leurs classes afin de généraliser leurs utilisations dans le domaine routier

**Mots-Clés :** Caractérisation ; Traitement ; Déchets miniers ; Calcaire phosphatique ; Calcaire ; Construction de routes ; Kef- Essenoun.

## Abstract

---

Waste rock materials are becoming widely used in road pavement and building constructions in many countries with abundance of these materials to reduce material cost and environmental pollution. In this work, experimental laboratory tests were carried out upon the waste rock produced from extraction of the phosphate in the Kef-Essenoun mine, located on the Algerian side of the Algerian–Tunisian border, to study the performance of road pavement foundations built with this type of materials. Two types of wastes, namely phosphatic limestone (type 1) and limestone (type 2), were initially tested to determine the most suitable one to be used in pavement structures. The characterization tests have shown that the presence of Carbonate-fluorapatite and Carbonate-fluorapatite, Calcite, Dolomite and Quartz are predominant in phosphatic limestone and limestone respectively. The Los Angeles abrasion (LA) and micro-Deval (MD) values range from 59.9% to 90.4% and 42.05% to 86.31% for Phosphatic limestone and from 43.64% to 95.88% and 38.25% to 75% for Limestone. It is also noted that the values of CBR of type1 and type2 wastes were found to be 10.5% and 18.7% respectively. The unconfined compressive strength (UCS) values of these materials were 715 and 2807 kN/m<sup>2</sup> respectively and they increased with increasing of the maximum dry density. The results show that these materials, classified as B<sub>42t<sub>s</sub></sub> and B<sub>42s</sub> respectively, should be used cautiously in capping layers and backfill materials of pavement roads. Therefore, an experimental study on these two types of mine waste rock, were treated with a hydraulic binder of 2%, 4%, and 6%, the influence of the treatment was measured by means of mechanical parameters, carrying out a series of tests, including, Proctor compaction tests, CBR tests, pH measurement tests, simple compressive strength tests for the purpose of evaluating the bearing capacity and raising their class in order to generalize their uses in the field of roads

**Mots-Clés :** Characterization; Treatment ; Mine Wastes; Phosphatic Limestone; Limestone; Road Construction; Kef- Essenoun.

أصبحت مواد النفايات الصخرية مستخدمة على نطاق واسع في رصف الطرق وإنشاءات المباني في العديد من البلدان مع وفرة من هذه المواد لتقليل تكلفة المواد والتلوث البيئي. أجريت في هذا العمل اختبارات معملية تجريبية على مخلفات الصخور الناتجة عن استخلاص الفوسفات في منجم كاف-السنون الواقع على الجانب الجزائري من الحدود الجزائرية-التونسية ، لدراسة أداء أساسات رصف الطرق المبنية على هذا الأساس من نوع المواد. تم اختبار نوعين من النفايات ، وهما الحجر الجيري الفوسفاتي (النوع 1) والحجر الجيري (النوع 2) ، في البداية لتحديد الأنسب لاستخدامه في هياكل الرصف. أظهرت اختبارات التوصيف أن وجود كربونات فلوراباتيت وكربونات فلوراباتيت والكالسيت والدولوميت والكوارتز يسود في الحجر الجيري الفوسفاتي والحجر الجيري على التوالي. تتراوح قيم كشط لوس أنجلوس (LA) و (micro-Deval (MD) من 59.9٪ إلى 90.4٪ و 42.05٪ إلى 86.31٪ للحجر الجيري الفوسفاتي ومن 43.64٪ إلى 95.88٪ و 38.25٪ إلى 75٪ للحجر الجيري. و يلاحظ أيضًا أن قيم CBR للنفايات من النوع 1 والنوع 2 كانت 10.5٪ و 18.7٪ على التوالي. كانت قيم مقاومة الانضغاط البسيط (UCS) لهذه المواد 715 و 2807 كيلو نيوتن / م<sup>2</sup> على التوالي وزادت مع زيادة الكثافة الجافة القصوى. أظهرت النتائج أن هذه المواد ، المصنفة على أنها B42s و B42ts على التوالي ، يجب استخدامها بحذر في طبقات السد ومواد الردم لطرق الرصف. لذلك تم إجراء دراسة تجريبية لهذين النوعين من نفايات الصخور المنجمية و تمت معالجتهما باستخدام مادة رابطة هيدروليكية بنسبة 2٪ و 4٪ و 6٪ ، وتم قياس تأثير المعالجة بواسطة عوامل ميكانيكية ، وإجراء سلسلة من الاختبارات. بما في ذلك اختبارات بروكتور للضغط واختبارات CBR واختبارات قياس الأس الهيدروجيني واختبارات مقاومة الضغط البسيطة بغرض تقييم قدرة التحمل ورفع فتتها من أجل تعميم استخداماتها في مجال الطرق.

**الكلمات الدالة :** توصيف معالجة ، مخلفات منجميه ، حجر جيري فوسفاتي ، حجر جيري ، اشغال الطرقات ، منجم كاف السنون.

# Introduction Générale

---

## 1. Introduction

Les projets d'infrastructure routière nécessitent de grandes quantités de matériaux. La demande croissante de granulats dans le secteur routier s'est accentuée ces dernières années avec la croissance des villes. L'utilisation de produits miniers industriels inhabituels dans le secteur de la construction routière peut contribuer à la conservation des ressources naturelles non renouvelables et minimiser les quantités de déchets produits par les industries minières [1].

La grande quantité de déchets résultant des opérations minières a suscité une réelle prise de conscience quant à leur impact sur l'environnement, l'écologie et la géotechnique. La libération de composants toxiques provenant de métaux lourds et le drainage minier acide sont des exemples de ces effets.

La contamination des eaux souterraines, les vastes espaces de terres naturelles exploitables, l'instabilité de la zone de stockage des déchets et la génération de nuages de poussière sont des exemples de résultats de ces effets.

L'exploitation de matériaux de substitution pour le secteur de la construction routière présente de nombreux gains économiques et écologiques. En effet, lorsque des déchets aux propriétés adéquates sont utilisés, il est possible d'éviter la consommation d'énergie, de réduire les distances de transport et les coûts de l'extraction [2]. Depuis plusieurs décennies, la réutilisation des déchets utilisés comme matériau de construction a été étudiée par de nombreuses recherches expérimentales telles que : les résidus miniers [1,3], les déchets de construction et de démolition recyclés ont été utilisés dans la construction de routes et de remblais [4 -7], les déchets des mines de charbon [8,9], les déchets de plastique et de caoutchouc dans la sous-couche, la couche d'asphalte dans les chaussées souples et rigides [10 -12], les scories d'acier et le verre comme agrégats secondaires dans les mélanges d'asphalte [13 -15], les déchets miniers de tungstène [16], sédiments marins [17], cendres de fond et cendres volantes dans le domaine de l'ingénierie géotechnique [18], déchets miniers

de fer et d'or [19], boues rouges et chaux [20]. En outre, les matériaux pouzzolaniques tels que le ciment, la chaux, les cendres volantes, la poussière de four à ciment et le ciment Portland ordinaire ont été utilisés pour stabiliser certains matériaux de résidus à des fins de construction [21 -23].

L'Algérie est la troisième réserve mondiale avec 2,2 milliards de tonnes métriques de ressources (U.S. Geological Survey, 2020) [24]. Elle dispose d'une importante réserve de roche phosphatée. Environ 41 ha de terres sont actuellement en exploitation à Kef- Essenoun. Un taux d'extraction actuel est de 2,8 millions de tonnes de minerai avec un ratio de décapage d'environ 2,2 qui a produit 10 millions de tonnes de déchets où ces derniers doivent être enlevés et éliminés annuellement.

L'accumulation pendant plusieurs décennies de déchets rocheux provenant des mines de phosphate à ciel ouvert et des processus de valorisation pose de graves problèmes environnementaux, écologiques et sanitaires dans les zones environnantes [25]. Il est révélé que ces déchets sont en effet dangereux pour les humains, les animaux et la végétation. Ils polluent l'air, le sol environnant et contaminent les eaux souterraines par lixiviation.

Le but principal de cette recherche consiste à suggérer une solution de réutilisation afin de réduire l'impact négatif des déchets rocheux sur l'environnement. L'acte de réutilisation consiste à trouver une nouvelle utilisation pour les déchets dont les propriétés sont acceptables et adéquates. Les déchets sous leur forme actuelle sont destinés à être éliminés dans des décharges. Il faut noter que la réutilisation de ces résidus aura un impact très important sur la préservation de l'environnement et comme principale ressource matérielle pour la construction. Comme l'ont rapporté de nombreux chercheurs [26 -31], qui ont constaté que ces matériaux (résidus de phosphate) pourraient être largement utilisés dans la construction de bâtiments et de routes. Enfin, nous avons proposé que cette nouvelle approche de réutilisation soit intégrée dans le guide routier algérien. Il est à noter que les études sur les déchets miniers de phosphate en Algérie sont rares, ainsi, pour cette raison, la caractérisation chimique, minéralogique, physique et géotechnique des déchets miniers de la mine de phosphate de Kef-Essenoun en Algérie a été choisie pour être étudiée dans cette étude.

## 2. Problématique

En effet, la mauvaise connaissance de l'aptitude des matériaux recyclés sur les voiries ne permet pas de les utiliser avec confiance. Des résultats obtenus montrent que nos

matériaux classés selon (GTR édition 2000) présentent des caractéristiques médiocres (faibles) ne répondent pas au règlement pour les utilisés dans la géotechnique routière, dans ce texte, il est pertinent d'assumer l'amélioration des propriétés mécaniques, hydriques des matériaux chantonnés de Type 1 et 2 pour permettre d'évaluer leur utilisation en fondation routière.

### 3. Objectifs

L'usage des résidus miniers pour les couches de fondation et de sous-fondation des chaussées est un domaine relativement nouveau. Le manque de connaissance fondamentale sur leur comportement limite leur réutilisation. Par conséquent, et afin d'examiner les divers aspects concernant la possibilité d'employer des déchets miniers en technique routière. L'objectif de cette étude expérimentale est de faire une caractérisation complète des deux matériaux recyclés (minières) de Kef-Essnoun et dans cette recherche les matériaux étudiés sont de Type 1 « le calcaire phosphaté » et Type 2 « le calcaire ». Afin de pouvoir juger de la possibilité de leur valorisation dans le domaine routier. Des essais en laboratoire sont effectués par une idée de les associer avec un liant hydraulique (ciment) en vue d'améliorer leurs caractéristiques géotechniques et mécaniques, et permettront de vérifier et valoriser la performance en laboratoire de ces matériaux pour permettre leur utilisation en construction routière, en particulier en couche de fondation et couche de forme.

### 4. Méthodologie

La méthodologie utilisée pour la réalisation de ce projet s'organise autour de cinq chapitres principaux, dont les trois premiers ont un caractère bibliographique et les deux derniers décrivent les recherches effectuées.

**Le premier chapitre :** est réservé à la description géologique des différentes formations rencontrées et l'étude hydrogéologique de la région de Djebel el-Onk ainsi la situation de la zone de prélèvement.

**Le deuxième chapitre :** met en lumière un axe très important qu'est l'adoption de l'utilisation de divers déchets et sous-produits industriels dans la construction routière comme alternative aux matériaux traditionnels et montre leurs types, propriétés, sources et domaines d'utilisation.

**Le troisième chapitre :** aborde les différentes méthodes du traitement des chaussées au ciment ou aux liants hydrauliques routiers et techniques de réalisation.

**Le quatrième chapitre:** développe les caractérisations chimiques, minéralogiques, physiques et géotechniques des déchets miniers de la mine de Kef-Essenoun. Les propriétés des matériaux chantonnés ont été comparées par les propriétés exigées par le guide technique réalisation des remblais et couche de forme édition 2000 et Catalogue algérien pour la conception de nouvelles chaussées.

**Le cinquième chapitre :** est la dernière partie importante du projet de recherche, expose la procédure expérimentale, de nature spéculative, présente les résultats des essais réalisés au laboratoire. Permet d'approfondir les connaissances sur le comportement des deux types des stériles minières et analyser les résultats obtenus en relation avec les essais réalisés, afin d'évaluer et traiter la performance mécanique et hydrique de ces matériaux et les comparés par les propriétés d'utilisation d'un matériau dans les constructions routières exigées au guide technique. Ainsi que des solutions optimales de réemploi de chaque type de déchet minier en technique routière.

**Enfin,** une conclusion générale sur les travaux effectués, des perspectives permettent de croire qu'ils pourraient être utilisés dans la structure de la route et des recommandations pour des études ultérieures, ainsi une liste de références bibliographiques et des annexes qui présentent le détail des données analysées .

# Chapitre I

## Aperçu Bibliographique : Géologie du Djebel El-ONK

---

### **I.1. Introduction**

La région de Tébessa est en effet connue pour son important potentiel minier, notamment en ce qui concerne les gisements de substances utiles associés aux contextes sédimentaires. Les phosphates naturels, en particulier, constituent une ressource importante de la région, et sont concentrés au sud de Tébessa, dans le bassin minier de Djebel Onk.

Les gisements de phosphate naturel de la région sont alimentés par plusieurs gisements, notamment ceux de Kef -Essenoun et de Bled El Hadba, qui sont connus pour être des sources importantes de cette substance utile. En effet, les ressources naturelles en phosphate de la région atteignent deux milliards de tonnes, ce qui représente une source de richesse et de développement économique pour la région.

Cependant, il est important de noter que l'exploitation minière peut avoir des conséquences négatives sur l'environnement, notamment en termes de rejets miniers, dégradation des sols et des ressources en eau. Il est donc essentiel que les activités minières soient menées de manière responsable et durable, en tenant compte de l'impact environnemental et en assurant la protection des écosystèmes locaux.

### **I.2. Géologie Régionale Du Djebel El-Onk**

#### **I.2.1. Situation géographique du Djebel El-Onk**

Il est intéressant de noter que cette région montagneuse est située dans la partie nord-ouest du Sahara algérien, à l'est des montagnes de Nemamcha et à une vingtaine de kilomètres de

la frontière algéro-tunisienne. Elle appartient à la wilaya de Tébessa et se trouve à une centaine de kilomètres de la ville la plus importante, Bir El Ater.

Le massif montagneux du Djebel Onk est principalement composé de calcaire et culmine à 1338 mètres. Le flanc nord descend en pente douce tandis que le flanc sud plonge rapidement sous des dépôts miocènes et quaternaires. Les gisements de Djemi Djema et de Kef-Essnoun sont situés au sud de la montagne, le gisement de Kef-Essnoun se trouvant à environ 2 km à l'ouest du gisement de Djemi Djema. Le gisement de Kef-Essnoun couvre une superficie de 2,1 km<sup>2</sup>, avec une longueur de 2,7 km et une largeur de 0,8 km. La zone "1" est un quartier du gisement de Djemi Djema. Tarfaya représente les affleurements de la couche productive sur le flanc sud d Djebel Onk. [32,33].

Les coordonnées LAMBERT de la zone sont X=981 500 984 500 Y=168 000 170 000 et les côtes topographiques varient de 720m au sud-ouest à 810m au nord-est (orientation nord). Les gisements sont traversés par un réseau enchevêtré d'oueds remplis d'alluvions torrentielles du quaternaire, comme Oued el Abiod et Oued El Bir. Le complexe minier de Djebel Onk est situé à 7 km de la ville de Bir El Ater et à 340 km des installations portuaires d'Annaba.

La région du Djebel Onk est subdivisée en cinq secteurs miniers, comprenant les gisements de Kef-Esnoun, Djemi-Jema, Djebel El-Onk Nord, Oued Betita et Bled El-Hadba.



Figure I.1. Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk [34]

### I.2.2. Stratigraphie

#### I.2.2.1. Crétacé

Dans le cœur de l'anticlinal de Djebel Onk, ces sédiments sont les plus anciens. Seuls les dépôts du Maestrichtien apparaissent dans ces roches formées par une tectonique extrêmement très accidentées.

##### ➤ Maestrichtien :

Des calcaires blancs massifs à intercalations marneuses au centre de l'anticlinal du Djebel El-Onk servent de représentation des sédiments de cette époque. Une surface ferrugineuse et percée identifie le sommet.

#### I.2.2.2. Paléocène

Des sédiments marins d'une épaisseur raisonnable lui servent de représentation (350 m).

##### a. **Danien**

D'un point de vue lithologique, le Danien est divisé en deux sous-étages : inférieur et supérieur.

- **Danien inférieur**

Des argiles marneuses et schisteuses gris foncé à brun verdâtre sont utilisés pour le représenter. Le Danien inférieur à une épaisseur de 30 à 40 mètres.

- **Danien supérieur**

Sa largeur varie d'une dizaine de centimètres à un mètre et il est constitué de calcaire blanc dur.

##### b. **Montien**

Des calcaires détritiques avec des lumachelles, des intercalations de marne et de dolomie et une petite quantité de silex sont présents à titre d'exemples. La largeur typique est de 100 mètres.

##### c. **Thanétien**

C'est dans cette strate que l'on trouve la minéralisation phosphatée primaire. Elle comporte deux étages inférieurs qui sont subdivisés.

- **Thanétien inférieur**

Les marnes schisteuses noires à charbon foncé sont représentatives du Thanétien inférieur. Dans la partie inférieure, on trouve des conglomérats, de minces lits de phosphate et deux niveaux de marnes remplies de faune. Entre 30 et 40 mètres d'épaisseur.

- **Thanétien supérieur**

Dans les gisements de Djebel Onk, c'est la strate qui peut être travaillée. La couche de phosphate a une épaisseur typique de 30 m et commence par un niveau dolomitique avec des gastéropodes. Elle est prise en sandwich par une formation de dolomie, une succession de marnes noires à parois feuilletées et un calcaire à silex au sommet. La couche de phosphate est plus mince (17 m au maximum) et finit par disparaître complètement dans la région du Djebel Onk Nord. (biseau stratigraphique) [33]

### 1.2.2.3. Eocène

#### a. Yprésien

D'une épaisseur de 32 m, il repose immédiatement sur les dépôts du Thanétien

- **Yprésien inférieur**

Les dolomies et les calcaires dolomitiques servent d'exemples. Des intercalations de phosphates très dolomitiques sont clairement visibles, et une quantité importante de détritiques de silex noir est présente.

- **Yprésien supérieur**

Il est composé de marne, de calcaire dolomitique et de calcaire en couches superposées.

#### b. Lutétien

La série yprésienne est recouverte par les formations de cette période. Dans la région du Djebel-Onk, elles sont fréquentes. (270 m d'épaisseur). Dans l'ordre, du plus bas au plus haut, on sépare :

- **Lutétien inférieur**

Elle se caractérise par une réduction notable du calcaire et le remplacement de ce type de roche par des marnes blanches pulvérulentes. Avec une espèce particulière (Hemither Sitea

Moracano), on trouve des géodes de quartz et des nodules de silex. L'épaisseur varie entre 40 et 50 mètres.

- **Lutétien supérieur**

Ce faciès évaporitique est composé de dépôts calcaires, d'argile phosphatée verte et de gypse. À la base, des bancs de calcaire d'une épaisseur pouvant atteindre 10 mètres peuvent être différenciés de l'argile phosphatée verte. Au sommet, on trouve des argiles vertes et des bancs de gypse. Son épaisseur est de 65 mètres.

#### **I.2.2.4. Miocène**

Un complexe de roches terrigènes, de conglomérats, d'argiles, de sables et de schistes lui sert de représentation. Trois formations lithologiques peuvent être identifiées :

- **Miocène inférieur**

Des conglomérats, des sables avec de minces lits d'argile siliceuse, constituent la majorité de sa composition. Il est de couleur gris pâle, blanchâtre. Il mesure 200 m

- **Miocène moyen**

Entrecoupé de sables fins et moyens, il est principalement constitué d'argile brune, parfois de schiste. Il peut atteindre une hauteur de 250 m.

- **Miocène supérieur**

Il appartient à la série sable-argile-conglomérat. Il a une portée de 350 m.

#### **I.2.2.5. Quaternaire**

De grandes parties de la région sont recouvertes de formations quaternaires. Les éboulis de pente, les dépôts de sable, les graviers, les sédiments éoliens, alluviaux et fluviaux en sont des exemples. [32,33]

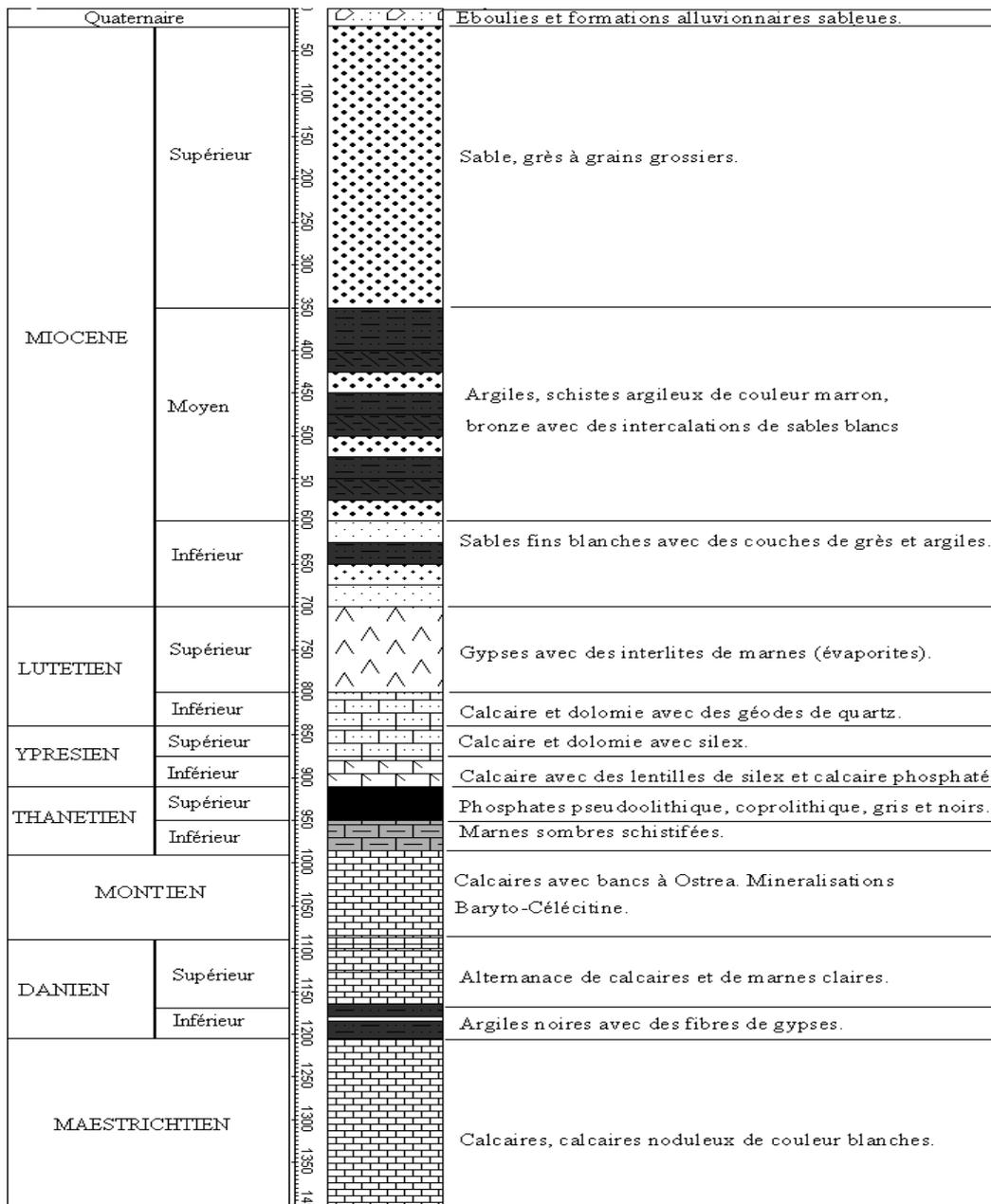


Figure I.2. Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk (Algérie orientale) [32]

### I.3. Gisement de Kef-Essnoun

#### I.3.1. Situation géographique local de Kef-Essnoun

La mine de phosphate de Kef- Essenoun (34.726784 E, 7.895978 N) est située sur le flanc sud de l'anticlinal crétacé de Djebel Onk dans l'Atlas Saharien Oriental [35]. Il est situé à 7 km au sud-est de la ville de Bir El Ater (Tebessa, nord-est de l'Algérie) et à environ 21 km de la frontière algéro-tunisienne [36]. Le site d'étude s'étend sur environ 250 ha et

appartient au bassin minier de Djebel Onk qui représente la partie occidentale du bassin de Gafsa-Metaloui-Onk contenant de nombreuses couches de phosphorite déposées du Crétacé supérieur à l'Eocène inférieur [35 ,37]. Malgré cette continuité latérale, le gisement de Kef-Essenoun présente des différences substantielles avec le bassin de Gafsa Metlaoui, notamment en ce qui concerne les lithologies et la succession en particulier dans la formation phosphoritique [38,39]. Dans le gisement de Kef-Essenoun, les lithologies sédimentaires consistent en une succession d'environ 500 m d'épaisseur du Crétacé supérieur (Maastrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien), où la couche de phosphorite du Thanétien supérieur est exploitée pour le phosphate, comme le montre la figure (I.3.) [35 ,38].

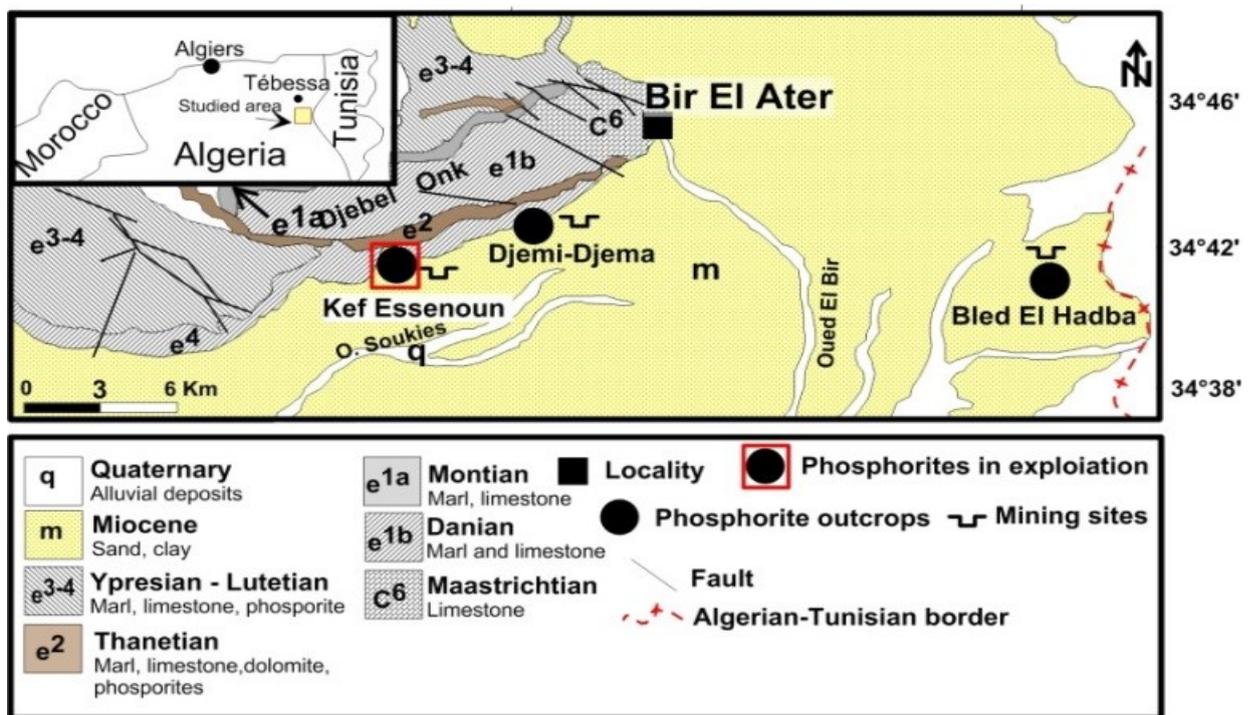


Figure I.3. Carte de croquis géologique de la zone d'étude. Modifié d'après [40].

## 1.3.2. Stratigraphie

Toute la succession lithologique de Djebel El-Onk est rencontrée à Kef-Essnoun mais s'indifférencie, cependant, par une épaisseur verticale plus importante du faisceau phosphaté (jusqu'à 53 m dans certains sondages). Le gisement de Kef-Essnoun est constitué de bas en haut par la succession lithologique suivante (figure I.4.) [32].

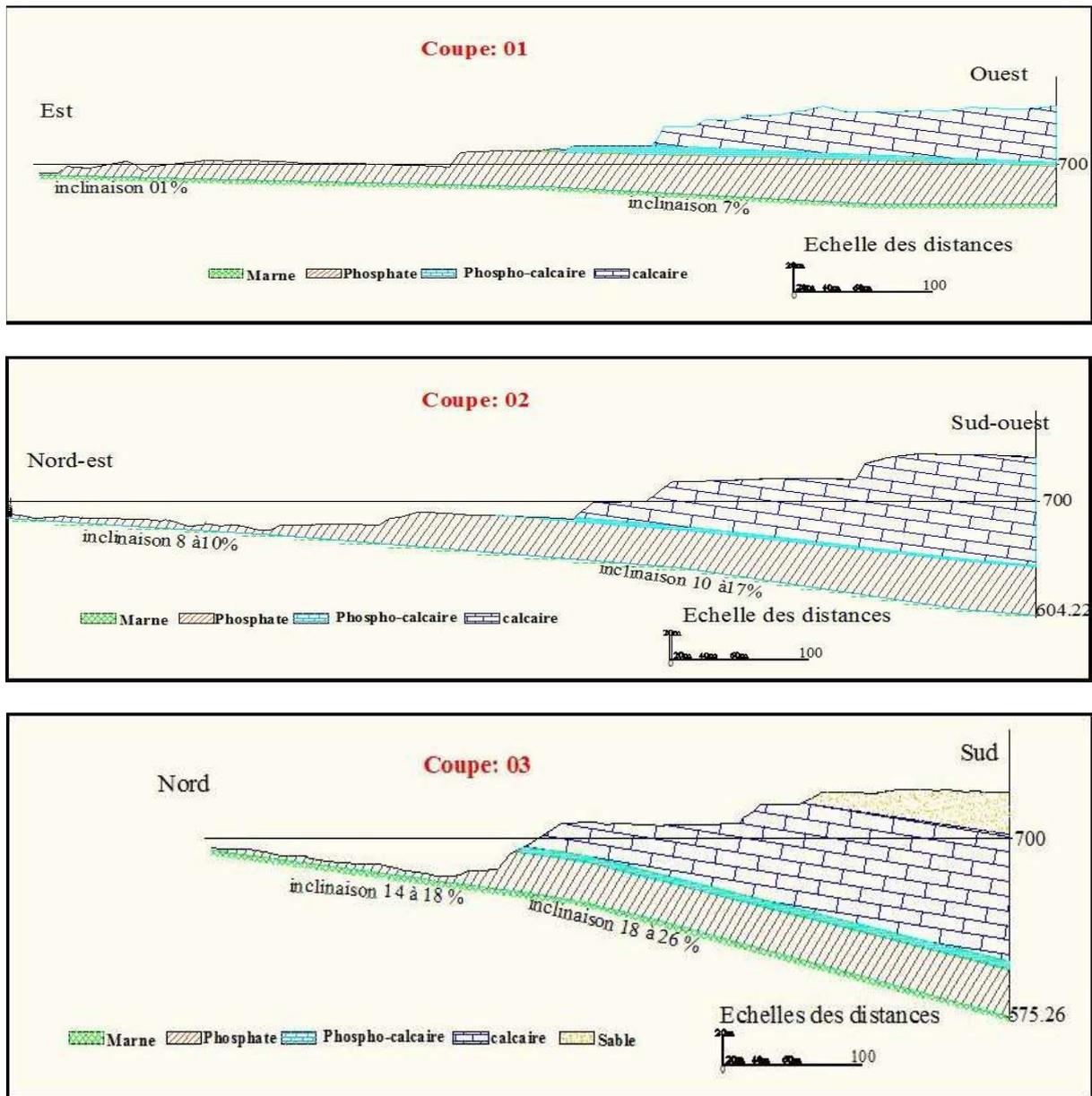


Figure I.4. Coupes géologiques à travers le gisement de Kef-Essnoun [41].

### I.3.2.1. Paléocène

#### A/Montien

Au sud-est se trouvent les roches montiennes. Des calcaires silicifiés avec des lumachelles bioclastiques et d'autres organismes fossilisés sont visibles au pied de cet étage. Une succession d'argiles lumachelliques, d'argiles calcaires et de marnes dolomitiques alternées recouvre ces calcaires au sommet. La couche suivante est un dépôt de dolomie, suivi d'un calcaire gris clair et faiblement phosphaté. Cette couche peut atteindre une épaisseur de 100 mètres. [38]

### **B/ Thanétien**

#### **B-1/ Thanétien inférieur**

Des marnes argileuses, feuilletées, gris foncé à verdâtre, bitumineuses et irrégulièrement intercalées de minces bancs de calcaire grisâtre et de couches de phosphates d'épaisseur décimétrique le manifestent dans le périmètre exploré.

Une zone minéralisée de phosphate cuprolite à gros grains et matrice argilo-marneuse, interrompue par de minces couches de marnes phosphatées et dolomitiques, est bien visible au sommet de cette série. Des marnes phosphatées résiduelles grisâtres et stratifiées, d'une épaisseur typique de 1,70 à 2 mètres, marquent la fin du Thanétien inférieur.

#### **B-2/ Thanétien supérieur**

C'est le seul élément qui constitue la zone rentable de la minéralisation de phosphate connue dans le bassin de Bir El Ater. Ces phosphates ressemblent typiquement à du grès et leur taille varie de celle de grains fins à celle de gros grains. Ils sont beiges, grisâtres, parfois même noirs avec une teinte bleutée et se présentent sous forme de lentilles. Dans les faciès fermes, la matrice est constituée de carbonate, et dans les faciès mous et friables, elle est constituée de marne argileuse. Le minerai comprend des restes fossiles abandonnés, principalement des coprolithes, des lumachelles, des lamellibranches, des gastéropodes et des fragments de dents de poissons et de requins. Le puits a une épaisseur moyenne d'environ 30 mètres. L'épaisseur de l'amas de phosphates au large du synclinal atteint 34 à 36 mètres vers l'ouest et le nord-ouest. Vers le sud-ouest du groupe, cet épaississement est également notable. [42]

### **C/ Yprésien**

Une série calcaire-dolomitique à silex repose sur la série thanétienne. Ce groupe d'âge yprésien est calcaire, dolomitique, carbonaté et marneux. Elle peut atteindre 56 m d'épaisseur et contient peu de phosphates. Le groupe de l'Yprésien comprend des marnes et des calcaires dolomitiques entrecoupés de minces bancs de phosphate dolomitique de 1,7 à 2,3 m d'épaisseur.

#### **I.3.2.2. Miocène**

Toutes les structures sous-jacentes ne sont pas alignées avec sa base. Il est principalement composé d'une forte séquence de sables quartzeux lâches et jaunâtres, entrecoupés de strates de marnes argileuses jaunâtres à verdâtres. Les conglomérats

basiques, constitués d'éléments polygéniques, anguleux à subanguleux (quartz, calcaire, marne), ainsi que d'un ciment argilo-sableux, sont typiques du début du Miocène.

La puissance de la série augmente progressivement d'est en ouest, pour atteindre une épaisseur maximale de 301 m.

### I.3.2.3. Quaternaire

La quasi-totalité de la région étudiée est recouverte de dépôts quaternaires. Les sédiments éoliens et alluviaux sont ceux dans lesquels on les trouve le plus souvent. [38]

## I.4. Climat de la région

L'environnement algérien se caractérise par une extrême variation saisonnière des précipitations et des températures. Cette variation est principalement due aux irrégularités topographiques et aux impacts opposés de la Méditerranée et du Sahara. Dans un contexte méthodologique traditionnel, nos recherches hydroclimatiques sont basées sur des observations ponctuelles et des mesures in situ de différents paramètres climatiques enregistrés sur une longue période d'observation au niveau des stations climatiques.

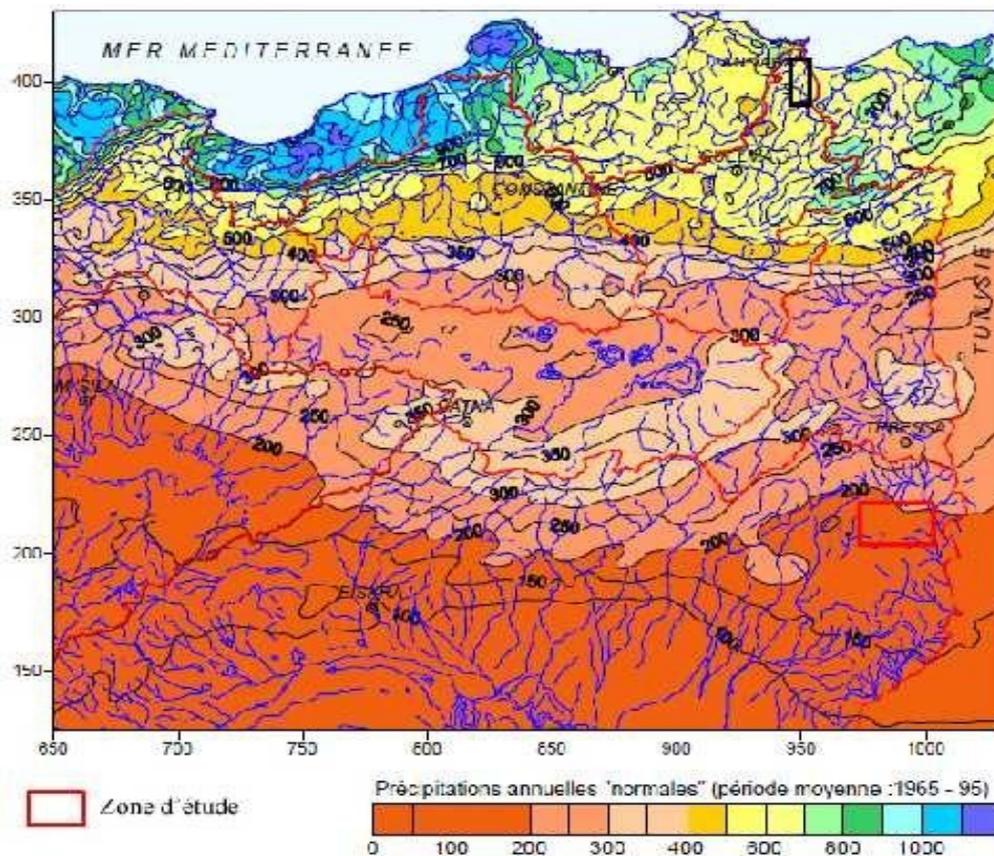


Figure I.5. Précipitations annuelles normales entre 1965 et 1995 [43]

La situation géographique de l'Algérie l'a divisée en trois zones climatiques distinctes : la première, avec un climat méditerranéen au nord, la deuxième, avec un climat semi-aride à l'intérieur (hauts plateaux), et la troisième, avec un climat aride caractéristique du grand Sahara. [44]

La compréhension du comportement des cours d'eau, des variations de réserves, des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux naturelles passe par la compréhension du climat. Pour mieux comprendre le fonctionnement et les effets d'un système hydraulique de surface, le bilan hydrique doit être élaboré.

Pour les deux périodes de mesure de 2016 et 2017, l'observation a été réalisée à partir de la station météorologique de Tébessa dont les coordonnées géographiques sont : latitude 36°25'38"N, longitude 08°07'06"E, et altitude 815 m.

### I.4.1. Précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations sont un élément clé pour comprendre le régime hydrologique d'une région. Selon les données présentées, la station de Tébessa a des précipitations annuelles moyennes de 291,15 mm et les précipitations mensuelles ne dépassent pas 50 mm. Le mois le plus humide est le mois d'octobre avec une moyenne mensuelle de 49,15 mm et le mois le moins arrosé est le mois de février avec une moyenne mensuelle de 6,5 mm. (Figure I.6.)

La répartition saisonnière des précipitations montre que les saisons du printemps et de l'automne sont les plus humides, avec 68 % des précipitations annuelles pour la période considérée, tandis que la saison estivale est la plus sèche avec seulement 10,13 % des précipitations totales

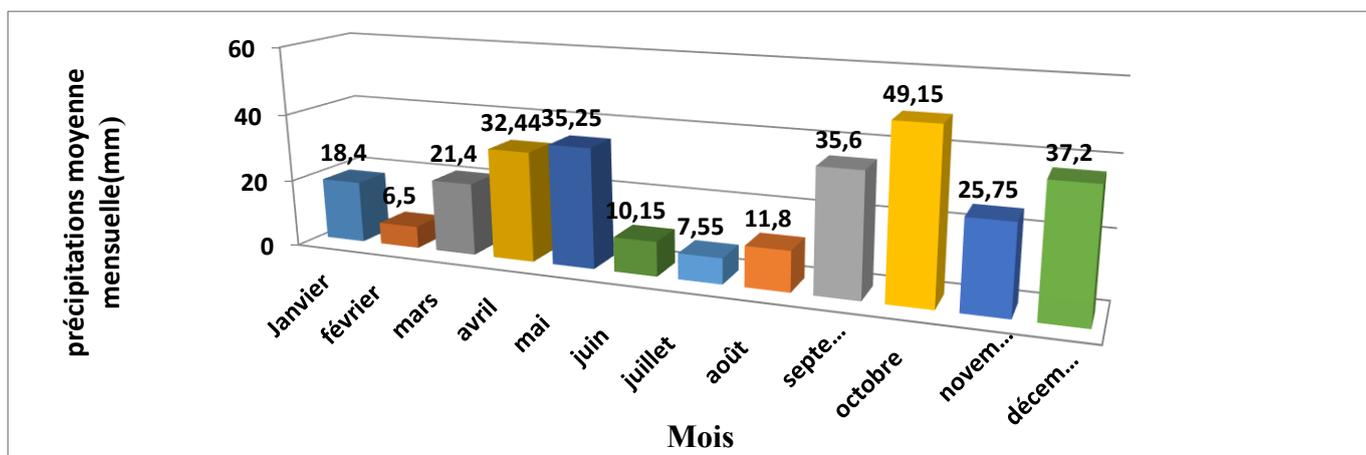


Figure I.6. Variation des précipitations moyenne mensuelle entre 2016/2017 (en mm)

### I.4.2. Températures moyennes mensuelles

La figure I.7. montre la variation des températures moyennes mensuelles pour l'année 2016/2017, exprimées en degrés Celsius. Cette analyse montre que les températures sont les plus élevées durant la période estivale, avec un maximum de 29,48°C enregistré en juillet. Les températures les plus basses sont observées pendant la période hivernale, avec un minimum de 7,13°C enregistré en janvier.

Il est important de noter que ces variations de température ont une influence sur le bilan hydrique, notamment sur le taux d'évapotranspiration et la salinité de l'eau. Des températures plus élevées en été peuvent entraîner une concentration de minéraux par évaporation, ce qui peut affecter la qualité chimique de l'eau. La température est donc un élément important à prendre en compte dans l'analyse du climat et de son impact sur l'environnement. [45]

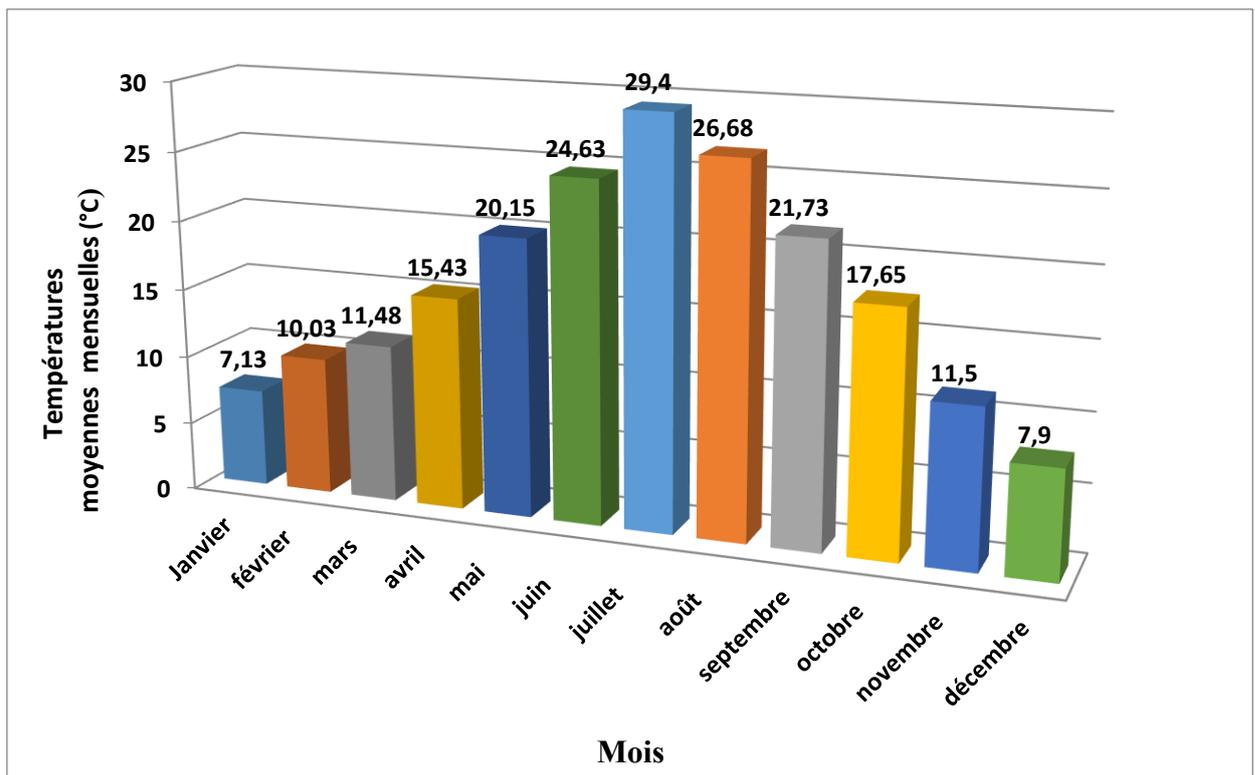


Figure 1.7. Variation des températures moyennes mensuelles entre 2016/2017 (en C°)

### I.4.3. La vitesse du vent

Une valeur maximale de 4 m/sec est observée en mars, tandis que la valeur minimale de 2,5 m/sec est enregistrée en octobre. Ces variations saisonnières peuvent avoir un effet sur les processus d'évaporation et d'évapotranspiration, qui dépendent de la vitesse du vent pour transporter l'humidité de l'air et favoriser l'évaporation. En outre, la vitesse du vent peut jouer un rôle important dans l'érosion, le transport et l'accumulation de particules fines telles que le sable. Les vents forts peuvent transporter de grandes quantités de sable et de poussière, ce qui peut avoir un impact sur l'environnement et la santé humaine. La vitesse du vent est un paramètre climatique important dans la zone d'étude, qui peut avoir un effet sur l'évaporation, l'évapotranspiration, le transport des particules et les processus d'érosion. La variation saisonnière de la vitesse du vent reste presque constante au cours de l'année, avec des valeurs maximales enregistrées en mars et des valeurs minimales enregistrées en octobre. (Figure I.8.). [46]

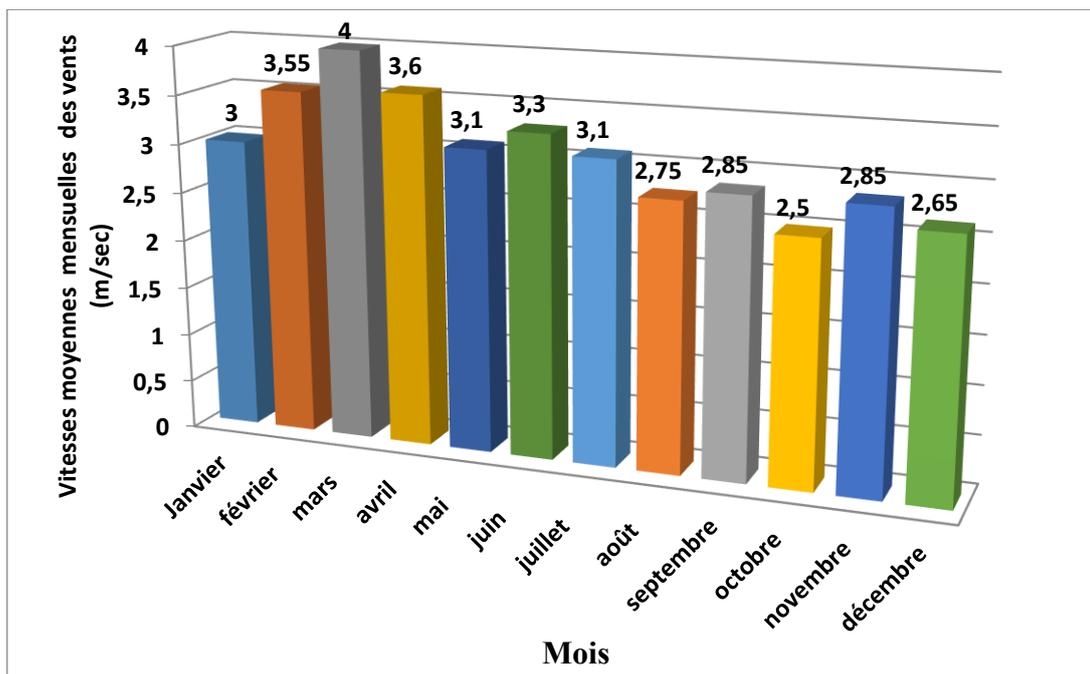


Figure I.8. Variation de la Vitesse moyenne mensuelle des vents (m/sec)

### I.4.4. L'humidité relative de l'air

L'humidité relative est un paramètre important qui peut influencer le temps et le climat d'une région. Selon les données présentées dans la figure I.9, l'humidité relative moyenne mensuelle varie considérablement au cours de l'année dans la zone d'étude.

Un minimum de 39,2 % est observé au mois de juillet, qui correspond à la période de la saison sèche. Durant cette période, l'humidité relative ne dépasse pas 45%. En revanche, pendant la saison froide (novembre à février), des valeurs plus élevées sont observées, avec un maximum de 78,7 % enregistré en décembre. Ces variations saisonnières de l'humidité relative peuvent être liées à la direction du vent et aux différences de température. En effet, pendant la saison sèche, les vents peuvent souffler depuis des zones plus sèches, tandis que la saison froide peut être caractérisée par des vents provenant de zones plus humides. En outre, des températures plus élevées pendant la saison sèche peuvent contribuer à réduire l'humidité relative, tandis que des températures plus basses pendant la saison froide peuvent favoriser une augmentation de l'humidité relative.

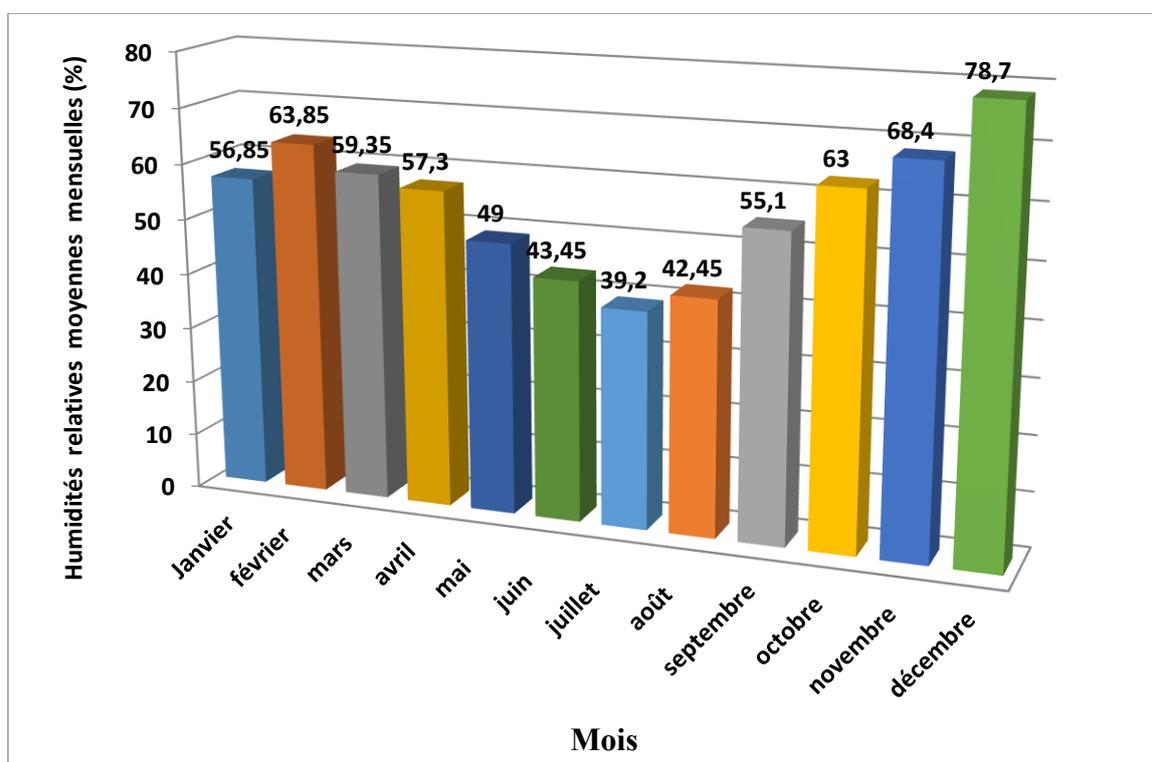


Figure I.9. Variation de l'humidité relative moyenne mensuelle (%)

### I.5. Conclusion

La région de Djebel Onk est située dans les montagnes de l'Atlas saharien, dans la partie orientale. Le massif montagneux calcaire est caractérisé par un flanc sud qui plonge rapidement sous des dépôts du Miocène et du Quaternaire. Le gisement de phosphate présent dans la région est de nature sédimentaire stratiforme et constitue l'extension vers l'ouest des phosphates situés sur le territoire tunisien. Ce gisement appartient à une formation tahitienne dont la base est caractérisée par l'apparition d'un premier dépôt de phosphate important mais très argileux. Les couches qui suivent ce gisement sont constituées de marnes noires, puis du lit phosphatier principal, d'une épaisseur d'environ 30 m, accompagné d'une formation carbonatée naturelle.

Le gisement de Kef Essnoun est situé sur le flanc sud de l'anticlinal de Djebel Onk. L'épaisseur du faciès phosphaté atteint 50 mètres et la couverture est constituée d'une série de silex calcaire-dolomitiques de l'Yprésien, localement recouverte de calcaire lutétien, de sables miocènes et d'alluvions quaternaires. L'épaisseur totale de la couverture varie de 40 à 198 mètres.

L'analyse des données climatiques de la station de Tébessa montre que la variation des températures est caractérisée par un été chaud et un hiver relativement froid. La température moyenne sur l'année est de l'ordre de 18°C. L'humidité relative est influencée par la direction du vent et la température, avec une valeur minimale de 39,2% observée en juillet et une valeur maximale de 78,7% observée en décembre. La variation de la vitesse du vent est constante selon les saisons, avec une valeur maximale de 4 m/sec observée en mars et une valeur minimale de 2,5 m/sec observée en octobre. L'analyse des précipitations révèle que le mois le plus pluvieux est octobre avec une précipitation mensuelle moyenne de 49,15 mm, tandis que le mois le moins pluvieux est février avec une précipitation mensuelle moyenne de 6,5 mm. La moyenne annuelle totale des précipitations est de 291,15 mm, aucune moyenne mensuelle ne dépassant 50 mm. La répartition des précipitations par saison montre que le printemps et l'automne sont les saisons les plus pluvieuses, tandis que l'été est la saison la plus sèche.

# Chapitre II

## Utilisation des matériaux alternatifs pour la construction routière

---

### II. Introduction

La préservation de l'environnement et les économies d'énergie, hypothèses fondamentales du développement durable, ainsi que les économies financières sont possibles grâce à l'utilisation de nouveaux matériaux et technologies non standard dans la construction et l'entretien des routes. Différents types de déchets et de sous-produits industriels peuvent être utilisés dans la construction des routes comme alternative aux matériaux standard. Pour être applicables, les matériaux alternatifs doivent répondre à certaines caractéristiques techniques, présenter un niveau d'exécution acceptable et être économiques par rapport aux matériaux traditionnels.

Les raisons de l'utilisation de matériaux alternatifs sont nombreuses et l'emportent largement sur les inconvénients éventuels. L'utilisation de matériaux alternatifs est importante tant du point de vue écologique qu'économique. D'un point de vue écologique, l'utilisation de matériaux alternatifs implique une moindre exploitation des ressources naturelles et une réduction de la quantité de déchets accumulés dans les décharges.

Les matériaux alternatifs qui peuvent être utilisés en remplacement des matériaux de construction standard se distinguent par leurs caractéristiques chimiques et physiques, par l'état d'origine dans lequel ils se trouvent, par le traitement supplémentaire qu'ils doivent subir avant d'être utilisés et par l'usage auquel ils sont destinés. Toute une série de matériaux peuvent être réutilisés, avec ou sans finition

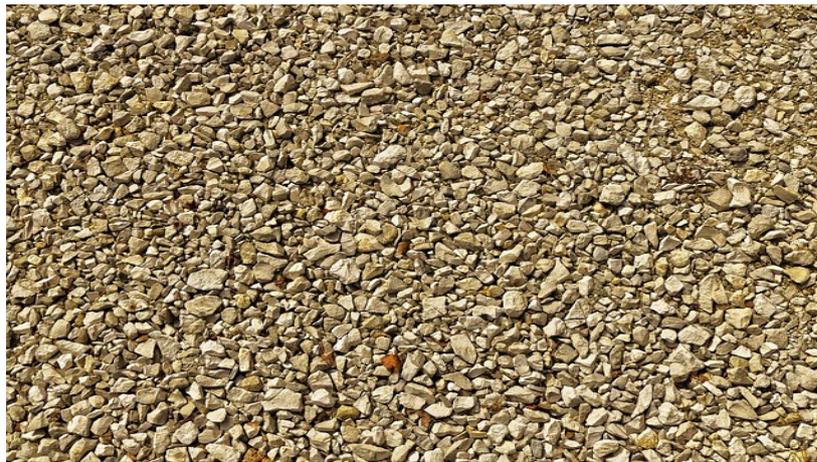
mineure. Ainsi, pour diverses utilisations dans la construction de routes et d'autoroutes, on peut utiliser : les déchets de construction et de démolition, l'asphalte recyclé, le béton concassé, les cendres volantes et les scories des centrales thermiques, les scories métallurgiques, la poussière des fours à ciment et à chaux, la fumée de silice, le sable de fonderie, les stériles, les cendres des usines d'incinération des déchets solides municipaux, les sous-produits des carrières, les déchets de bardeaux de toiture, le vieux caoutchouc, les cendres des boues d'épuration, le verre et la céramique, et les déchets plastiques.

Une analyse détaillée des différents types de matériaux alternatifs utilisés pour la construction des routes est présentée ci-dessous.

### **II.1. Matériaux rocheux naturels**

Les matériaux d'origine naturelle, tels que la roche et le sol, constituent une part importante du contenu en matériaux et du coût d'une route. Il a été constaté que les différents types de roches se comportent différemment dans les diverses couches d'une chaussée et que ces différences sont plus importantes dans les roches que dans les sols. Il a également été constaté que les conditions environnementales, telles que le climat et la topographie, jouent un rôle important dans la performance de ces matériaux dans les routes. Par conséquent, la durabilité des matériaux naturels est un facteur important dans leur sélection pour l'utilisation dans les routes. L'asphalte est le matériau rocheux naturel le plus couramment utilisé, mais puisque nous parlons d'alternatives, nous nous concentrerons sur la pierre concassée et les déchets de phosphate.

La pierre concassée est le produit minéral le plus fondamental au monde. Elle est abondante, largement disponible et peu coûteuse. C'est un matériau que les gens connaissent bien dans presque toutes les régions du monde. La plupart des pierres concassées sont utilisées dans la construction d'autoroutes et de bâtiments. Pour la construction d'une autoroute asphaltée à deux voies, on utilise environ 25 000 tonnes de pierre concassée par kilomètre.



**Figure II.1.** Matériaux rocheux naturels (pierre concassée)

De nombreux types de roches sont utilisés pour fabriquer de la pierre concassée. Les types de roches utilisées pour fabriquer de la pierre concassée sont les suivants : calcaire, granit, roche piège, grès, quartzite, dolomite, cendres et scories volcaniques, marbre, ardoise, dacite, coquillages et marne calcaire. Chacun de ces types de roches se prête à un certain nombre d'utilisations.

L'utilisation de sous-produits industriels inhabituels dans les techniques routières peut contribuer à la conservation des ressources naturelles non renouvelables et à la réduction des déchets produits par certaines industries. Les stériles de phosphate pourraient être considérés comme une alternative potentielle de matières premières secondaires dans la construction routière. Le guide a classé ces matériaux comme des déchets, qui ne peuvent donc pas être utilisés dans la construction routière. Cependant, les stériles de phosphate sont des roches naturelles sédimentaires qui n'ont subi aucune transformation autre que la fragmentation mécanique. [47]

## **II.2. Agrégat fabriqué**

Ils sont fabriqués à dessein à partir de matériaux sélectionnés tels que les roches concassées pour le sable manufacturé, les cendres volantes pour les agrégats de cendres volantes, et les sous-produits d'autres processus d'extraction de minéraux tels que l'argile pour les agrégats d'argile expansée. [48]

### II.3. Laitier de haut fourneau expansé

Le laitier de haut fourneau expansé est un sous-produit du laitier de fer produit de manière similaire au laitier de haut fourneau granulé, mais avec une quantité contrôlée d'eau, appliquée au laitier fondu pour piéger la vapeur dans la masse, ce qui donne un produit poreux, semblable à de la pierre ponce. Ce produit est ensuite concassé et criblé pour obtenir des tailles convenant aux agrégats légers. [49]

### II.4. Granulats à base de cendres volantes

Plusieurs agrégats de béton léger peuvent être produits à partir de cendres volantes. Outre l'utilisation des cendres de fond de four dans la maçonnerie en béton, les granulés de cendres volantes peuvent être liés par fusion thermique ou chimiquement, à l'aide de ciment ou de chaux. Ces matériaux présentent de nombreuses propriétés souhaitables. [50]

### II.5. Sable fabriqué

Le sable manufacturé est un granulats fin concassé fabriqué à des fins spécifiques à partir d'un matériau de base approprié et conçu pour être utilisé dans la construction de béton ou de routes. Seuls les matériaux de base présentant des caractéristiques de résistance, de durabilité et de forme appropriées sont pris en considération. La production implique généralement un concassage, un criblage et éventuellement un lavage. La séparation en fractions distinctes, la recombinaison et le mélange peuvent être nécessaires. [51]



Figure II.2. Sable fabriqué

## II.6. Granulat de polystyrène

Les déchets broyés de polystyrène expansé sont utilisés en combinaison avec des agrégats de poids normal pour produire du béton léger. Un produit breveté australien utilisant de petites billes de polystyrène enrobées (d'une taille maximale de 3 mm ou 1,5 mm) ou des granulés recyclés (broyés et calibrés à une taille maximale de 5 mm) a été introduit sur le marché en 1990. Le produit est utilisé et fourni dans des camions de béton prémélangé standard dont la densité varie de 300 à 1800 kg/m<sup>3</sup> et la résistance à la compression de 1 à 15 MPa. Le granulat enrobé a une densité de 32 kg/m<sup>3</sup> et un coefficient thermique du matériau ( $k$ ) de 0,04 w/mK. Le MEB a montré que le revêtement permet aux cristaux d'hydrates de ciment de se développer à la surface de l'agrégat de polystyrène. [52]



Figure II.3. Granulat de polystyrène

## II.7. Argiles expansées, schistes et ardoises

Certaines argiles, certains schistes et certaines ardoises se dilatent plusieurs fois lorsqu'ils sont chauffés jusqu'à un stade semi plastique (en raison de la formation de gaz dans la masse du matériau à la température de fusion) et développent une structure interne cellulaire. Les granulats d'argile, de schiste et d'ardoise expansés plus lourds peuvent être utilisés pour le béton léger structurel, y compris les éléments en béton précontraint. [53]



Figure II.4.

Argiles

expansées, schistes et ardoises

## II.8. Sous-produit réutilisé

Les agrégats de sous-produits réutilisés sont des agrégats produits à partir de sous-produits de processus industriels. Les exemples incluent divers agrégats provenant de fabricants de fer et d'acier.

### II.8.1. Laitier de haut fourneau refroidi à l'air

Il s'agit d'un sous-produit de la fabrication du fer, dans lequel les constituants de la silice et de l'alumine se combinent à la chaux pour former un laitier fondu recueilli sur le dessus du fer dans un haut fourneau. Le laitier sort du fourneau sous la forme d'un flux fondu à 1400-1600°C. Si on le laisse refroidir lentement, il se solidifie en un matériau gris, cristallin, ressemblant à de la pierre, appelé scorie refroidie à l'air. Ce produit est ensuite concassé et tamisé pour obtenir des tailles convenant à un granulats grossier. [54]



Figure II.5. Laitier de haut fourneau à granulation sèche

### II.8.2. Laitier de haut fourneau granulé

Le laitier granulé de haut fourneau ou le sable de laitier est le produit de la trempe rapide du laitier de haut fourneau fondu avec une quantité excessive d'eau pour obtenir un produit semblable à du sable. En Australie, le laitier granulé est principalement utilisé dans la production de ciment de haut fourneau granulé moulu. Les quantités excédentaires de ces granulés peuvent être utilisées comme agrégat fin (sable grossier).

**Laitier de four à arc électrique** Description Le laitier de four à arc électrique est un sous-produit de l'acier formé dans un four à arc électrique. Au cours du processus, les déchets d'acier et les fondants sont ajoutés à une cuve en forme de coupe à revêtement réfractaire. Cette cuve possède un couvercle à travers lequel passent des électrodes de carbone. Un arc est induit entre la ferraille et les électrodes et la chaleur résultante fait fondre la ferraille et les fondants. L'acier et les laitiers sont également séparés de la même manière que dans le procédé de traitement des laitiers de four à acier. [55-57]



**Figure II.6.** Laitier granulé de haut-fourneau broyé

### II.8.3. Laitier de fourneau à acier

Le laitier de four à acier est un sous-produit de l'acier formé dans le Basic Oxygen System (BOS). Le laitier BOS est extrait de la cuve après le raffinage exothermique du fer fondu et de l'acier recyclé en présence de fondants et d'oxygène. Il est constitué de silicates de calcium et de ferrites combinés à des oxydes fondus de fer, d'aluminium, de calcium, de magnésium et de manganèse. Après refroidissement à l'air, le matériau présente une structure essentiellement cristalline et est concassé et tamisé pour être utilisé comme granulats grossier. [58-61]



**Figure II.7.** Le laitier en tant que sous-produit du four de fabrication de l'acier

### II.8.4. Cendres de fond d'incinérateur

Plus de 90 % (en masse) des résidus d'incinération sont constitués de mâchefer, un matériau ressemblant à du laitier. En ce qui concerne les ordures ménagères, les cendres d'incinération, après avoir été débarrassées des métaux ferreux et non ferreux, peuvent être broyées en une poudre fine, mélangées à de l'argile, pelletisées et cuites dans un four pour produire un agrégat artificiel d'ordures ménagères frittées. [62]

Rejet de la laverie de charbon (CWR) Description Les rejets de la laverie de charbon sont un sous-produit du processus de préparation du charbon et sont principalement produits en conjonction avec la valorisation du charbon à coke. Lors de son extraction, le charbon brut est lavé afin d'éliminer les matériaux à forte teneur en cendres qu'il contient. Les matériaux produisant des cendres comprennent : des couches de matériaux non carbonés ou faiblement carbonés dans la veine de charbon ; des matériaux de toit et de sol extraits par inadvertance avec le charbon ; et des roches de digue qui ont pénétré dans la veine de charbon



**Figure II.8.** Les cendres d'incinération

## II.9. Agrégats synthétiques

L'activité accrue dans le domaine des autoroutes et d'autres constructions a accéléré le rythme de consommation de granulats de haute qualité. Cette situation, associée à une répartition géographique déséquilibrée des gisements, a créé un problème d'approvisionnement dans certaines régions, et on s'attend à ce que de nombreuses autres régions rencontrent un problème à l'avenir. Pour compenser la pénurie ou le coût élevé des agrégats, des matériaux moins couramment utilisés, comme les coquilles et les scories, sont substitués dans la construction des routes. Les sols stabilisés sont également substitués aux granulats dans les bases et les sous-bases. Une autre approche du problème consiste à utiliser des agrégats synthétiques plutôt que naturels [63].

Une étude a été faite pour identifier les matériaux existants et potentiels convenant à la production de granulats synthétiques, pour concevoir de nouvelles méthodes de production de ces granulats et pour évaluer les perspectives actuelles et futures de leur utilisation dans la construction routière. Un grand nombre de granulats synthétiques existants et potentiels ont été identifiés. Plusieurs matériaux manufacturés ou sous-produits, tels que les agrégats légers et le laitier de haut fourneau, sont actuellement utilisés comme granulats ; d'autres sous-produits ou déchets qui pourraient être utilisés après un traitement mécanique mineur comprennent un certain nombre de déchets céramiques, diverses scories et mâchefers industriels, des déchets de démolition et des ferrailles de fer ou d'acier.

L'étude a examiné les méthodes possibles de production de nouveaux granulats synthétiques - par frittage ou fusion de matériaux naturels à grains fins comme le sable, l'argile ou la terre, ou de déchets comme les poussières d'aciéries ou les déchets miniers ; ou par traitement chimique ou thermo-chimique de mélanges comme ceux de sable et de chaux ou de cendres volantes et de chaux. Les granulats synthétiques offrent une alternative possible à l'importation de granulats naturels d'autres régions. L'intérêt actuel des granulats synthétiques pour la construction d'autoroutes dépend donc de facteurs économiques spécifiques à la localité qui souffre d'une pénurie de granulats. À terme, lorsque la pénurie de granulats se généralisera et que l'importation de granulats naturels deviendra trop importante et trop coûteuse pour être une pratique saine, les granulats synthétiques pourront constituer une solution viable au problème. Le développement le plus significatif pour l'avenir sera probablement soit l'utilisation de matériaux de chantier pour la fabrication de granulats synthétiques dans des équipements de traitement polyvalents et portables, soit

l'établissement d'une industrie des granulats synthétiques à grande échelle qui traite des matériaux largement disponibles tels que les argiles et les schistes. Il ne faut pas négliger une autre possibilité, à savoir le développement de nouveaux systèmes routiers nécessitant des quantités moindres de granulats [64].

Différents types de granulats synthétiques sont présentés ci-dessous.



**Figure II.8.** Agrégats synthétiques

### **II.9.1. Traitement thermique des matériaux naturels à grain fin**

Ce procédé permet d'obtenir des agrégats synthétiques présentant des caractéristiques souhaitables pour la construction d'autoroutes, mais les limitations des matières premières et les coûts de production élevés restreignent considérablement l'utilité de cette source d'agrégats synthétiques. Plusieurs méthodes potentielles pour surmonter ces limitations ont été suggérées. Il est recommandé d'utiliser, en plus des argiles ou des schistes gonflants, d'autres matériaux plus largement disponibles. Un agrégat dense pourrait être produit par traitement thermique de matériaux non gonflants ou, si un agrégat léger était souhaité, des matériaux générateurs de gaz pourraient être ajoutés pour provoquer le gonflement. Les matières premières alternatives potentielles comprennent les argiles et les schistes de toutes sortes, le sable, la terre et le limon, un matériau finement divisé, soufflé par le vent. [65,66]

### **II.9.2. Traitement thermique des sous-produits ou des déchets**

Un certain nombre de ces matériaux sont disponibles en quantités limitées et généralement dans des endroits isolés. Les boues de phosphate, les résidus des mines de charbon, la poussière des fours électriques et les poussières de désenfumage en sont des exemples typiques. Les boues de phosphate sont les résidus colloïdaux de phosphate et

d'argile qui résultent de la production de granulés de phosphate. Ils sont produits principalement en Floride, mais il existe également des gisements importants au Tennessee. La quantité estimée de boues résiduelles produites en 1963 était d'environ 20 millions de tonnes. Une fois déshydratées, séchées, pelletisées et cuites, ces boues, qui avant la déshydratation contiennent normalement environ 20 % de solides, peuvent être utilisées pour produire un excellent agrégat léger. Les caractéristiques de cuisson sont très similaires à celles des argiles utilisées pour fabriquer des agrégats légers. Les boues ont une courte plage de cuisson et se gonflent d'elles-mêmes à des températures de l'ordre de 2 000 à 2 200 F.

Le principal inconvénient de l'utilisation des argiles phosphatiques est leur nature colloïdale qui fait de la déshydratation une opération coûteuse et longue. Les résidus des mines de charbon, notamment ceux associés aux décharges ou aux terrils, constituent une autre source potentielle de déchets convenant à la production de granulats synthétiques. La poussière des fours électriques à acier et la poussière de désenfumage sont des particules extrêmement fines recueillies dans les gaz de cheminée. Bien que l'on dispose de peu d'informations sur leurs caractéristiques et leurs propriétés, il est probable qu'elles puissent être converties en agrégats synthétiques par le processus de granulation-frittage utilisé avec les cendres volantes. [67]

### **II.10. Matériaux composites**

Les caractéristiques de particules autrement inadéquates peuvent être améliorées en les revêtant d'une peau imperméable. D'une manière générale, toute particule ou tout matériau qui a une forme fondamentalement cubique ou arrondie ou qui peut être transformé en granulés peut être revêtu d'un matériau fusible. Par exemple, les particules d'agrégat de structure imparfaite pourraient être recouvertes d'une boue argileuse appropriée qui serait fondue à haute température. L'intérieur pourrait être un sol naturel à l'état de granulés ou un intérieur poreux en forme de nid d'abeille. Les matériaux d'âme solides, tels que les grammes de sable ou les particules de pierre tendre, nécessiteraient un revêtement d'une épaisseur minimale. Un noyau de matériau plus mou, comme de la terre granulée, pourrait être recouvert d'un revêtement plus épais afin que la qualité du produit ressemble davantage à celle du matériau de revêtement. Les exigences de cuisson sont déterminées par le type et l'épaisseur du matériau d'enrobage. Les propriétés chimiques des particules enrobées d'argile cuites ressembleraient étroitement à celles du matériau de surface, tandis que la densité et la

résistance seraient principalement fonction du matériau de base. La performance du produit peut être contrôlée par une sélection appropriée des composants [68,69].



**Figure II.9.** Types de matériaux composites dans la construction

### II.11. Pierre concassée

La pierre concassée est le produit minéral le plus fondamental au monde. Elle est abondante, largement disponible et peu coûteuse. C'est un matériau que les gens connaissent bien dans presque toutes les régions du monde.

La plupart des pierres concassées sont utilisées dans la construction d'autoroutes et de bâtiments. Pour la construction d'une autoroute asphaltée à deux voies, on utilise environ 25 000 tonnes de pierre concassée par kilomètre. Les types suivants sont utilisés : calcaire, granite, roche piège, grès, quartzite, dolomite, cendres et scories volcaniques, marbre, ardoise, dacite, coquille et marne calcaire. [70,71].



**Figure II.11.** Pierres concassées pour la construction de routes

## II.12. Déchets de plastique

La plupart des déchets plastiques sont riches en polymères. Il peut être utilisé soit comme agent stabilisant dans les sols et les couches de fondation, soit comme additif aux mélanges d'agrégats dans les revêtements d'asphalte à chaud. Il est ajouté au liant sous forme de granulés à raison de 0,25 à 0,5 % du poids du liant dans la méthode humide ou aux granulats dans la méthode sèche. Dans l'ensemble, la méthode humide surpasse la méthode sèche en termes de facilité et de forces de cisaillement appliquées pour assurer la dispersion des copeaux de plastique. Le Polyéthylène Haute Densité (PEHD) est préféré au polyéthylène basse densité (PEBD) pour améliorer les propriétés mécaniques du HMA. Plus le taux de plastique ajouté est élevé, moins le bitume est sensible à la température et plus il améliore la résistance à l'arrachement. 30% de LDPE dans la méthode sèche a développé la stabilité du mélange et le taux de résistance à la traction retenue. [72,73].



Figure II.12. Utilisation de déchets plastiques dans la construction de routes

## II.13. Déchets de construction

Les déchets structurels provenant de la démolition et des routes abandonnées peuvent être transformés en agrégats de construction. Ces matériaux recyclés peuvent être utilisés comme base ou sous-base pour les routes, les trottoirs, les parcs de stationnement, les ponts et autres structures de construction.

Les déchets de démolition tels que les briques cassées, le plâtre, le stuc, le béton et les pierres de construction naturelles peuvent être recyclés en agrégats de construction. Les matériaux de route abandonnés, comme la brique et la pierre, peuvent également être utilisés comme agrégats. Cependant, il est important de noter que la qualité des matériaux recyclés peut varier en fonction de leur origine et de leur état de dégradation.

L'utilisation d'agrégats recyclés présente de nombreux avantages, notamment la réduction des coûts de construction, la réduction de la quantité de déchets envoyés en décharge et la réduction de l'impact environnemental de la construction. En outre, l'utilisation d'agrégats recyclés peut contribuer à la réduction de l'empreinte carbone en évitant les émissions de gaz à effet de serre associées à l'extraction et au transport de matériaux neufs.

Il est important de noter que l'utilisation d'agrégats recyclés peut être limitée par la disponibilité de matériaux recyclables de qualité, ainsi que par les coûts associés à la collecte, au tri, au transport et au traitement de ces matériaux. Par conséquent, l'utilisation d'agrégats recyclés est souvent plus avantageuse lorsqu'elle est mise en œuvre à proximité du point d'origine des matériaux recyclés, afin de réduire les coûts de transport [74].



**Figure II.13.** Déchets de construction recyclables

### II.14. Bardeaux d'asphalte recyclés

Les bardeaux d'asphalte sont en effet disponibles en deux types : les bardeaux en fibre de verre et les bardeaux organiques.

- Les bardeaux en fibre de verre sont fabriqués en appliquant une couche de fibre de verre sur le dessus et le dessous d'une feuille de base en papier ou en carton. Cette feuille de base est ensuite enduite d'asphalte pour la rendre imperméable et résistante aux intempéries. Les bardeaux en fibre de verre sont généralement plus durables et résistants aux flammes que les bardeaux organiques.
- Les bardeaux organiques, quant à eux, sont fabriqués à partir d'une feuille de base en papier ou en feutre saturée de ciment bitumineux. Cette feuille est ensuite enduite d'asphalte pour renforcer sa résistance aux intempéries. Les bardeaux organiques sont plus souples que les bardeaux en fibre de verre et sont souvent utilisés pour les toits qui ont une pente faible.

Les deux types de bardeaux contiennent des fibres minérales, des charges minérales et des granules de roche dure, ainsi que du ciment bitumineux. Les granules de roche dure sont utilisées pour renforcer la résistance aux intempéries des bardeaux et pour leur donner une apparence attrayante. Le pourcentage moyen de ciment bitumineux dans les bardeaux est d'environ 30% de la masse totale, mais cela peut varier en fonction du fabricant et du type de bardeaux [75].



**Figure II.14.** Recyclage de bardeaux d'asphalte

### **II.15. Revêtement en asphalte récupéré**

Les caractéristiques des matériaux recyclés en asphalte dépendent en grande partie de leur source d'origine. Les granulats utilisés pour la fabrication de l'asphalte récupéré peuvent varier en termes de taille, de forme et de composition chimique. La teneur en liant peut également varier, tout comme la rigidité du liant, qui peut affecter la durabilité de l'asphalte recyclé.

En raison de ces variations dans les matériaux recyclés, il est important de procéder à une caractérisation approfondie des matériaux avant leur utilisation. Cette caractérisation peut inclure des tests de laboratoire pour évaluer la composition chimique, la taille et la forme des granulats, ainsi que la teneur en liant et la rigidité du liant.

En fonction des résultats de la caractérisation, il est possible d'ajuster la formulation de l'asphalte recyclé en ajoutant des adjuvants ou en modifiant la proportion de granulats pour améliorer la qualité du matériau. Cela peut permettre d'obtenir un produit recyclé de haute qualité, qui peut être utilisé pour la construction de nouvelles routes ou pour la rénovation de routes existantes [76].



Figure II.15. Matériaux recyclés en asphalte

## II.16. Caoutchouc en miettes "Pneus usagés"

Qu'il soit traité par voie humide ou sèche, le caoutchouc émietté utilisé dans les applications de revêtement d'asphalte présente plusieurs avantages autres qu'une meilleure résistance au dérapage. Il confère également aux mélanges d'asphalte une résistance au cisaillement, ce qui permet de supporter la charge imposée par le trafic et de prévenir l'apparition d'ornières dans les couches inférieures de la chaussée. [77].



Figure II.16. Le caoutchouc émietté

## II.17. Sables de fonderie

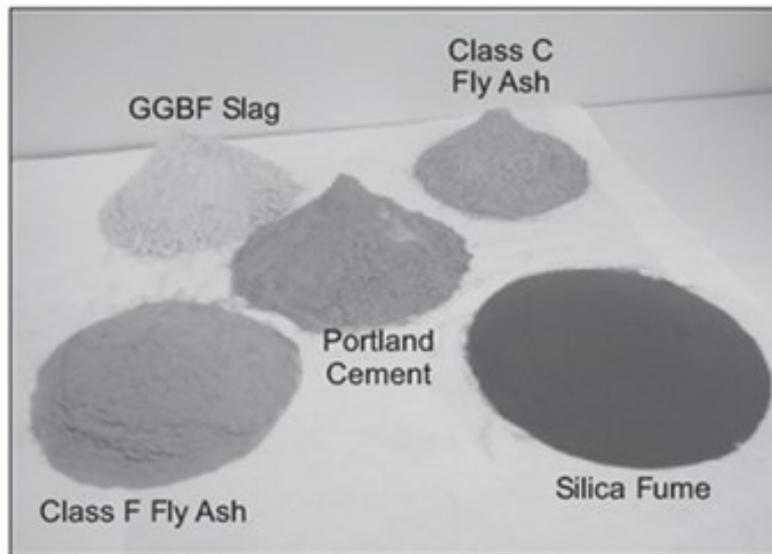
Il s'agit d'un sous-produit de l'industrie de la fonte des métaux ferreux et non ferreux, classé comme un matériau à grain fin composé d'une silice de haute qualité, de taille uniforme et d'une propreté considérable. La littérature mentionne que le sable est réutilisé dans les fonderies autant de fois qu'il devient éventuellement peu pratique de le faire, puis il est déposé comme déchet de fonderie. C'est à ce stade qu'on l'envisage pour les travaux routiers. Ce matériau a été utilisé dans le HMA, les sous-fondations, les remblais et dans les matériaux de remblayage en tant que remblais fluides. [78].



Figure II.17. Sables de fonderie

## II.18. Produits de la combustion du charbon / Matériau cimentaire supplémentaire

Il s'agit notamment des cendres volantes, des cendres résiduelles/des laitiers de chaudière, des cendres de bassin, des sables bitumineux, des sols contaminés par le pétrole, des cendres de schiste bitumineux et des semelles de frein fines. Le taux modeste de métaux lourds dans les cendres volantes 18 et les particules ultra-minces font que les cendres volantes sont viables comme charge minérale dans les HMA. Elles peuvent être de type C, à haute teneur en calcium, ou de type E, à teneur réduite en calcium. [79,80].



**Figure II.18.** Matériaux cimentaires supplémentaires

## **II.19. Déchets industriels pour la construction de routes**

Il existe de nombreux types de déchets, tels que les déchets industriels, de construction, ménagers, agricoles, etc. Ils comprennent les cendres volantes, les cendres de charbon, les pierres de carrière, les plastiques, le verre, les agrégats recyclés, les matériaux géo-naturels, les fibres et les sacs en polyéthylène, etc. Nécessité des déchets, par exemple : pénurie d'agrégats/de sols de bonne qualité pour la construction de routes. La production et l'accumulation de différents déchets, les problèmes d'élimination et d'environnement, l'économie et l'utilisation rentable sont des tâches très difficiles. La civilisation produit également des déchets. La question de l'élimination de ces déchets est un défi. Certains de ces matériaux ne sont pas biodégradables et entraînent souvent une crise de l'élimination des déchets et une pollution de l'environnement.

Les déchets industriels des centrales thermiques sont les cendres volantes, les cendres résiduelles et les cendres de bassin ; ceux des aciéries sont les laitiers de haut fourneau, les laitiers de haut fourneau granulés et les laitiers d'acier. Les centrales thermiques jouent un rôle majeur dans la production d'énergie et, dans le scénario indien, les cendres volantes sont utilisées à partir de charbon à forte teneur en cendres.

Les cendres volantes sont l'un des résidus créés lors du processus de combustion et comprennent les fines particules qui s'élèvent avec les gaz de combustion. Dans le domaine du génie civil et de l'industrie, le terme "cendres volantes" fait généralement référence aux

endres volantes de charbon provenant des centrales électriques au charbon (centrales thermiques), qui sont de loin les cendres volantes les plus utilisées dans la construction et les applications industrielles. Selon la source et la composition du charbon brûlé, les composants des cendres volantes varient considérablement, mais toutes les cendres volantes comprennent des quantités substantielles de dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) (à la fois amorphe et cristallin) et d'oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), également connu sous le nom de chaux, tous deux étant des ingrédients endémiques dans de nombreuses strates de roches houillères, d'oxyde de fer ( $\text{FeO}$ ) et d'oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Selon la source, le charbon peut contenir un ou plusieurs produits chimiques toxiques à l'état de traces : Arsenic, Béryllium, Bore, Cadmium, Chrome, Cobalt, Plomb, Manganèse, Mercure, Molybdène, Sélénium, Strontium, Thallium, et Vanadium.

La poussière de four à ciment (CKD) est la matière particulaire alcaline sèche finement divisée transportée par les gaz d'échappement d'un four à ciment et captée par le système de contrôle de la pollution atmosphérique du four. En général, la composition de la poussière de four à ciment est similaire à celle du ciment et consiste en carbonate de calcium, calcite, silicate, sulfate de potassium, sulfate de calcium, oxyde d'aluminium, oxyde de fer, chlorure de potassium, oxyde de magnésium, sulfate de sodium et fluorure de potassium. La poussière de four à ciment a une composition chimique similaire à celle du ciment ; par conséquent, la valeur principale de la poussière de four à ciment est ses propriétés cimentaires. Lorsque la poussière de four à ciment est utilisée comme agent stabilisant, le mélange et le compactage de la poussière de four à ciment sont terminés lorsqu'elle est appliquée initialement ou dans les 24 heures ; et La poussière de four à ciment peut être mélangée au sol pour modifier les limites plastiques ou la teneur en humidité afin de fournir les propriétés stabilisées souhaitées.

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit industriel du fer produit dans un haut fourneau. Il a des propriétés similaires à celles du ciment. Il est utilisé comme matériau de liaison dans les constructions routières. Ce laitier se compose principalement de silicates et d'aluminosilicates de chaux et d'autres bases. Le laitier de haut fourneau est généré lors du processus de fusion dans les opérations de fabrication de l'acier. Le laitier est une masse assez complexe et relativement inerte. Il est composé d'oxydes métalliques (produits à la suite de l'oxydation du métal pendant le processus de fusion), de réfractaire fondu, de sable provenant de moulages de ferraille recyclés, de cendres de coke et d'autres matériaux.

Le laitier d'acier est un sous-produit du processus de fabrication de l'acier. Il contient des mélanges fondus d'oxydes et de silicates, principalement du calcium, du fer, de la chaux non éteinte et du magnésium. Le laitier d'acier contient des quantités importantes de fer ; sa structure de vide fortement comprimée en fait un matériau très dense et dur. Le laitier d'acier est un déchet de la fabrication de l'acier. La taille des particules varie de 80 mm à 300 microns. Comparé au laitier de haut fourneau, le laitier d'acier contient des quantités plus faibles de silice, des quantités plus élevées d'oxyde de fer et d'oxyde de calcium en raison de la présence de chaux libre, le laitier d'acier doit être altéré avant d'être utilisé dans la construction. [81-83].

### **II.20. Conclusion**

La construction utilise de très grandes quantités de granulats naturels (gravier, sable, pierre concassée) provenant de l'excavation, et une partie considérable de ces quantités est utilisée pour les besoins de la construction des routes. Cette demande continue de matériaux naturels épuise les sources naturelles et, dans les régions où les agrégats naturels de qualité font défaut, les coûts d'achat et de transport augmentent considérablement les coûts de construction. L'exploitation des granulats naturels représente une perte, non seulement des granulats eux-mêmes, mais aussi de l'environnement naturel dont les granulats sont extraits.

La procédure d'exploitation donne également lieu à divers effets négatifs qui entraînent des modifications visuelles de l'environnement, une augmentation du trafic lourd sur les routes existantes dont la capacité de charge est insuffisante, du bruit, de la poussière et des vibrations. D'autre part, l'accumulation de divers déchets dans des décharges ou l'élimination des matériaux qui sont apparus comme des sous-produits dans un processus technologique ou de production représentent l'un des problèmes environnementaux cruciaux.

Un large éventail de ces matériaux alternatifs non standard est utilisé avec succès depuis de nombreuses années dans le monde entier. De nombreuses entreprises et services publics, ainsi que des universités, participent depuis des années à la recherche, au développement et à la démonstration de ces matériaux. Pour être exploitables, les matériaux alternatifs doivent répondre à certaines caractéristiques techniques, présenter un niveau d'exécution acceptable et être économiquement comparables aux matériaux traditionnels.

# Chapitre III

## Les différents types des liants et Technique de Traitement

---

### III.1. Introduction

Le traitement avec un liant est une méthode utilisée pour modifier les propriétés d'un sol en lui ajoutant un matériau liant tel que du ciment, de la chaux, de la pouzzolane, ou tout autre matériau qui peut améliorer la résistance, la durabilité et la stabilité du sol. Lorsque le liant est mélangé avec le sol, il réagit avec les particules du sol pour former des liaisons qui renforcent la structure du sol et améliorent sa capacité à supporter des charges. Contrairement au compactage qui vise à tasser le sol, le traitement avec un liant crée de nouvelles liaisons chimiques entre le sol et le liant. Cette méthode est fréquemment utilisée lors de la construction des ponts, des routes et d'autres ouvrages de génie civil, afin de renforcer les sols fragiles pour qu'ils puissent supporter de lourdes charges.

### III.2. Aperçu historique

Vers 1830, le ciment a été appliqué pour la première fois comme adhésif en Allemagne, où il a été largement utilisé pour stabiliser les pistes d'atterrissage pendant la Première Guerre mondiale. Mais en Belgique, l'utilisation d'un liant pour traiter les sols a gagné en popularité dans les années 1960, notamment dans le cadre d'un programme de construction d'autoroutes. Au cours des 20 dernières années, l'utilisation de liants pour traiter les sols s'est considérablement développée, en particulier pour les sols fins tels que les sols argileux et limoneux.

Comme en témoignent les anciennes routes romaines, les structures et les bétons de terre typiques, l'utilisation de la chaux comme liant remonte à bien plus loin. La Grande Muraille de Chine, construite à l'aide d'un mélange de chaux et d'argile comprimée, est un autre exemple de l'utilisation de la chaux comme liant.

En Allemagne, où il a été largement utilisé pour stabiliser les pistes d'atterrissage pendant la Première Guerre mondiale, le ciment a été utilisé pour la première fois comme adhésif vers 1830. Mais en Belgique, l'utilisation d'un liant pour traiter les sols s'est généralisée dans les années 1960, notamment dans le cadre de la construction d'autoroutes. L'utilisation des liants a connu un essor

important au cours des 20 dernières années, notamment pour le traitement des sols délicats comme les sols argileux et les sols limoneux.

En raison du renforcement des réglementations environnementales et de la demande croissante en ressources naturelles, cette méthode connaît actuellement un renouveau important. Qu'il s'agisse de petits ou de grands chantiers, elle apporte une solution technique, financière et écologique à la question des terres de déblais.

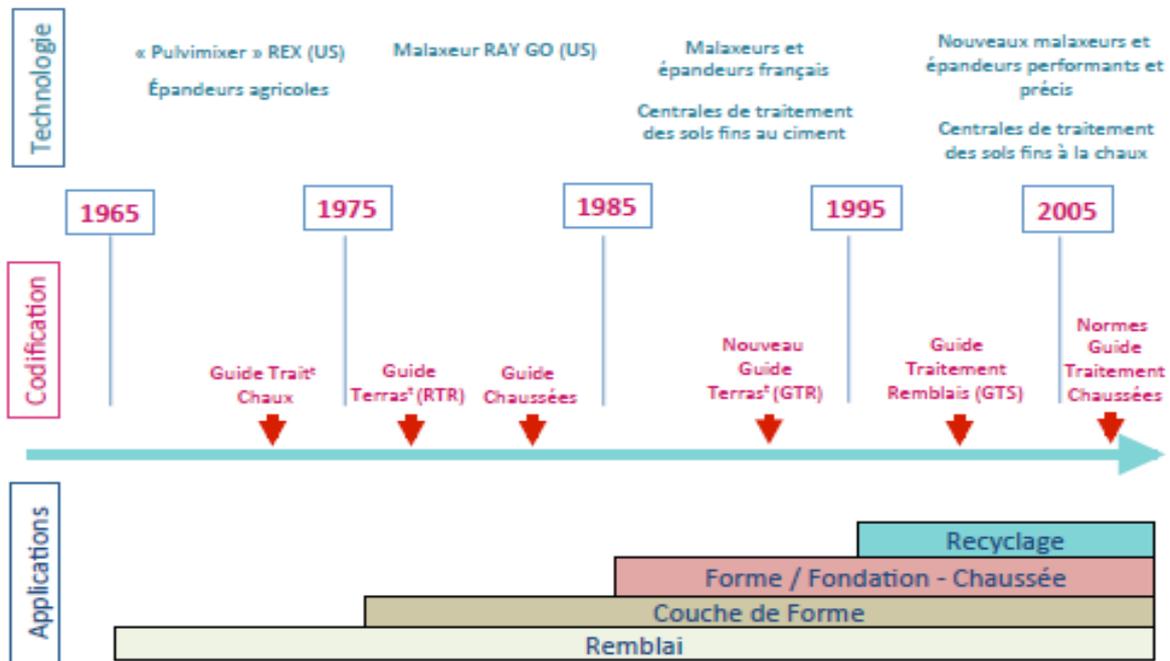


Figure III.1 Historique du développement du traitement des sols [84]

### III.3. Types de traitement

#### III.3.1 Amélioration

Une méthode de traitement appelée amélioration des sols vise à améliorer les propriétés géotechniques des sols à plasticité élevée, comme les limons et les argiles. Cette amélioration permet d'améliorer la circulation, ce qui augmente la capacité portante, la résistance au poinçonnement et la facilité de mise en place et de compactage. Pour ce faire, les sols plastiques sont améliorés par l'ajout de petites quantités de liant, généralement de l'ordre de 1 à 3 %, le plus souvent de la chaux ou une combinaison de chaux et de ciment.

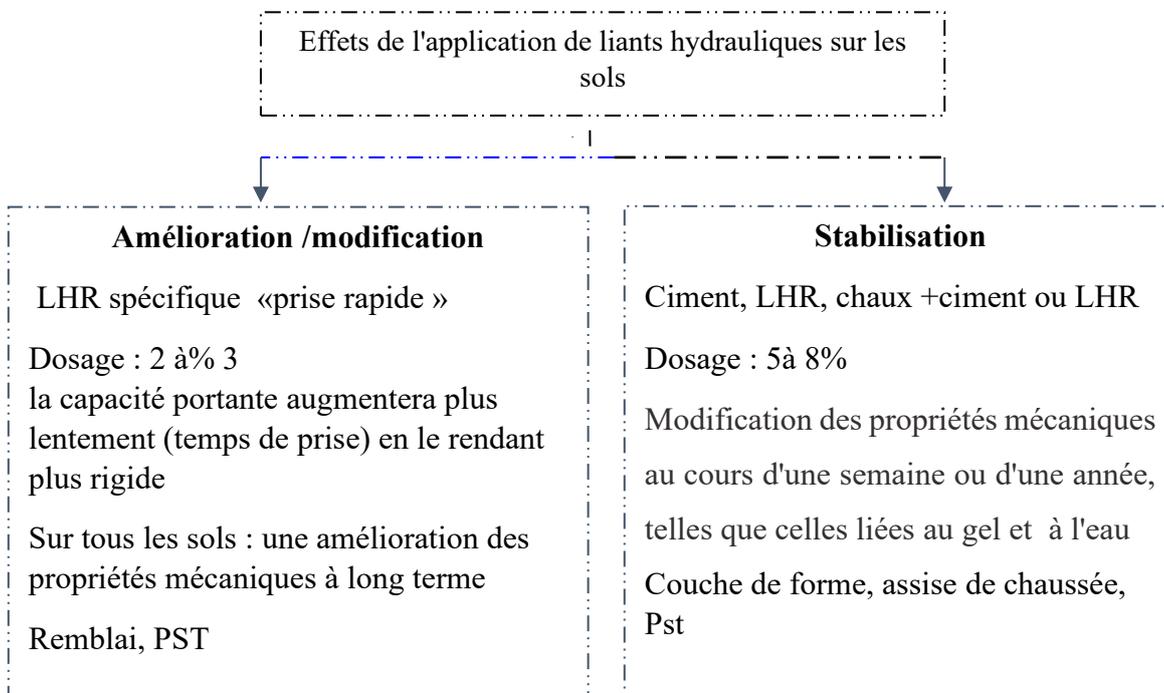
### III.3.2. Stabilisation

La stabilisation est généralement utilisée pour des sols ayant des caractéristiques mécaniques insuffisantes pour supporter les charges de circulation. Elle est particulièrement efficace pour les sols à faible portance, tels que les sols limoneux et argileux. Les méthodes de stabilisation peuvent également être utilisées pour renforcer les remblais existants, les murs de soutènement et les fondations de bâtiments.

Il existe plusieurs méthodes de stabilisation, dont la stabilisation mécanique, la stabilisation hydraulique, la stabilisation chimique, la stabilisation thermique et la stabilisation électronique. Le choix de la technique de stabilisation dépend des caractéristiques du sol, de l'utilisation prévue de la zone à stabiliser et de l'environnement.

En général, la stabilisation des sols consiste à mélanger le sol avec un liant pour améliorer ses propriétés mécaniques. La quantité de liant utilisée varie en fonction des caractéristiques du sol et des exigences de la construction. Les liants couramment utilisés comprennent le ciment, la chaux, les émulsions de bitume, les polymères et les résines époxy.

Après le traitement, le sol stabilisé doit être compacté pour obtenir une densité uniforme. Le compactage est effectué à l'aide de compacteurs de sol ou de rouleaux. Les couches de sol stabilisé peuvent également être renforcées avec des géotextiles pour améliorer leur résistance à l'érosion et à la déformation. [85]



## III.4. Différents Produits de traitement

### III.4.1. Ciments

Le traitement au ciment peut être utilisé dans diverses applications, telles que la stabilisation de sols pour la technique des routes, de plates-formes industrielles, de pistes d'atterrissage, de parkings, de digues et de barrages. Il peut également être utilisé pour la réparation de structures en béton, comme les ponts et les bâtiments.

En ce qui concerne les types de ciments courants, voici une brève description de chacun :

- CEM I Ciment Portland : c'est le type de ciment le plus courant, qui est composé principalement de clinker et de gypse. Il convient pour une utilisation générale dans la construction ;
- CEM II Ciment Portland composé : il s'agit d'un ciment Portland auquel on ajoute d'autres matériaux, tels que des laitiers de haut-fourneau, des cendres volantes ou des filler calcaires. Ces ajouts peuvent améliorer certaines propriétés, comme la résistance aux sulfates, la résistance à la fissuration ou la durabilité ;
- CEM III Ciment de haut-fourneau : ce ciment est composé principalement de laitier de haut-fourneau et de clinker. Il est souvent utilisé pour sa résistance accrue aux sulfates et pour sa faible teneur en clinker, qui réduit l'impact environnemental de sa production ;
- CEM IV Ciment pouzzolanique : ce ciment est produit en mélangeant du clinker et des pouzzolanes, qui sont des matériaux d'origine volcanique. Les pouzzolanes réagissent chimiquement avec le ciment pour former des produits hydratés qui améliorent la résistance et la durabilité du béton ;
- CEM V Ciment composé : c'est un ciment qui contient des ajouts multiples, tels que des laitiers de haut-fourneau, des cendres volantes et des pouzzolanes. Il est souvent utilisé pour améliorer les propriétés du béton, comme la résistance aux sulfates, la résistance à la fissuration et la durabilité.

La distinction entre chaque type de ciment a des propriétés spécifiques qui le rendent plus ou moins adapté à certaines applications. Le choix du type de ciment dépendra donc des conditions d'utilisation et des exigences de performance. [86]

Les ciments de haut-fourneau (CEM III) sont couramment utilisés pour le traitement des sols, car ils ont une bonne résistance mécanique et une meilleure durabilité que les ciments Portland ordinaires (CEM I). Les deux classifications de résistance les plus utilisées pour le traitement des sols sont 32,5 N et 42,5 N. En général, les ciments à prise rapide (CEM I) ne sont pas conseillés car la prise rapide et la chaleur intense produite pendant l'hydratation peuvent entraîner des fissures dans le sol. [87]

**Tableaux III.1.** Possibilités d'emploi des ciments courant avec différents types des sols [88]

Types de sols	CEM I	CEM II	CEM III	CEM IV	CEM V
Sols pas peu argileux (classe A1- B1- B2 -B3- B4 B5- D1- D2)	+ <sup>(1)</sup>	+	+	?	+
Sols argileux prétraités à la chaux (classes A2 -A3- B6)	+ <sup>(1)</sup>	+	?	?	?
Craies classe(R1)	+ <sup>(1)</sup>	?	?	?	?
Sols calcaires et mammo- calcaires (classe R2)	+ <sup>(1)</sup>	+	+	?	+

+ : a priori adapté

+<sup>(1)</sup> : a priori adapté - Usage à privilégier pour les travaux d'arrière-saison (ces Ciments donnent un faible délai de maniabilité), sauf ajout d'un retardateur

? : Étude spécifique nécessaire

### Action de ciment sur les sols

Le ciment peut être ajouté aux sols pour augmenter leur résistance à l'eau et leurs qualités mécaniques. Lorsque les composants du ciment se combinent à l'eau, ils créent des constituants hydratés qui maintiennent les particules du sol ensemble. Les principaux composants créés lors de l'hydratation des silicates de calcium (C3S et C2S) présents dans le ciment sont la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté (C-S-H).

L'existence de gypse dans le ciment est nécessaire à l'hydratation des aluminates tricalciques (C3A). L'ettringite est produite en présence de gypse, ce qui contribue à améliorer la résistance du sol. En l'absence de gypse, l'eau et les C3A se combinent pour produire du C4AH13, du C2AH8 et du C3AH6. Sous l'effet de la chaleur d'hydratation, les C4AH13 et C2AH8 instables se transforment en C4AH8.

L'ajout de ciment aux sols peut améliorer leur résistance et leur durabilité en formant des constituants hydratés qui lient les particules du sol entre elles. Les proportions des différents composants dans le ciment influencent les propriétés finales du sol traité.

La composition chimique et minéralogique du ciment ainsi que la quantité d'eau disponible pour hydrater les phases du ciment déterminent le comportement du ciment dans les sols. Comme les composants du ciment hydraté lient les grains du sol entre eux, les sols à faible concentration d'argile peuvent être renforcés plus facilement avec du ciment. En particulier, la composition moléculaire et minéralogique des argiles joue un rôle important dans la manière dont le ciment interagit avec les sols argileux. Les éléments argileux peuvent se combiner avec le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  produit lors de l'hydratation du ciment, mais ils peuvent également retarder la prise du ciment en enfermant les grains de ciment dans une barrière. L'influence du ciment sur les caractéristiques du sol telles que la capacité portante, la rigidité, le module de déformation et la résistance au gel s'est accrue au fil du temps. [89]

### III.4.2. Liants spéciaux routiers LSR (ou liants hydrauliques routiers LHR)

Les cimentiers français ont commencé à concevoir et à développer des liants routiers spécialisés depuis la fin des années 1980 pour la construction des parties supérieures des ouvrages en terre (PST), des bases de remblais insensibles à l'eau et des couches de forme. La composition, les exigences et les normes de conformité des liants hydrauliques routiers sont définies par une norme (NF P 15-108). [22]

Les liants spéciaux routiers (LSR) ou liants hydrauliques routiers (LHR) sont des matériaux utilisés pour renforcer et stabiliser les sols dans la construction de routes et de chaussées. Ils sont fabriqués à partir de mélanges de ciment, de chaux et de pouzzolane, et ont des propriétés spécifiques adaptées à chaque usage routier.

Les (LSR) sont utilisés pour la constitution de parties supérieures de terrassement (PST), les bases de remblais insensibles à l'eau et les couches de forme. En formant des liens physiques entre les particules du sol, ils renforcent les sols, augmentant ainsi leur capacité portante, leur rigidité, leur module de déformation, leur résistance au gel et leur résistance mécanique. [90]

- **Types de LHR**

La résistance, la stabilité et la durabilité des sols traités ont été spécifiquement prises en compte dans chaque variété de LHR. Par exemple, les LHR à portance rapide sont conçus pour les travaux nécessitant une mise en service rapide, tandis que les LHR de traitement des sols fins conviennent aux sols argileux ou limoneux qui nécessitent une plus grande rigidité et une meilleure résistance au gel.

Pour garantir les meilleurs résultats, il est essentiel de sélectionner le type de LHR approprié en fonction des caractéristiques du sol à traiter et des exigences du projet. Les cimentiers peuvent donner des conseils sur le meilleur LHR à utiliser, ainsi que des détails sur les exigences et les normes de conformité des différents produits.

- **Choix du type de LHR**

Le type de sol à traiter, la teneur en eau et la température, ainsi que l'objectif du traitement, influencent le type de LHR choisi. (Amélioration ou stabilisation). Par rapport aux ciments conventionnels, les LHR présentent un certain nombre d'avantages techniques et financiers, notamment:

- Un délai de maniabilité plus long grâce à une prise plus lente, ce qui permet une utilisation plus souple lors des opérations de traitement.
- Une plus faible fissuration des matériaux traités et des ouvrages sus-jacents (chaussées, plates-formes industrielles...) en raison de leur module d'élasticité généralement plus faible que celui obtenu par le traitement des sols avec les ciments traditionnels.
- Un coût souvent plus économique.

Il convient donc de bien étudier les caractéristiques du sol à traiter et les objectifs de l'opération pour choisir le type de LHR le plus adapté, en fonction de ses propriétés et de ses avantages. [90]

### III.4.3. Chaux

Selon la réaction chimique :  $\text{CO}_3\text{Ca} + 50 \text{ Kcal} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ , la chaux est produite par décarbonatation de la roche à 900°C. En fonction de la composition chimique et de la pureté de la roche d'origine, il existe différentes sortes de chaux. Le calcaire pur produit une chaux aérienne qui peut être soit calcique, soit magnésienne, selon qu'elle contient de l'oxyde de calcium ou de l'oxyde de magnésium. La chaux peut être éteinte, ou séchée, de deux manières différentes. Le terme "chaux grasse" fait référence à la chaux aérienne calcique (également appelée chaux éteinte) qui se présente sous diverses formes : roche ou poudre pour la chaux vive et la poudre, suspension dans l'eau (lait de chaux) ou boue pour la chaux éteinte.

Le cycle de vie de la chaux comprend la décarbonatation, l'hydratation et la recarbonatation, ce qui permet de la qualifier de substance "aérienne". En effet, l'absorption du dioxyde de carbone suite à l'hydratation permet à la chaux de retrouver sa forme calcaire d'origine à température ambiante. La chaux est utilisée dans de nombreuses industries, mais elle est particulièrement utile dans le secteur de la construction pour le traitement des sols, des coproduits, des granulats de carrières et des ouvrages souterrains, car elle joue également le rôle d'activateur de prise. En raison de ses caractéristiques physico-chimiques, telles que la basicité, la surface spécifique et la réactivité, elle est également utilisée dans l'agriculture, la chimie, l'industrie du verre, l'épuration des sols et le conditionnement des boues. [91]



Figure III.2. Sol avant traitement *et* après traitement

#### - Action de la chaux sur les sols

L'ajout de chaux dans les sols fins à teneur élevée en argiles ou limons permet de modifier leur comportement et d'améliorer leur stabilité. La chaux agit en abaissant la teneur en eau du sol, ce qui réduit son gonflement en présence d'eau et sa rétraction par sécheresse. Cela se produit grâce à l'hydratation de

la chaux vive, qui consomme de l'eau et provoque de l'évaporation, ainsi qu'à l'apport de matériau sec et à l'aération du sol.

La quantité de chaux nécessaire varie en fonction des caractéristiques du sol et des résultats souhaités, mais elle se situe généralement entre 1 % et 3 %. Toutefois, il convient de noter que l'ajout d'une trop grande quantité de chaux peut avoir des effets néfastes sur les propriétés mécaniques du sol, et qu'il faut donc procéder avec précaution. [92]

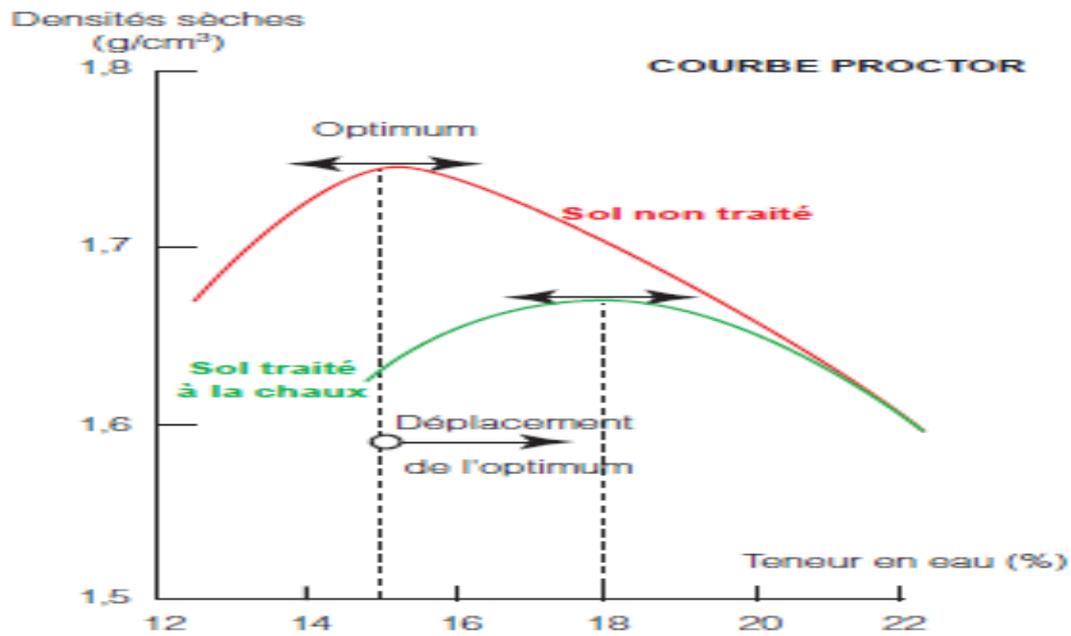
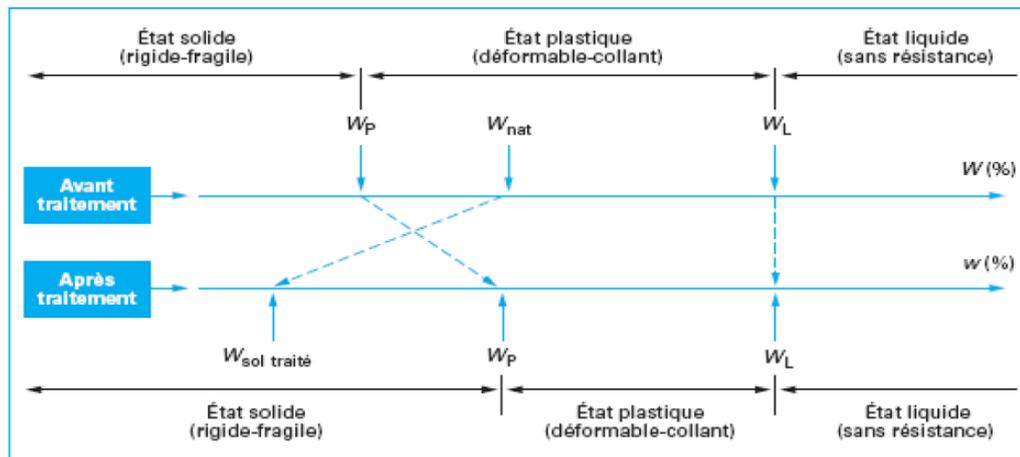


Figure III.3 influences de traitement à la chaux sur les caractéristiques d'un sol [91]

L'ajout de chaux à un sol peut entraîner des modifications importantes de ses propriétés géotechniques. La chaux agit comme un flocculant, provoquant l'agglutination des particules d'argile, ce qui peut améliorer la stabilité et la résistance du sol. En particulier, l'ajout de chaux peut entraîner une diminution de l'indice de plasticité, une augmentation de l'indice de portance immédiate, une diminution de la densité Proctor optimale et une augmentation de la teneur en eau optimale.

Ces changements transforment finalement le sol d'un état plastique à un état solide, ce qui le rend plus adapté à une large gamme d'applications de construction.



**Figure III.4.** Modification immédiate du comportement d'un sol argileux humide provoqué par l'introduction de chaux vive [91]

Altération à long terme du sol par l'ajout de chaux : La base forte qu'est la chaux augmente le pH du sol. Ce pH élevé favorise l'agression des constituants du sol. (Silice et alumine). Lorsque ces substances sont en solution, elles réagissent avec le calcium du sol pour créer des aluminates de calcium hydratés, des silicates et des silicoaluminates de calcium hydratés, qui servent de liant en se cristallisant entre les grains du sol. (réaction pouzzolanique). Des mois, voire des années, peuvent s'écouler avant que cette réaction ne s'arrête. [92]

### III.5. Avantages du retraitement en place

Le traitement des sols en place à la chaux, au ciment ou au liant hydraulique routier (LHR) présente trois types d'avantages différents : techniques, économiques et écologiques/environnementaux :

- Avantages techniques : Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, stable et durable, qui détient des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. De plus, grâce à la rigidité du nouveau matériau, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support. Généralement, elle assure un bon comportement par temps chaud. Il n'y a ni déformation, ni orniéage et la structure se comporte bien vis-à-vis des cycles de gel-dégel, grâce à sa rigidité et à l'effet de dalle induit. Enfin, ce type de traitement est une technique dont la facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation reste des plus faciles ;
- Le traitement des sols in situ à la chaux et/ou au liant routier hydraulique présente des avantages technologiques significatifs. Il produit une couche uniforme, solide et durable dont les propriétés mécaniques s'apparentent à celles du ciment ou du gravier hydraulique. En outre, la rigidité du nouveau matériau garantit une répartition optimale des charges sur le substrat, ce qui réduit les risques de déformation et d'orniéage. L'effet de dalle généré par cette méthode permet également de l'appliquer aux cycles de gel-dégel. Enfin, les contraintes d'exploitation sont simples à adapter ;

- Le retraitement en place est économiquement avantageux pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cette technique utilise peu d'énergie car elle ne nécessite pas de chauffer les matériaux, contrairement à d'autres techniques de traitement des sols. Ensuite, la réutilisation des matériaux en place permet de minimiser les coûts associés au transport et à la mise en décharge des déblais, ainsi qu'à l'apport de nouveaux matériaux de construction ;
- De plus, l'absence de transport de granulats et de déblais en décharge contribue à réduire l'impact environnemental du chantier et à préserver le réseau routier environnant. Enfin, cette technique est souvent moins coûteuse et plus rapide que d'autres méthodes qui impliquent un décaissement complet des matériaux en place, ce qui peut réduire considérablement les coûts et les délais de construction ;
- Le retraitement en place est une technique économiquement viable qui permet de réduire les coûts et les délais de construction tout en minimisant l'impact environnemental du chantier. [91]

Avantages écologiques / environnementaux : Le traitement des sols en place à la chaux et/ou au liant hydraulique permet de réduire les quantités de matériaux évacués et de granulats nécessaires pour la réfection de chaussées ou la construction de nouvelles routes, ce qui a un impact positif sur l'environnement. En outre, en réutilisant les matériaux existants sur place, cette technique contribue à réduire la consommation d'énergie nécessaire pour extraire, transporter et traiter de nouveaux matériaux. Elle limite également les nuisances liées au transport routier de matériaux et la pollution atmosphérique qui en découle. Enfin, cette technique permet de réduire les coûts liés à la gestion des déchets et des matériaux excavés, en évitant leur transport et leur mise en décharge. [91]

### III.6. Technique de traitement et Matériels d'exécution

L'exécution des traitements de sols nécessite une série d'opérations et l'utilisation de matériels spécifiques adaptés aux caractéristiques du sol et aux objectifs du traitement. Les principales étapes sont

- Préparation du terrain : cette étape consiste à préparer le sol en enlevant la végétation, les souches, les pierres et les débris qui peuvent nuire à la qualité du traitement. Les zones dégradées ou instables doivent également être identifiées et traitées avant la mise en place du traitement ;
- Dosage des liants : le dosage des liants (chaux, ciment, liants hydrauliques) doit être adapté aux caractéristiques du sol et aux objectifs du traitement. Un dosage incorrect peut conduire à une perte d'efficacité du traitement ou à une dégradation de la qualité du sol ;
- Mise en place du liant : la mise en place du liant se fait généralement à l'aide de machines spécifiques, telles que des épandeurs, des malaxeurs ou des pulvérisateurs. Il est important de bien répartir le liant sur l'ensemble de la surface à traiter pour obtenir une couche homogène ;

- Malaxage : le malaxage permet de mélanger le liant avec le sol et d'obtenir une couche homogène. Cette opération est réalisée à l'aide de machines spécifiques, telles que des fraiseuses ou des rotavators, qui mélangent le sol et le liant à une profondeur définie en fonction des objectifs du traitement ;
- Compactage : le compactage permet d'augmenter la densité du sol traité et d'assurer sa stabilité. Cette opération est réalisée à l'aide de rouleaux compresseurs, qui doivent être adaptés aux caractéristiques du sol et à l'épaisseur de la couche traitée ;
- Contrôle qualité : tout au long du processus, il est important de contrôler la qualité du traitement en effectuant des tests de laboratoire et en mesurant les caractéristiques mécaniques du sol traité sur le terrain.

Les matériels d'exécution sont donc des machines spécifiques adaptées à chaque étape de la réalisation du traitement de sol. Les épandeurs, malaxeurs, pulvérisateurs, fraiseuses, rotavators et rouleaux compresseurs sont les principaux matériels utilisés pour la mise en œuvre du traitement. Il est important de bien choisir les matériels en fonction des caractéristiques du sol à traiter et des objectifs du traitement pour obtenir un résultat optimal

### **III.6.1. Principales opérations de traitement**

Les méthodes fondamentales de traitement des sols existants comprennent généralement les étapes suivantes : préparation du sol à traiter (enlèvement des blocs, homogénéisation, humidification si nécessaire) ; épandage du liant de traitement ; mélange du liant avec le sol ; ajustement de la teneur en eau (soit en humidifiant le sol par pulvérisation, soit en l'asséchant par aération) ; ajustement du mélange ; compactage ; application d'une protection de surface sur le sol traité (dans le cas d'une couche de fondation).

### **III.6.2. Exécution des travaux**

La réalisation des travaux de traitement de sols est une opération complexe qui nécessite une préparation minutieuse du sol avant le malaxage avec le liant. Tout d'abord, le sol doit être ouvert à l'aide d'un scarificateur ou d'un ripper pour faciliter le malaxage ultérieur. Ensuite, l'état hydrique du sol doit être ajusté en fonction de la teneur en eau optimale nécessaire pour obtenir une densité maximale après compactage du mélange sol-liant. Le sol peut être asséché par brassage mécanique ou humidifié avec une arroseuse.

Le liant doit être appliqué avec précision, idéalement à l'aide d'épandeurs volumétriques dont la production est gérée par la vitesse du transporteur. La pose de bâches sur la surface de la plate-forme

traitée et leur pesée immédiatement après le passage de l'épandeur avec le liant de traitement permet de déterminer la régularité de l'épandage.

Des machines performantes, telles qu'un pulvérisateur à arbre horizontal, doivent être utilisées pour le mélange en place de la terre et du liant afin d'homogénéiser le mélange jusqu'à une épaisseur raisonnablement élevée, comprise entre 30 et 40 cm. Pour éviter de laisser une substance surmenée exposée aux intempéries, un compactage partiel doit être effectué juste après le mélange. En fonction de la couche concernée, le compactage partiel doit fournir entre 70 et 80 % de l'énergie nécessaire pour obtenir la qualité de compactage souhaitée.

La largeur totale à ajuster doit être rabotée pour l'ajustement final ; en aucun cas les points bas ne doivent être remplis avec le matériau restant après le bouchage des bosses. Un évaluateur est généralement utilisé à cet effet. Il est nécessaire d'éliminer les débris liés au rabotage. L'épaisseur à raboter doit être prise en compte lors du processus de traitement afin de s'assurer que le matériau traité a une épaisseur suffisante. (environ 3 cm).

Afin de fournir l'énergie supplémentaire nécessaire pour obtenir la qualité de compactage souhaitée pour la couche en question, le compactage final doit être effectué immédiatement après le réglage final et avant que la "période d'ouvrabilité" du mélange sol-liant n'expire. Pour éviter la déshydratation ou l'humidification supplémentaire due à l'environnement, il faut appliquer une protection de surface à toutes les couches de forme traitées. En appliquant une couche d'émulsion et, si nécessaire, en procédant à un sablage, cette protection de surface peut être réalisée en tant que couche de cure. [93]

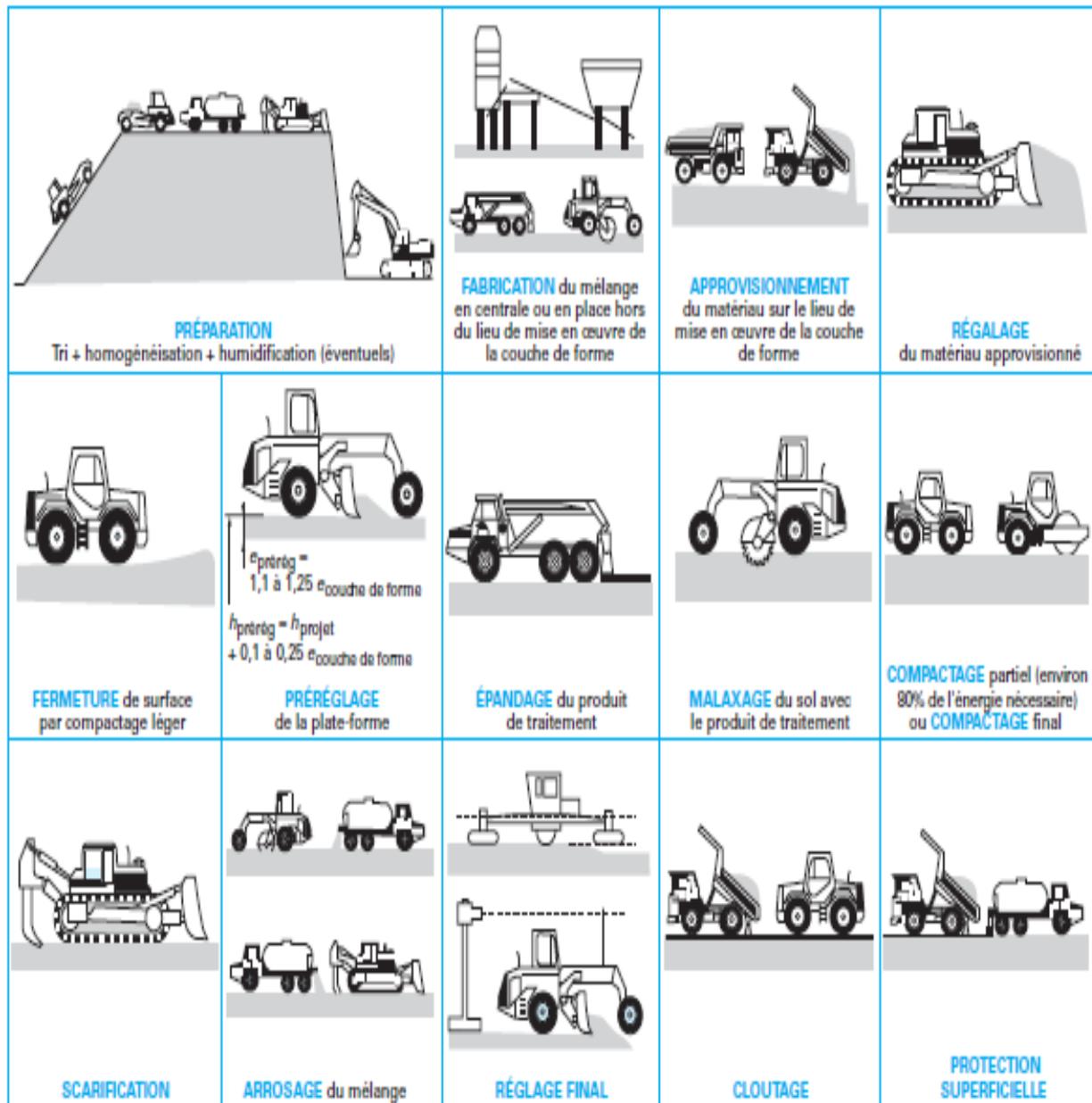


Figure III.5. Opérations élémentaires intervenant dans l'exécution d'une couche de forme en sol traité [90]

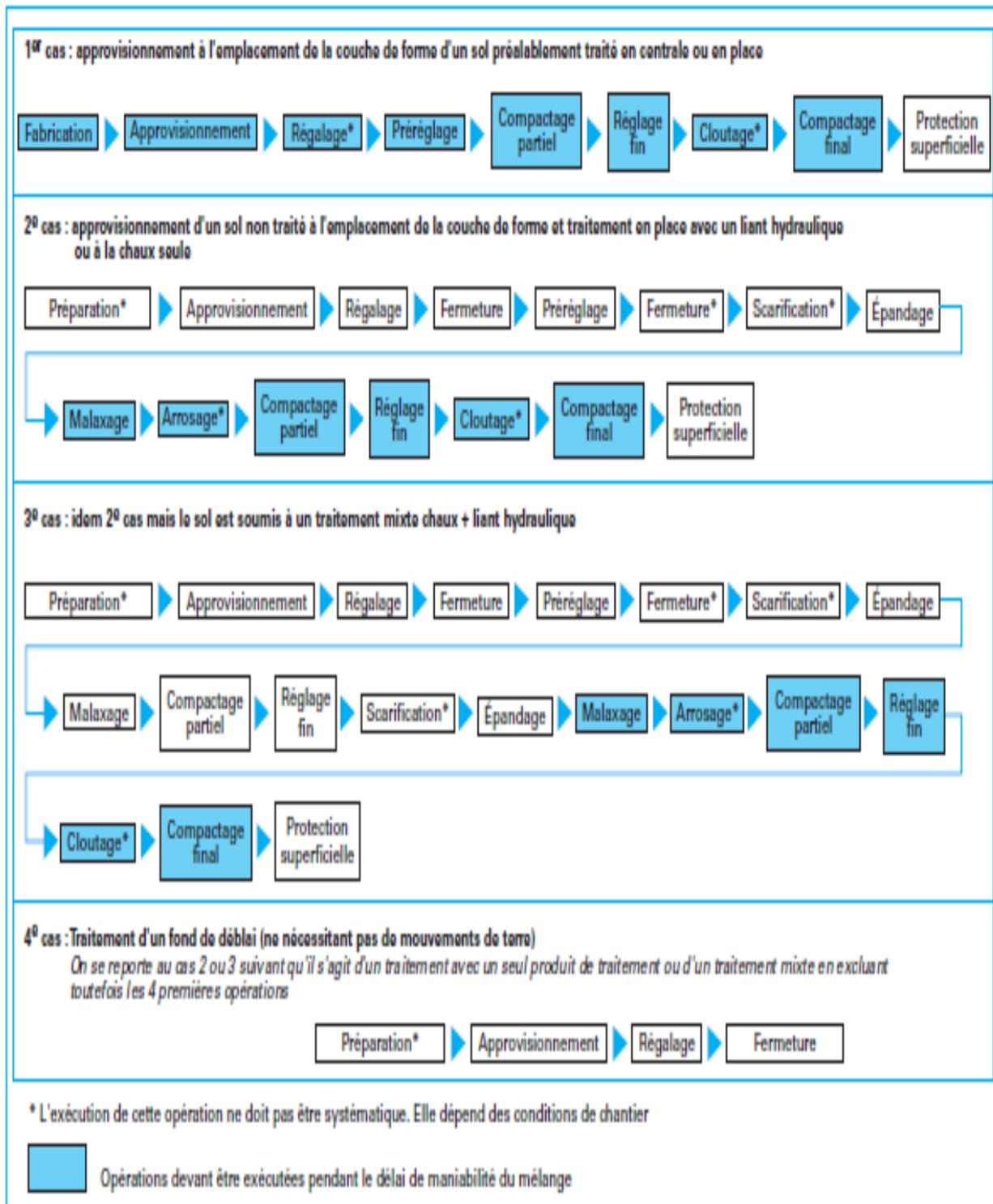


Figure III.6. Ordonnancement des opérations pour quatre cas de chantiers types [90]

### III.6.3. Matériels d'exécution

Le traitement des terres est une technique de génie civil utilisée pour améliorer les propriétés des sols en vue de leur utilisation dans la construction d'infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires et de bâtiments.

Il existe deux types de méthodes de traitement des sols :

La chaux et/ou les liants hydrauliques sont mélangés in situ avec le sol pour agir comme un agent nettoyant. Le mélange dans une installation de mélange du sol et de la substance de traitement. Les avantages et les inconvénients de ces deux techniques varient. Le malaxage en place est utilisé lorsque le sol est peu profond et qu'une profondeur de traitement limitée est requise. Cette méthode permet également une économie de temps et de matériel et évite les problèmes de transport des sols. Cependant, elle nécessite un contrôle rigoureux du dosage et de l'homogénéité de l'agent de traitement dans le sol.

Le malaxage en centrale, quant à lui, est utilisé pour les profondeurs de traitement importantes et pour une meilleure homogénéité de l'agent de traitement dans le sol. Cette méthode est également plus appropriée pour le traitement des matériaux de couche de fondation et de forme de type PF4, mais elle nécessite un transport des matériaux et une installation de malaxage. [87]

- **Matériels de stockage**

Les silos mobiles sont généralement équipés de dispositifs de pesage et de dosage pour permettre la production des mélanges à partir des différentes matières premières. Ils sont également équipés de systèmes de transfert pour alimenter les machines de traitement sur chantier.

Les silos fixes sont installés en centrale et sont équipés de dispositifs de dosage, de mélange et de stockage pour permettre la production des mélanges à grande échelle. Ils sont également équipés de systèmes de transfert pour alimenter les camions de transport en vrac.

Les silos de stockage sont généralement équipés de systèmes de surveillance de niveau pour permettre le contrôle de la quantité de produit disponible en temps réel. Des systèmes de ventilation peuvent également être installés pour prévenir l'accumulation de poussière et d'humidité dans les silos.

Il est important de prendre en compte les propriétés physiques et chimiques des produits stockés ainsi que les conditions environnementales du chantier ou de la centrale pour choisir le type de silo et les équipements nécessaires.



**Figure III.7.** Traitement en centrale : installation fixe et traitement en place

### • Épandeurs

Les épandeurs sont des engins utilisés pour répandre les produits de traitement sur la chaussée. Selon leur génération, ils fonctionnent différemment.

Les épandeurs de première génération étaient équipés de doseurs volumétriques, ce qui signifie que la quantité de produit répandu était déterminée par le volume du doseur. Les épandeurs de deuxième génération étaient également équipés de doseurs volumétriques, mais ils étaient asservis à la vitesse de déplacement de l'engin. Cela permettait de maintenir une quantité de produit répandu constante, même si la vitesse de l'engin variait.

Les épandeurs de dernière génération disposent en plus de dispositifs pondéraux qui permettent d'ajuster avec précision les quantités de liant répandues. Ces dispositifs mesurent le poids du produit répandu en temps réel et ajustent automatiquement la quantité de produit répandue en fonction de la vitesse de l'engin. Cela permet une application plus précise et plus homogène du produit sur la chaussée [90]



Figure III.8. Epandeur à liants

### • Malaxeurs

Les malaxeurs sont des équipements utilisés pour mélanger les matériaux de construction. Il existe différents types de malaxeurs tels que les rotobèches, les malaxeurs à outils fixes ou animés et les centrales de malaxage.

- Les rotobèches sont des engins adaptés au domaine du génie civil et issus du domaine agricole. Les malaxeurs à outils fixes sont utilisés pour le traitement des sols avec de la chaux vive dans les corps de remblais, hors des zones spécifiques. Ils peuvent être des charrues à disques, à socs ou des engins à lames ;
- Les malaxeurs à outils animés sont équipés d'outils d'attaque au sol et sont de différentes générations. Les malaxeurs de première génération ont une chambre de malaxage à l'arrière, tandis que ceux des générations suivantes ont une chambre de malaxage située entre les trains avant et arrière. Les dernières générations d'appareils ont des améliorations telles que la profondeur de

malaxage, la puissance des engins et les outils d'attaque au sol. Certains malaxeurs ont également un système d'injection d'eau et un système de guidage GPS.

Les centrales de malaxage sont recommandées pour le malaxage des matériaux des couches de fondation et des couches de forme de type PF4. Elles peuvent également être utilisées pour le malaxage des matériaux de couche de forme de type PF3. [90]



**Figure III.9.** Matériels de malaxage

- **Arroseuses**

Les arroseuses sont des équipements utilisés pour humidifier les matériaux traités pendant les opérations de traitement de sol. Il existe différents types d'arroseuses : les arroseuses gravitaires, à pression ou à pompe, ainsi que les arroseuses enfouisseuses. Les arroseuses gravitaires fonctionnent par gravité et sont adaptées pour les petits chantiers. Les arroseuses à pression ou à pompe sont plus performantes et adaptées pour les chantiers de plus grande envergure. L'ajout contrôlé d'eau en profondeur est rendu possible par les pulvérisateurs d'enfouissement, qui augmentent la cinétique et l'homogénéité de l'hydratation du matériau et réduisent les pertes d'eau. Certains malaxeurs peuvent combiner deux processus en un seul en ayant une barre d'injection attachée à un camion-citerne qui se déplace avec le malaxeur. [87]



**Figure III.10** Arroseur enfouisseur avec citerne attelée sur tracteur et arroseuse

- **Compacteurs**

Les différentes familles de compacteurs existantes sont :

- Les compacteurs à pneus, qui sont adaptés aux sols cohérents ou semi-cohérents. Ils exercent une pression uniforme sur toute la surface, réduisant ainsi la formation de cavités ;
- Les compacteurs vibrants à cylindres lisses, qui sont utilisés pour les sols granulaires et semi-cohérents. Les vibrations verticales du cylindre permettent de tasser les particules en profondeur ;
- Les compacteurs vibrants à pieds dameurs, qui sont également adaptés aux sols granulaires et semi-cohérents. Ils sont équipés de plusieurs pieds qui exercent des pressions importantes sur une petite surface, tassant ainsi les particules en profondeur ;
- Les compacteurs statiques à pieds dameurs, qui sont utilisés pour les sols cohérents. Ils exercent une pression élevée sur une petite surface, créant ainsi une forte densité dans le sol ;
- Les plaques vibrantes, qui sont utilisées pour les travaux de finition sur les sols granulaires et semi-cohérents. Les vibrations horizontales de la plaque permettent de compacter la surface du sol.

Le choix de l'ensemble de l'atelier de traitement dépendra donc de la nature des sols à traiter et des produits de traitement utilisés [92]



Figure III.10. Compacteurs

### III.7. Retraitement en place des chaussées aux liants hydrauliques

Utilisation de liants hydrauliques pour le recyclage de chaussées in situ une méthode de régénération d'une structure homogène adaptée au trafic à supporter à partir d'une chaussée dégradée

utilise du ciment ou des liants hydrauliques routiers lors du recyclage de chaussées à froid en place. Il s'agit de mélanger in situ un ciment ou un liant routier hydraulique, ainsi qu'éventuellement un correcteur granulométrique et de l'eau, au matériau issu de l'arrachage de l'ancienne chaussée jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène. Si le matériau recyclé ne peut supporter à lui seul les contraintes du trafic, d'autres couches de chaussée sont appliquées sur la base de la nouvelle chaussée après réglage et compactage. [94]

Tableau III.2. Les matériels de traitement en place [94]

Opérations	But /moyen	Matériel
<b>Défonçage</b>	Décohésionne l'ancienne chaussée	-Chargeur avec défonneur -Bouteur avec défonneur
<b>Remise au profil</b>	Répartition uniforme des matériaux	Niveleuse
<b>Correction granulaire</b>	Apport de matériaux	-Répondeur -finisseur niveleuse
	Concassage	-Raboteuse -concasseur en place ou mobile
	Écrêtage	A la main -matériel agricole
<b>épardage liant</b>	Chaux : annihiler argiles Ciment ou LHR : résistance à long terme	-Manuel (au sac) - épandage à LHR
<b>humidification</b>	Obtention de la teneur en eau optimale Proctor	-rampe à eau avant traitement -pulvérisation de l'eau dans le malaxeur
<b>Malaxage</b>	Homogénéise le matériau	Rotobêche –pulvimixeurs à arbre horizontal-ateliers de reconditionnement
<b>Pré-fissuration</b>	Organiser et maîtriser la fissuration des matériaux	Matériel spécifique de pré fissuration
<b>Réglage</b>	Obtention cote définitive	Niveleuse ou autograde
<b>Compactage</b>	Obtention de la densité	Liste d'aptitude DRCR
<b>Couche de protection ou couche de surface</b>	Protection des assises traitées	Matériels courants

### III.8. Conclusion

Il existe plusieurs types de liants utilisés dans le traitement des sols, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients. Les liants peuvent être classés en deux catégories principales : les liants hydrauliques et les liants non hydrauliques.

Les liants hydrauliques, tels que le ciment et la chaux, durcissent lorsqu'ils sont exposés à l'eau, ce qui les rend particulièrement adaptés aux sols humides ou instables. Les liants non hydrauliques, tels que les polymères, les émulsions et les bitumes, durcissent grâce à des processus chimiques ou physiques, ce qui les rend adaptés aux sols secs ou modérément humides.

La technique de traitement des sols peut également varier considérablement en fonction de la nature des sols à traiter, des produits de traitement utilisés et des exigences du projet. Cependant, certaines techniques courantes comprennent l'ajout de liants, la stabilisation mécanique, la stabilisation chimique.

L'ajout de liants est une technique courante pour améliorer la résistance et la durabilité des sols. La stabilisation mécanique implique l'utilisation de techniques telles que le compactage pour renforcer les sols. La stabilisation chimique implique l'utilisation de produits chimiques pour renforcer les sols, tandis que la vitrification implique la fusion des sols avec des additifs pour créer un matériau solide et durable.

Le choix de la technique de traitement dépendra de la nature des sols à traiter, des produits de traitement utilisés et des exigences du projet. Le choix d'une technique appropriée peut aider à améliorer la résistance, la durabilité et la stabilité des sols, ce qui peut avoir des avantages à long terme pour l'environnement et la santé humaine.

# Chapitre IV

## Caractérisation des stériles miniers

---

### IV.1. Introduction

Tout à fait, la réutilisation des stériles de la mine de Kef-Essenoun dans la construction de routes peut offrir de nombreux avantages environnementaux et économiques, en réduisant la quantité de déchets à stocker et en utilisant des matériaux locaux et disponibles. Cependant, il est important de mener une étude approfondie pour s'assurer de leur aptitude à l'utilisation dans la construction de chaussées. Cette étude doit inclure une caractérisation complète des stériles pour évaluer leur composition chimique et minéralogique, leurs propriétés mécaniques et leur aptitude à la compaction et à la stabilité.

En outre, il est important de prendre en compte les exigences réglementaires et les normes en matière de construction routière pour garantir la sécurité des usagers de la route. Si les résultats de l'étude expérimentale sont positifs, la réutilisation des stériles de la mine de Kef-Essenoun peut être une solution durable pour la gestion des déchets miniers et la construction de routes en Algérie.

### IV.2. Zone de prélèvement des stériles minières type calcaire phosphaté et calcaire (DJEBEL EL-ONK).

Les stériles de la mine de Kef- Essenoun sont constitués de terres et de roches excavées lors des opérations minières après récupération de la partie commercialement exploitable (**Figure IV.1**). Ces stériles sont déchargés et accumulés en énormes quantités. Entre 2006 et 2017, les quantités estimées de stériles produits sont d'environ 5,5 à 18,5 Mt/an. Ces quantités augmenteront à plus de 18 Mt/an dans le futur (**Figure IV.2**). Ces quantités de déchets sont des ressources importantes dans le domaine de la construction de chaussées. La réutilisation des

résidus miniers pour les couches d'infrastructure et de fondation est une approche relativement nouvelle en Algérie. Le manque de connaissances fondamentales sur leur comportement limite leur réutilisation. Par conséquent, et afin d'examiner les différents aspects concernant la possibilité d'utiliser ces déchets miniers en ingénierie routière, une caractérisation complète est nécessaire.



Figure IV.1. Déchets de mines de phosphate à proximité du site minier de Kef- Essenoun

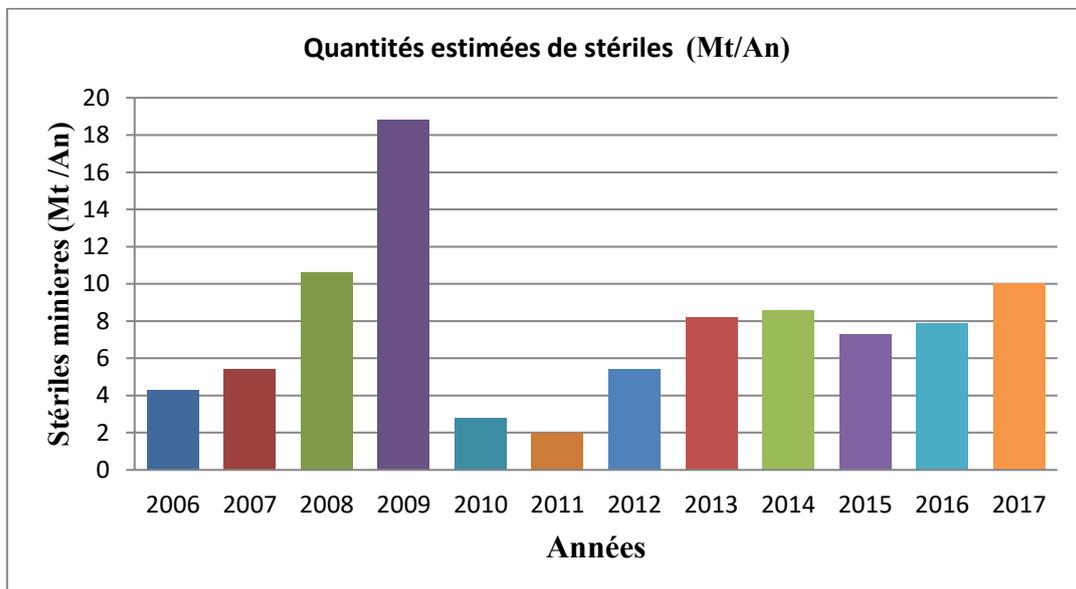


Figure IV.2. Quantités estimées de stériles générés par Kef-Essenoun (CERAD 2017). [95]

Le but de cette étude expérimentale est de faire une caractérisation géotechnique des deux matériaux miniers recyclés de Kef-Essenoun. Dans cette recherche, les matériaux étudiés sont le calcaire phosphaté (type 1) et le calcaire (type 2) (**Figure IV.3**)



**Figure IV.3.** Résidus de la mine de Kef Essenoun : (a) calcaire phosphaté, (b) calcaire.

### **IV.3. Méthodes et matériels d'échantillonnage**

Les méthodes d'échantillonnage peuvent être divisées en trois catégories :

- Une profondeur inférieure à un mètre est utilisée pour l'échantillonnage à faible profondeur. Il nécessite l'utilisation de méthodes simples et d'outils facilement accessibles et transportables. La collecte d'échantillons est rapide. (à l'aide d'une pelle et d'une truelle ; d'une tarière à main ; de tubes de prélèvement de sol) ;
- Une excavation permettant de prélever des échantillons à des profondeurs allant jusqu'à 7 mètres est une tranchée ou un puits d'exploration. En fonction de la profondeur souhaitée, cette technique d'échantillonnage nécessite l'utilisation d'une excavatrice (pépine) ou d'une pelle hydraulique ;
- L'utilisation d'échantillonneurs et d'outils de forage appropriés est nécessaire pour l'échantillonnage du sol à partir d'un trou de forage. Par rapport à ce qui peut être réalisé avec les techniques ci-dessus, des échantillons de sol plus profonds peuvent maintenant être prélevés à l'aide de trous de forage. En outre, cette approche présente l'avantage d'être moins dérangeante que l'échantillonnage en tunnel. (nécessite l'utilisation d'une tarière, d'une foreuse rotative, d'une foreuse à câble). Différents types d'échantillonneurs ont été créés pour prélever des échantillons de

sol à partir de différents équipements de forage. Dans les dépôts non consolidés, les deux types d'échantillonneurs les plus populaires sont le carottier fendu et le tube à paroi mince. Dans certaines situations, des tubes de carottage ou d'autres échantillonneurs plus spécialisés peuvent également être utilisés ;

- Il est essentiel d'utiliser les échantillonneurs et le matériel de creusement appropriés pour prélever des échantillons de terre à partir d'un trou de forage. Des profondeurs plus importantes que celles atteintes par les méthodes susmentionnées peuvent être atteintes en utilisant des trous de forage pour collecter des échantillons de sol. En outre, cette méthode présente l'avantage d'être moins intrusive que l'échantillonnage en tranchée. (nécessite l'utilisation d'une tarière, d'une foreuse rotative, d'une foreuse à câble). Différents types d'échantillonneurs ont été créés pour prélever des échantillons de sol à partir de divers types d'équipements de forage. Le carottier fendu et le tube à paroi mince sont les deux types d'échantillonneurs les plus fréquemment utilisés dans les sols non consolidés. Des tubes de carottage ou d'autres échantillonneurs plus spécialisés peuvent également être utilisés dans certaines situations. [96]

Tableau IV.1. Principaux types d'échantillonneurs de sols. [96]

Matériel	Application générale	Avantage et inconvénients
<b>Pelle et truelle</b>	Sol de faible profondeur (0-1m) ou dans une tranchée	Simple à utiliser. très facilement disponible .prélèvement d'un échantillon Romanie.
<b>Tarière manuelle</b>	Sol de faible profondeur (0-1m)	Simple à utiliser. Prélèvement d'échantillons remaniés. Peut s'appliquer aux sols rocailloux ou compacts.
<b>Tube d'échantillonnage</b>	Sol de faible profondeur (0-0.5m) ou dans une tranchée	Simple à utiliser peu coûteux .faible remaniement du sol (souhaitable pour des composés volatils) .volume restreint de sol. difficile à utiliser dans les sols compacts ou rocailloux.
<b>Carottier fendu</b>	utilisés fréquemment avec des outils de forage (0m-roc).	Seulement un léger remaniement de l'échantillon. permet l'utilisation de manchons pour protéger la pureté des échantillons. Durable. Convient à une utilisation dans des sols compacts. Permet un échantillonnage continu.
<b>Tube à paroi mince (shelby)</b>	Sols argileux et silteux (0m-roc). utilisés fréquemment avec des outils de forage	l'échantillonnage de matériaux non remanie. peut être utilisé pour se rendre à l'installation sans transport supplémentaire. Permet un échantillonnage continu.ne peut pas être utilisé sur des sols rocailloux
<b>Tube carottier de tarières creuses</b>	sol argileux et silteux (0m-roc). utilisé avec un outil à tarière creuse.	permet un échantillonnage constant des sols argileux et silteux, mais ne convient pas aux sols rocailloux.
<b>Tube carottier pour foreuses rotatives</b>	Roche et sol A utiliser uniquement avec une foreuse rotative.	permet d'échantillonner des structures de sol avec des blocs. permet un échantillonnage continu Le matériau peut être modifié par les fluides de forage. Les carottiers à triple paroi peuvent atténuer ce problème.

À l'aide d'une pelle et d'une main, des échantillons ont été prélevés dans la zone de recherche (Figure IV.4)



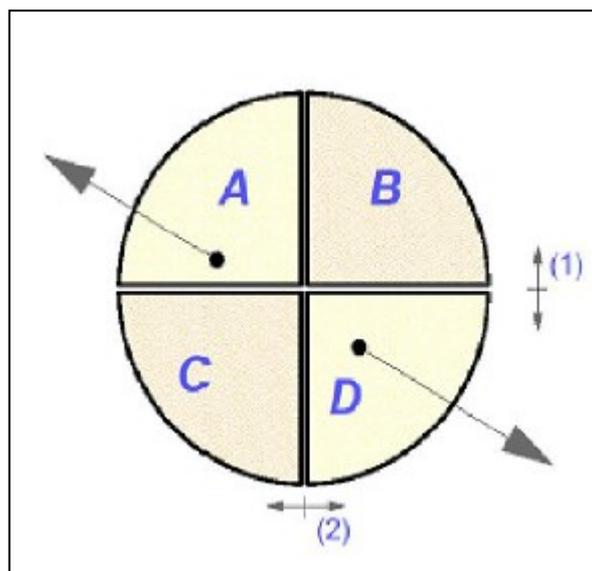
Figure IV.4. Photo montrant la zone de prélèvement (gisement de Kef-Esnoun -Google Earth)

### IV.3.1. Préparation de l'échantillon

Une quantité plus petite  $q$  doit être utilisée pour le test en laboratoire. Comment diviser ce nombre,  $q$ , qui représente  $Q$  ? Le découpage en quartiers et l'utilisation d'un échantillonnage sont deux techniques simples et largement efficaces. Le matériau du site est tamisé une fois qu'il a été déterminé qu'il est desséché. Pour éliminer les gros graviers, le matériau est essentiellement passé au travers d'un tamis de 20 mm, et seul le matériau passable est ensuite conservé pour l'échantillonnage.

#### 4.3.1.1 Le quartage

L'échantillon est divisé en quarts, comme le terme l'indique. Étaler l'échantillon bien homogénéisé dans un plateau métallique à bords bas, si possible. Diviser l'échantillon en deux moitiés égales (1) puis en quatre quarts approximativement égaux (2) à l'aide d'une truelle (2). La moitié de l'échantillon initial est obtenue en éliminant les fractions A et D et en réunissant les fractions B et C opposées polairement. (Figure IV.5)



**Figure IV.5.** Représentatif du quartage.

#### IV.3.1.2. Emploi d'échantillonneur

Cet outil de laboratoire permet de diviser facilement l'échantillon initial complet en deux parties représentatives. Les diviseurs transversaux créent une série d'entonnoirs dont les ouvertures sont orientées dans des directions différentes. À l'aide d'une pelle spéciale, la substance à examiner est versée dans l'échantillonneur et recueillie dans deux minuscules bacs. Chaque moitié, qui sert de représentation de l'ensemble, peut être divisée en deux autres groupes de deux, et ainsi de suite.

### IV.4. Classification des sols selon LPC modifié (1974/1980)

La classification LPC modifié (1974/1980) permet de classer les sols en vingt-deux types différents, en fonction de leur texture et de leur teneur en matière organique. Les sols grenus, tels que Gb, Gm, GA, GL, Sb, Sm, SA, et SL, ont une texture grossière et une teneur en matière organique inférieure à 10 %. Les sols fins, tels que At, Ap, Lt, et Lp, ont une texture fine et une teneur en matière organique inférieure à 10 %. Les sols faiblement organiques, tels que fo-At, fo-ap, fo-Lt, et fo-Lp, ont une teneur en matière organique comprise entre 10 % et 20 %. Les sols moyennement organiques, tels que mo-a, mo-sf, et mo-f, ont une teneur en matière organique comprise entre 20 % et 30 %. Les sols très organiques, tels que to-a, to-sf, et to-f, ont une teneur en matière organique supérieure à 30 %.

Les symboles utilisés pour les sols dans le système de classification LPC/USCS sont les mêmes pour les sols grossiers et les sols fins. Les lettres "a", "sf" et "f" sont utilisées pour indiquer la teneur en matière organique. La lettre "a" est utilisée pour indiquer la présence de matière organique amorphe, "sf" pour la matière organique semi-fibreuse et "f" pour la matière organique fibreuse.

Il convient de noter que les modifications apportées à la classification LPC/USCS ne concernent que la description des sols organiques, et en particulier ceux dont la concentration en matière organique est supérieure à 3 %. En effet, le test de von Post permet de mesurer le degré d'humification des fibres organiques pour les matériaux à forte teneur en matière organique

### **IV.5. Paramètres retenus pour la classification des sols GTR 2000 (Norme NFP 11-300)**

Dans le monde entier, plusieurs systèmes de classification coexistent. Bien qu'elle soit très simpliste, la catégorisation de l'American Society for Testing and Materials (ASTM) est encore utilisée occasionnellement. Le système Réalisation des remblais et des couches de forme du Guide technique, également connu sous le nom de GTR [97], contient une classification précise et complète d'un large éventail de matériaux. Trois critères sont utilisés pour classer cette catégorie :

#### **IV.5.1. Paramètres de nature**

Elles font référence à des propriétés intrinsèques, c'est-à-dire des propriétés qui ne changent pas ou peu au fil du temps ou en raison des diverses manipulations subies par le sol au cours de son application. La granularité et la teneur en argile sont les caractéristiques qui ont été conservées [98].

#### **IV.5.2. Paramètres de comportement mécanique**

Ces paramètres ne sont pris en compte que lors de l'évaluation de l'utilisation potentielle des sols dans les couches de forme. Ils font la distinction entre les matériaux qui peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme parce que leur fraction granulaire est susceptible de survivre au trafic et ceux qui risquent de se fracturer en un sol principalement composé de particules fines, inutilisable à l'état naturel sans dispositions particulières (traitement, etc.).

Les paramètres considérés sont : les coefficients Los Angeles (LA) (Norme P 18-573) [99], et micro-Deval en présence d'eau (MDE) (Norme 18-572) [100], et le coefficient de friabilité des sables (FS) (Norme P 18-576) [101].

#### **IV.5.3. Paramètres d'état**

Il s'agit de paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais qui dépendent plutôt du milieu environnant. Le seul paramètre d'état pris en compte dans cette classification pour les sols meubles sensibles à l'eau est l'état hydrique ; sa signification est essentielle pour résoudre tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

Ces paramètres sont toujours calculés sur la fraction 0/50 mm, qui est la fraction que les études de laboratoire standard sont le plus susceptibles d'identifier. [98]

### **IV.6. Programme expérimental et procédures d'essai**

#### **IV.6.1. Essais initiaux et sélection des matériaux d'étude**

Les déchets miniers utilisés dans cette recherche ont été collectés à différents endroits des résidus empilés situés autour de la mine de Kef-Essenoun. Les déchets sont principalement constitués de calcaire phosphaté et de calcaire. Ces matériaux ont été saumurés au laboratoire pour décrire leurs propriétés minéralogiques, chimiques, physiques et mécaniques, où la procédure de test analysé, est présentée dans la **figure IV.6**.

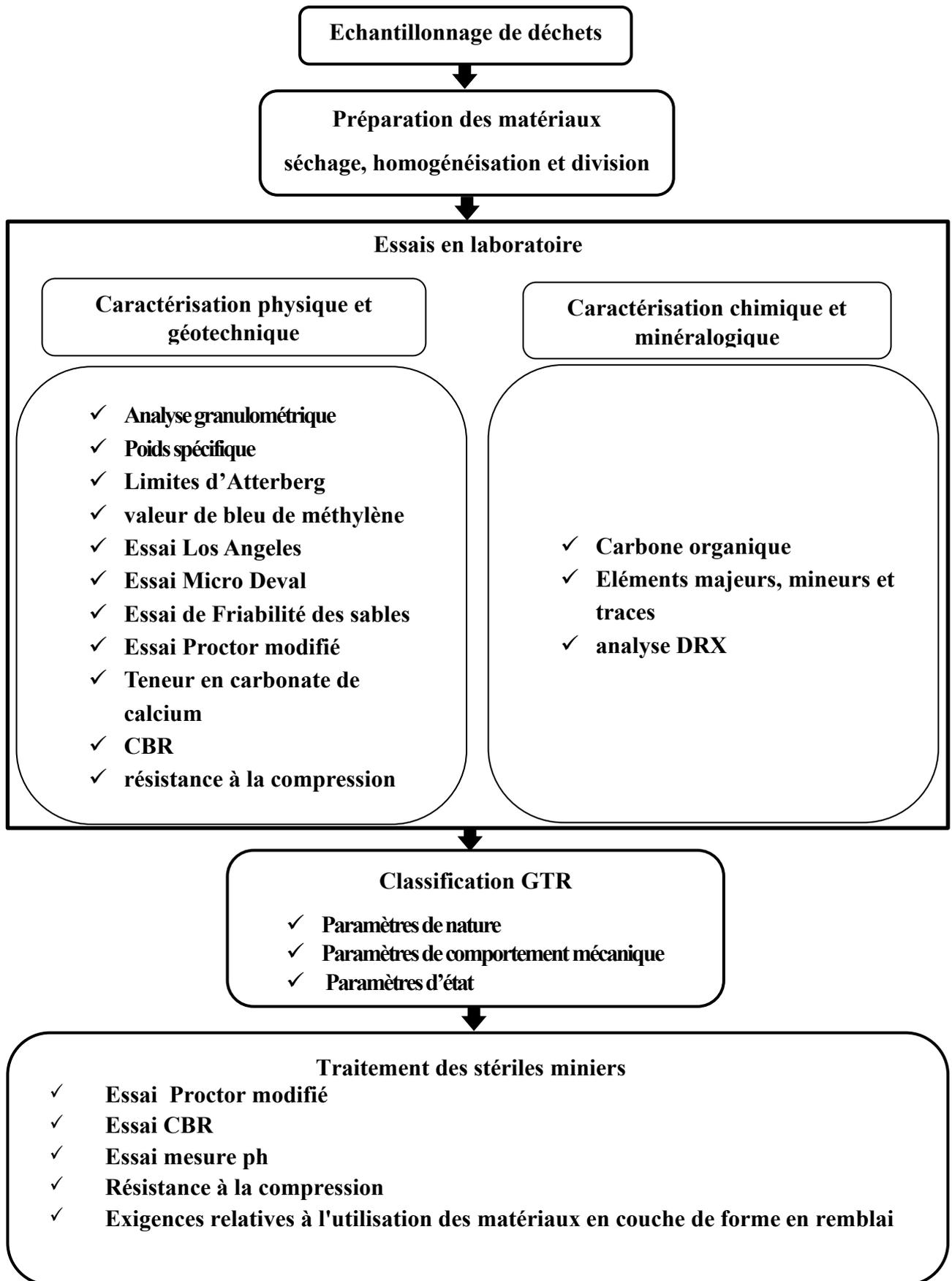


Figure IV.6. Résumé de la méthodologie suivie

### IV.6.2. Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Les analyses des éléments majeurs ont été réalisées par la société algérienne des phosphates (*SOMIPHOS*) en utilisant les méthodes analytiques suivantes : colorimétrique, gravimétrique, volumétrique, ionométrique et spectrophotométrique par spectrométrie d'absorption atomique (*AAS*). Les résidus de minerai de phosphate des phases cristallines ont été effectués par (*XRD*). Les diagrammes de diffraction ont été réalisés avec un diffractomètre PANalytical X'Pert Pro équipé d'un rayon X conventionnel (radiation Cu K, fonctionnant à 40kV et 30mA) avec une détection dans la gamme  $2\theta$  10-90°.

### IV.6.3. Paramètres physiques

Les principales caractéristiques physiques des échantillons de déchets étudiés sont reportées dans le tableau 1. Par séchage à l'étuve à 105°C (+/- 5°C), la teneur en eau initiale mesurée est d'environ 4,62% et 8,54% pour le calcaire phosphaté et le calcaire, respectivement (NF P94-050) [102], il est important de dire que lors de prélèvement de l'échantillon du site nous étions en hiver, (en mois de janvier). tandis qu'en été le teneur en eau naturelle sera presque négligeable ( $w \rightarrow 0$ ). Les paramètres physiques suivants ont été mesurés :

- a. La gravité spécifique, mesurée par la méthode du pycnomètre (NF P94-054) [103] ;
- b. L'activité de la fraction argileuse, mesurée par le test au bleu de méthylène (NF P 94-068) [104] ;
- c. Essai Limites d'Atterberg (NF P94-051) [105] ;
- d. La distribution granulométrique selon (NF P 94-056) [106] ;

L'essai consiste à faire passer un échantillon représentatif de sol à travers des tamis superposés dont les ouvertures descendent du haut de 50 mm jusqu'à 0,08 mm. **La figure IV.9** montre les courbes de distribution granulométrique des échantillons de calcaire phosphatique et de calcaire. Les échantillons ont été classés selon le système de classification modifié du LPC (1980) (**Figure IV.7 et IV.8**). Selon la courbe granulométrique, les pourcentages de galets, de gravier, de sable, de limon et d'argile dans le calcaire phosphatique et le calcaire étaient respectivement de 51%, 29%, 17,28%, 2,72%, et 27,5%, 29%, 40,23%, 3,27%. Les coefficients d'uniformité (*Cu*) et de courbure (*Cc*) obtenus

pour le calcaire phosphatique et le calcaire étaient respectivement de 69,44, 17,85, et 0,36, 4,11. D'après le système unifié de classification des sols, les deux échantillons sont classés dans la même catégorie : Graves propre mal gradué (*Gm*). La distribution granulométrique et les caractéristiques dimensionnelles des échantillons testés sont présentées dans le **tableau IV.2**.

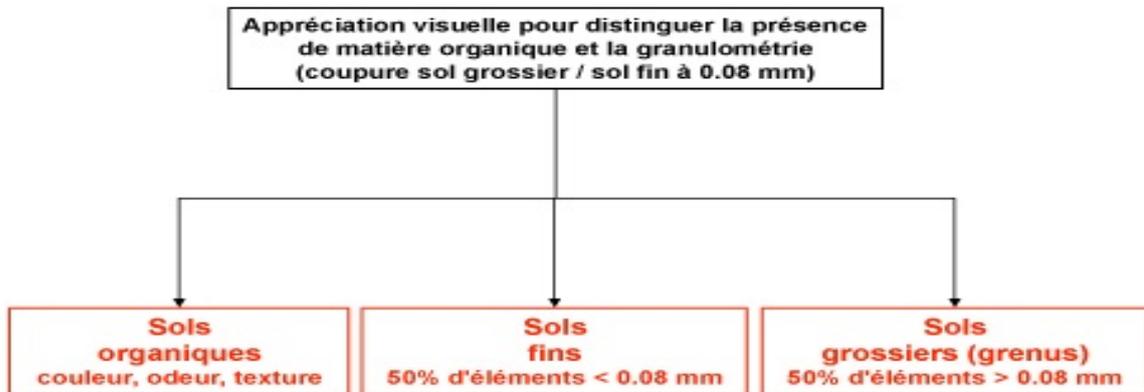


Figure IV.7. Les grandes familles de la classification LPC modifié (1974/1980).

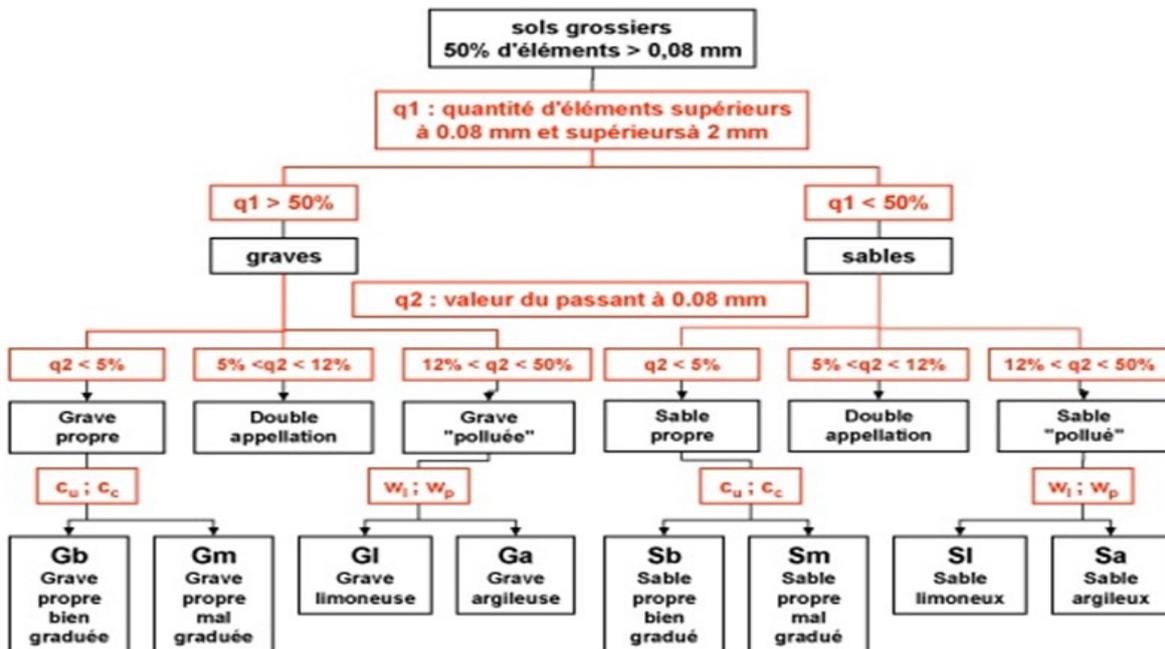


Figure IV.8. Diagramme de classification pour les sols grossiers dans la classification LPC modifié (1974/1980).

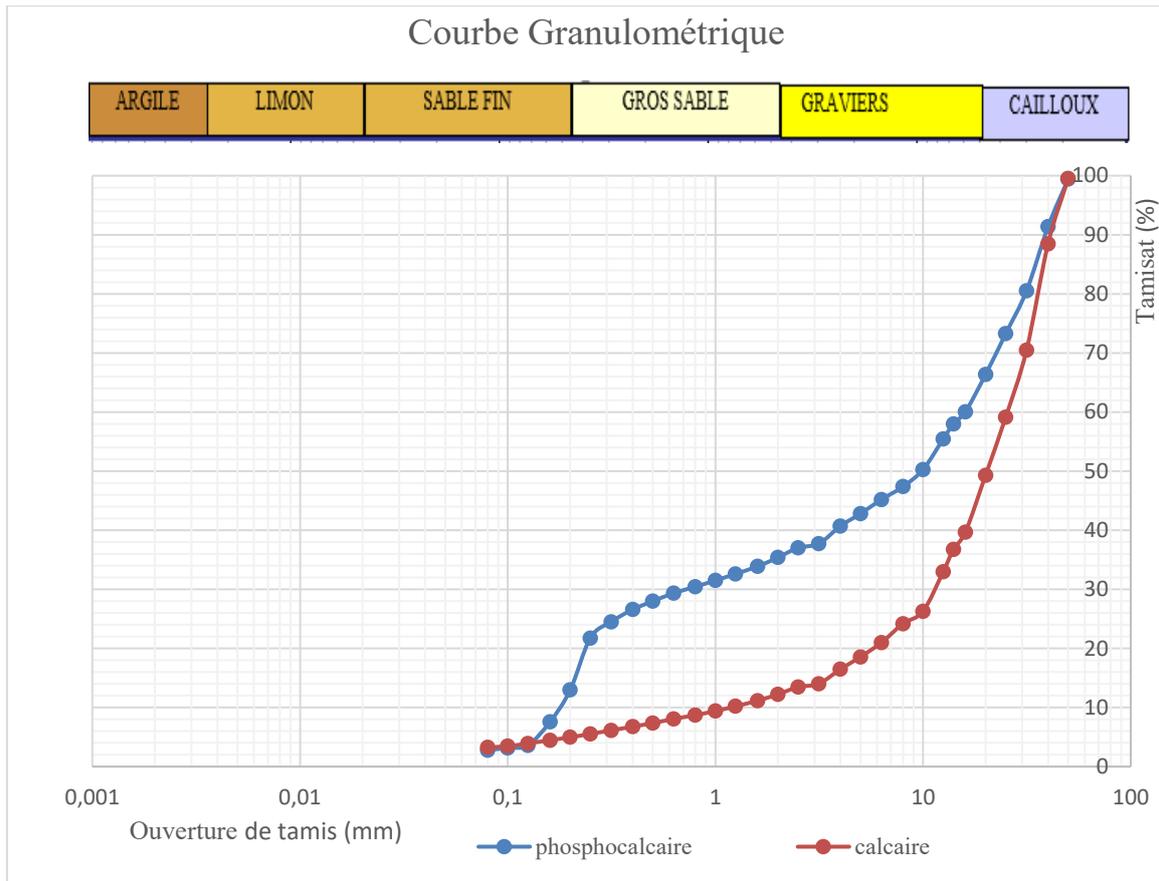


Figure IV.9. Courbes granulométriques du calcaire phosphaté et de calcaire

#### IV.6.4. Propriétés mécaniques des déchets

##### IV.6.4.1. Essai Proctor modifié

La détermination de la densité sèche maximale ( $\gamma_d^{max}$ ) et de la teneur en eau optimale ( $W_{OPT}$ ) des échantillons de déchets solides a été effectuée en réalisant des essais au proctor modifié (NF-P 94-093) [107] (Figure IV.10). Les échantillons de calcaire phosphaté et de calcaire séchés à l'étuve ont été soigneusement mélangés avec la quantité d'eau requise pour le compactage. L'échantillon mélangé est ensuite placé dans le moule de compactage et compacté en respectant la procédure d'essai standard. Après le test de compactage, l'échantillon a été extrait du moule et pesé pour définir sa densité comme le montre la figure IV.12, et par la formule  $\rho_d = Sr \cdot \rho_s / (Sr + (w \cdot \rho_s) / \rho_w)$ , on obtient les deux autres courbes de saturation pour  $Sr=100\%$  et  $Sr=85\%$ .

Les résultats obtenus à partir de cet essai sont utilisés dans les essais de CBR et compression.



Figure IV.10. Essai Proctor modifié pour Type 1: calcaire phosphaté et Type 2: calcaires

#### IV.6.4.2. Essai CBR (California Bearing Ratio)

L'essai du California Bearing Ratio (*CBR*) est l'expérience la plus importante recommandée pour déterminer la faisabilité de l'utilisation des déchets dans l'ingénierie routière. L'indice CBR définit la capacité d'un matériau à supporter la circulation des engins de construction et mesure le rapport de force nécessaire à un piston circulaire pour pénétrer dans les matériaux compactés dans un moule CBR, avec une vitesse de  $1,27 \pm 0,1$  mm/min. L'essai consiste à appliquer une charge statique à travers un piston et à suivre la pénétration dans le matériau, pour les étapes de pénétration de 2,5 et 5,0 mm ; en appliquant des valeurs de charge statique standard de 1,02 et 2,10 kN et de 1,10 et 3,65 kN pour les déchets de type 1 et 2 respectivement.

Les essais (*CBR*) ont été effectués selon la norme (NF-P94-078) [108]. Les valeurs de (*CBR*) pour les différents déchets sont présentées dans le tableau IV.2. L'indice de gonflement libre (*IGL*) est le rapport de la différence entre la hauteur initiale  $H_i$  et la hauteur finale  $H_f$  de l'échantillon immergé et la hauteur initiale de l'échantillon en pourcentage [109] :

$$FSI = \frac{\Delta H}{H_i} \times 100 \quad (1)$$

Où :  $\Delta H = H_f - H_i$

#### IV.6.4.3. Los Angeles ,Micro-Deval et Friabilité

Les paramètres de comportement pris en compte dans la classification sont : le coefficient de friabilité du sable (*FS*), mesuré sur la fraction 0/2 mm (norme NF P18-576) [101], dans le cas des sols sableux, les coefficients de Los Angeles (*LA*) (norme P 18-573) [99] et le coefficient de Micro-Deval en présence d'eau (*MD*) (norme P 18-572) [100] pour les sols graveleux.

Par définition, le coefficient "Los Angeles" est le rapport entre la fraction de l'échantillon passant au tamis de 1,6 mm après passage dans la machine et la masse initiale. Le but de cet essai est de mesurer la résistance à la fragmentation des granulats. Habituellement, la classe de granulats qui doit être adoptée est 10/14. Néanmoins, dans cette étude, nous adoptons pour l'essai toutes les classes granulaires : 4/6,3 - 6,3/10 - 10/14 10/25 16/31 et 25/50 mm selon la norme afin de définir correctement les matériaux étudiés.

Les essais Micro-Deval et Deval consistent à mesurer l'usure des granulats produite par le frottement mutuel dans un cylindre rotatif dans des conditions bien définies. Les granularités des matériaux soumis à l'essai sont les classes granulaires suivantes : 4/6,3, 6,3/10, 10/14 et 25/50 mm. Il a été observé que la résistance à l'usure de certaines roches n'est pas la même en conditions sèches qu'en présence d'eau.

La friabilité est un critère d'identification utilisé pour la classification des sables destinés à être utilisés comme couche de forme. L'essai consiste à mesurer le changement de granulométrie des sables produit par la fragmentation dans un cylindre rotatif avec une charge en présence d'eau. Les valeurs (*FS*) (*LA*) (*MD*) pour les déchets de type 1 et 2 sont indiquées dans le tableau IV.2.

#### IV.6.5. Essai de résistance à la compression simple

L'essai de résistance à la compression sans confinement (*RC*) a été réalisé selon la procédure d'essai standard (NF P98-230-3) [110]. Les échantillons ont été compactés à leur (Densité sèche maximale) et (Teneur en eau optimale), dans un cylindre de 117 mm de hauteur et 152 mm de diamètre. Les échantillons ont été conservés à température ambiante de 20° à 30°C après 1 jour de moulage puis au deuxième âge après 14 jours et au troisième âge après 28 jours. La résistance à la compression des échantillons conservés a été testée à l'aide d'un essai de compression contrôlé par déformation à une vitesse de déformation de 1,2 mm/min. Les valeurs de (*RC*) des déchets étudiés sont présentées dans la **figure IV.14**.

Tableau IV.2. Propriétés physiques et géotechniques des matériaux collectés

Propriétés des résidus miniers		Type1	Type2		
Teneur en eau hiver/été	%	4.62/0.4	8.54/0.6		
PH		6.8	7.8		
Propriétés géotechniques - Paramètres naturels					
Distribution granulométrique					
Couleur		Grisâtre	Beige		
Forme		Angulaire	Angulaire		
Distribution granulométrique					
Limon et argile		2.78	3.27		
Sable	(%)	17.28	40.23		
Gravier		29.00	29.00		
Cailloux		51.00	27.50		
Coefficient d'uniformité ( $CU = D_{60}/D_{10}$ )		69.44	17.85		
Coefficient de courbure $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$		0.36	4.11		
classification LPC		Gm	Gm		
Teneur en eau optimale ( $W_{opt}$ )	%	12.30	14.15		
Densité sèche maximale ( $\gamma_d$ ) max	kN/m <sup>3</sup>	1.85	2.00		
CBR Immédiat	%	24.724	36.675		
CBR Immersion	%	10.548	18.293		
Gonflement libre	%	0.303	0.308		
Limite de liquidité ( $LL$ )	%	30.88	33.41		
Limite de plasticité ( $LP$ )	%	no- mesurable	23.805		
Indice de plasticité ( $IP$ )	%	-	9.60		
Valeur de bleu de Méthylène ( $VBS$ )	g/100g	0.83	1		
Teneur en carbonate de calcium	%	54	88		
matière organique	%	< 1	< 1		
Équivalent de sable ( $ES$ )		22.22	12.82		
Masse spécifique	kN/m <sup>3</sup>	2.737	2.631		
Densité apparente	kN/m <sup>3</sup>	1.434	1.328		
Test d'abrasion de Los Angeles					
4/6.3 6.3/10 10/14		82.9	75.5	72.2	95.88 59.36 43.64
10/25 16/31 25/50	%	68.8	59.9	90.4	43.74 88.3 84.4
Test Micro Deval et Deval					
4/6.3 6.3/10 10/14	%	82.6	86.31	81.96	64 73 75
25/50			42.05		38.25
Coefficient de friabilité des sables	%		32		31
Classification des matériaux	-		<b>B<sub>42</sub> ts</b>		<b>B<sub>42</sub> s</b>
Résistance à la compression simple					
après 24 h			182		520
14jours	kN/m <sup>2</sup>		683		2671
28jours			715		2807

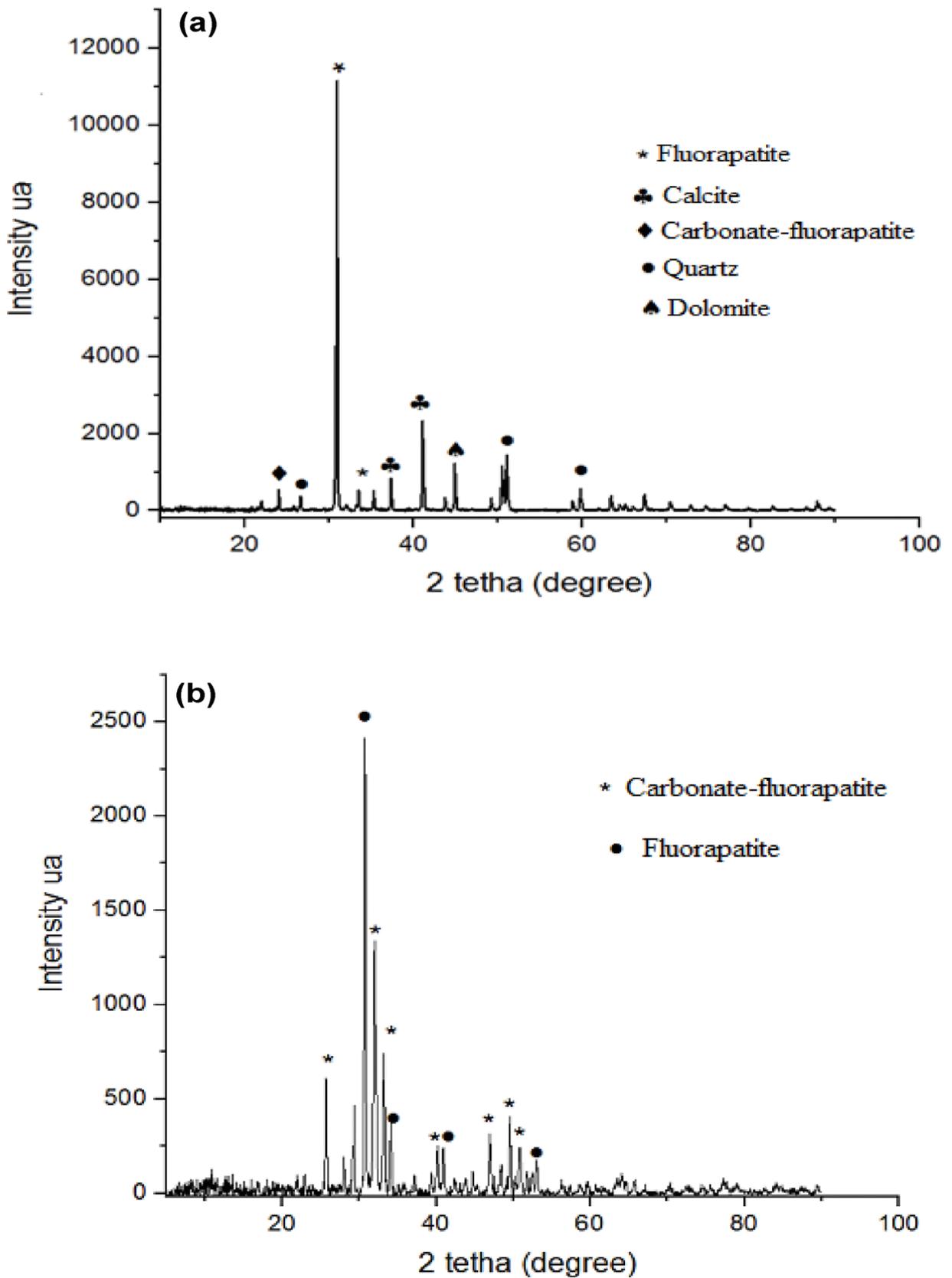
Note : D10, D30 et D60 représentent la taille des particules de sol, en mm, dont 10 %, 30 % et 60 % sont inférieurs à ces tailles, respectivement.

## IV.7. Résultats

### IV.7.1. Chimique et minéralogique

Le schéma DRX des deux échantillons est illustré dans la **figure IV.11**. Il montre la présence de la classe minérale apatite avec des taux de substitution variables de  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{F}^-$  and  $\text{OH}^-$ , y compris : Carbonate-fluorapatite  $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_5\text{CO}_3\text{F}_{1.5}(\text{OH})_{0.5}]$ , Fluorapatite  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}]$ , Carbonate-apatite  $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6]$ , Carbonate-hydroxyapatite  $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_3(\text{CO}_3)_3(\text{OH})_2]$ , Hydroxyapatite  $[\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})]$  et Phosphate hydraté, mais les éléments de gangue sont essentiellement représentés par : Calcite  $[\text{CaCO}_3]$ , Quartz  $[\text{SiO}_2]$ , Dolomite  $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$  et gypse  $[\text{CaSO}_4]$  [111,112].

Le carbonate-fluorapatite est la phase dominante indexée dans une symétrie hexagonale (SG : P63/m) selon la référence **ASTM XRD (98-003-4653)** [113]. Cependant, le Calcaire est le plus riche en Calcite, Quartz et Dolomite par rapport au Calcaire Phosphaté.



**Figure IV.11.** Analyse par diffraction des rayons X des déchets de la mine Kef-Essenoun : (a) calcaire phosphaté, (b) calcaire

### IV.7.1.1. Analyse Chimique

Les résultats de l'analyse chimique des deux déchets de phosphate (*type 1*) et (*type 2*) ont été présentés dans le **tableau IV.3**. Les résultats montrent un pourcentage élevé d'éléments majeurs : CaO (37,84 wt %), SiO<sub>2</sub> (10,40 wt %) et MgO (4,66 wt %) pour le type 1 et CaO (49,77 wt %), MgO (5,24 wt %) et SiO<sub>2</sub> (2,30 wt %) pour le type 2. Cependant, les concentrations de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (22,66 wt %) sont plus élevées pour le type 1 que pour le type 2.

La composition chimique confirme la composition minérale du calcaire phosphatique et du calcaire qui contient quatre minéraux principaux : Carbonate-fluorapatite, Calcite, Dolomite et Quartz. Ces résultats sont en accord avec les recherches précédentes sur les roches phosphatées et leurs déchets [114 -117].

**Tableau IV.3.** Composition chimique des déchets de calcaire phosphaté (*type1*) et de calcaire (*type2*)

	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	
Éléments majeurs (wt %)												
Type1	22.66	1.20	14.23	37.84	0.70	4.66	0.35	10.40	0.42	0.04	18.80	
Type2	0.89	0.03	39.06	49.77	0.25	5.24	0.26	2.30	0.09	0.01	40.70	
	F	H <sub>2</sub> O	COrg							Pb	Zn	Cu
Éléments majeurs (wt %)						Éléments traces (ppm)						
Type1	2.05	1.54	0.22							30	60	2.50
Type2	0.40	0.72	0.02							30	32.5	3.00

LOI : Loss on Ignition, Corg : Carbone organique

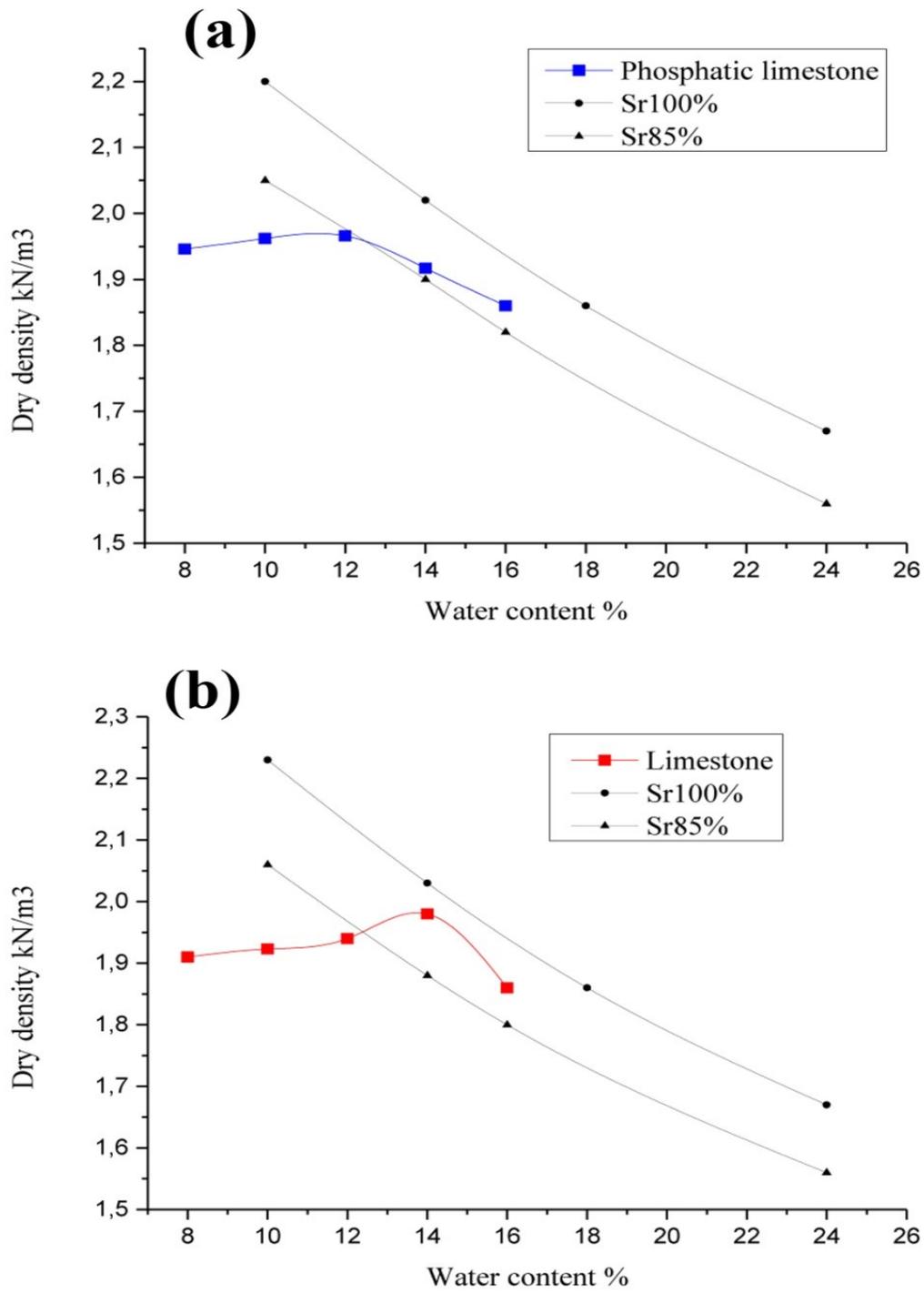
### IV.7.2. Caractéristiques de base des matériaux étudiés

Les déchets utilisés dans cette enquête étaient de couleur grisâtre et beige pour le type 1 et le type 2 respectivement, avec une teneur en humidité très faible due au climat aride de la région. Les valeurs de pH des résidus sont de 6,8 et 7,8 pour le calcaire phosphaté et le calcaire, respectivement, ce qui indique un pH basique. La masse spécifique du calcaire ( $2,631 \text{ kN/m}^3$ ) est inférieure à celle du calcaire phosphaté ( $2,737 \text{ kN/m}^3$ ), ceci est dû à la présence de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (22,66 % en poids) dans ce dernier. L'échantillon de calcaire phosphaté étant non plastique, la mesure de la limite et de l'indice de plasticité a été évitée. Cependant, l'échantillon de calcaire a un indice de plasticité ( $IP$ ) de 9.6% qui a été validé par le test au bleu de méthylène.

### IV.7.3. Comportement mécanique des matériaux

#### IV.7.3.1. Caractéristiques de compactage

Les résultats des essais de compactage des déchets, en termes de densité sèche et de teneur en eau mesurée, sont donnés dans la **figure IV.12**. Les courbes de saturation à 85% et 100% sont également présentées dans la **figure IV.12**. Les résultats indiquent que les déchets de calcaire fournissent la densité sèche maximale ( $\gamma_d$ ) max la plus élevée avec  $2.00 \text{ g/cm}^3$  et ( $W_{OPM}$ ) 14.15%. Tandis que les déchets calcaires phosphatés donnent un ( $\gamma_d$ ) max de  $1.85 \text{ g/cm}^3$  et 12.30% de ( $W_{OPM}$ ). En général, les caractéristiques de compactage dépendent à la fois de la distribution granulométrique et de la masse spécifique des matériaux. Dans ce cas, la présence de cénosphères (particules creuses de grande taille) est la principale cause de la densité inférieure des échantillons de calcaire phosphaté.

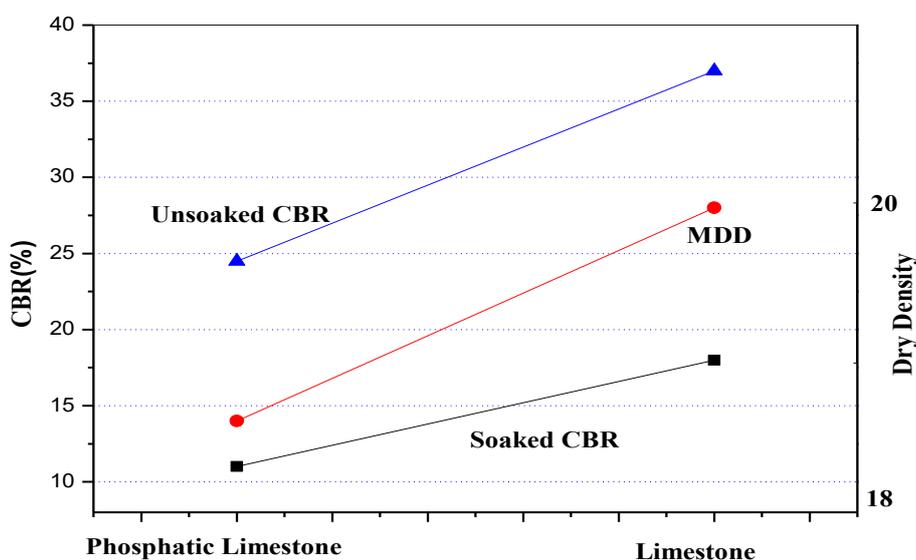


**Figure IV.12.** Courbes de compactage Proctor modifiées correspondantes pour les déchets miniers : (a) calcaire phosphaté, (b) calcaire.

### IV.7.3.2. California Bearing Ratio (CBR)

La **figure IV.13** montre les valeurs du CBR(*Immédiate*) et CBR (*Imbibition*) après 04 jours de cure dans l'eau en fonction du  $(\gamma_d)_{max}$ . On peut observer que les valeurs de CBR des deux types d'échantillons augmentent au fur et à mesure que le  $(\gamma_d)_{max}$  augmente. On remarque également que les déchets de calcaire phosphaté donnent une valeur de CBR imbibé de 10,5% qui peut être considérée comme un matériau de capacité portante moyenne tandis que la valeur de CBR imbibé de 18,7% obtenue pour le calcaire indique qu'il peut être utilisé comme un matériau approprié pour les couches de fondation des chaussées (*GTR, 2000*).

Les indices de gonflement libre des échantillons obtenus pour les matériaux de type 1 et de type 2 sont de 0,303% et 0,308%, respectivement. Ces résultats montrent que ces déchets ne sont pas expansifs. Cela signifie que les déchets de type 1 et de type 2 ne présentent pas de tendance à gonfler lorsqu'ils sont exposés à l'eau ou à l'humidité. C'est une caractéristique importante pour les matériaux de construction, car un gonflement excessif peut causer des dommages aux structures et aux fondations. Les résultats obtenus sont conformes aux normes (IS 2720 (Part XL), 2002) [118] qui définissent la méthode d'essai pour déterminer l'indice de gonflement libre des sols. Ces résultats sont encourageants pour l'utilisation de ces déchets dans la construction de routes et d'autres applications similaires.



**Figure IV.13.** Valeurs CBR de déchets du calcaire phosphaté et calcaire en rapport avec le  $(\gamma_d)_{max}$

### IV.7.3.3. Los Angeles et Micro-Deval

La variation des valeurs (*LA*) et (*MD*) est rapportée dans le tableau IV.2. Les valeurs (*LA*) vont de 59,9% à 90,4% pour le calcaire phosphaté et de 43,64% à 95,88% pour le calcaire pour toutes les classes granulaires considérées 4/6,3 6,3/10 10/14 10/25 16/31 et 25/50 mm. Pour les classes granulaires 4/6.3 6.3/10 10/14 et 25/50 mm les valeurs obtenues de (*MD*) sont comprises entre 42,05% et 86,31% pour les déchets de type1 et entre 38,25% et 75% pour les déchets de type2. Ces résultats indiquent que les déchets calcaires donnent des valeurs appropriées. Par contre, ces déchets ne conviennent pas à la construction de chaussées. Les valeurs des tests (*LA*) et (*MD*) des matériaux doivent être inférieures à 45%.

Le coefficient de friabilité du sable (*FS*) est l'un des indicateurs permettant d'évaluer la résistance des matériaux sableux non traités utilisés pour l'infrastructure de la chaussée à la charge du trafic. Les valeurs (*FS*) des échantillons sont de 32% et 31% pour les matériaux de type 1 et 2, respectivement. La limite recommandée pour cette utilisation est  $FS \leq 60$  (GTR, 2000).

### IV.7.3.4. Résistance à la compression simple

La résistance à la compression simple des échantillons de déchets miniers a été testée après 1, 14 et 28 jours de durcissement, comme le montre la **figure IV.14**. Il est bien connu que les matériaux gagnent en résistance au fil du temps après un mois de période d'étude et que la magnitude de la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la ( $\gamma_d$ ) max du matériau granulaire compacté. Il a également été montré que la résistance à la compression du calcaire à 28 jours est 3,9 fois plus importante que celle obtenue pour le calcaire phosphaté. D'autre part, les caractéristiques mécaniques ne se détériorent pas avec le temps.

Le calcaire ferme les orifices intérieurs en cimentant les grains (la chaux réagit fortement avec l'eau et l'énergie de compactage), favorisé par la plasticité du matériau compacté. Dans ce cas, le calcaire et la roche ont un comportement similaire et la résistance à la compression augmente avec le temps. Par ailleurs, le calcaire phosphaté ne se cimente pas lors du compactage en raison de l'absence de plasticité et de la présence d'une grande quantité de phosphate friable, ce qui explique la faible résistance mécanique par rapport au calcaire.

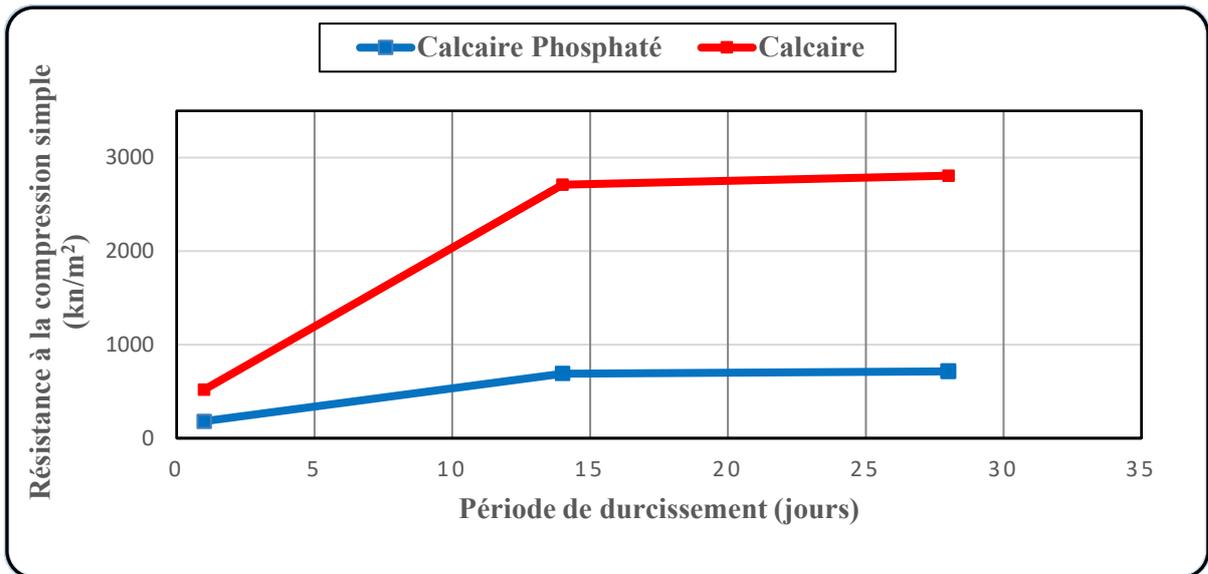
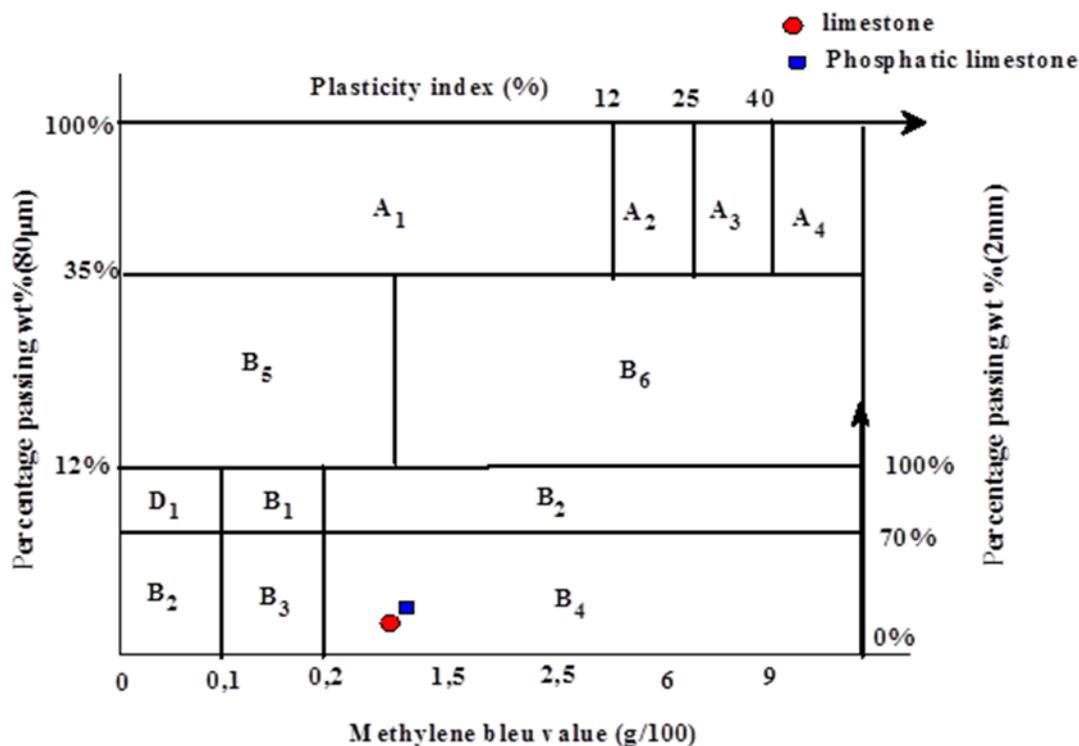


Figure IV.14. Les valeurs de ( $R_c$ ) des échantillons durcis pendant 1, 14 et 28 jours

#### IV.8. Classifications des sols

D'après le guide technique de la construction des remblais et des couches de forme (GTR, 2000), les matériaux des résidus font partie de la classe B appelée sols de sable et de gravier avec des fines. Selon la nature de ces matériaux, leur classe est B4. Ils présentent un pourcentage de passage de  $80\ \mu\text{m}$  inférieur à 12 %, moins de 70 % de grains de taille 2 mm ; aucune granulométrie supérieure à 50 mm. La valeur d'absorption du bleu de méthyle est supérieure à 0,2. Le coefficient micro-Deval ( $MD$ ) et le coefficient Los Angeles ( $LA$ ) sont supérieurs à 45. Ces types de matériaux sont sensibles à l'eau en raison des fines plastiques et contiennent une grande proportion de particules grossières, ils sont donc généralement perméables. Ensuite, les déchets sont classés comme : **B42ts** (très sec) pour le type 1 et **B42s** (sec) pour le type 2 comme on peut le voir sur la figure IV.15.



A : sols fins, B : sols sableux et graveleux avec des particules fines et D : sols insensibles à l'eau.

Figure IV.15. Classification des échantillons de déchets étudiés selon leur nature (GTR, 2000)

#### IV.9. Possibilité d'utiliser les déchets miniers dans la construction de routes

Dans le domaine des matériaux routiers, selon différentes classifications (GTR, 2000), l'évaluation générale des déchets miniers en tant que matériau de couche de forme va de passable à médiocre. Les déchets calcaires phosphatés, considérés comme des matériaux sensibles à l'eau, se trouvant dans un état hydrique très sec (ts), ne sont normalement pas réutilisables dans la construction de remblais ou la couche de forme, mais dans certains cas, leur humidification peut être envisagée pour les ramener à l'état "s" (sec) ou "m" (normal). L'utilisation des déchets de calcaire dans la construction des routes pourrait être autorisée moyennant un traitement aux liants hydrauliques. Ce traitement nécessite une mesure préalable de leur résistance mécanique. Pour la procédure de compactage, le sol très sec est considéré comme impossible à compacter correctement par les méthodes standard. A l'état sec (s) et très sec (ts), ces sols ne sont pas faciles à compacter pour former des structures de remblai stables.

Le catalogue algérien de l'Agence Nationale de Contrôle Technique des Travaux Publics (*CTTP 2001*) pour la conception de nouvelles chaussées exige l'utilisation de matériaux bien calibrés (*GW*) avec (*IP*) moins de 10% et (*LA*) moins de 40% dans la couche de base. Les résultats indiquent que les matériaux de stériles, qui sont catégorisés comme B42ts et B42s, respectivement, doivent être utilisés avec prudence comme matériaux de remblai et de couche de forme pour les routes de pavage, ils doivent être traités avec un liant hydraulique, tel que le ciment, pour augmenter leurs qualités mécaniques et physiques, élevant leurs classes en conséquence. L'augmentation des propriétés mécaniques des résidus en vue d'une utilisation comme matériau de sous-fondation de la chaussée sera plus économique et plus écologique, car elle permettra d'obtenir des couches de sous-fondation plus minces et peut-être de réduire l'épaisseur de la couche de chaussée. Dans ce cas, la stabilisation est le meilleur choix. Au fur et à mesure de l'expansion de la mine, les piles de déchets créées par l'exploitation d'une réserve géologique aussi importante finiront par engendrer des problèmes environnementaux et écologiques plus importants. D'un point de vue économique et environnemental, on estime que l'utilisation de ces déchets est avantageuse.

### **IV.10. Conclusion**

Les déchets miniers peuvent être utilisés pour construire des routes, mais cela nécessite un traitement préalable pour améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques. Les déchets calcaires phosphatés sont considérés comme des matériaux sensibles à l'eau et ne sont normalement pas réutilisables dans la construction de remblais ou de couches de forme. Cependant, dans certains cas, leur humidification peut être envisagée pour les ramener à l'état sec ou normal.

Le traitement de ces matériaux aux liants hydrauliques, comme le ciment, peut augmenter leurs qualités mécaniques et physiques, ce qui peut les rendre plus appropriés pour une utilisation dans les couches de sous-fondation de la chaussée. Cela peut également permettre de réduire l'épaisseur de la couche de chaussée et donc de réduire les coûts de construction et les impacts environnementaux associés.

Cependant, l'utilisation de ces déchets dans la construction de routes doit être effectuée avec prudence car les matériaux doivent répondre à certaines normes de qualité pour garantir la sécurité et la durabilité de la route. Les réglementations en matière de construction de routes exigent l'utilisation de matériaux bien calibrés avec une plasticité d'indice (*IP*)

inférieure à 10% et un angle de frottement interne ( $LA$ ) inférieur à 40% dans la couche de base. Les matériaux de stériles, qui sont des déchets miniers, doivent donc être traités pour répondre à ces exigences.

En conclusion, l'utilisation de deux matériaux miniers recyclés de Kef-Essenoun dans la construction de routes peut être une option économique et écologique si elle est effectuée avec prudence et en respectant les normes de qualité appropriées. Le traitement des déchets miniers aux liants hydrauliques peut améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques, ce qui peut les rendre plus appropriés pour une réutilisation dans les couches de sous-fondation de la chaussée.

# Chapitre V

## Traitement des stériles miniers

---

### V.1. Introduction

Le traitement des sols à l'aide de liants hydrauliques, tels que le ciment ou la chaux, est une technique courante dans la construction de routes, d'autoroutes et d'autres surfaces pavées. Le processus consiste à mélanger le sol avec un liant hydraulique et de l'eau pour créer un matériau solide capable de supporter le poids des véhicules et d'autres charges lourdes.

L'utilisation de liants hydrauliques dans la stabilisation des sols peut offrir un certain nombre d'avantages, notamment une meilleure capacité de charge, une durabilité accrue et une réduction des coûts d'entretien. Elle peut également contribuer à réduire l'impact environnemental des activités de construction en minimisant le besoin de matériaux vierges et en réduisant la quantité de déchets générés.

### V.2. Sol étudié et programme expérimental

Dans notre programme expérimental, l'étude a été réalisée sur des stériles miniers issues de la région de djebel-Onk (gisement Kef-esnnoun), le sol est mélangé au ciment, les pourcentages de ciment ajoutés sont respectivement (2 %, 4% et 6%) exprimés en poids sec du sol et compacté à la teneur en eau optimale. Le ciment choisi dans cette étude est un ciment Portland composé (CPJ-CEM II 42,5), couramment utilisé en Algérie. Pour déterminer les propriétés mécaniques menées sur des différentes formulations : stérile de type 1 (calcaire phosphaté) ou de type 2 (calcaire) + C% (avec C% représente les pourcentages de ciment), les essais d'identification sont les suivants :

- Essais de Proctor modifié ;
- Essais CBR immédiate et immersion ;
- Essai mesure pH ;

- Essais de compression simple ;
- Essais ultrasoniques.

Selon la Classification des matériaux (GTR 2000) les matériaux étudiés sont placés dans la classe B<sub>42s</sub> pour le type 1 et dans la classe B<sub>42s</sub> pour le type 2 voire (voire annexe A). [97]

### **V.3. Conditions d'utilisation des matériaux en remblai et en couche de forme**

Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai et en couche de forme dépendent de leurs propriétés mécaniques et de leur état hydrique. Pour le matériau de type 1, leur état naturel n'est pas adapté à une utilisation en remblai ou en couche de forme, mais ils peuvent être humidifiés pour atteindre un état plus utilisable. Pour le matériau de type 2, leur faible teneur en eau nécessite un compactage intense ou une humidification pour les rendre utilisables en remblai. En couche de forme, ces sols doivent être traités avec un liant hydraulique pour améliorer leur résistance à l'eau.

Les conditions d'utilisation en remblai dépendent également des conditions météorologiques. En cas de forte pluie, la mise en remblai est déconseillée. En cas de pluie faible, un compactage intense est nécessaire pour le matériau de type 1, tandis que le matériau de type 2 peut être utilisé en l'état avec un compactage intense ou humidifié avec des couches minces et un compactage moyen. En l'absence de pluie ou d'évaporation importante, le matériau peut être utilisé en l'état avec un compactage intense pour une hauteur de remblai maximale de 10 m ou humidifié avec des couches minces et un compactage moyen. En cas d'évaporation importante, le matériau peut être arrosé pour maintenir l'état ou humidifié avec des couches minces et un compactage moyen.

En ce qui concerne les conditions d'utilisation en couche de forme, le matériau de type 1 ne convient pas à une utilisation en couche de forme. Le matériau de type 2 doit être traité avec un liant hydraulique et peut être utilisé en cas de pas de pluie avec un arrosage pour maintenir l'état hydrique. L'épaisseur conseillée de la couche de forme est de 0,35 m. [98]

## V.4. Produit de traitement

Le ciment CPJ-CEM II 42.5 est le produit de traitement utilisé dans ce cas. Ce ciment est un type de ciment Portland composé, obtenu en combinant du clinker grossièrement broyé avec du gypse, qui agit comme régulateur de prise (**Tableau V.1**).

Le ciment Portland composé CPJ-CEM II 42.5, se compose de : 80 à 94% de clinker portland, plus 6 à 20% de calcaire purifié en tant qu'ajout et de constituants secondaires (un contrôle de prise consistant en 0 à 5% de sulfate de calcium).

**Tableau V.1.** Caractéristiques physico-chimiques du ciment

<b>Désignation CPA-CEM I 42,5</b>		
<b>Caractéristiques physiques</b>		
Densité	(g/cm <sup>3</sup> )	3,2
Réglage initial	(min)	140-195
Prise finale	(min)	195-290
Retrait à 28 jours	(mm)	0,3-2,5
Surface spécifique	(cm <sup>2</sup> /g)	2900
Résistance à la compression à 28 jours	(MPa)	C 42,5
<b>Caractéristiques chimiques</b>		
SiO <sub>2</sub>	(%)	20.01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	2.97
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(%)	4.65
CaO	(%)	64.01
MgO	(%)	0.62
SO <sub>3</sub>	(%)	2.15
Cl (%)	(%)	0.015
Na <sub>2</sub> O (%)	(%)	0.24
PF (%)	(%)	4.34

## V.5. Etude expérimentale (essais géotechniques au laboratoire)

### V.5.1. Essais de Proctor modifié

L'essai Proctor modifié NF-P 94-093 [107] consiste à compacter un matériau à différentes teneurs en eau selon une procédure et une énergie conventionnelles. La densité sèche du matériau est déterminée pour chaque teneur en eau, et les variations de cette densité en fonction de la teneur en eau sont reportées sur une courbe appelée courbe de Proctor.

Cette courbe présente généralement une valeur maximale de densité sèche obtenue à une teneur en eau particulière, connue sous le nom de caractéristiques de compactage optimales de Proctor normal ou modifié, selon le type d'essai réalisé.

Deux types de moules peuvent être utilisés dans ces essais, en fonction de la finesse des grains du sol : le moule Proctor, d'un diamètre intérieur de 101,6 mm et d'une hauteur de 117 mm (sans rehausse), d'un volume de 948 cm<sup>3</sup>, et le moule CBR, d'un diamètre de 152 mm et d'une hauteur de 152 mm (sans rehausse) et d'un disque d'écartement de 25,4 mm d'épaisseur, ce qui donne une hauteur utile de 117 mm et un volume de 2221,98 cm<sup>3</sup>.

Les essais Proctor normal et Proctor modifié se distinguent par l'intensité du compactage utilisé, l'essai Proctor normal ayant une résistance souhaitée relativement faible, adaptée aux remblais non compactés ou peu chargés, tandis que l'essai Proctor modifié a une résistance souhaitée plus élevée, adaptée aux chaussées autoroutières.

Pour réaliser l'essai, l'échantillon entier de matériau est séché dans un four à une température maximale de  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$  jusqu'à ce qu'il atteigne un état sec. L'échantillon est ensuite tamisé à une taille de 20 mm. Le test est effectué sur des échantillons non traités et traités au ciment, avec différents pourcentages d'eau ajoutés pour homogénéiser la teneur en humidité du matériau. Le matériau est divisé en cinq parties égales par inspection visuelle.

Avant d'introduire le matériau dans le moule, le moule, la base et la contremarche sont fixées et les parois du moule sont lubrifiées si nécessaire. Si le moule CBR est utilisé, un disque d'espacement est placé au fond du moule. Un papier filtre ou un film plastique peut également être placé au fond du moule Proctor ou sur le disque d'espacement du moule CBR pour faciliter le démoulage. Le matériau est ensuite introduit en quantité telle que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure à un tiers ou à un cinquième de la hauteur du moule pour les essais Proctor normal et Proctor modifié, respectivement. La couche est compactée avec le dispositif de compactage correspondant en utilisant 25 ou 56 coups par couche, selon le type d'essai. Ce processus est répété pour le nombre de couches requis. Après le compactage de la dernière couche, la colonne montante est retirée et l'excédent de matériau au-dessus du moule est soigneusement nivelé à l'aide d'une règle. Si des éléments de plus de 10 mm sont déplacés au cours de cette opération, laissant des vides à la surface de l'échantillon, ces vides sont remplis avec des éléments fins et lissés à l'aide de la règle. L'ensemble du moule et du matériau est ensuite pesé. Afin de déterminer les spécifications de compactage pour la construction de remblais, de couches de

forme et de chaussées, les caractéristiques de compactage Proctor sont des paramètres fréquemment utilisés pour l'identification des matériaux [98].

Les caractéristiques à l'optimum Proctor modifié déterminées sur des matériaux obtenus pour différents mélanges (stérile avec pourcentage du ciment), les résultats sont présentés sur le tableau ci-après avec traçage des courbes de compactage.

**Tableau V.2.** Résultats de l'ajout de ciment sur les caractéristiques de Proctor modifié pour type1.

<b>Résultat de l'essai Proctor modifiée : Type1 : Calcaire Phosphaté</b>							
<b>0%ciment</b>		<b>2%ciment</b>		<b>4%ciment</b>		<b>6% ciment</b>	
<b>w%</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>	<b>w%</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>	<b>w%</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>	<b>w%</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>
8.00	1.946	7.40	1.981	6.10	2.071	4.87	2.175
10.00	1.962	10.35	2.011	8.90	2.095	7.93	2.215
12.00	1.966	12.41	2.063	10.85	2.161	9.64	2.241
14.00	1.917	13.95	2.087	11.91	2.190	11.02	2.261
16.00	1.86	15.97	2.010	15.50	2.05	14.50	2.110

**Tableau V.3.** Résultats des caractéristiques obtenues de l'essai Proctor modifié avec pourcentages de ciment différents pour type 1

<b>Paramètres</b>	<b>Valeurs essai Proctor</b>			
<b>Ciment (%)</b>	<b>0%ciment</b>	<b>2%ciment</b>	<b>4%ciment</b>	<b>6% ciment</b>
<b>Densité sèche maximale (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.85	2.09	2.20	2.27
<b>Teneur en eau optimale (%)</b>	12.30	14.00	12.20	11.10

**Tableau V.4.** Résultats de l'ajout de ciment sur les caractéristiques de Proctor modifié pour type 2.

<b>Résultat de l'essai Proctor modifiée : Type2 : Calcaire</b>							
<b>0%ciment</b>		<b>2%ciment</b>		<b>4%ciment</b>		<b>6% ciment</b>	
<b>w%</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>	<b>w%</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>	<b>w%</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>	<b>w%</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>
8.00	1.910	7.20	1.930	5.90	1.981	4.30	2.070
10.00	1.923	10.14	1.940	8.90	1.993	7.50	2.130
12.00	1.940	12.03	1.960	10.50	2.007	9.33	2.210
14.00	1.980	13.81	2.000	11.67	2.015	10.91	2.280
16.00	1.860	15.80	1.880	13.17	1.960	13.76	2.200

**Tableau V.5.** Résultats des caractéristiques obtenues de l'essai Proctor modifié avec

pourcentages de ciment différents pour type 2

Paramètres	Valeurs essai Proctor			
Ciment (%)	0%ciment	2%ciment	4%ciment	6%ciment
Densité sèche maximale ( $g/cm^3$ )	2.00	2.10	2.20	2.29
Teneur en eau optimale (%)	14.15	13.95	12.60	11.30

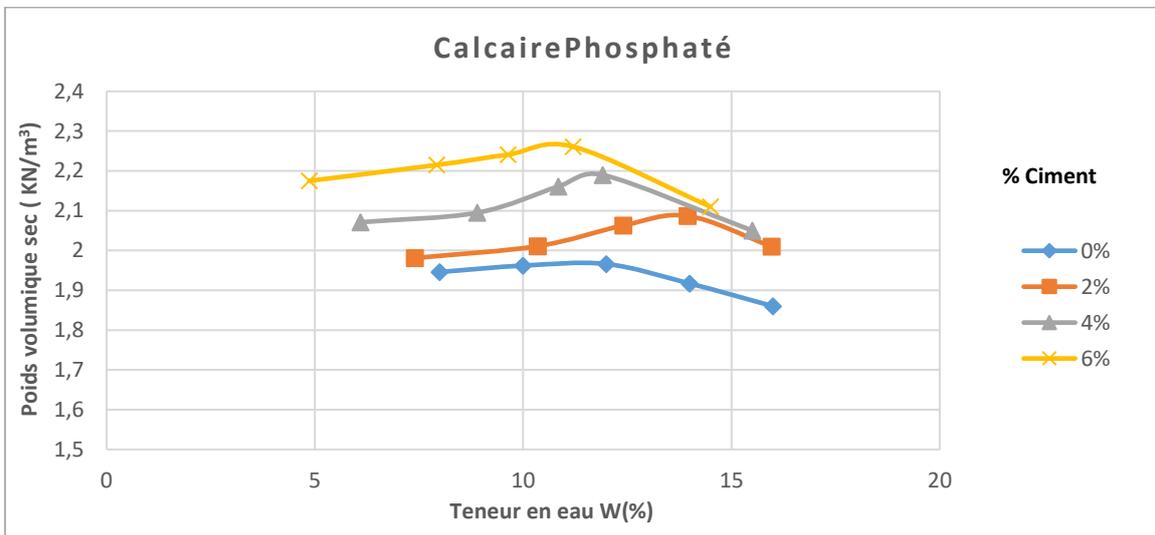


Figure V.1. Courbes Proctor modifié pour type 1(calcaire phosphaté)

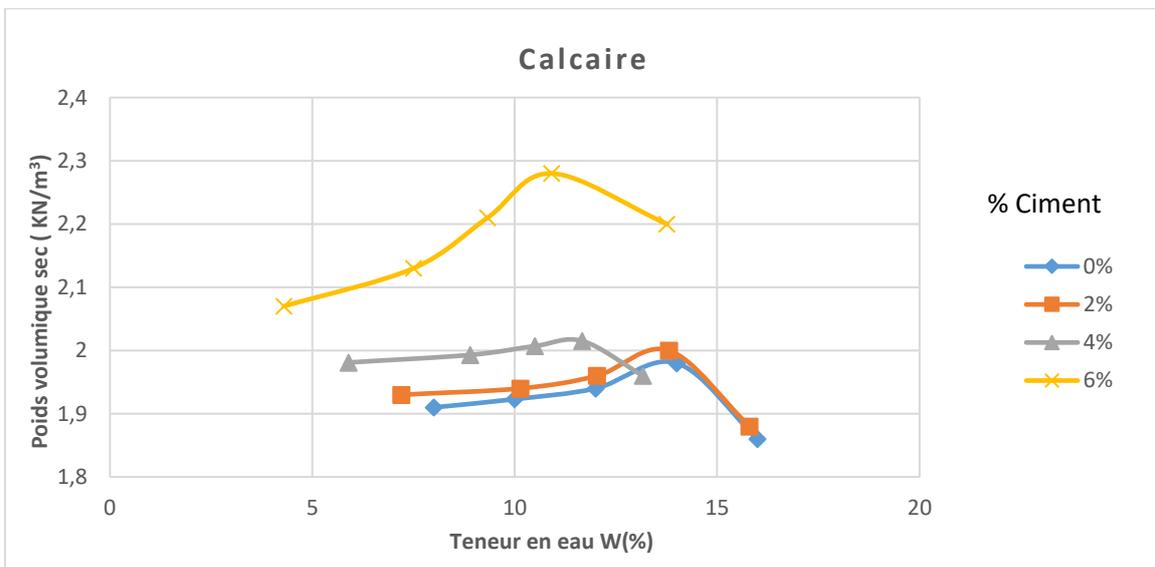


Figure V.2. Courbes Proctor modifié pour type 2(calcaire)

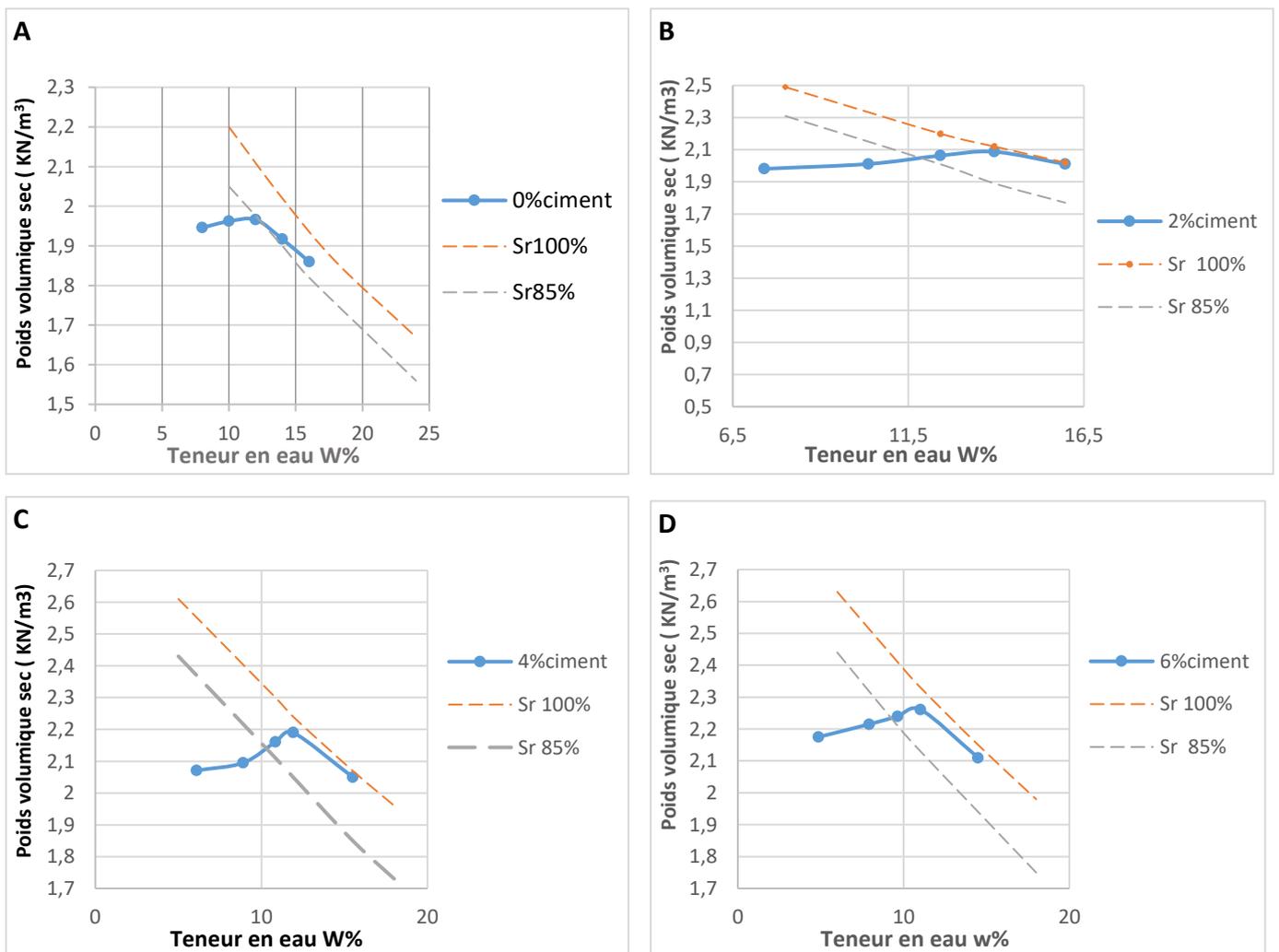
Les courbes d'essai de compactage Proctor modifiée (Figures V.1 et V.2) sont réalisées à partir des valeurs de poids volumique sec en fonction de la teneur en eau, regroupées dans les tableaux en haut (V.2 - V.4). Dans ces courbes, on observe que l'augmentation du pourcentage de ciment réduit la teneur en eau (w%) et augmente le poids volumique sec ( $\gamma_d$ ) pour les deux types de stérile traités aussi dans ces courbes on peut avoir les paramètres fondamentaux de Proctor, qui sont la teneur en eau optimale et la densité

sèche maximale. Les valeurs sont données dans les **tableaux (V.3 - V.5)** L'augmentation de la densité maximale Proctor et la diminution de la teneur en eau optimale indiquent que le matériau traité sera plus facile à compacter efficacement, car acceptant plus d'humidité et rendu moins sensible aux variations de teneur en eau. Ceci contrebalance largement la relative perte de densité du mélange.

### V.5.2. Les courbes de saturations

Par la formule :  $Sr \cdot \rho_s / (Sr + (w \cdot \rho_s) / \rho_w)$ , on obtient les deux autres courbes de saturation pour Sr=100% (en rouge) et Sr=85% (en gris) (**Figures V.3 et V.4**).

- **Type 1 : calcaire Phosphaté**



**Figure V.3.** Courbes des saturations avec 0% 2% 4% 6% ciment de calcaire phosphaté

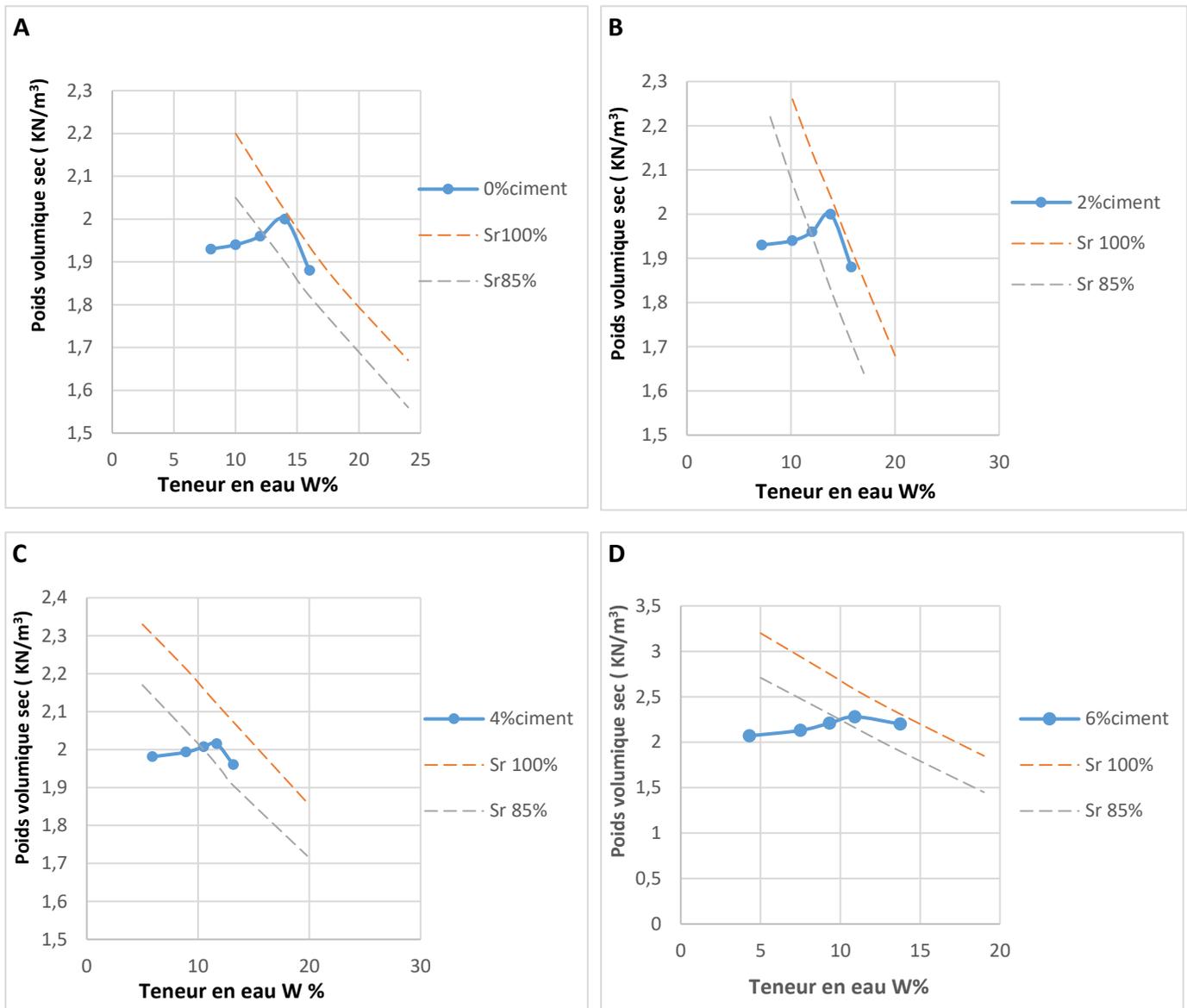


Figure V.4. Courbes des saturations avec 0% 2% 4% 6% ciment de calcaire

### V.5.3. Essai CBR (California Bearing Ratio)

L'essai CBR est un essai de portance des remblais et des couches compactées dans les structures routières [108]. L'objectif est de déterminer expérimentalement des indices de portance (IPI, CBR) qui permettent de classer les sols (*GTR*), d'évaluer l'aptitude à la circulation des engins de terrassement (*IPI*) et de déterminer l'épaisseur de la chaussée (plus le CBR augmente, plus l'épaisseur diminue). Il existe trois types d'indices mesurés en fonction des objectifs : l'indice de portance immédiate, l'indice CBR immédiat et l'indice CBR après immersion. L'indice de portance immédiate mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à sa teneur en eau naturelle ou dans la gamme de teneur en eau dans laquelle il est susceptible d'évoluer. L'indice CBR immédiat mesure la résistance

au poinçonnement d'un sol compacté généralement au niveau d'énergie Proctor modifié à sa teneur en eau Proctor optimale ( $W_{OPM}$ ). Si le matériau est un support ou un constituant d'une structure routière, l'éprouvette de sol sera surchargée de disques annulaires représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plate-forme. L'indice CBR après immersion mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau puis immergé pendant plusieurs jours (généralement 4 jours). Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol compacté et/ou soumis à des variations du régime hydrique. La préparation et les procédures opérationnelles de l'essai comportent plusieurs étapes, notamment la préparation du moule, le compactage du sol, l'immersion et le poinçonnement (**Figure V.5**).

L'essai CBR après immersion mesure la résistance au poinçonnement d'un sol compacté à différentes teneurs en eau et caractérise l'évolution de la portance du sol lorsqu'il est soumis à des variations du régime hydrique. Dans la classification GTR 2000, on distingue cinq états hydriques en fonction de l'humidité du sol.

Le premier état est l'état "très humide" (th), qui correspond à une teneur en eau très élevée qui ne permet généralement pas d'utiliser le sol dans les conditions techniques et économiques ;

Le deuxième état est l'état "humide" (h), qui correspond à un état de forte teneur en eau qui permet néanmoins la réutilisation du sol en prenant des mesures particulières telles que l'aération, le traitement, le faible remblayage, etc. ;

Le troisième état est l'état d'humidité "moyenne" (m), qui correspond à l'état d'humidité optimal où les contraintes de mise en œuvre du sol sont minimales ;

Le quatrième état est l'état "sec" (s), qui correspond à un état de faible humidité mais qui permet tout de même la mise en œuvre avec des dispositions particulières telles que l'arrosage, le surcompactage, etc. ;

Le cinquième et dernier état est l'état très sec (ts), qui correspond à un état de très faible humidité qui ne permet généralement pas de réutiliser le sol dans des conditions techniques et économiques.



**Figure V.5.** Immersion pendant 4 jours dans l'eau et poinçonnement

▪ **Résultats et interprétations**

Les résultats de l'essai CBR sont exprimés en termes d'indice de portance immédiat (*IPI*), d'indice CBR immédiat (*CBR 0J*) (**Tableaux V.6 et V.7**), d'indice CBR après immersion (*CBR 4J*) (**Tableaux V.8 et V.9**) et de gonflement (GL en %). L'indice CBR recherché est par convention la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux ratios. Plus l'indice CBR est élevé, meilleure est la portance du sol (**tableau V.10**).

- On définit les valeurs suivant :

$$\frac{\text{effort de pénétration à 2.5 d'enfoncement en (kN)}}{13.35} \times 100$$
$$\frac{\text{effort de pénétration à 5mm d'enfoncement en (kN)}}{19.93} \times 100$$

Tableau V.6. Les résultats d'essai CBR immédiat pour type 1 : calcaire phosphaté

<b>CBR immédiate Type 1: calcaire phosphaté</b>					
<b>Sans traitement</b>			<b>Traité à 2%ciment</b>		
<b>Enfoncement (mm)</b>	<b>Force (kN)</b>	<b>Contrainte (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Enfoncement (mm)</b>	<b>Force (kN)</b>	<b>Contrainte (kN/m<sup>2</sup>)</b>
1.25	1.0225	538.1578	1.25	14.1630	7454.210
2.00	1.5879	835.7368	2.00	21.1554	11134.42
2.50	2.0114	1058.631	2.50	23.6764	12461.26
5.00	5.3261	2803.210	5.00	33.2217	17485.10
7.50	8.2130	4322.631	7.50	40.2136	21165.05
10.00	8.50	4473.684	10.00	48.0894	25310.21

Tableau V.7. Les résultats d'essai CBR immédiat pour type 2 : calcaire.

<b>CBR immédiate Type2 : calcaire</b>					
<b>Sans traitement</b>			<b>Traité à 2%ciment</b>		
<b>Enfoncement (mm)</b>	<b>Force (kN)</b>	<b>Contrainte (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Enfoncement (mm)</b>	<b>Force (kN)</b>	<b>Contrainte (kN/m<sup>2</sup>)</b>
1, 25	1.1458	603.0526	1,25	-	-
2 ,00	2.3958	1260.947	2 ,00	-	-
2,50	3.0208	1589.894	2,50	-	-
5,00	7.3093	3847.000	5,00	-	-
7,50	12.7682	6720.105	7,50	-	-
10,00	19.660	10347.36	10,00	-	-

**Tableau V.8.** Les résultats d'essai CBR immersion pour type 1 : calcaire phosphaté

<b>CBR immersion Type1 : calcaire phosphaté</b>					
<b>Sans traitement</b>			<b>Traité à 2%ciment</b>		
<b>Enfoncement (mm)</b>	<b>Force (kN)</b>	<b>Contrainte (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Enfoncement (mm)</b>	<b>Force (kN)</b>	<b>Contrainte (kN/m<sup>2</sup>)</b>
1.25	0.2083	109.6315	1.25	-	-
2.00	0.9583	504.3684	2.00	-	-
2.50	1.0225	538.1578	2.50	-	-
5.00	2.1022	1106.421	5.00	-	-
7.50	5.8847	3097.210	7.50	-	-
10.00	7.9225	4169.736	10.00	-	-

**Tableau V.9.** Les résultats d'essai CBR immersion pour type 2 : calcaire

<b>CBR immersion Type2 : calcaire</b>					
<b>Sans traitement</b>			<b>Traité à 2%ciment</b>		
<b>Enfoncement (mm)</b>	<b>Force (kN)</b>	<b>Contrainte (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Enfoncement (mm)</b>	<b>Force (kN)</b>	<b>Contrainte (kN/m<sup>2</sup>)</b>
1.25	0.3958	208.3157	1.25	-	-
2.00	0.8749	460.4736	2.00	-	-
2.50	1.1041	581.1052	2.50	-	-
5.00	3.6458	1918.8421	5.00	-	-
7.50	6.5466	3445.5789	7.50	-	-
10.00	8.5433	4496.4736	10.00	-	-

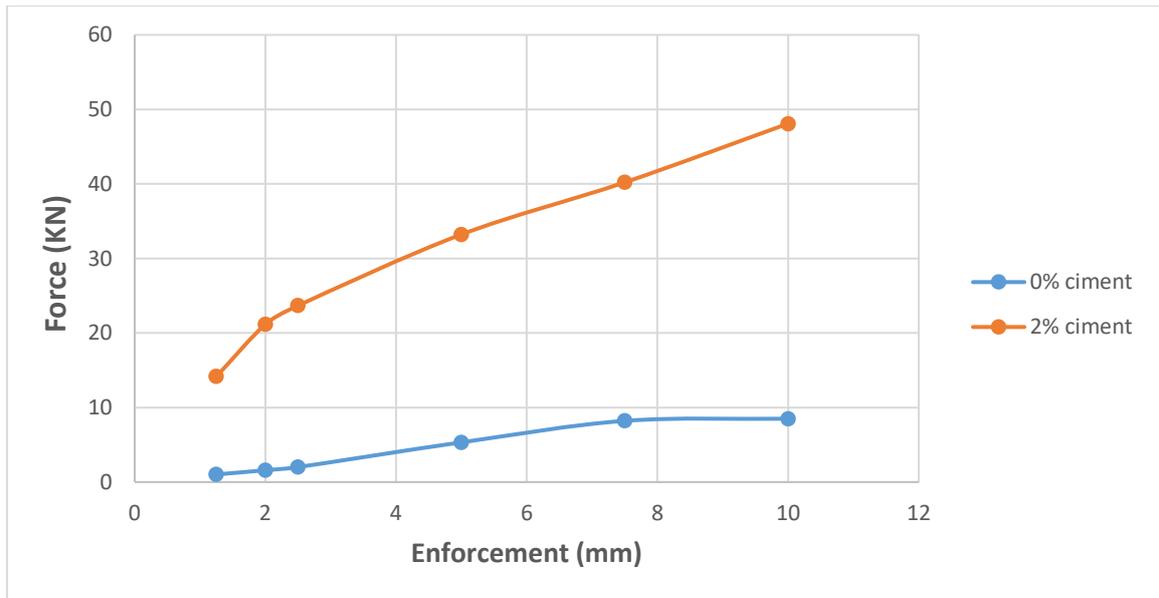


Figure V.6. Diagrammes Effort-Enfoncement pour type1 : calcaire phosphaté

Tableau V.10. Les résultats de l'indice CBR pour chaque type.

	Type1 : Calcaire Phosphaté		Type2 : Calcaire	
	0%ciment	2%ciment	0%ciment	2%ciment
<b>I<sub>CBR</sub> Immédiat</b>	26.724	177.351	36.675	-
<b>I<sub>CBR</sub> Immersion</b>	10.548	-	18.2930	-

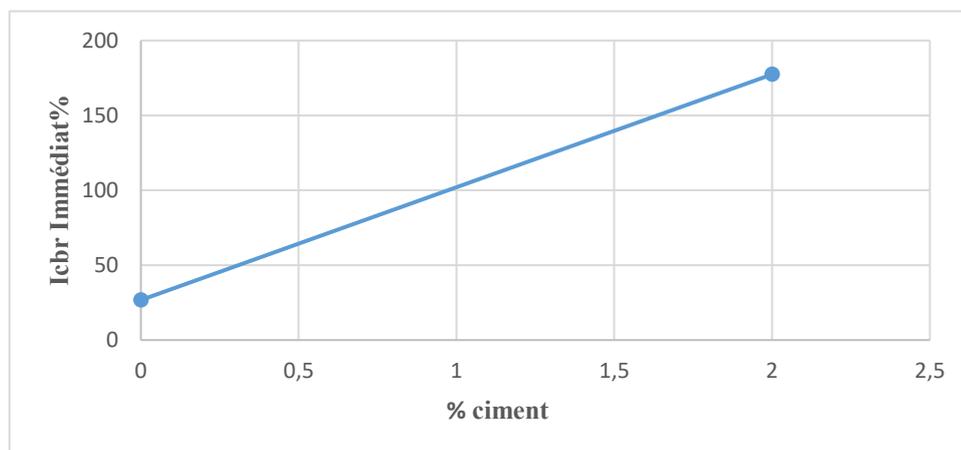


Figure V.7. Diagramme d'indice CBR en fonction des différents pourcentages de ciment pour type 1 : Calcaire Phosphaté

Les figures (V.6 et V.7) présentent l'influence de l'ajout du ciment sur l'indice de portance CBR. On observe qu'il y a une tendance générale d'augmenter les indices CBR rapidement avec l'accroissement du pourcentage de ciment. Un accroissement de 26.724% à 177,351 % pour le sol traité de type 1 avec pourcentages de ciment varié de (2 %.4%.6%).

Donc l'addition du % liant hydraulique (ciment) signifie l'amélioration de la portance du sol (augmentation d'indice CBR) par la diminution du volume des vides dans le sol qui est dû à la bonne distribution des particules du sol avec les particules fines de l'additif de ciment (**Tableau V.11**).

**Tableau V.11.** Classification des sols en fonction du CBR [98]

<b>S<sub>1</sub></b>	CBR < 5	Portance très faible
<b>S<sub>2</sub></b>	5 < CBR < 10	Portance faible
<b>S<sub>3</sub></b>	10 < CBR < 15	Portance moyenne
<b>S<sub>4</sub></b>	15 < CBR < 30	Portance bonne
<b>S<sub>5</sub></b>	30 < CBR	Portance excellente

Le gonflement libre correspond à la variation de hauteur de l'éprouvette immergée pendant la période d'immersion de 4 jours (**tableau V.12**). Il est un indicateur de la capacité du sol à gonfler en présence d'eau. La valeur du gonflement libre GL est déterminée en pourcentage par la relation (1).

**Tableau V.12.** Valeurs du gonflement libre pour chaque type du matériau

	Type 1: Calcaire Phosphaté		Type 2: Calcaire	
	Sans traitement	Traité à 2% ciment	Sans traitement	Traité à 2% ciment
<b>Δh(mm)</b>	0.477	0.08	0.485	0.03
<b>h(mm)</b>	157	157	157	157
<b>GL %</b>	0.3038	0.051	0.308	0.020

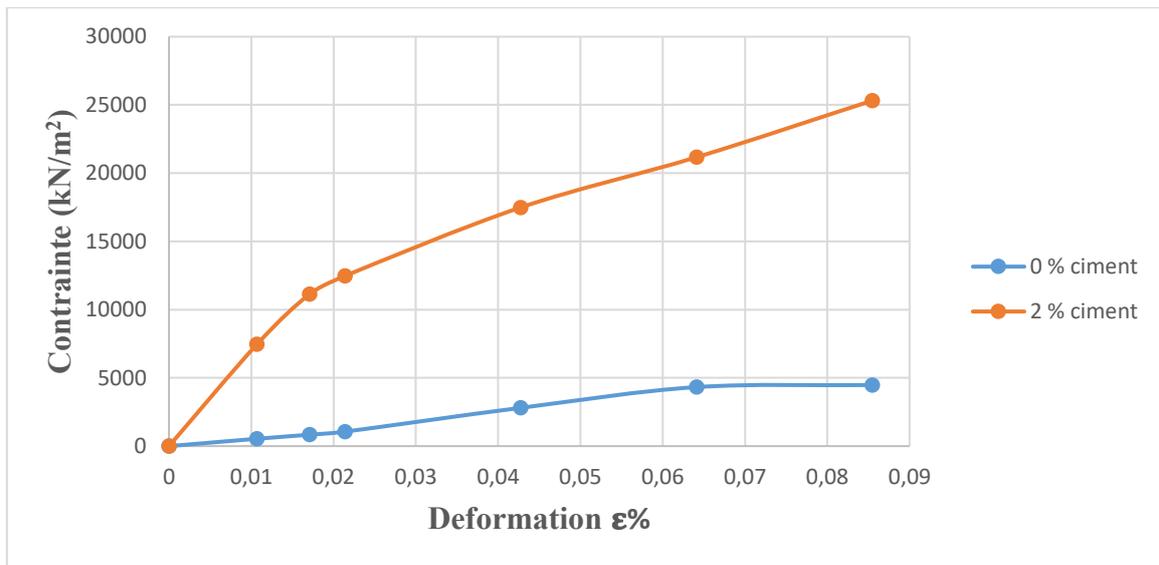
La déformation dans le matériau (**tableau V.13**) est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{Déformation : } \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

Δl : déplacement (mm) ; L : longueur de prouvaît (11.7 cm).

**Tableau V.13.** Valeurs de la déformation à base de l'essai *CBR*.

Type 1 : Calcaire phosphaté	
déplacement (mm)	Déformation
0	0
1.25	0.010683761
2	0.017094017
2.5	0.021367521
5	0.042735043
7.5	0.064102564
10	0.085470085



**Figure V.8.** Courbes contrainte –déformation à base de l'essai *CBR*.

**Tableau V.14.** Valeurs de Module d'Yong à base de l'essai *CBR*.

Type 1: Calcaire Phosphaté		
Pourcentage du Ciment	0 % ciment	2% ciment
Module de Yong (kN/m <sup>2</sup> )	52342.10	296129.46

D'après les résultats de la **figure V.8** , qui illustre les courbes de contrainte-déformation à base de l'essai *CBR* avec des pourcentages de ciment qui varient de 0 à 2%, on peut observer une augmentation significative des modules de déformation en fonction de la teneur en ciment, passant de 52342.10 kN/m<sup>2</sup> pour le mélange sans ciment à 296129.46 kN/m<sup>2</sup> pour le mélange avec 2% de ciment (**Tableau V.14**). Cette augmentation indique une amélioration de la résistance mécanique du matériau, ce qui le rend acceptable pour une utilisation en tant que couche de forme, couche de fondation et couche d'assise après traitement selon la classification LCPC SETRA 1994.

#### V.5.4. Essai du pH

L'essai de mesure de pH consiste à utiliser un indicateur coloré pour visualiser les changements de pH dans une solution. Il existe plusieurs indicateurs colorés différents, tels que le bleu de thymol, le rouge de phénol, le thymol-phtaléine et le bleu de quinoléine, qui doivent être choisis en fonction de la plage de pH envisagée. D'autres méthodes de mesure de pH peuvent également être utilisées, telles que l'utilisation d'un appareil de mesure ou de papier pH. [119 -121].

L'indicateur coloré phénolphtaléine est souvent utilisé pour estimer le pH dans les dosages d'acide faible ou de base forte. Il change de couleur en fonction de la valeur du pH de la solution, virant de l'incolore en milieu acide au rose pour un pH supérieur à 8. Le tableau ci-dessous montre les différentes couleurs de l'indicateur phénolphtaléine en fonction de la zone de virage de pH :

**Tableau 5.15.** couleur d'indicateur phénolphtaléine en fonction du pH

Non	Zone de virage de ph	pH	Couleur
Phénolphtaléine	8.2 < ph < 9. 9	pH < 8. 2 8 < ph < 9. 6 pH > 9. 6	Incolore Rosâtre Rose soutenu

➤ Résultats et interprétations



Figure V.9. Echantillons de type calcaire phosphaté mis en test d'un indicateur coloré



Figure V.10. Echantillons de type calcaire mis en test d'un indicateur coloré.

Tableau V.16. Valeurs du ph pour chaque type du matériau non traité et traité

Indicateur Phénolphtaléine	Type 1 : Calcaire Phosphaté		Type2 : Calcaire	
	pH	Couleur	pH	Couleur
Sans traitement	6.8	Incolore	7.8	Incolore
2% ciment	8.6	Rosâtre	9	Rosâtre
4% ciment	9	Rosâtre	10	Rose soutenu
6% ciment	9.4	Rosâtre	11	Rose soutenu

Les produits essentiels de l'hydratation du ciment dont les silicates de calcium hydratés (C-S-H) et la portlandite  $Ca(OH)_2$ , le premier conféré au béton sa résistance

mécanique et le second lui conféré la durabilité et lui donne un  $\text{pH} \approx 13$  en ajoutant du ciment à notre mélange la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Fais diminuer l'acidité, de ce fait, en faisant varier le taux du ciment, on observe aisément que le  $\text{pH}$  augmente, et ceci en utilisant la phénolphtaléine.

### V.5.5. Essais de compression simple

L'essai de résistance à la compression simple [110] a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques d'un mélange traité et non traité aux liants hydrauliques (ciment) préparés à l'optimum Proctor (différents % d'OPM), de dimensions  $D= 152 \text{ mm}$ ,  $H= 117 \text{ mm}$ , et conservées à l'air à une température comprise entre  $20^\circ$  et  $30^\circ\text{C}$ . Il s'agit de comprimer un cylindre entre deux plaques ; le centre du matériau traité est soumis à un effort de compression à l'aide d'une presse (appareil de compression simple) jusqu'à ce qu'il se rupture. Il est essentiel que les surfaces de contact supérieures et inférieures entre l'équipement et l'échantillon soient aussi plates que possible. La rupture se produit 30 à 60 secondes après l'application de la charge, et l'échantillon est constamment chargé à un taux statistique. La résistance et le module d'élasticité sont calculés à partir de la tension appliquée et de la déformation mesurée. La contrainte atteinte au point de rupture est égale à la résistance à la compression, notée  $R_C$  (en  $\text{kN}/\text{mm}^2$  ou  $\text{MPa}$ ). Cette valeur de  $R_C$  permet d'évaluer l'efficacité du traitement et la capacité du sol traité à supporter les charges de circulation. En général, une résistance en compression simple supérieure à  $1 \text{ MPa}$  est considérée comme satisfaisante pour la circulation des engins de chantier sur la couche traitée. La répartition des écrasements est la suivante : directement après le premier jour de moulage, puis au deuxième âge après 14 jours, et au troisième âge après 28 jours.

L'équation suivante donne la résistance à la compression simple  $R_C$  (la contrainte maximale) :

$$R_C = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (3)$$

F : la charge la plus élevée utilisée lors de la mesure (en kN)

D : le diamètre de l'échantillon, mesuré en millimètres avant l'examen.



Figure V.11. Préparation des éprouvettes et rupture des échantillons sous un test de compression simple

➤ **Résultats et interprétations**

Les résultats de la campagne d'essais effectuée sont représentés dans le tableau ci-dessous ;

**Tableau V.17.** Variation de la résistance à la compression pour -type 1- en fonction du temps et l'ajout du ciment

<b>Type 1 : Calcaire Phosphaté</b>			
<b>échantillons</b>	<b>Pourcentage du ciment</b>	<b>Écrasement</b>	<b>Resistance (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>1(A,B,C,D)</b>	0%	Après 1j	182
<b>1(A,B,C,D)</b>	0%	Après 14j	683
<b>1(A,B,C,D)</b>	0%	Après 28j	715
<b>1(A,B,C,D)</b>	2%	Après 1j	801
<b>1(A,B,C,D)</b>	2%	Après 14j	2081
<b>1(A,B,C,D)</b>	2%	Après 28j	2279
<b>1(A,B,C,D)</b>	4%	Après 1j	1446
<b>1(A,B,C,D)</b>	4%	Après 14j	4325
<b>1(A,B,C,D)</b>	4%	Après 28j	4763
<b>1(A,B,C,D)</b>	6%	Après 1j	2211
<b>1(A,B,C,D)</b>	6%	Après 14j	4699
<b>1(A,B,C,D)</b>	6%	Après 28j	9062

**Tableau V.18.** Variations des paramètres Proctor modifiée pour type 1 à différent délai du traitement

<b>Type 1 : Calcaire Phosphaté</b>								
<b>Echan.</b>	<b><math>\gamma_d</math></b>	<b><math>w_{optm}</math></b>	<b>%ciment</b>	<b>Date</b>	<b>P compac g</b>	<b>V échantillon cm 3</b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>	<b>w%</b>
<b>1(A,B,C,D)</b>	1.96 12.30		0%	1j	4015	2121.98	1,6966	11,52
<b>1(A,B,C,D)</b>	1.96 12.30		0%	14j	4025	2121.98	1,7925	5,82
<b>1(A,B,C,D)</b>	1.96 12.30		0%	28j	4030	2121.98	1,8392	3,26
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.09 14.00		2%	1j	4220	2121.98	1,8101	9,87
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.09 14.00		2%	14j	4270	2121.98	1,9221	4,69
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.09 14.00		2%	28j	4285	2121.98	1,9743	2,28
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.20 12.20		4%	1j	4455	2121.98	1,9447	7,96
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.20 12.20		4%	14j	4520	2121.98	2,0559	3,61
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.20 12.20		4%	28j	4604	2121.98	2,1298	1,87
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.27 11.00		6%	1j	4700	2121.98	2,0874	6,11
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.27 11.00		6%	14j	4770	2121.98	2,1790	3,16
<b>1(A,B,C,D)</b>	2.27 11.00		6%	28j	4775	2121.98	2,2181	1,45

**Tableau V.19.** Variations de la résistance à la compression pour -type 2- en fonction du temps et l'ajout du ciment

<b>Type 2 : Calcaire</b>			
<b>Échan.</b>	<b>Pourcentage du ciment</b>	<b>Écrasement</b>	<b>Resistance (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>1(A,B,C,D)</b>	0%	Après 1j	520
<b>2(A,B,C,D)</b>	0%	Après 14j	2671
<b>3(A,B,C,D)</b>	0%	Après 28j	2807
<b>4(A,B,C,D)</b>	2%	Après 1j	1760
<b>5(A,B,C,D)</b>	2%	Après 14j	3522
<b>6(A,B,C,D)</b>	2%	Après 28j	3962
<b>7(A,B,C,D)</b>	4%	Après 1j	1874
<b>8(A,B,C,D)</b>	4%	Après 14j	4781
<b>9(A,B,C,D)</b>	4%	Après 28j	6856
<b>10(A,B,C,D)</b>	6%	Après 1j	2746
<b>11(A,B,C,D)</b>	6%	Après 14j	7951
<b>12(A,B,C,D)</b>	6%	Après 28j	13015

**Tableau V.20.** variations des paramètres Proctor modifiée pour type 2 à différent délai du traitement

<b>Type 2 : Calcaire</b>							
<b>Échan.</b>	<b><math>\gamma_d</math> <math>w_{opm}</math></b>	<b>%ciment</b>	<b>Date</b>	<b>P. Compac g</b>	<b>V échantillon cm<sup>3</sup></b>	<b><math>\gamma_d</math> g/cm<sup>3</sup></b>	<b>w%</b>
<b>1(A,B,C,D)</b>	1.98 14.00	0%	1j	4090	2121.98	1,7133	12,5
<b>2(A,B,C,D)</b>	1.98 14.00	0%	14j	4100	2121.98	1,8211	6,1
<b>3(A,B,C,D)</b>	1.98 14.00	0%	28j	4105	2121.98	1,8727	3,3
<b>4(A,B,C,D)</b>	2.10 13.95	2%	1j	4290	2121.98	1,8346	10,2
<b>5(A,B,C,D)</b>	2.10 13.95	2%	14j	4325	2121.98	1,9504	4,5
<b>6(A,B,C,D)</b>	2.10 13.95	2%	28j	4395	2121.98	2,0230	2,38
<b>7(A,B,C,D)</b>	2.20 12.60	4%	1j	4500	2121.98	1,9509	8,7
<b>8(A,B,C,D)</b>	2.20 12.60	4%	14j	4590	2121.98	2,0919	3,4
<b>9(A,B,C,D)</b>	2.20 12.60	4%	28j	4640	2121.98	2,0230	1,9
<b>10(A,B,C,D)</b>	2.29 11.30	6%	1j	4700	2121.98	2,0744	6,98
<b>11(A,B,C,D)</b>	2.29 11.30	6%	14j	4760	2121.98	2,1938	2,25
<b>12(A,B,C,D)</b>	2.29 11.30	6%	28j	4816	2121.98	2,2427	1,2

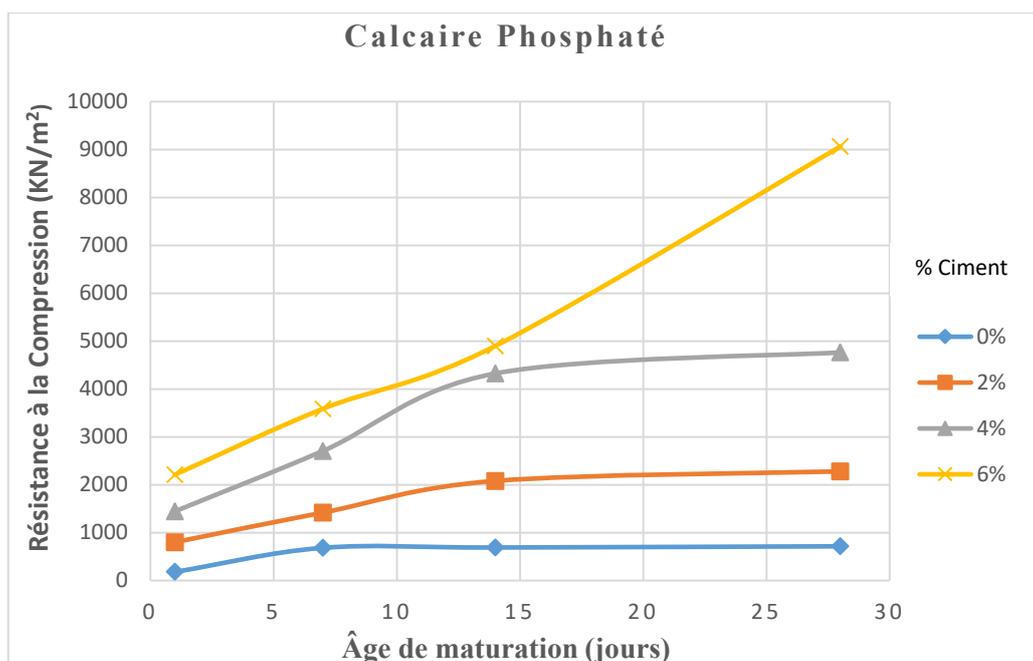


Figure V.12. Évolutions de la résistance à la compression pour type 1 en fonction du temps et l'ajout du ciment.

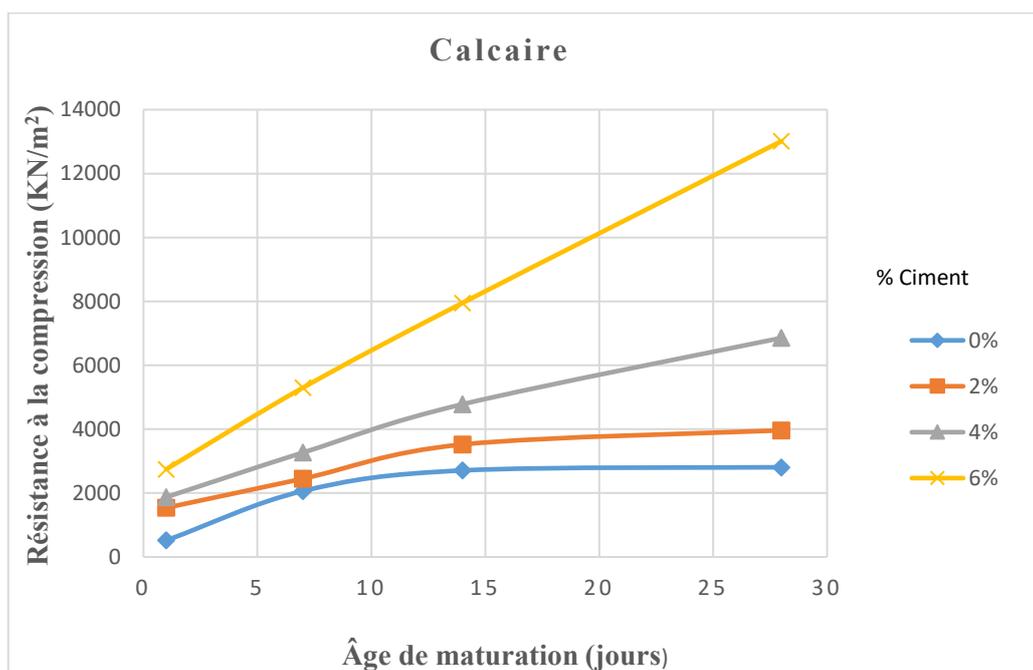


Figure V.13. Évolutions de la résistance à la compression pour type 2 en fonction du temps et l'ajout du ciment.

Dans premier temps, des essais de compression simple ont été réalisés pour les deux types de sols naturels à un âge de 1, 14 et 28 jours pour type 1 et 2. Les éprouvettes confectionnées à l'optimum Proctor modifiée, il est à noter que la résistance en compression est plus faible pour type 1 que type 2 à l'état naturel. Ces graphes représentent l'évolution de la résistance à la compression simple des deux types des sols avant et après traitement

aux différents pourcentages de ciment et pour trois différentes durées de cure 1, 14 et 28 jours. Les résistances des deux types du sol 1 et 2 évoluent rapidement, à 28 jours et aux teneurs en liants de 6 %, le sol de type 2 présente de meilleures résistances de 13,015 MPa. Pour le sol 1 et de 9,062 MPa pour type 2, ces résultats confirment l'effet du temps de cure sur l'amélioration de la résistance des mélanges type 1, 2 plus pourcentage du ciment, qui est une expression de durcissement qui se produit dans le temps. Ainsi cette augmentation peut être expliquée aisément par la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment et l'addition des matériaux fins dans les sols qui implique une augmentation de la cohésion. La raison de la forte augmentation de la résistance à la compression après à 28 jours est justifiée par la réaction d'hydratation du ciment pendant cette période, le critère de traficabilité (limite de 1 MPa) est satisfait dès 1 jour pour type 1 ; même pour sol de type 2, ce critère est satisfait à 1 jour, mais ce critère n'est satisfait qu'après 14 jours pour 2% de LH.

## **V.6. Conclusion**

Cette étude a montré que les deux types de stériles étudiés peuvent être utilisés comme matériaux de couche de forme et de remblais dans la construction routière avec précaution. Cependant, en utilisant la technique de traitement avec liants hydrauliques, leur capacité portante est améliorée, ce qui peut permettre d'augmenter leur classe de faisabilité. L'ajout de ciment aux échantillons de sols a amélioré leurs caractéristiques mécanico-physiques, telles que les paramètres d'essais Proctor modifiés, CBR. De plus, l'ajout de ciment a augmenté la portance des mélanges, réduit le gonflement et augmenté la résistance en compression des échantillons.

Ces résultats montrent que le traitement avec liants hydrauliques est une solution pour améliorer les performances des matériaux de couche de forme et de remblais dans la construction routière. En outre, les conditions réelles de la construction routière doivent également être prises en compte lors de l'utilisation de ces matériaux traités avec des liants hydrauliques, afin de s'assurer de leur sécurité et de leur durabilité à long terme.

# Conclusion Générale

---

Dans ce travail nous avons effectué une caractérisation des stériles miniers de la mine de kef-Esmnoun, en vue de leur utilisation dans les travaux de construction routière. Ces résidus miniers (calcaire phosphaté et calcaire) de la mine de Djebel El-Onk qui appartenant au domaine de l'atlas saharien est caractérisée par une structure géologique cassante, cette dernière présente un massif montagneux calcaire qui culmine à 1338 mètres et dont le flanc Nord descend en pente douce tandis que le flanc Sud plonge rapidement sous les dépôts du miocène et du quaternaire.

La gestion des résidus et des déchets des mines et des carrières est une condition essentielle pour limiter les impacts environnementaux, écologiques et géotechniques. Les principaux résultats de cette étude peuvent être résumés comme suit :

- Les déchets contiennent principalement du CaO, du SiO<sub>2</sub> et du MgO. Le calcaire phosphaté a une concentration élevée de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (22,66 % en poids) par rapport au calcaire (0,89 % en poids). En termes d'éléments traces, une très faible concentration de Pb, Zn et Cu a été détectée. La composition minéralogique des deux déchets de phosphate contient quatre minéraux principaux : Carbonate-fluorapatite, Calcite, Dolomite, et Quartz ;
- Les matériaux sont des graves propres mal gradués (Gm) contenant toutes les tailles de grains, des galets à l'argile. Les particules sont de forme angulaire avec un indice de plasticité très faible. Elles n'ont pas de grains de plus de 50 mm, une proportion de passage de 80 m inférieure à 12 %, et moins de 70 % de grains de 2 mm ;
- Les coefficients de Los Angeles et de Micro-Deval des matériaux étudiés dépassent 45%. Où sont classés en B42 ts pour le calcaire phosphaté et B42 s pour le calcaire ;
- Du point de vue du comportement mécanique et de l'applicabilité dans la construction des routes, les valeurs de (CBR) et (Rc), augmentent avec (DSM), également les (Rc) augmentent avec les âges de maturation ;
- Les performances mécaniques des déchets de calcaire sont plus appropriées que celles du calcaire phosphaté, qui est régi essentiellement par la teneur en phosphate (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> % en poids). Les propriétés mécaniques diminuent avec

l'augmentation de la teneur du phosphate. En revanche, le calcaire phosphaté présente une faible plasticité et une plus grande proportion de phosphate friable, ce qui entraîne une moindre compaction du matériau ;

- En termes d'impacts environnementaux, la réutilisation efficace des déchets miniers dans le domaine des matériaux routiers permet de réduire la production d'énormes quantités de déchets, minimisant ainsi les dommages environnementaux et assurant une construction durable. Les deux déchets considérés dans cette étude pourraient être utilisés dans la construction de la structure de la chaussée à condition qu'ils soient traités avec des liants hydrauliques.

Pour cette raison, nous avons décidé d'approfondir des recherches sur les deux types de matériaux avec la technique de traitement au liant hydraulique (ciment) pour permettre améliorer leur capacité portante et donc monter leur classe.

L'étude du comportement mécanique au laboratoire des deux types du stériles par l'ajout d'un pourcentage de ciment allant de 2% à 6% montre une augmentation des caractéristiques mécanico-physique (amélioration des paramètres d'essais Proctor modifié, CBR, compression simple et essai ultrasonique).

- Des caractéristiques de compactage au Proctor modifié et valeurs de l'IPI ont été déterminées pour le sol naturel et pour les sols traités aux trois différents pourcentages de (ciment) de 2%, 4% et 6%, ce sont des pourcentages de ciment utilisés pour évaluer la qualité du traitement. Le ciment augmente le poids volumique sec maximal et diminue la teneur en eau optimale. Elle augmente aussi les valeurs de l'IPI après le traitement ;
- L'addition du ciment donne un accroissement de la portance des mélanges, d'après les résultats de l'essai CBR effectué sur les déchets de type calcaire phosphaté avec différents pourcentages de ciment. Les résultats de l'indice CBR sont de 177, 35 % seulement avec 2% ciment ;
- De plus, une amélioration est accompagnée par la réduction du gonflement d'une valeur de 0.051 0.020 pour type 1 et 2, avec seulement un traitement de 2%, la diminution du potentiel de gonflement par l'ajout de ciment apparaissait meilleure pour les deux stériles, et qui représente un point très positif pour l'utilisation du mélange dans le domaine routier. Les modules de déformation

pour type 1'augmentent en fonction de la teneur en ciment (0 à 2%) de 52342.10 à 296129.46 kN/m<sup>2</sup> ;

- On observe aisément que le pH augmente en fonction de pourcentage de ciment, le pH égal à (6.8 - 7.8) pour type 1 et 2 à l'état naturel, et (9.4 - 11) avec traitement à 6%. ;
- L'évolution de la rigidité du sol après le traitement est examinée par les essais de compression simple et ultrasonique. Pour les essais de compression simple, on observe que la valeur de ( $R_c$ ) augmente avec l'addition du pourcentage de ciment, et que la valeur de ( $R_c$ ) à un jour avec de 4 et 6 % de ciment, est plus grande que celle de quatorze jours sans ciment ;
- La résistance en compression ( $R_c$ ) des éprouvettes augmente avec le pourcentage des ciments. La valeur de la résistance a pu atteindre 9 ,062MPa pour le sol 1 et de13 ,015 MPa pour type 2 pour un traitement de 6% à 28 jours ;
- Le traitement des déchets stériles miniers de type 1 et 2 avec 2% de ciment CPJ42.5 permet d'améliorer la portance du matériau et de réduire l'épaisseur de la couche de forme nécessaire pour répondre aux réglementations de GTR2000. En conséquence, la solution de traitement est économique par rapport à l'utilisation d'un matériau non traité, principalement en raison de la faible quantité de ciment ajoutée. Toutefois, certains coûts supplémentaires tels que le répandage et le malaxage du ciment n'ont pas été pris en compte et pourraient affecter le coût total de la solution de traitement.

Donc ces matériaux après traitement sont utilisables dans la couche forme ainsi on peut les utiliser dans la couche assise (couche de base et fondation) avec un pourcentage de ciment de 2% seulement, qui a conféré un *CBR* de 177.35% selon FM5-430-00-2.

### **Point économique**

Les stériles miniers (de deux types 1 et 2) répondent favorablement au traitement et la solution traitement reste avantageuse. Compte tenu de son intérêt environnemental, au point économique. Le traitement des déchets avec 2% de ciment CPJ42.5 améliore la portance du matériau ce qui conduit à une épaisseur de la couche de forme de 50cm plus faible que celle réalisée avec un matériau non traité qui est de 80cm, comme exemple.

Ces épaisseurs sont tirées des règlements de GTR2000 après avoir fait le calcul des couts des matériaux et des prestations de la mise en place de la couche de forme, la

solution de traitement s'avère plus économique, cela est dû sans doute à la faible quantité de ciment ajoutée (seulement 2%), bien que nous n'ayons pas considéré tous les coûts supplémentaires, notamment le répendage et le malaxage du ciment qui peuvent engendrer un coût plus élevé que celui calculé. En outre, l'intérêt environnemental du traitement des déchets stériles miniers doit également être pris en compte dans l'analyse économique.

### **Perspectives et recommandations**

Comme perspectives, on pourrait envisager des études et aussi d'enrichir un peu plus les bases de données expérimentales sur le sujet tels que :

- Étude de la durabilité du traitement dans des conditions environnementales variées et sévères. Étude et évaluation de l'efficacité du traitement en présence de différents composés organiques en termes de gain de résistance ;
- Étudier le comportement des sols argileux traités à l'aide de l'appareil triaxial qui permettra sans doute d'approfondir la compréhension du comportement mécanique de ces sols (module de déformation des matériaux à des cycles de déchargement rechargement) ;
- Faire étude sur les Paramètres du cisaillement direct ;
- Faire une étude complète du comportement mécanique de sol traité à long terme ;
- Valider des résultats trouvés par la modélisation numérique du sol traité ;

Suivre le comportement des remblais traités à long terme par l'emplacement d'instruments en place tels que le tassomètre par exemple.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Amrani, M., Taha, Y., Kchikach, A., Benzaazoua, M., and Hakkou, R. (2019). Valorization of Phosphate Mine Waste Rocks as Materials for Road Construction: Minerals, Vol. 9, No. 4, p. 237, DOI: 10.3390/min9040237. Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales ÉDITION : Août 2008 Révisé : 5 février 2010, Cahier 5 échantillonnage des sols. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Page 20,21, 24,25
- [2] Lidelow, S., Macsik, J., Carabante, I., Kumpiene, J. (2017). Leaching behaviour of copper slag, construction and demolition waste and crushed rock used in a full-scale road construction. *Journal of Environmental Management*, Vol. 204, pp. 695–703, DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.032
- [3] Djellali, A., Salah, M., Behrooz, L., and Abdelkader, S. (2019). Evaluation of Cement-Stabilized Mine Tailings as Pavement Foundation Materials: Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 8, DOI: 10.1007/s10706-018-00796-8.
- [4] Nguyen, T.H., Nguyen, T.T.T., Nguyen, T.T.H. and Phan, V.T. 2022. The Feasibility of Applying Waste Concrete as Coarse Aggregates in New Concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 12, 5 (Oct. 2022), 9192–9195. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.5206>.
- [5] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Ali, M.M.Y., and Bo, M.W. (2012). Geotechnical Properties of Recycled Concrete Aggregate in Pavement Sub-Base Applications: Vol. 35, No. 5, pp. 1–9.
- [6] Arulrajah, A., Piratheepan, J., Disfani, M.M., and Bo, M.W. (2013). Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications: *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 25, No. 8, pp. 1077–1088, DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000652.
- [7] Zhang, J.; Gu, F.; Zhang, Y. (2019). Use of building-related construction and demolition wastes in highway embankment: Laboratory and field evaluations. *J. Clean. Prod.*, 230, 1051–1060, doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.1
- [8] Bian, Z., Dong, A.E.J., Lei, A.S., Leng, H., Mu, A.S., and Wang, A.H. (2009). The impact of disposal and treatment of coal mining wastes on environment and farmland: pp. 625–634, DOI: 10.1007/s00254-008-1537-0.
- [9] Haibin, L., and Zhenling, L. (2010). Resources, Conservation and Recycling Recycling utilization patterns of coal mining waste in China: 'Resources, Conservation & Recycling', Vol. 54, No. 12, pp. 1331–1340, DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.05.005.
- [10] Al-Fahdawi, F.A., Al-Hadithi, A.I. and Al-Asafi, J.A. 2022. The Mechanical Properties of Ferrocement Mortar with Waste Plastic Fibers at Elevated Temperatures. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 12,5(Oct.2022),9347–9350. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.5209>.
- [11] Khan, I.M., Kabir, S., Alhussain, M.A., and Almansoor, F.F. (2016). Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Asphalt Design using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction: *Procedia Engineering*, Vol. 145, No. May, pp. 1557–1564, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.04.196.
- [12] Hasan, H.A., Mohammed, H.A., and Masood, G.G. (2020). Effect of rubber tire on behaviour of subgrade expansive Iraqi soils: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 870, No. 1, DOI: 10.1088/1757-899X/870/1/012066.
- [13] Disfani, M.M., Arulrajah, A., Bo, M.W., and Hankour, R. (2011). Recycled crushed glass in road work applications: *Waste Management*, Vol. 31, No. 11, pp. 2341–2351, DOI: 10.1016/j.wasman.2011.07.003.
- [14] Zumrawi, M.M.E., and Khalil, F.O.A. (2017). Experimental Study of Steel Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture: *Experimental Study of Steel Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture*: No. February, DOI: 10.11648/j.ajcbm.20170201.14.
- [15] Mohajerani, A., Vajna, J., Cheung, T.H.H., Kurmus, H., Arulrajah, A., and Horpibulsuk, S. (2017). Practical recycling applications of crushed waste glass in construction materials: A review: *Construction and Building Materials*, Vol. 156, pp. 443–467, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.005.
- [16] Castro-gomes, J.P., Silva, A.P., Cano, R.P., Suarez, J.D., and Albuquerque, A. (2012). Potential for reuse of tungsten mining waste-rock in technical-artistic value added products: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 25, pp. 34–41, DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.11.064.
- [17] Dubois, V., Abriak, N.E., Zentar, R., and Ballivy, G. (2009). The use of marine sediments as a pavement base material: *Waste Management*, Vol. 29, No. 2, pp. 774–782, DOI: 10.1016/j.wasman.2008.05.004.
- [18] Reddy, C.S., Mohanty, S., and Shaik, R. (2018). Physical, chemical and geotechnical characterization of fly ash, bottom ash and municipal solid waste from Telangana State in India: *International Journal of Geo-Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 1–23, DOI: 10.1186/s40703-018-0093-z.
- [19] Dos Santos, T.G.; Martins, L.F.R.; Sosa, E.R. Technological characterization of tailings from iron and gold mining with a geoenvironmental focus for reuse in geotechnical application. *Environ. Sci. Eng.* 2019, 1, 253–260, doi:10.1007/978-981-13-2227-3\_31.
- [20] Sridevi, G., Sahoo, S., Sen, S., Red, A., and Lime, A.F.A. (2019). *Ground Improvement Techniques and Geosynthetics*, Springer Singapore.
- [21] Bheel, N., Jokhio, M.A., Abbasi, J.A., Lashari, H.B., Qureshi, M.I. and Qureshi, A.S. 2020. Rice Husk Ash and Fly Ash Effects on the Mechanical Properties of Concrete. *Engineering, Technology & Applied Science Research*. 10,2(Apr.2020),5402–5405. DOI: <https://doi.org/10.48084/etasr.3363>.
- [22] Ahmari, S., and Zhang, L. (2013). Utilization of cement kiln dust (CKD) to enhance mine tailings-based geopolymer bricks: *Construction and Building Materials*, Vol. 40, pp. 1002–1011, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.069.
- [23] Salahudeen, A.B., Eberemu, A.O., and Osinubi, K.J. (2014). Assessment of Cement Kiln Dust-Treated Expansive Soil for the Construction of Flexible Pavements: DOI: 10.1007/s10706-014-9769-0.

- [24] U.S. Geological Survey, (2020), BioData—Aquatic bioassessment data for the Nation: U.S. Geological Survey database, accessed February 20, 2020, at <https://doi.org/10.5066/F77W698B>.
- [25] Boumaza, B., Kechiched, R., Chekushina, T. V. (2021). Trace metal elements in phosphate rock wastes from the Djebel Onk mining area (Tébessa, eastern Algeria): a geochemical study and environmental implications: *Applied Geochemistry* 127, 104910. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104910>
- [26] Figueroa, J.L., Zhou, L., and Chang, W.F. (1987). Use of Phosphate Mining Waste in Secondary Road Construction.: *Transportation Research Record*, Vol. 1, No. 4, pp. 59–64.
- [27] Shen, W., Zhou, M., and Zhao, Q. (2007). Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder: *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 7, pp. 1480–1485, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.07.010.
- [28] Shen, W., Zhou, M., Ma, W., Hu, J., and Cai, Z. (2009). Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material: *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 164, No. 1, pp. 99–104, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.07.125.
- [29] Ahmed, A.A., and Abouzeid, A.Z.M. (2009). Potential Use of Phosphate Wastes As Aggregates in Road Construction: *JES. Journal of Engineering Sciences*, Vol. 37, No. 2, pp. 413–422, DOI: 10.21608/jesaun.2009.125357.
- [30] Ally, A.N., Blanche, M.M., Nana, U.J.P., Grâce, M.M., François, N., and Pettang, C. (2021). Recovery of Mining Wastes in Building Materials: A Review: *Open Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, No. 04, pp. 379–397, DOI: 10.4236/ojce.2021.114022.
- [31] Idrissi, H., Taha, Y., Elghali, A., El Khessaimi, Y., Aboulayt, A., Amalik, J., Hakkou, R., and Benzaazoua, M. (2021). Sustainable use of phosphate waste rocks: From characterization to potential applications: *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 260, p. 124119, DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.124119.
- [32] Cieslinski S. et al. "Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates de la région de Bir El Ater" (1985,1987), EREMP, 3-6-11-17, inédit.
- [33] Prian, G. P. et Cortiel Ph.,- Etude de développement du gisement de phosphate de Djebel Onk (Algérie). Rapport d'expertise géologique, (1993) B.R.G.M. France, p. 11-29, 133-149, 169-173, inédit
- [34] SO.NA.RE.M: Rapport sur les travaux de prospection et d'évaluation sur les phosphates dans le district minier du Djebel Onk. (1976 - 1978)
- [35] Chabou-Mostefai, S., (1987). Étude de la série phosphatée tertiaire du Djebel Onk, Algérie, Stratigraphie, Pétrographie, Minéralogie et Analyse Statistique. Thèse Doctorat. Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille, France, pp. 376.
- [36] Gadri, L.; Hadji, R.; Zahri, F.; Benghazi, Z.; Boumezeur, A.; Laid, B.M.; Raïs, K. (2015). The quarries edges stability in opencast mines: a case study of the Jebel Onk phosphate mine, NE Algeria. *Arab. J. Geosci*, doi:10.1007/s12517-015-1887-3.
- [37] Kechiched, R., Laouar, R., Bruguier, O., Kocsis, L., Salmi-Laouar, S., Bosch, D., Ameer-Zaimeche, O., Foufou, A., Larit, H., (2020). Comprehensive REE + Y and sensitive redox trace elements of Algerian phosphorites (Tébessa, eastern Algeria): A geochemical study and depositional environments tracking: *Journal of Geochemical Exploration* 208, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106396>
- [38] Kechiched, R., Laouar, R., Bruguier, O., Laouar-Salmi, S., Ameer-Zaimeche, O., and Foufou, A. (2016). Preliminary Data of REE in Algerian Phosphorites: A Comparative Study and Paleo-redox Insights: *Procedia Engineering*, Vol. 138, pp. 19–29, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.02.048.
- [39] Kechiched, R., Laouar, R., Bruguier, O., Salmi-Laouar, S., Kocsis, L., Bosch, D., Foufou, A., Ameer-Zaimeche, O., Larit, H. (2018). Glauconite-bearing sedimentary phosphorites from the Tébessa region (eastern Algeria): Evidence of REE enrichment and geochemical constraints on their origin: *Journal of African Earth Sciences* 145, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.05.018>.
- [40] Kassatkine, Y., Yahyaoui, A., Chatilov, S., 1980. The works of prospecting and assessment on phosphate executed in 1976–1978 in the mining district of Djebel Onk. In: SONAREM (Société Nationale de Recherche et d'Exploration Minière) Internal Report. 2. pp. 140 Algeria.
- [41] FERPHOS. Rapport technique de l'exploitation de la carrière de Djebel El Onk plan d'exploitation préliminaire du gisement de Bir el Ater rapport interne.
- [42] ORGM,: Rapport final sur les résultats des travaux d'exploration des phosphates du gisement de bled el hadba 2012\_2014 .37p.
- [43] A.N.R.H. Etude de synthèse sur les ressources en eaux de surface de l'Algérie du Nord, Alger, A.N.R.H. (2003). Rapport d'étude
- [44] ROUABHIA A, Vulnérabilité et risques de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod Nord-Est Algérien. (2006) Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba .158p.
- [45] GOUAIDIA L, Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Eord-Est Algérien. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar-(2008) Annaba.128p.
- [46] MAOUI A, Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise .Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar- (2007) Annaba.245p.
- [47] B. E. Amadi and E. U. Agwu "Engineering properties of natural rock materials"
- [48] M. Shahria Alam, Anum Irfan, and S.M. Al-Mamun "Manufactured Fine Aggregates in Construction: Current Trends and Future Opportunities" was published in the journal *Materials Today: Proceedings* in 2022.
- [49] Osman Hulusi Oren, Aliakbar Gholampour, Osman Gencil, Togay Ozbakkaloglu, Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, Volume 238, 2020, 117774, ISSN 09500618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.11777>
- [50] Biqin Dong, Chufa Chen, Guanqi Wei, Guohao Fang, Kai Wu, Yanshui Wang, Fly ash-based artificial aggregates synthesized through alkali-activated cold-bonded pelletization technology, *Construction and Building Materials*, Volume 344, 2022, 128268, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128268>.

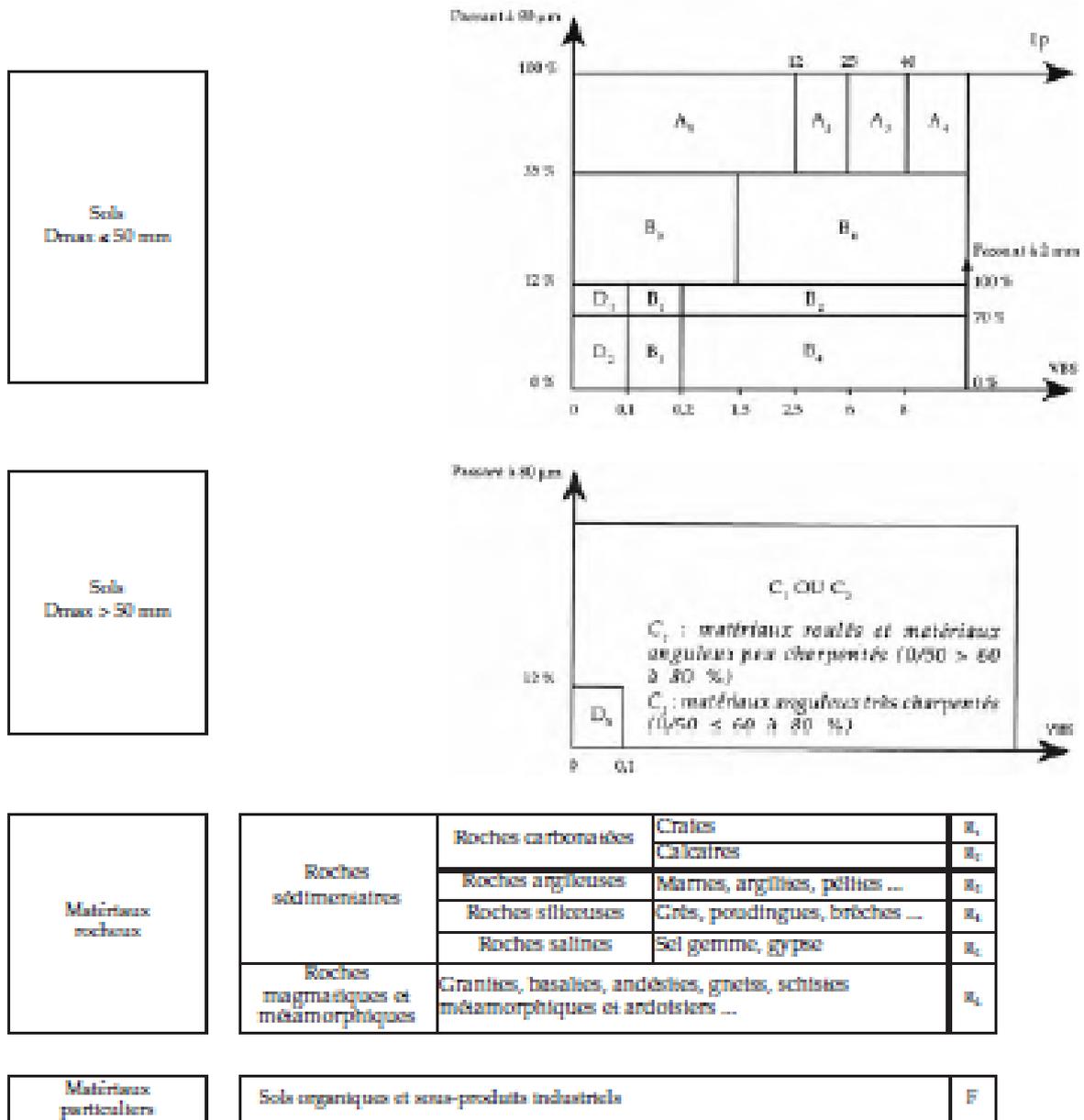
- [51] M.Adams Joe, A.Maria Rajesh, P.Brightson, M.Prem Anand, Experimental Investigation on The Effect Of M-Sand In High Performance Concrete ,American Journal of Engineering Research (AJER) e-ISSN : 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936 Volume-02, Issue-12, pp-46-51 www.ajer.org
- [52] Daneti Saradhi Babu, K. Ganesh Babu, Wee Tiong-Huan,Effect of polystyrene aggregate size on strength and moisture migration characteristics of lightweight concrete,Cement and Concrete Composites,Volume 28, Issue 6,2006,Pages 520-527,ISSN 0958-9465,https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.02.018.  
(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946506000497).
- [53] Annessh Borthakur, Kristida L. Chhour, Hannah L. Gayle, Samantha R. Prehn, Michael K. Stenstrom, Sanjay K. Mohanty,Natural aging of expanded shale, clay, and slate (ESCS) amendment with heavy metals in stormwater increases its antibacterial properties:Implications on biofilter design,Journal of Hazardous Materials,Volume 429,2022,128309,ISSN 0304-3894,https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128309.  
(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389422000978).
- [54] Paulo R. de Matos, Jade C.P. Oliveira, Taisa M. Medina, Diego C. Magalhães, Philippe J.P. Gleize, Rudiele A. Schankoski, Ronaldo Pilar,Use of air-cooled blast furnace slag as supplementary cementitious material for self-compacting concrete production,Construction and Building Materials,Volume 262,2020,120102,ISSN 0950-0618,https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120102.  
(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820321073).
- [55] S.C Pal, A Mukherjee, S.R Pathak,Investigation of hydraulic activity of groundgranulated blast furnace slag in concrete,Cement and Concrete Research,Volume 33, Issue 9,2003,Pages 1481-1486,ISSN 0008-8846,  
https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00062-0.  
(https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603000620)
- [56] Ha-Won Song, Velu Saraswathy,Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview,Journal of Hazardous Materials,Volume 138, Issue 2,2006,Pages 226-233,ISSN03043894,https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.07.022.
- [57] Erdoğan Özbay, Mustafa Erdemir, Halil İbrahim Durmuş,Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review,Construction and Building Materials,Volume 105,2016,Pages 423-434,ISSN 0950-0618,https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153.
- [58] Qifeng Song, Ming-Zhi Guo, Lei Wang, Tung-Chai Ling,Use of steel slag as sustainable construction materials: A review of accelerated carbonation treatment,Resources, Conservation and Recycling,Volume 173,2021,105740,ISSN 0921-3449,https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105740.
- [59] Moura, C.; Nascimento, L.; Loureiro, C.; Rodrigues, M.; Oliveira, J.; Silva, H. Viability of Using High Amounts of Steel Slag Aggregates to Improve the Circularity and Performance of Asphalt Mixtures. Appl. Sci. 2022, 12, 490. [Google Scholar] [CrossRef]
- [60] Goli, A. The study of the feasibility of using recycled steel slag aggregate in hot mix asphalt. Case Stud. Constr. Mater. 2022, 16, e00861. [Google Scholar] [CrossRef]
- [61] Zhao, X.; Sheng, Y.; Lv, H.; Jia, H.; Liu, Q.; Ji, X.; Xiong, R.; Meng, J. Laboratory investigation on road performances of asphalt mixtures using steel slag and granite as aggregate. Constr. Build. Mater. 2022, 315, 125655. [Google Scholar] [CrossRef]
- [62] Dongxing Xuan, Pei Tang, Chi Sun Poon,Limitations and quality upgrading techniques for utilization of MSW incineration bottom ash in engineering applications – A review,Construction and Building Materials,Volume 190,2018,Pages 1091-1102,ISSN 0950-0618,https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.174.
- [63] Diego Maria Barbieri, Baowen Lou, Robert Jason Dyke, Hao Chen, Fusong Wang, Billy Connor, Inge Hoff, Mechanical properties of roads unbound treated with synthetic fluid based on isoalkane and tall oil,Transportation Geotechnics,Volume 32,2022,100701,ISSN 2214-3912,https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100701.
- [64] P.J Wainwright, D.J.F Cresswell,Synthetic aggregates from combustion ashes using an innovative rotary kiln,Waste Management,Volume 21, Issue 3,2001,Pages 241-246,ISSN 0956-053X, https://doi.org/10.1016/S0956-053X(00)00096-9.
- [65] Sirdesai, N.N., Mahanta, B., Ranjith, P.G. et al. Effects of thermal treatment on physico-morphological properties of Indian fine-grained sandstone. Bull Eng Geol Environ 78, 883–897 (2019). https://doi.org/10.1007/s10064-017-1149-6
- [66] Bo Zhang, Wu Wei, Wei Shi, Yanwu Guo, Shengping Wen, Xiaolan Wu, Kunyuan Gao, Li Rong, Hui Huang, Zuoren Nie,Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Er-containing Al–7Si–0.6 Mg alloy by laser powder bed fusion, Journal of Materials Research and Technology,Volume 18,2022Pages 3073-3084,ISSN 2238-7854,
- [67] Łach, M., Mikuła, J. & Hebda, M. Thermal analysis of the by-products of waste combustion. J Therm Anal Calorim 125, 1035–1045 (2016). https://doi.org/10.1007/s10973-016-5512-9
- [68] Karbhari, V.M., Seible, F. Fiber Reinforced Composites – Advanced Materials for the Renewal of Civil Infrastructure. Applied Composite Materials 7, 95–124 (2000). https://doi.org/10.1023/A:1008915706226
- [69] AL-Oqla, F.M., Hayajneh, M.T. & Nawafleh, N. Advanced synthetic and biobased composite materials in sustainable applications: a comprehensive review. emergent mater. (2023). https://doi.org/10.1007/s42247-023-00478-z
- [70] Multazem Mohammed, Anteneh Geremew, Murad Mohammed, Abubekir Jemal, A study on the applicability of scoria gravel an alternative base course material through blending with marble waste aggregate,Heliyon,Volume 8, Issue 11,2022,e11742,ISSN 2405-8440,
- [71] Al-Mosawe, H.; Albayati, A.; Wang, Y.; Mashaan, N.S. An Experimental Study of Granular Material Using Recycled Concrete Waste for Pavement Roadbed Construction. Buildings 2022, 12, 1926. https://doi.org/10.3390/buildings12111926
- [72] Johnson Kwabena Appiah, Victor Nana Berko-Boateng, Trinity Ama Tagbor,Use of waste plastic materials for road construction in Ghana,Case Studies in Construction Materials,Volume 6,2017,Pages 1-7,ISSN 2214-5095,
- [73] DAWODU, Praise Onimisi, APATA, A. C., IMOH, U. U., et al. Comparative Study of Cement Replacement with Waste Plastic in Interlocking Paving Stone for Highway Construction in Nigeria. Journal of Engineering Research and Reports, 2023, vol. 24, no 1, p. 20-29.

- [74] S.E. Sapuay, Construction Waste – Potentials and Constraints, *Procedia Environmental Sciences*, Volume 35, 2016, Pages 714-722, ISSN 1878-0296,
- [75] He Wang, Punyaslok Rath, William G. Buttlar, Recycled asphalt shingle modified asphalt mixture design and performance evaluation, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 7, Issue 2, 2020, Pages 205-214, ISSN 2095-7564,
- [76] Mohammad Naser, Mu tasim Abdel-Jaber, Rawan Al-shamayleh, Nawal Louzi, Reem Ibrahim, Evaluating the effects of using reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate on the behavior of hot mix asphalts, *Transportation Engineering*, Volume 10, 2022, 100140, ISSN 2666-691X,
- [77] Daniele Rigotti, Andrea Dorigato, Novel uses of recycled rubber in civil applications, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Volume 5, Issue 4, 2022, Pages 214-233, ISSN 2542-5048,
- [78] Bavita Bhardwaj, Pardeep Kumar, Waste foundry sand in concrete: A review, *Construction and Building Materials*, Volume 156, 2017, Pages 661-674, ISSN 0950-0618,
- [79] Ivan Diaz-Loya, Maria Juenger, Saamiya Seraj, Rafic Minkara, Extending supplementary cementitious material resources: Reclaimed and remediated fly ash and natural pozzolans, *Cement and Concrete Composites*, Volume 101, 2019, Pages 44-51, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.06.011>.
- [80] Daman K. Panesar, 3 - Supplementary cementing materials, Editor(s): Sidney Mindess, In *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 2019, Pages 55-85, ISBN 9780081026168, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00003-4>.
- [81] Aditya Kumar Anupam, Praveen Kumar, G.D. Ransinchung R.N., Use of Various Agricultural and Industrial Waste Materials in Road Construction, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 104, 2013, Pages 264-273, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.119>.
- [82] Dimulescu, C.; Burlacu, A. Industrial Waste Materials as Alternative Fillers in Asphalt Mixtures. *Sustainability* 2021, 13, 8068. <https://doi.org/10.3390/su1314806>
- [83] Tejas Biranje, Omkar Lad, Shataratha Navale, Sumeet Bankar, Dr. Mrs. Sonali Dhokpande. (2022) Economical Application of Industrial Waste in Road Construction. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 291-300. Online publication date: 20-Feb-2022.
- [84] Service d'études techniques des routes et autoroutes, édition 1996, guide pratique : l'entretien courant Des chaussées, France, page 8
- [85] Le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour l'exécution des remblais et des couches de formes N° 89, Septembre 2004 : Document technique .
- [86] Irl. Rens., fédération de l'industrie cimentière belge ; le retraitement en place des chaussées au moyen de ciment ; 30 mars 2003 ; page 2
- [87] Traitement des sols à la chaux ou au ciment. Page ,2 : Fiches techniques
- [88] Code de bonne pratique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques ; édité par centre de recherches routières Bruxelles ; établissement reconnu par application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947, page 34 ,43.49.
- [89] Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – application à la réalisation des remblais et des couches de forme (gts), guide technique setra-lcpc, janvier 2000.
- [90] Vénuat m. 1980 : "traitement des sols à la chaux et au ciment". 459p.
- [91] Traitement des matériaux, par pierre Rossi et Guy Raoul, dossier délivré pour 22/09/2008, page 6, 9 ,19 ,18.
- [92] Lerm infos n° 28, le traitement des sols à la chaux, janvier 2014 page 6 ,7.
- [93] Armenti (Yannick), Bruant (Etienne). Ecole des mines de Douai. Etude de marché des produits de traitement pulvérulents pour l'amélioration des sols ». Promotion 2011. page 23 ,24.
- [94] Document technique, routes n°96 • juin 2006, le retraitement en place à froid des chaussées au ciment ou aux liants hydrauliques routiers, page 4 ,6
- [95] CERAD (2017), "Technical report on the exploitation of the Djebel El Onk quarry preliminary exploitation plan of the Bir el Ater deposit" internal report
- [96] Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales ÉDITION : Août 2008 Révisé : 5 février 2010, Cahier 5 échantillonnage des sols. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Page 20,21, 24,25
- [97] Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR), guide technique SETRA-LCPC, 2e édition, 1992.
- [98] Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, Guide technique : Réalisation des remblais et des couches de forme, Fascicule I, 2ème Edition Juillet 2000, réalisé par : Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, page 20 ,24.
- [99] P18-573. Aggregates. Los Angeles Test—Granulate. Los Angeles Pruefung; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1990.
- [100] P18-572. Aggregates. Micro-Deval Attribution Test; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1990.
- [101] NF P18-576. Aggregates. Sand Friability test; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1990.
- [102] NF-P94-050. Soils: Investigation and Testing. Determination of Moisture Content. Oven Drying Method; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1995.
- [103] NF P94-054. Soils: Investigations and Testing. Determination of unit weight of solid particles -Water pycnometer method; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1991.
- [104] NF-P94-068. Soils: Investigation and Testing. Measuring of the Methylene Blue Adsorption Capacity of a Rocky Soil. Determination of the Methylene Blue of a Soil by Means of the Stain test—Sols: Reconnaissance et essais; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1998.
- [105] NF-P94-051. Soil: Investigation and Testing. Determination of Atterberg's Limits. Liquid Limit Test Using Cassagrande Apparatus. Plastic Limit Test on Rolled Thread—Sols: Reconnaissance et Essais; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1993.

- [106]NF-P94-056. Soil: Investigation and Testing. Granulometric Analysis. Dry Sieving Method after Washing—Sols: Reconnaissance et essais; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1996.
- [107]NF-P94-093. Soils: Investigation and Testing—Determination of the Compaction Reference Values of a Soil Type—Standard Proctor Test—Modified Proctor Test—Sols: Reconnaissance et essais—Détermination des références de compactage d'un matériau—Essai Proctor Normal—Essai Proctor modifié; Association Française de Normalisation: Paris, France, 2014.
- [108]NF-P94-078. Soils: Investigation and Tests. CBR after Immersion. Immediate CBR. Immediate Bearing Ratio. Measurement on Sample Compacted in CBR Mould—Sols: Reconnaissance et essais; Association Française de Normalisation: Paris, France, 1997.
- [109]Jaleh Forouzan, A. Prediction of Swelling Behavior of Expansive Soils Using. 2016.
- [110]NF P98-230-3. Pavements Tests - Preparation of materials that are bound with hydraulic binders or unbound – part 3 - Laboratory manufacture of gravel or sand mixtures for use in test specimens Essais relatifs aux chaussées — Préparation des matériaux traités aux liants hydrauliques ou non traités —Partie 3 —Fabrication en laboratoire de mélange de graves ou de sables pour la confection d'éprouvettes.
- [111]Nettour, D.; Chettibi, M.; Bulut, G.; Benselhou, A. Beneficiation of Phosphate Sludge Rejected. *Min. Miner. Depos.* 2019, 3443.
- [112]Bounemia, L.; Mellah, A. Characterization of crude and calcined phosphates of Kef Essennoun (Djebel Onk, Algeria). *J. Therm. Anal. Calorim.* 2020, doi:10.1007/s10973-020-10167-2.
- [113]Soukeur, A.; Szymczyk, A.; Berbar, Y.; Amara, M. Extraction of rare earth elements from waste products of phosphate industry. *Sep. Purif. Technol.* 2021, 256, 117857, doi:10.1016/j.seppur.2020.117857.
- [114]Kechiched, R., Laouar, R., Bruguier, O., Kocsis, L., Salmi-Laouar, S., Bosch, D., Ameur-Zaimeche, O., Fougou, A., Larit, H., (2020). Comprehensive REE + Y and sensitive redox trace elements of Algerian phosphorites (Tébessa, eastern Algeria): A geochemical study and depositional environments tracking: *Journal of Geochemical Exploration* 208, 106396. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106396>
- [115]Buccione, R., Kechiched, R., Mongelli, G., Sinisi, R., (2021). REEs in the North Africa P-bearing deposits, paleoenvironments, and economic perspectives: a review: *Minerals* 11(2), 214.
- [116]Boumaza, B., Kechiched, R., Chekushina, T. V. (2021). Trace metal elements in phosphate rock wastes from the Djebel Onk mining area (Tébessa, eastern Algeria): a geochemical study and environmental implications: *Applied Geochemistry* 127, 104910. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104910>
- [117]Ferhaoui, S., Kechiched, R.; Bruguier, O., Sinisi, R., Kocsis, L., Mongelli, G., Bosch, D., Ameur-Zaimeche, O., Laouar, R. (2022). Rare earth elements plus yttrium (REY) in phosphorites from the Tébessa region (Eastern Algeria): Abundance, geochemical distribution through grain size fractions, and economic significance: *Journal of Geochemical Exploration*, 107058. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107058>
- [118]IS 2720 (Part XL), Methods of Test for Soils, Measurement of Swelling Pressure of Soils, Indian Standard, Delhi, India, 2002.
- [119]Behnood, A.; Tittelboom, K.V.; De Belie, N. Methods for measuring pH in concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* 2016, 105, 176–188. [CrossRef]
- [120]Nguyen, T.H.; Venugopala, T.; Chen, S.; Sun, T.; Grattan, K.T.V.; Taylor, S.E.; Basheer, P.A.M.; Long, A.E. Fluorescence based fibre optic pH sensor for the pH 10–13 range suitable for corrosion monitoring in concrete structures. *Sens. Actuators B Chem.* 2014, 191, 498–507. [CrossRef]
- [121]Martin-del-Rio, J.J.; Alejandre, F.J.; Marquez, G.; Blasco, F.J. An argument for using alizarine yellow R and indigo carmine to determine in situ the degree of alkalinity in reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* 2013, 40, 426–429. [CrossRef]

## Annexe A

**Tableau synoptique de la classification des matériaux  
selon leur nature**



**Classe B (suite)**

**SOLS SABLEUX ET GRAVELEUX  
AVEC FINES (suite)**

← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN REMBLAI →

← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN COUCHE DE FORME →

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe
D <sub>max</sub> ≤ 50 mm et tamisat à 80 µm ≤ 35%	<b>B</b> <b>Sols sableux et graveleux avec fines</b>	- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm ≤ 70% - V <sub>80</sub> > 0,2 ou I <sub>p</sub> ≤ 25	<b>B<sub>1</sub></b> Graves argileuses (ou argileuses)	La plasticité de leurs fines rend ces sols sensibles à l'eau. Ils sont plus graveleux que les sols B <sub>2</sub> et leur fraction sableuse est plus faible. Pour cette raison, ils sont en général perméables. Ils réagissent assez rapidement aux variations de l'environnement hydrique et climatique (humidification - séchage). Lorsqu'ils sont extraits dans la nappe, il est assez peu probable, en climat océanique, que leur état hydrique puisse s'améliorer jusqu'à devenir "moyen". Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, et/ou Micro Deval en présence d'eau, MDE).	IP <sub>1</sub> ≤ 7 ou W <sub>1</sub> ≥ 1,25 W <sub>100</sub>	B <sub>1</sub> th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>1</sub> th
					7 < IP <sub>1</sub> ≤ 15 ou 1,10 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 1,25 W <sub>100</sub>	B <sub>1</sub> h	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>1</sub> h
					0,9 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 1,10 W <sub>100</sub>	B <sub>1</sub> m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>1</sub> m
					0,6 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 0,9 W <sub>100</sub>	B <sub>1</sub> s	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>1</sub> s
					W <sub>1</sub> < 0,6 W <sub>100</sub>	B <sub>1</sub> ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>1</sub> ts
							LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>1</sub> ts
		- tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% - V <sub>80</sub> ≤ 1,5 ou I <sub>p</sub> ≤ 12	<b>B<sub>2</sub></b> Sables et graves très siliceux...	La proportion de fines et la faible plasticité de ces dernières, rapprochent beaucoup le comportement de ces sols de celui des sols A <sub>1</sub> . Pour la même raison qu'indiquée à propos des sols A <sub>1</sub> , il y a lieu de préférer le critère VBS au critère I <sub>p</sub> , pour l'identification des sols B <sub>2</sub> . Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite de connaître leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, et/ou Micro Deval en présence d'eau, MDE).	IP <sub>1</sub> ≤ 5 ou W <sub>1</sub> ≥ 1,25 W <sub>100</sub>	B <sub>2</sub> th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>2</sub> th
					5 < IP <sub>1</sub> ≤ 12 ou 1,10 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 1,25 W <sub>100</sub>	B <sub>2</sub> h	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>2</sub> h
					12 < IP <sub>1</sub> ≤ 30 ou 0,9 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 1,10 W <sub>100</sub>	B <sub>2</sub> m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>2</sub> m
					0,6 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 0,9 W <sub>100</sub>	B <sub>2</sub> s	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>2</sub> s
					W <sub>1</sub> < 0,6 W <sub>100</sub>	B <sub>2</sub> ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>2</sub> ts
							LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>2</sub> ts
		- tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% - V <sub>80</sub> > 1,5 ou I <sub>p</sub> > 12	<b>B<sub>3</sub></b> Sables et graves argileux à très argileux	L'influence des fines est prépondérante ; le comportement du sol se rapproche de celui du sol fin ayant même plasticité que les fines du sol avec toutefois une plus grande sensibilité à l'eau due à la présence de la fraction sableuse en plus grande quantité.	IP <sub>1</sub> ≤ 4 ou W <sub>1</sub> ≥ 1,3 W <sub>100</sub> ou I <sub>c</sub> ≤ 0,8	B <sub>3</sub> th		
					4 < IP <sub>1</sub> ≤ 10 ou 0,8 < I <sub>c</sub> ≤ 1 ou 1,1 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 1,3 W <sub>100</sub>	B <sub>3</sub> h		
					10 < IP <sub>1</sub> ≤ 25 ou 1 < I <sub>c</sub> ≤ 1,2 ou 0,9 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 1,1 W <sub>100</sub>	B <sub>3</sub> m		
					0,7 W <sub>100</sub> ≤ W <sub>1</sub> < 0,9 W <sub>100</sub> ou 1,2 < I <sub>c</sub> ≤ 1,3	B <sub>3</sub> s		
					W <sub>1</sub> < 0,7 W <sub>100</sub> ou I <sub>c</sub> > 1,3	B <sub>3</sub> ts		

Les paramètres inscrits en **caractères gras** sont ceux dont le choix est à privilégier.

## CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

**B<sub>4</sub>** (états m, s et ts)

Sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en remblai	Code						
					E	G	W	T	R	C	H
<b>B<sub>4</sub>m</b>	Ces sols sont très sensibles à la situation météorologique	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai, avec des garanties de qualité suffisantes	NON						
		+	pluie faible	E : extraction frontale C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	2	0	0	0	0	2	2
		=	ni pluie, ni évaporation importante	C : compactage moyen	0	0	0	0	0	2	0
		-	évaporation importante	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense	0	0	0	0	0	1	0
				Solution 2 : arrosage W : arrosage pour maintien de l'état C : compactage moyen	0	0	3	0	0	2	0
<b>B<sub>4</sub>s</b>	Pour ces sols, il faudra compenser l'effet néfaste de la faible teneur en eau par un compactage intense, un arrosage ou une humidification. L'humidification dans la masse pour changer d'état est relativement facile à réaliser	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai, avec des garanties de qualité suffisantes	NON						
		+	pluie faible	E : extraction en couche R : couches minces C : compactage intense	1	0	0	0	1	1	0
		=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0	0	0	0	0	1	2
				Solution 2 : humidification W : humidification pour changer de l'état R : couches minces C : compactage moyen	0	0	4	0	1	2	0
		-	évaporation importante	Solution 1 : arrosage W : arrosage pour maintien de l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0	0	3	0	0	1	2
				Solution 2 : humidification W : humidification pour changer d'état R : couches minces C : compactage moyen	0	0	4	0	1	2	0
		<b>B<sub>4</sub>ts</b>	<b>Sols normalement inutilisables en l'état</b> Mais dans certains cas leur humidification peut être envisagée pour les amener à l'état 's' ou 'm'				NON				

## CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

**B<sub>12</sub>, B<sub>11</sub>, B<sub>10</sub>**

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Épaisseur préconisée de la couche de forme e (en m.) et classe PF de la plate-forme support de chaussée					
						PST n° 1		PST n° 2		PST n° 3	PST n° 4
						AR1	AR1	AR1	AR2	AR2	
B <sub>12</sub> h		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON						
				m OU -	pas de pluie						T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné
B <sub>10</sub> m	Les sols de cette classe contiennent une fraction fine en faible quantité mais cependant suffisante pour leur conférer une grande sensibilité à l'eau. Par ailleurs leur fraction grossière est trop faible pour envisager l'usage simple après démixtion de cette fraction fine. La seule solution est donc de les traiter avec un liant hydraulique. Ces sols se traitent en place (ou en centrale lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec).	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	e = 0,25	e = 0,25	e = 0,25	e = 0,25	
				m OU -	pas de pluie						W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné
B <sub>10</sub> s		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON						
				m OU -	pas de pluie						W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné
B <sub>11</sub> h et B <sub>12</sub> h	La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique nécessairement de les traiter pour les utiliser en couche de forme.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON						
				m OU -	pas de pluie						T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné
B <sub>11</sub> m et B <sub>10</sub> m	Ce traitement peut être un traitement aux liants hydrauliques pour les moindres angles de la classe ou un traitement associé chaux + liant hydraulique pour les plus angles et les plus humides. Ces sols se traitent le plus souvent en place et éventuellement en centrale après les avoir traités en place à la chaux.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)	e = 0,25	e = 0,25	e = 0,25	e = 0,25	
				m OU -	pas de pluie						W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné
B <sub>11</sub> s et B <sub>10</sub> s		+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON						
				m OU -	pas de pluie						W : Humidification pour changer l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné

