

# REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique.

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued.



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de  
GénieCivile

## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Génie Civile.

Option : Matériaux de génie civile.

Présenté par :-**MAALOUL Fatiha.**  
**-RIGHI Rahma .**

## THEME:

**Amélioration des propriétés physico-mécanique  
d'un sable gypseux (cas de la région d'El-Oued).**

**(Etude théorique).**

<b>Mr. BEDADI Mohammed laide.</b>	<b>Docteur</b>	Université d'El Oued.
<b>Mr . LABIODH Bachir.</b>	<b>Docteur</b>	Université d'El Oued.
<b>Mr. DJEDID Tarek.</b>	<b>Docteur</b>	Université d'El Oued.
<b>Mr. FARIK Ali.</b>	<b>Docteur</b>	Université d'El Oued.

**Année Universitaire : 2019/ 2020.**



# *Remerciements*

*Nous exprimons nos sincères remerciements et notre gratitude aux professeurs respectés DJEDID Tarek et FARIK Ali pour leurs conseils sur ce travail et leurs précieux conseils.*

*À notre ami étudiant AZZOUZ Soumiea, à M. NDJEIMA Khalifa pour le suivi qu'il nous a donné ses conseils et ses orientations, ainsi que ses encouragements tout au long de ce travail.*

*Nous exprimons notre gratitude à M. DIAB Djaafar, M. ZEGHDI Othman, M. ZERIG Tahar, KARROUCHI Mbarek et M. MAHMOUDI Bachir.*

*Nous remercions également tous les amis et ceux qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes parents*

*À mes frères et sœurs*

*À tous mes amis, et tous ceux qui me tiennent à cœur et à tous  
ceux qui nous ont aidés à accomplir ce travail.*

MAALOUL Fatiha



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes parents*

*À mes frères et sœurs*

*À tous mes amis, et tous ceux qui me tiennent à cœur et à tous  
ceux qui nous ont aidés à accomplir ce travail.*

**RIGHI Rahma**

## ملخص:

يعتبر مشكل قلة مواد البناء (المواد الأولية لإنشاء الطرق) من بين المشاكل المطروحة في هياكل الهندسة المدنية، وإنجاز الطرق يعتمد أساسا على استخدامها (الرمل الجبسي، الزفت...) و التي يجب أن تكون بمواصفات مطابقة للمقاييس.

في دراستنا النظرية هذه تطرقنا إلى بعض التعريفات و إلى شرط اختيار الرمل الجبسي و هو ضرورة تلبية متطلبات القوة الفنية وأهمها متطلبات ثبات مقاومة الضغط وكذلك المتطلبات الاقتصادية , تهدف دراستنا " النظرية " للإفادة و الارشاد لصالح البحث "التجريبي" القائم على تحسين الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للرمل الجبسي في ولاية الوادي و كان ذلك من خلال تقديم خصائص الرمل الجبسي لأغلب محاجر الولاية مع ذكر ايجابياتها و سلبياتها , و عرض طرق و مناهج التحسين و العلاج "من خلال الدراسات السابقة " لأجل الاستغلال الامثل للمادة المحلية ( الرمل الجبسي ).

و قد خلصت الدراسة بعمل مرضي نوعا ما من حيث ما قدمته من نتائج الدراسات السابقة "في هذا السياق" التي كانت ناجحة و لا شك في أنها مفيدة جدا في الدراسات التجريبية المستقبلية في تحسين الرمل الجبسي لولاية الوادي.

**الكلمات المفتاحية:** الرمل الجبسي, ولاية الوادي, دراسة نظرية, الدراسات السابقة .

## Résumé:

Le problème du manque de matériaux de construction (matières premières pour la construction de routes) fait partie des problèmes soulevés dans les ouvrages de génie civil, et l'achèvement des routes dépend principalement de leur utilisation (sable gypseux, asphalte ...), qui doit être conforme aux normes.

Dans notre étude théorique, nous avons traité de quelques définitions et de la condition de choix du sable gypseux , qui est la nécessité de répondre aux exigences de résistance technique, dont la plus importante est les exigences de stabilité de résistance à la pression ainsi que les exigences économiques. Notre étude «théorique» vise à bénéficier et guider en faveur de la recherche «expérimentale» basée sur l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques. Pour le sable gypseux dans Wilaya d'El-Oued, et cela en présentant les propriétés du sable gypseux pour la plupart des carrières de région, en mentionnant leurs avantages et inconvénients, et en présentant des méthodes et des approches d'amélioration et de traitement «à travers des études antérieures» pour une utilisation optimale du matériau local (sable gypseux).

L'étude s'est conclue par un travail assez satisfaisant au regard des résultats qu'elle présentait des études précédentes «dans ce contexte» qui ont été couronnées de succès et sans aucun doute très utiles dans les futures études expérimentales d'amélioration du sable gypseux pour la Wilaya d'El-Oued.

**Mots clés:** sable gypseux, Wilaya d'El-Oued, étude théorique, études antérieures.

**Summary:**

The problem of lack of building materials (raw materials for road construction) is among the problems raised in civil engineering structures, and the completion of roads depends mainly on their use (gypsum sand, asphalt ...), which must be in conformity with the standards.

In our theoretical study, we dealt with some definitions and the condition of choosing gypsum sand, which is the necessity to meet the requirements of technical strength, the most important of which is the requirements for stability of pressure resistance as well as the economic requirements. Our "theoretical" study aims to benefit and guide in favor of "experimental" research based on improving physical and mechanical properties. For gypsum sand in the state of El-Oued, and that was by presenting the properties of gypsum sand for most of the state's quarries, mentioning their advantages and disadvantages, and presenting methods and approaches for improvement and treatment "through previous studies" for the optimal utilization of the local material (gypsum sand).

The study ended with a fairly satisfactory work in view of the results it presented from previous studies "in this context" which were successful and undoubtedly very useful in future experimental sand improvement studies. gypsum for the Wilaya of El-Oued.

**Key words:** gypsum sand, El-Oued state, theoretical study, previous studies.

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR SABLE GYPSEUX</b>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 le sol gypseux.....	4
I.2.1 Généralités .....	4
I.2.2 Avantages et inconvénients.....	4
I.2.3 Caractéristiques. ....	5
I.2.4 Répartition spatiale des sols gypseux. ....	6
I.2.4.1 Distribution des sols gypseux dans le monde. ....	6
I.2.4.2 distribution des sols gypseux en Algérie. ....	8
I.2.5 Pédogenèse des sols gypseux. ....	9
I.2.6 les sables gypseux.....	10
I.2.6.1 sable gypseux dans la nature .....	10
I.2.6.2 Sable gypseux au laboratoire. ....	10
I.2.6.3. Classification des sable gypseux. ....	12
I.2.6.4. Caractéristiques Géotechniques .....	14
I.2.6.4.2. Caractéristiques chimiques.....	15
I.2.6.4.3. Essai des Limites d'Atterberg.....	16
I.2.6.4.4. Essai d'équivalent de Sables.....	17
I.2.6.4.5. Essai Proctor modifié.....	17
I.2.6.4.6. Essai CBR .....	18
I.2.6.4.7. Essai de résistance à la compression simple. ....	18
I.3 la Croûte et l'encroûtement.....	19
I.4 Le gypse et les encroûtements gypseux .....	19
I.4.1 Le gypse .....	19
I.4.1.1 définition .....	19
I.4.1.2. Solubilité et processus de dissolution du gypse. ....	21
I.4.2 les encroûtements gypseux .....	22
I.4.2.1 Profil des encroûtements gypseux .....	22
I.4.2.2 Les essais fondamentaux.....	23
I.4.2.3 Préparation des matériaux.....	24
I.4.2.4 Domaine d'utilisation .....	24
I.4.2.5 Mise en œuvre. ....	24
I.5 Les encroûtements calcaire.....	25
I.5.1 Profil des encroûtements calcaires .....	26
I.5.2 Les essais fondamentaux .....	27
I.5.3 Hypothèses de formation .....	28
I.5.4 Utilisation des tufs calcaires en constructions routière .....	28
I.6 Les encroûtements Gypso- Calcaires (mixte).....	31
I.7 Le gypse dans la nature.....	31
I.8 Les gypses Pulvérulents.....	32
I.9 Utilisation du sable gypseux en technique routière.....	33
I.10 Chaussées en sable gypseux.....	34
I.11 Structure De La Chaussée Saharienne.....	35
I.12 Conclusion .....	37
<b>CHAPITRE II: STATISTIQUES SUR LE SABLE GYPSEUX DANS LA WILAYA D'EL-OUED</b>	
II.1. Introduction.....	39

II.2.Situation de la wilaya d'El Oued.....	39
II.3.La Recherche de Gisement.....	40
II.3.1.La Prospection. ....	40
II.3.1.1.Le Climat. ....	40
II.3.1.2.La Topographie . ....	41
II.3.1.3.Les Indicateurs botaniques ou zoologiques . ....	41
II.3.1.4.La Photographie aérienne. ....	41
II.3.1.5.Les Sondages. ....	41
II.4.Le sable gypseux est distribué dans la wilaya d'El-Oued.....	41
II.5.Critères de sélection des matériau.....	44
II.6. Caractéristique géotechniques de certains gisements.....	46
II.6.1.Gisement : Robbah – elgadachi hassi ali. ....	46
II.6.1.1.Caractéristiques géotechniques ..... 46	
II.6.1.2.Avantages et inconvénient ..... 46	
II.6.2.Gisement : Sehine sud (vers trifaoui ). .... 47	
II.6.2.1.Caractéristiques géotechniques. .... 47	
II.6.2.2.Avantages et inconvénient ..... 47	
II.6.3.Gisement : Sahane berry..... 48	
II.6.3.2. Avantages et inconvénient ..... 48	
II.6.4.Gisement : Oued el melah (Magrane) ..... 49	
II.6.4.1-Caractéristiques géotechniques..... 49	
II.6.4.2.Les avantages ..... 49	
II.6.5.Gisement : Hobba ..... 50	
II.6.5.1-Caractéristiques géotechniques ..... 50	
II.6.5.2. Les avantages. .... 50	
II.6.6.Gisement : RN 16 Touggourt el-oued (khobna safra ). .... 51	
II.6.6.1-Caractéristiques géotechniques ..... 51	
II.6.6.2. Avantages et inconvénient ..... 51	
II.6.7.Gisement : RN 48 el-oued –Hamraia ..... 52	
II.6.7.1-Caractéristiques géotechniques ..... 52	
II.6.7.2.Les avantages. .... 52	
II.7.Remarques générales..... 53	
II.8. Conclusions..... 54	

**CHAPITRE III: RESUMES DES ETUDES PRECEDENTES**

III.1. Introduction.....	56
III.2.La première étude (Contribution à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques des sables gypseux de la région d'El-Oued. (Etude expérimentale)).....	56
III.2.1. Introduction. ....	56
III.2.2.Le but de l'étude.....	56
III.2.4.Caractéristiques géotechniques de matériaux (avant traitement ). ....	57
III.2.5. Résultats obtenus (après traitement).. ....	57
III.2.5.1 Addition de la chaux à 2%.....	58
III.2.5.2. Addition de la chaux à 4%.....	57
III.2.5.3.Addition de la chaux à 6%.....	58
III.2.5.4.Addition de la chaux à 8%.....	58
III.2.6.Influence du traitement sur la résistance à la compression simple.....	59
III.2.6.1 Influence de la teneur en liant sur la RC pour différents âges.....	58
III.2.6.2. Influence de l'eau de compactage sur la résistance à la compression simple.....	59
III.2.6.3.Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC) pour différentes teneurs en liant. ....	60

III.2.6.4. Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).	61
III.2.7. Remarques.	62
III.3. La deuxième étude (Amélioration d'un sol de plate-forme de sable gypseux par un compactage accru).	62
III.3.1. Introduction.	62
III.3.2. Le but de l'étude.	63
III.3.3. Matériaux utilisés et conditions de traitement.	63
III.3.4. Propriétés du sol (avant traitement).	63
III.3.5. Résultats obtenus (après traitement).	64
III.3.6. L'effet de la période de trempage sur les rapports de CBR trempé à non trempé.	64
III.3.7. Effet de la période de trempage sur le rapport de résistance CBR / CBR <sub>4</sub> .	65
III.3.8. Effet de la tension de compression sur le rapport CBR <sub>120</sub> / CBR <sub>4</sub> .	65
III.3.9. L'effet de la tension de compression sur les valeurs CBR <sub>120</sub> et CBR non cuites respectivement.	66
III.3.10. Remarques.	67
III.4. La troisième étude (Amélioration du module élastique d'un sable gypseux sol de la plate-forme par un compactage accru).	67
III.4.1. Introduction.	67
III.4.2. Le but de l'étude.	67
III.4.3. Matériaux utilisés et conditions de traitement.	67
III.4.4. Caractéristiques du sol (avant traitement).	68
III.4.5. Préparation des échantillons de sol pour les tests de module d'élasticité.	68
III.4.6. Résultats obtenus (après traitement).	68
III.4.7. Corrélation entre module d'élasticité et CBR.	70
III.4.8. Remarques.	71
III.5. La quatrième étude (Effet de la fréquence de trempage-séchage sur le sable de chaussée riche en gypse).	72
III.5.1. Introduction.	72
III.5.2. Le but de l'étude.	72
III.5.3. Matériaux utilisés et conditions de traitement.	72
III.5.4. Propriétés du sol (avant traitement).	73
III.5.5. Résultats obtenus (après traitement).	73
III.5.6. Remarques.	76
III.6. Cinquième étude (Caractérisation et étude de la durcissement d'un sable gypseux de Ben Guesha, dans le domaine de la géotechniques routières).	76
III.6.1. Introduction.	76
III.6.2. Le but de l'étude.	77
III.6.3. Matériaux utilisés et conditions d'expérimentation.	77
III.6.4. Propriétés du sable (avant traitement).	77
III.6.5. Résultats obtenus (après traitement).	78
III.6.6. Evolution de la résistance à la compression simple.	78
III.6.7. Etat hydrique des échantillons.	80
III.6.8. Détermination du modèle de Young pour les différents états de confection et de conservation des éprouvettes.	82
III.6.8.1 Le module de Young.	80
III.6.9. Observation au MEB de poudres d'échantillons de sable gypseux compactés et séchés.	82
III.6.10. Remarques.	82
III.7. Conclusion.	82
<b>Conclusion générale et recommandations.</b>	<b>84</b>

**Bibliographie.....87**

Liste des figures

FIGURE I. 1: DISTRIBUTION DES SOLS GYPSEUX DANS LE NORD ET L'EST DE L'AFRIQUE, SUD DE L'EUROPE ET DANS LE SUD EST DE L'ASIE (VAN ALPHAN ET ROMERO, 1971). .....	7
FIGURE I. 2: CLASSIFICATION DES TUF S AU TCR SELON LEURS PERFORMANCES MECANIQUES (CTTP, 2001).....	14
FIGURE I. 3: FUSEAUX GRANULOMETRIQUES DE MATERIAUX EXTRAITS DE DIFFERENTS ENCROUTEMENTS (COLOMBIER, 1998 ).....	15
FIGURE I. 4: DIAGRAMME SCHEMATIQUE MONTRANT LE MECANISME DE FORMATION DU GYPSE .....	20
FIGURE I. 5: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU RESEAU PRIMAIRE D'UN RESEAU CRISTALLIN MONOCLINIQUE DE GYPSE .....	21
FIGURE I. 6: FORMATION D'ENCROUTEMENTS PAR EVAPORATION[24].	22
FIGURE I. 7: PROFIL D'UN ENCROUTEMENT GYPSEUX .....	23
FIGURE I. 8: REPARTITION DES ENCROUTEMENTS CALCAIRES DANS LE MONDE .....	25
FIGURE I. 9: PROFIL D'UN ENCROUTEMENT CALCAIRE MUR.....	27
FIGURE I. 10: SCHEMA DU CIRCUIT DE LA FORMATION DES TUF S CALCAIRES. ....	28
FIGURE I. 11: FORMATION D'ENCROUTEMENTS GYPSEUX PAR DEPOT SELON DURAND .....	33
FIGURE I. 12: CARTE ILLUSTRANT LES AXES GHARDAÏA – EL GOLEA ET GHARDAÏA – OUARGLA.....	34
FIGURE I. 13: COUPE TRANSVERSALE TYPE D'UNE CHAUSSEE SAHARIENNE. ....	37
FIGURE II. 1: PLAN LA WILAYA D'EL OUED (LIMITES, GRANDES VILLES).....	40
FIGURE II. 2: PLAN DE SITUATION DES GISEMENT DANS LA WILAYA D'EL-OUED EN 1994.....	44
FIGURE III. 1: COURBES INFLUENCE DE LA TENEUR EN LIANT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE POUR DIFFERENTS AGES.	59
FIGURE III. 2: COURBES INFLUENCE DE L'EAU DE COMPACTAGE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE. ....	60
FIGURE III. 3: COURBES INFLUENCE DU TEMPS DE SECHAGE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION(RC). ....	61
FIGURE III. 4: INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU FINALE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (RC). ....	62
FIGURE III. 5: DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DU SOL GYPSIFERE D'AL-DORE. ....	63

FIGURE III. 6: VARIATION DU CBR AVEC PERIODE DE TREMPAGE POUR DIFFERENTS.....	64
FIGURE III. 7: EFFET DE LA PERIODE DE TREMPAGE SUR LE RAPPORT ENTRE TREMPE ET NON TREMPE CBR.....	65
FIGURE III. 8: EFFET DE LA PERIODE DE TREMPAGE SUR LE RAPPORT CBR / CBR <sub>4</sub> POUR DIFFERENTS EFFORTS DE COMPACTAGE.....	65
FIGURE III. 9: EFFET DE L'EFFORT DE COMPACTAGE SUR LE RAPPORT CBR <sub>120</sub> / CBR <sub>4</sub> .....	66
FIGURE III. 10: EFFET DE L'EFFORT DE COMPACTAGE SUR CBR <sub>120</sub> . ....	66
FIGURE III. 11: EFFET DE L'EFFORT DE COMPACTAGE SUR LE CBR NON TREMPE. ....	67
FIGURE III. 12: L'EFFET DE LA PERIODE DE TREMPAGE SUR LA VITESSE DE L'ONDE DE COMPRESSION POUR DIFFERENTES TENSIONS DE COMPRESSION.....	68
FIGURE III. 13: EFFET DE LA PERIODE D'IMPREGNATION SUR LA VITESSE DE L'ONDE DE CISAILLEMENT POUR DIFFERENTS EFFORTS DE COMPACTAGE. ....	69
FIGURE III. 14: RELATION ENTRE LA VITESSE DE L'ONDE DE COMPRESSION ET L'EFFORT DE COMPACTAGE POUR DIFFERENTES PERIODES DE TREMPAGE. ....	69
FIGURE III. 15: RELATION ENTRE LA VITESSE DE L'ONDE DE CISAILLEMENT ET L'EFFORT DE COMPACTAGE POUR DIFFERENTES PERIODES DE TREMPAGE. ....	70
FIGURE III. 16: CORRELATION ENTRE LES VALEURS MESUREES DU MODULE ELASTIQUE ET LES VALEURS CBR CORRESPONDANTES POUR LE SABLE GYPSEUX TREMPE.....	71
FIGURE III. 17: DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DU SABLE GYPSEUX TESTE. ....	73
FIGURE III. 18: VARIATION TEMPORELLE DU CBR PENDANT LE TREMPAGE CYCLIQUE ET SECHAGE PENDANT UNE DUREE DE CYCLE DE 8 JOURS. ....	74
FIGURE III. 19: EFFET DU TREMPAGE ET DU SECHAGE CYCLIQUES SUR LA RESISTANCE RATIOS CBRT / CBRUN ET CBRT / CBR <sub>4</sub> POUR UNE DUREE DE CYCLE DE 8 JOURS.....	74
FIGURE III. 20: VARIATION TEMPORELLE DU CBR EN FONCTION DU NOMBRE DE CYCLES POUR TOUTES LES FREQUENCES ETUDIEES. ....	74
FIGURE III. 21: EFFET DU TREMPAGE ET DU SECHAGE CYCLIQUES SUR LA TENEUR EN HUMIDITE EN HAUT, AU MILIEU ET AU BAS DES ECHANTILLONS DE SOL PENDANT UNE DUREE DE CYCLE DE 60 JOURS. ....	75
FIGURE III. 22: COMPARAISON ENTRE LE CBR TREMPE POUR LE TREMPAGE CONTINU ET LE CBR TREMPE A L'EQUILIBRE POUR LE TREMPAGE ET LE SECHAGE CYCLIQUES.....	76
FIGURE III. 23: L'INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION A DIFFERENTES DUREES DE CONSERVATION. ....	79

## *Liste des Figures*

---

FIGURE III. 24: INFLUENCE DE LA DUREE DE CONSERVATION SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU SABLE DE BEN GUECHA. ....	79
FIGURE III. 25: VARIATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU RESIDUELLE.....	80
FIGURE III. 26: COURBES CONTRAINTE –DEFORMATION : ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE SUR SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA, A DIFFERENTES DUREE DE CONSERVATION ET POUR DEUX TENEURS EN EAU DE COMPACTAGE. ....	81
FIGURE III. 27: PHOTOS MEB DE Poudre DU SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA EXTRAITES D'ECHANTILLONS SECHES APRES COMPACTAGE RESPECTIVEMENT A $W=0\%$ ; $W= 11\%$ ( $3/4WOPM$ ); $W= WOPM=14.5\%$ ET $W= 16\%$ .....	82

**Liste des tableaux**

TABLEAU I. 1: DISTRIBUTION DES SOLS GYPSEUX DANS LE MONDE (F.A.O, 1990. MASHALI, 1995). .....	7
TABLEAU I. 2: RECAPITULATIF DES DIFFERENTES CLASSIFICATIONS SUR LES SABLES GYPSEUX.....	12
TABLEAU I. 3: LES DIFFERENTS TYPES D'ENCROUTEMENTS SELON LA NATURE CHIMIQUE.....	16
TABLEAU I.4: INDICE DE PLASTICITE POUR DIFFERENTS TYPES D'ENCROUTEMENTS.....	17
TABLEAU I.5: EQUIVALENT DE SABLES POUR DIFFERENTS TYPES D'ENCROUTEMENTS.....	17
TABLEAU I. 6: TENEUR EN EAU OPTIMALE ET DENSITE SECHE MAXIMALE POUR DIFFERENTS TYPES D'ENCROUTEMENTS. ....	17
TABLEAU I. 7: INDICE CBR IMMEDIAT ET IMBIBE POUR DIFFERENTS TYPES ENCROUTEMENTS. ....	18
TABLEAU I. 8: PRESENTE LES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES TUFES CALCAIRES UTILISES EN COUCHES DE FONDATION EN ALGERIE.....	29
TABLEAU I. 9: CRITERES D'UTILISATION DES TUFES CALCAIRES EN COUCHE DE BASE EN ALGERIE .....	30
TABLEAU I. 10: CRITERES D'UTILISATION DES TUFES CALCAIRES EN REMBLAIS EN ALGERIE .....	31
TABLEAU II. 1: PARAMETRES GEOTECHNIQUES ET D'EXPLOITATIONS DES GISEMENTS. ....	42
TABLEAU II. 2: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE GYPSEUX DE ROBBAH – ELGADACHI HASSI ALI. ....	46
TABLEAU II. 3: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE GYPSEUX DE SEHINE SUD (VERS TRIFAOUI ). ....	47
TABLEAU II. 4: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE GYPSEUX DE SAHANE BERRY. ....	48
TABLEAU II. 5: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE GYPSEUX DE OUED EL MELAH (MAGRANE).....	49
TABLEAU II. 6: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE GYPSEUX DE HOBBA. ....	50
TABLEAU II. 7: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE GYPSEUX DE RN 16 TOUGGOURT EL-OUED (KHOBNA SAFRA ). ....	51
TABLEAU II. 8: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE GYPSEUX DE RN 48 EL-OUED –HAMRAIA.....	52

TABLEAU III. 1: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE GYPSEUX (AVANT TRAITEMENT). .....	57
TABLEAU III. 2: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU (SABLE GYPSEUX + 2% DE LA CHAUX).....	57
TABLEAU III. 3: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU (SABLE GYPSEUX + 4% DE LA CHAUX).....	58
TABLEAU III. 4: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU (SABLE GYPSEUX + 6% DE LA CHAUX).....	58
TABLEAU III. 5: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU (SABLE GYPSEUX + 8% DE LA CHAUX).....	58
TABLEAU III. 6: RECAPITULATIF INFLUENCE DE LA TENEUR EN LIANT SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE POUR DIFFERENTS AGES.	59
TABLEAU III. 7: RECAPITULATIF INFLUENCE DU TEMPS DE SECHAGE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (RC). .....	60
TABLEAU III. 8:RECAPITULATIF INFLUENCE DE LA TENEUR EN EAU FINALE SUR LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (RC) POUR DIFFERENTES TENEURS EN LIANT.....	61
TABLEAU III. 9:EFFET DE L'EFFORT DE COMPACTAGE SUR LA MASSE VOLUMIQUE, LES VITESSES DES ONDES DE COMPRESSION ET DE CISAILLEMENT ET LE MODULE ELASTIQUE DU SABLE GYPSEUX TESTE AVANT ET APRES 120 JOURS DE TREMPAGE.....	70
TABLEAU III. 10: COMPARAISON DES RESULTATS MESURES DU MODULE RESILIENT AVEC CEUX CALCULES A PARTIR DE LA FORMULE GARBER ET HOEL (2015) POUR DES CONDITIONS NON TREMPES. ....	71
TABLEAU III. 11: DIMINUTION DE LA RESISTANCE DU SOL DUE AUX CYCLES DE TREMPAGE-SECHAGE.....	75
TABLEAU III. 11: CLASSIFICATION DU SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA.	77
TABLEAU III. 12: CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES ET MECANIQUES DU SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA. ....	78
TABLEAU III. 14: TAUX DE PERTE EN TENEUR EN EAU AVEC LE TEMPS DE CONSERVATION A L'AIR LIBRE. ....	80

# **Introduction générale**

### Introduction générale.

Les sables gypseux sont des matériaux semi-naturels utilisés dans les trottoirs depuis les années 50 du siècle dernier, car il a été constaté qu'ils sont abondants dans la région sud-est de l'Algérie (Ouargla, Touggourt et El-oued). Des études ont montré à l'époque qu'ils peuvent être utilisés dans les routes comme substitut local du ciment bien adapté au climat sec de la région.

Les sables gypseux sont disponibles dans la wilaya d'El-oued dans différentes qualités et spécifications, dont certaines sont à la mesure des conditions techniques d'utilisation des routes et d'autres à améliorer.

Notre étude "théorique" vise à ouvrir des horizons et à faciliter le processus de recherche basé sur le traitement du sable gypseux pour la wilaya d'el-Oued notamment et l'amélioration de ses propriétés (dans la partie expérimentale).

L'étude comprend 3 chapitres comme suit :

Le premier chapitre "une étude bibliographique": comprend quelques définitions de l'étude en plus de quelques détails concernant l'utilisation du sable gypseux dans la technologie routière .

Le deuxième chapitre, "Statistiques sur le sable gypseux dans la wilaya d'El-Oued ": comprend la répartition du sable gypseux dans la wilaya d'el-Oued avec les caractéristiques géotechniques de la plupart des carrières de sable gypseux de l'état, leurs avantages et inconvénients...

Le chapitre trois "Résumés des études précédentes": comprend certaines méthodes de traitement (à travers des études antérieures) avec mention de la méthodologie de traitement, des résultats et des conclusions pour chaque étude séparément .

# **Chapitre I**

## **Etude bibliographique sur sable gypseux**

## **I.1 Introduction.**

Cette recherche constitue une contribution «théorique» à la recherche visant à améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sables gypseux dans El'oued notamment, et elle contribue également à les qualifier pour investir dans le domaine de la construction routière.

Ce chapitre de l'étude comprend quelques définitions des matériaux qui nous intéressent dans notre étude, leur conception et les étapes de formation, ainsi que nous avons traité des conceptions du sable de gypse et de son utilisation dans la technologie des routes du désert (en particulier).

## **I.2 le sol gypseux.**

### **I.2.1 Généralités [1]**

Le terme "sol gypseux" est utilisé dans plusieurs sens selon la source consultée. La légende révisée de la carte du sol du monde (FAO[26]) définit "sol gypseux" quand il contient 5 % ou plus du gypse, est résultant de facteurs naturels et occupent également une grande surface dans les zones désertiques.

Ils sont largement utilisés dans les barrages et les matériaux de construction de routes dans les climats arides, arides et semi-arides.

### **I.2.2 Avantages et inconvénients.**

#### **-Les avantages .**

La rigidité : Le processus de laminage et d'empilement du sable de gypse, en plus de la douceur du matériau, assure la formation d'une couche solide et résistante aux chocs [2] .

Matériel local : Ce qui signifie que je le prends à la carrière (selon un permis) et le transporte au moindre coût [2][3].

Maniable : Le sable gypseux est un matériau pratique lorsqu'il est utilisé dans la technologie routière et autres, et il est facile de mener dans les essais, et ses résultats sont donnés en peu de temps [2].

### **-Les inconvénients [2].**

Substance sensible à l'eau : Le rapport de teneur en eux requis pour le sable gypseux utilisé est déterminé par l'essai de Proctor, le pourcentage d'eau étant un facteur direct de cohésion du sable.

Foliation ou glissement : Elle est causée par le vent dans la couche de sable de gypse dans les routes, on le remarque lors de sa préparation .

Homogénéité: Considérant qu'il s'agit d'une substance naturellement formée par l'action du vent et des précipitations sous forme de couches, il faut alors prélever toute la quantité que l'on souhaite utiliser et la mélanger pour obtenir une substance homogène.

Ses propriétés mécaniques sont faibles par rapport à béton bitumineux et le gravier concassé .

### **I.2.3 Caractéristiques.**

« Les propriétés des sols gypseux dépendent largement de la teneur en gypse et de la position de la croûte gypseuse dans le profil » [4] .

### **-Propriétés physiques[4][5].**

Texture :

Selon une étude réalisée en Espagne dans la région d'Ebro, il apparaît que la texture du sol est étroitement liée à la teneur en gypse, l'augmentation de la teneur en gypse conduit à un tissu dominé par les limons et le sable, c'est-à-dire la présence d'une cristallisation grossière et la diminution de teneur relative en argile .

Porosité :

La teneur en argile et la teneur et la taille des cristaux de gypse sont les principaux facteurs pour retenir le sol de gypse avec de l'eau, et ces facteurs sont considérés comme de petits réservoirs de remplissage et une alternative aux pores du sol, et c'est une forte absorption d'eau de surface lorsqu'il y a du gypse sous forme de poudre, alors que les croûtes gypseuses sont dures et présentent une faible porosité .

La structure :

Le sol de gypse dans la nature a une structure non cohésive, ce qui nécessite de le renforcer avec un ou plusieurs matériaux afin d'obtenir une croûte solide utilisable sur la route, cependant, nous constatons que le gypse joue un rôle important dans la structure et la cohésion de certains autres types de sol en ajoutant 1% de gypse à un sol salin et non invasif.

### **-Propriétés chimiques.**

PH[4][5]:

Les sols de gypse ont un degré d'acidité alcaline modéré (7,4- 9,4) et ne sont pas liés à la formation de gypse dans la carrière.

Capacité d'échange cationique [5] :

La capacité d'échange d'ions positifs dans le sol de gypse est inversement proportionnelle à la teneur en gypse dans le sol en raison de l'absence de charge négative à la surface des granules de gypse, sa valeur varie entre 7 et 14 meq/100 g de sol.

Composition du complexe absorbant et de la solution du sol[4][5]:

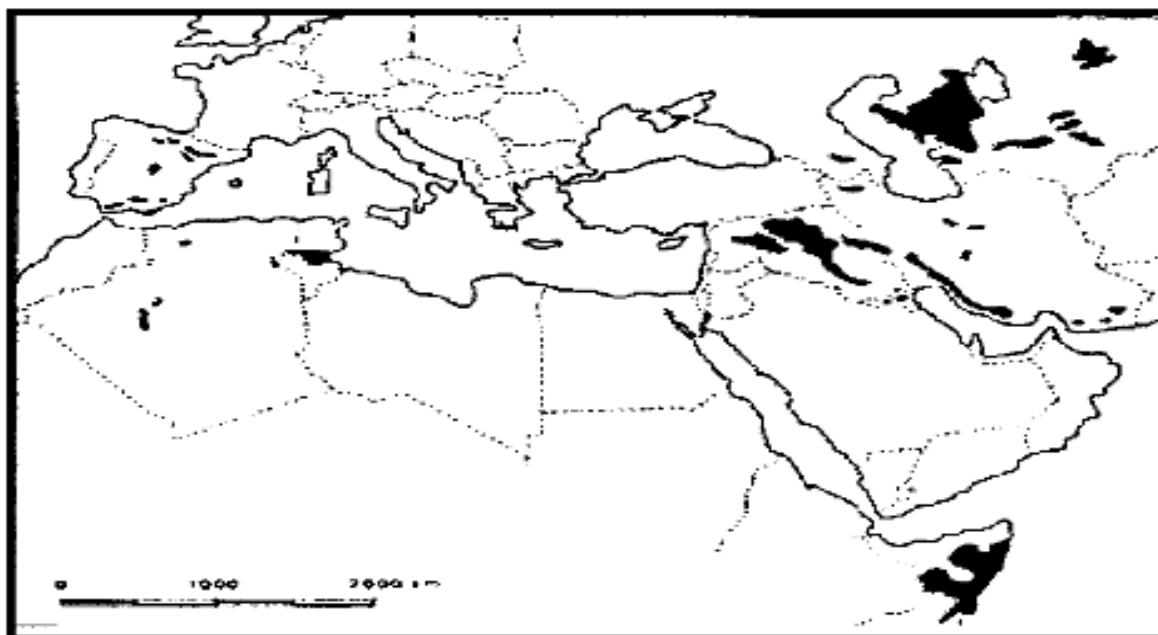
Les deux formations sont saturées d'ion  $\text{Ca}^{+2}$  et  $\text{So}^{-4}$  (les éléments principaux), contenant  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{K}^{+}$  dans de faibles proportions déterminées par la capacité d'échange cationique dans le sol, le cation échangeable prédominant est le calcium, suivit par le Mg ,k et parfois Na .

### **I.2.4 Répartition spatiale des sols gypseux.**

Comme on le sait, les sols gypseux se trouvent dans les régions arides et semi-arides du monde, où il y a un manque de drainage climatique qui provoque l'évacuation du sol du gypse, et les zones où les précipitations sont faibles (estimées à 300-400 mm) de sorte qu'elles n'affectent pas les roches mères ou Les gisements de gypse sont abondants dans la région, mais il peut parfois être trouvé dans les zones de fortes pluies[5].

#### **I.2.4.1 Distribution des sols gypseux dans le monde[4].**

Les sols gypseux se localisent essentiellement dans le Nord de l'Afrique, Sud et est de l'Europe, et du Sud- est de l'Asie , comme suit :



**Figure I. 1: Distribution des sols gypseux dans le Nord et l'Est de l'Afrique, Sud de l'Europe et dans le Sud Est de l'Asie (Van alphan et Romero[25]).**

Le tableau suivant montre la répartition des sols de gypse dans le monde par continent et pays, ainsi que les proportions de leur présence dans chaque pays par rapport à sa superficie totale et par rapport à la superficie totale des sols de gypse dans le monde.

**Tableau I. 1: Distribution des sols gypseux dans le monde (F.A.O, [26]. Mashali, [27]).**

Continent	Pays	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Le % par rapport à La superficie du pays	Le % par rapport à la superficie des sols gypseux dans le monde
Afrique	Maroc	1114,3	2,5	1,7
	Algérie	7966,3	3,3	12,2
	Tunisie	1439,8	9,3	2,2
	Lybie	3956,8	2,2	6,0
	Egypte	382,2	0,4	0,6
	Soudan	785,0	0,3	1,2
	Somalie	10161,2	16,2	15,5
	Ethiopie	1423,4	1,3	2,2
	Mali	2818,3	2,3	4,3

	Mauritanie	396,0	0,4	0,6
	Namibie	5327,7	6,5	8,2
Asie	Syrie	3966,6	21,6	6,0
	Jordanie	80,5	0,8	0,1
	Arabie Saoudite	82,5	0,04	0,1
	Oman	471,6	/	0,7
	Yemen	2931,0	8,8	4,5
	Koweït	354,6	/	0,5
	Irak	4779,2	11,0	7,3
	Iran	4,2	/	/
	Pakistan	9,5	0,01	/
	Inde	182,0	0,06	0,3
	Chine	11484,9	1,2	17,5
	Mongolie	60,9	0,04	0,1
Europe	Turquie	64,2	0,08	0,1
	Espagne	165,5	0,3	0,3
	Ex-U.R.S.S	5074,1	0,2	7,7
Amérique-N	Mexique	78,0	/	0,1

#### I.2.4.2 distribution des sols gypseux en Algérie.

Les sols de gypse sont présents depuis très longtemps en Algérie, mais ils n'ont pas été suffisamment étudiés, notamment dans le domaine géotechnique (technique de construction de routes), et les quelques études qui ont été menées jusqu'à présent ont traité d'autres aspects, y compris l'aspect descriptif des formes d'accumulation, les aspects chimiques et biologiques, et enfin les aspects géochimiques. Minéralogie, morphologie et microphysique [5].

Le sol de gypse en Algérie constitue 3,3% de sa superficie totale et 12,2 % de la superficie totale de sol de gypse dans le monde, et il est estimé à 7 966,3 km (FAO, [26]) [4].

En Algérie, on trouve des sols de gypse, plus précisément dans les régions suivantes:

Oran, Mostaganem, Saida, Tiaret, Ksar-Echellala, Djelfa, M'sila, les bordures des chotts et des Zahrez, Boussaâda, Hodna, Mechria, El-Bayadh, Khenchela, Batna, Adrar, Ouargla, Ain sefra, Laghouat, Biskra, El-Oued (Le souf), Touggourt (Oued R'hir) [5].

### **I.2.5 Pédogenèse des sols gypseux.**

La formation ou l'accumulation de sol de gypse est l'un des phénomènes les plus importants étudiés par la génétique des sols dans les régions arides du monde [5].

#### **-Les facteurs de formation et de distribution des sols gypseux.**

##### **A. le climat.**

L'accumulation de gypse dans le sol est très sensible aux changements climatiques (les processus de dissolution et de recristallisation), et ces deux phases alternent respectivement pendant les périodes humide et sèche, car le gypse se dissout ou se dissout dans le sol lorsque l'humidité est disponible alors qu'il a tendance à se déposer ou à se déposer dans le sol pendant les périodes sèches (Avoir une grande chaleur) (Carter et Inskeep, [28]; Porta et Herrero, [29]; Gutierrez et Gutierrez, [30]) .

##### **B. le relief.**

Les géomorphologues assument la tâche d'observer le sol gypse et son processus de formation en fonction de la nature du terrain et de l'effet de la pente sur le mouvement et la stabilité du sol (Canton et al., [31]; Roquero et Arias, [32]; Herrero et Boixadera, [33]) , ainsi que d'autre part l'effet des stades d'érosion et de sédimentation sur les stades de stabilité et de formation (accumulation) (Canton et al., [31]; Buck et Monger, [34]; Buck et Van Hoesen, [35]).

##### **C. sources d'apports de gypse .**

les sources d'apports de gypse est comme suit :

la nature du substrat géologique (Fedoroff et Courty, [36]; Boyadgiev et Verheye, [37]; Herrero et Porta, [38]) ;

· une nappe active peu profonde (Dekkiche, [39]; Kulke, [40]; Halitim, [41]; Abdesselam, [42]);

· l'apport éolien (Coque, [43]; Trichet, [44]; Dekkiche, [39]; Drake, [45]) ;

· l'apport hydrique de surface (Gutierrez et Gutierrez, [30]; Bourque, [46]; Khademi et al., [47]).

### **I.2.6 les sables gypseux[6] .**

C'est un gisement de gypse fin extrait de formations de surface naturelles qui occupent une grande surface dans les zones désertiques, il est utilisé comme matériau de remblai et de routes dans les zones aux climats arides et semi-arides.

#### **I.2.6.1 sable gypseux dans la nature [8].**

les sable gypseux sont des formations désertiques et qui existent en abondance dans certaines régions du Sahara , le sable gypseux est de formation quaternaire de la grande dépression du Sahara du Nord-Est entre Ouargla et la frontière tunisienne . (le gisements sont d'aspect variables , selon leur teneur en gypse , le mode de cristallisation de ce gypse ( gros ou fins cristaux ) et la proportion de calcaire qu'il contiennent . cette dernière peut devenir très forte et l'on a alors les pierres à plâtre de la région qui sont formées uniquement de gypse et de calcaire et qui se présentent sous l'aspect de roches très tendres .

dans la nature le gypse (  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ) se dépose par évaporation de solutions concentrées en sulfates , les encroûtements gypseux des zones se sont formés à différentes époques de l'ère quaternaire par l'évaporation des dépôts de gypse dans le sol à partir des nappes phréatiques séléniteuses .

#### **I.2.6.2 Sable gypseux au laboratoire[8] .**

##### **a) Prise du gypse.**

la " prise" du gypse paraissait à l'origine l'élément essentiel de la résistance du corps de chaussée , les études furent d'abord orientées vers la reproduction au laboratoire des circonstances de cette prise , la cohésion était appréciée par l'essai de résistance à la compression simple , après séchage , d'éprouvettes types sol-ciment , moulées et conservées dans différentes conditions ; on peut résumer comme suite les résultats obtenus par l'ensemble de ces études :

1- les matériaux à teneur en gypse suffisante et dont le gypse est dans un état assez divisé donnent en général une cohésion assez élevée après séchage , lorsqu'ils ont été amenés à une compacité suffisante , les résistance obtenues s'étagent de 10 à 40 bars , les valeurs les plus fréquentes caractérisant les bon sable gypseux étant de 15 à 30 bars , ces chiffres s'entendent

après compactage à la teneur en eau optimum à une densité de 95 à 98 % de la densité maximum ( Proctor modifié ), condition analogue à celle obtenue sur un chantier bien conduit .

2- la résistance ne dépend pas des conditions du séchage , qui peut être rapide ( pas de précaution de "cure " comme pour la prise de ciment ) , ni de la teneur en eau , à densité sèche constante ( la teneur en eau ne devant évidemment pas s'écarter très notablement de l'optimum ) ; c'est constatations étaient favorables à une exécution rapide des chantier , puisque ne nécessitant pas de précautions particulières .

3- la résistance dépende de la teneur en gypse ( et éventuellement en carbonates ) , mais également de l'état de division de ce gypse ( teneur en fines ) et de son état de cristallisation .

4- la résistance est à peu près proportionnelle à la compacité ; il a donc été recommandé aux exécutants de compacter très énergiquement ( d'autant que les autres qualités , comme la portance à l'état humide , varient également dans la même sens ) .

### **Observation.**

Dans certaines gisements , on a détecté que malgré la teneur en sulfates élevée on a obtenu des résistances assez faibles , ce phénomène s'explique que le matériau se trouvait à un état d' anhydrite (  $\text{Ca.SO}_4$  ) .

### **b) Tenue à l' eau , portance , gonflement .**

la prise des sables gypseux est réversible : toutes les éprouvettes séchées se délitent immédiatement par immersion dans l' eau , quel que soit le pourcentage de gypse et de son état . mais , avec la plupart des " bons " sable gypseux la résistance à la compression simple reste importante quand l'imbibition se limite à une faible teneur en eau , ce qui traduit une cohésion encore notable .

par ailleurs on apprécie la portance du sable gypseux par l'essai C.B.R . pour des teneur en eau plus élevées , les sables gypseux conservent des portances satisfaisantes .

toutefois avec certaines échantillons de sable gypseux , on a observé des gonflements importants , diverses constatations permettent de dire que la présence simultanée de chlorure et d' argile dans les sables gypseux est particulièrement néfaste et il faut se méfier des gisements de sables gypseux proches des dépressions ou ces éléments se trouvent en général

rassemblés . c' est ainsi que nous expliquons un certain nombre de désordres qui sont produits sur la route biskra-touggourt ,dans la zone sud ( Oued Righ ) ou elle traverse plusieurs chotts . la seule méthode sûre pour détecter ceux qui sont sensibles à l'eau et l'essai direct de gonflement , soit mesure du gonflement linéaire à l'aide du moule CBR soit à l'aide de l' appareil œdomètre ( essai de compressibilité ) .

### **I.2.6.3. Classification des sable gypseux[9].**

Pour résoudre les problèmes de mécanique des sols, il est important de caractériser un sol mais aussi de classer, c'est à dire de mettre dans un groupe ayant des comportements similaires.

Différentes classifications ont été établies, généralement, d'une manière empirique, par recoupement avec différentes expériences de chantier. Elles sont essentiellement liées aux conditions d'exécution des chantiers et aux risques d'évolution du matériau sous l'effet du trafic (attrition, matériau d'essence évolutive...) ou des variations de l'environnement.

#### **a) Classification géotechniques.**

La classification des sols est établie suivant les pays, mais aussi en fonction du domaine d'activité.

Dans le cas des tufs d'encroûtements, les classifications usuelles ne conviennent pas, comme le montre le tableau suivant:

**Tableau I. 2: Récapitulatif des différentes classifications sur les sables gypseux.**

<b>Méthode de classification</b>	<b>Caractéristiques prises en considération</b>	<b>Dénomination</b>
Américaine H .R.B	Limite d'Atterberg (Wl, Ip)	Sable limoneux ou argileux
Diagramme de Taylor	Granulométrie	Sable limoneux (SA-LI)
Abaque de CASAGRANDE	Limite d'Atterberg (Wl,Ip)	Sable argileux
United soil classification system U.S.C.S	Limite d'Atterberg	Sable argileux (SA, SC)
Technique Routière Saharienne	Granulométrie Nature minéralogique	Matériau fin de nature gypseuse.

D'après les classifications classiques des sols, il ressort que le matériau est un sable limoneux ou argileux.

D'après la Technique Routière Saharienne, le sol est un matériau fin de nature gypseuse, soit un sable gypseux.

Il est à remarquer que dans le cas des matériaux locaux, les classifications usuelles des sols ne sont pas applicables car elles ne tiennent pas compte, entre autres, de la nature minéralogique du matériau qui dans certains contextes est importante : une classification propre aux matériaux sahariens devra être étudiée et approfondie.

### **b) Classifications rationnelle.**

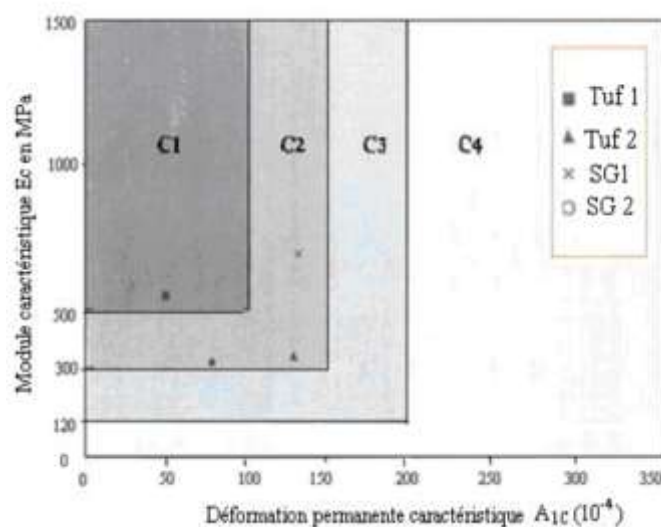
Cette classification est basée sur les performances mécaniques du matériau soumis à un chargement répété. Elle a été rendue possible grâce à la mise au point par les Laboratoires des Ponts et Chaussées Paute [9] et Paute [9], Morsli [57] d'un appareil triaxial à

chargements répétés – TCR- spécialement conçu pour l'étude des sols supports de chaussées et des matériaux non traités utilisés en couche d'assise.

L'échelle établie pour les classifications des matériaux locaux à partir des résultats de l'essai triaxial à chargements répétés est la même que celle établie pour les Graves Non Traitées (GNT).

La déformation permanente caractéristique  $A_{1c}$ , et le module caractéristique  $E_{1c}$ , sont obtenus sur des éprouvettes compactées à une teneur en eau voisine de la teneur en eau optimale proctor modifiée ( $W_{opm}$ ) et de masse volumique apparente comprise entre 95 et 97 % de la masse volumique apparente optimale de l'essai Proctor modifié. Les teneurs en eau de l'essai,  $W_{essai} = W_{opm} - 4\%$  correspondant à celle rencontrée dans les chaussées (Djelfa, El-Bayadh).

Des essais au TCR réalisés par le CTTP (CTTP, [59]) ont permis de classer les tufs en fonction des performances mécaniques du mélange granulaire selon la grille pré-établie décrite ci-dessus (fig I.2).



**Figure I. 2: Classification des tufs au TCR selon leurs performances mécaniques (CTTP, [59])**

Les caractéristiques mécaniques obtenues à partir de ces essais sont reportées dans la grille de classification (fig I.2). On note que les matériaux présentent des performances mécaniques satisfaisantes. Ils sont classés dans les zones C1 ou C2 au même titre que des graves dures.

On remarquera une « non corrélation » entre les caractéristiques d'usure des matériaux étudiés et les performances mécaniques obtenues à partir de simulation plus proche du comportement du matériau en assise de chaussée.

#### **I.2.6.4. Caractéristiques Géotechniques[7]:**

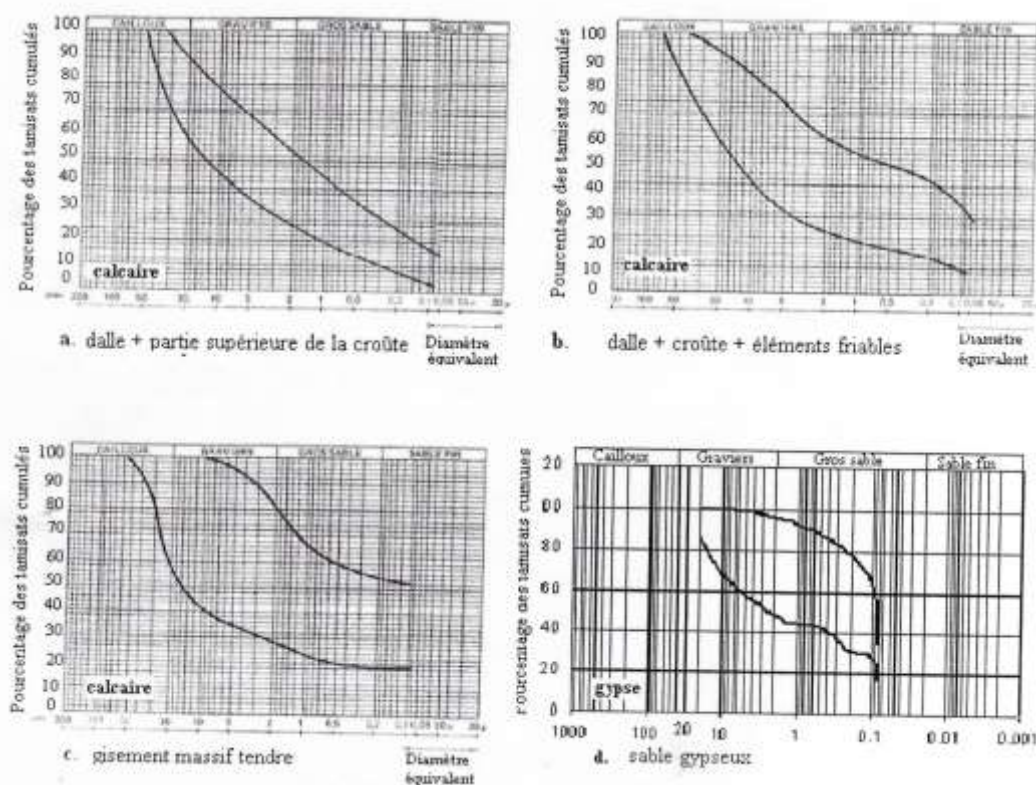
Avant tout utilisation d'un matériau en corps de chaussée, il est nécessaire d'apprécier ces caractéristiques géotechniques.

Plusieurs essais, afin d'établir les caractéristiques géotechniques, ont été réalisés dans différents laboratoires sur différents types de tuf d'encroûtement, et selon les normes admises en géotechnique classique.

### I.2.6.4.1 Essai d'analyse granulométrique:

Les fuseaux granulométriques des extraits d'encroûtements pour usages routiers sont extrêmement variables selon les caractéristiques du matériau d'origine et selon les processus d'extraction et d'élaboration.

Les courbes granulométriques des différents tufs d'encroûtement, souvent utilisés, doivent être à l'intérieur des fuseaux ci-dessous (figure I. 3)



**Figure I. 3: Fuseaux granulométriques de matériaux extraits de différents encroûtements (Colombier, [58])**

### I.2.6.4.2. Caractéristiques chimiques.

Dans un encroûtement gypso calcaire, les taux de carbonates et de sulfates varient en fonction de l'état d'avancement du processus de formation et de la nature du sol d'origine. Cette variabilité aura une influence sur les propriétés physiques et mécanique des matériaux. Les essais de détermination du taux de carbonates et de sulfates sont réalisés sur la fraction granulométrie inférieure à 1 mm.

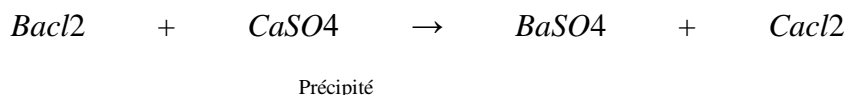
#### a) Détermination du taux de carbonates.

L'essai de détermination du taux de carbonate est effectué suivant la norme NF P 18-553. On utilise la méthode Dietrich-Frühling qui consiste à comparer le volume de dioxyde de

carbone, dégagé par l'attaque de la prise d'essai à l'acide chlorhydrique ,avec celui obtenu sur une poudre étalon de carbonate de calcium.

**b) Détermination du taux de sulfates.**

L'essai est réalisé à la base de la norme ISO 11048, le taux de sulfate dans un sol est déterminé par la méthode gravimétrique selon laquelle on ajoute du chlorure de baryum à l'eau ou l'extrait acide de sol, puis on assèche et on pèse le précipité de sulfate de baryum.



On calcul alors le taux à partir de la masse du matériau utilisé dans l'analyse et de la masse de sulfates de baryum précipité.

Le type d'encroûtement est déterminé selon la nature chimique correspondant au taux de sulfate et de carbonate .

**Tableau I. 3: Les différents types d'encroûtements selon la nature chimique.**

	Encroûtement	Calcaire	Gypso-calcaire	Gypseux
<b>Taux de Gypse et de calcaire</b>	Calcaire	50 à 95 %	10 à 50 %	Moins de 10 %
	Gypseux	Moins de 10 %	10 à 50 %	40 à 90 %
	Gypso+calcaire	Plus de 50%	Plus de 50%	Plus de 50%

**I.2.6.4.3.Essai des Limites d'Atterberg.**

L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-051, il a pour objectif de déterminer le taux de pollution des encroûtements en fine argileuse, on fait souvent référence à la valeur de l'indice de plasticité. Il est réalisé sur la fraction inférieure à 0.4 mm.

**Tableau I. 4: Indice de plasticité pour différents types d'encroûtements.**

Encroûtement	Calcaire	Gypso- calcaire	Gypseux
Indice de plasticité	Non mesurable < $I_p < 25$	Ordre de 13%	Ordre de 6%

#### I.2.6.4.4.Essai d'équivalent de Sables.

L'essai est effectué sur la base de la norme NF P 18-598, et sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier.

L'équivalent de sables est un rapport conventionnel volumétrique entre les grains fins et les autres. Il permet donc de caractériser l'importance des fines par une valeur numérique.

**Tableau I.5 - Equivalent de sables pour différents types d'encroûtements.**

Encroûtement	Calcaire	Gypso- calcaire	Gypseux
<b>Equivalent de Sable</b>	10 à 60 %	> 40 %	Sans signification

#### I.2.6.4.5.Essai Proctor modifié:

Réalisé à la base de la norme NF P 94-093, cet essai simule l'évolution du sol au cours du compactage et permet de déterminer pour une énergie de compactage donnée, la teneur en eau optimale pour obtenir la densité sèche maximale.

Du au caractère très évolutif des sables gypso calcaire, il est conseillé de ne réutiliser le même échantillon pour les différents point de teneur en eaux.(Tableau I.6) .

**Tableau I. 6: Teneur en eau optimale et densité sèche maximale pour différents types d'encroûtements.**

Encroûtement	Calcaire	Gypso- calcaire	Gypseux
Densité sèche	$7.1 < W_{opm} < 2$	$7.1 < W_{opm} < 2$	$60.1 < W_{opm} < 90.1$
Teneur eau optimale	$\%8 < W_{opm} < 20\%$	$\%8 < W_{opm} < 20\%$	$\%8 < W_{opm} < 20\%$

**I.2.6.4.6.Essai CBR:**

L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-093, Il sert à caractériser la portance du matériau c'est à dire la charge qu'il peut supporter sans se rompre, mais également à mesurer l'aptitude d'une chaussée à préserver sa portance une fois soumise à une forte immersion en cas de fortes pluies. Le CBR est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage le rapport entre les pressions produisant en même temps un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part, et dans un matériau de référence d'autre part. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes:

$$ICBR_{2,5} = \frac{F_{2,5}}{13,35} \times 100 \qquad ICBR_5 = \frac{F_5}{20} \times 100$$

$F_{2,5}$  = Force à 2,5 mm d'enfoncement.

$F_5$  = Force à 5 mm d'enfoncement.

**Tableau I.7: Indice CBR immédiat et imbibé pour différents types encroûtements.**

	Encroûtement	Calcaire	Gypso-calcaire	Gypseux
Essai CBR	immédiat	50 à 100	50 à 100	Jusqu'à 112 avec une moyenne de 40
	Imbibé	30 à 100	20 à 40	Peut chuter jusqu'à 8

**I.2.6.4.7.Essai de résistance à la compression simple.**

La résistance à la compression permet d'apprécier la valeur de la cohésion du matériau.

C'est un essai empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par FENZY[7], il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction <5 mm.

Le compactage à teneur en eau optimum Proctor modifié (OPM) est effectué à la presse, et les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve à 60° C pendant 98h (éprouvette de 5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur Les valeurs des résistances à la compression simple varient entre 5 bars et 40 bars.

### **I.3 la Croûte et l'encroûtement.**

En pédologie, les définitions les plus simples de la croûte et d'encroûtement sont :

" la Croûte" Ils sont définis comme des formations de surface ou intra-sol et sont la partie quelque peu solidifiée de la chaux, du gypse ou de l'accumulation de sel [10].

"Encroûtement" C'est une formation de surface molle, friable et poreuse qui est légère et de couleur claire, et c'est une partie adhérente de l'accumulation de gypse ou de calcaire s'étendant sur tout l'horizon, elle est moins dure qu'une croûte[10][11].

Ces formations se forment et se développent par une série d'échanges de dissolution et de recristallisation (précipitations), remontant à l'ère quaternaire[11].

Encroûtement est une forme de dépôt ou de recristallisation de matériaux et sont classées selon leur composition en 3 catégories, qui sont Les encroûtements gypseux , Les encroûtements calcaire et Les encroûtements gypso \_ calcaire (mixtes) [7] .

### **I.4 Le gypse et les encroûtements gypseux .**

#### **I.4.1 Le gypse .**

##### **I.4.1.1 définition .**

Le gypse est la forme la plus courante de sulfate de calcium, c'est du sulfate de calcium hydraté dont la formule chimique  $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$  [5] .

Le gypse est un minéral dérivé du mot latin « gypsum » et du mot grec « gypsos », et il appartient à la famille des évaporites et est la roche sédimentaire la plus soluble dans l'eau, résultant généralement de l'évaporation de l'eau du lac [5][7] .

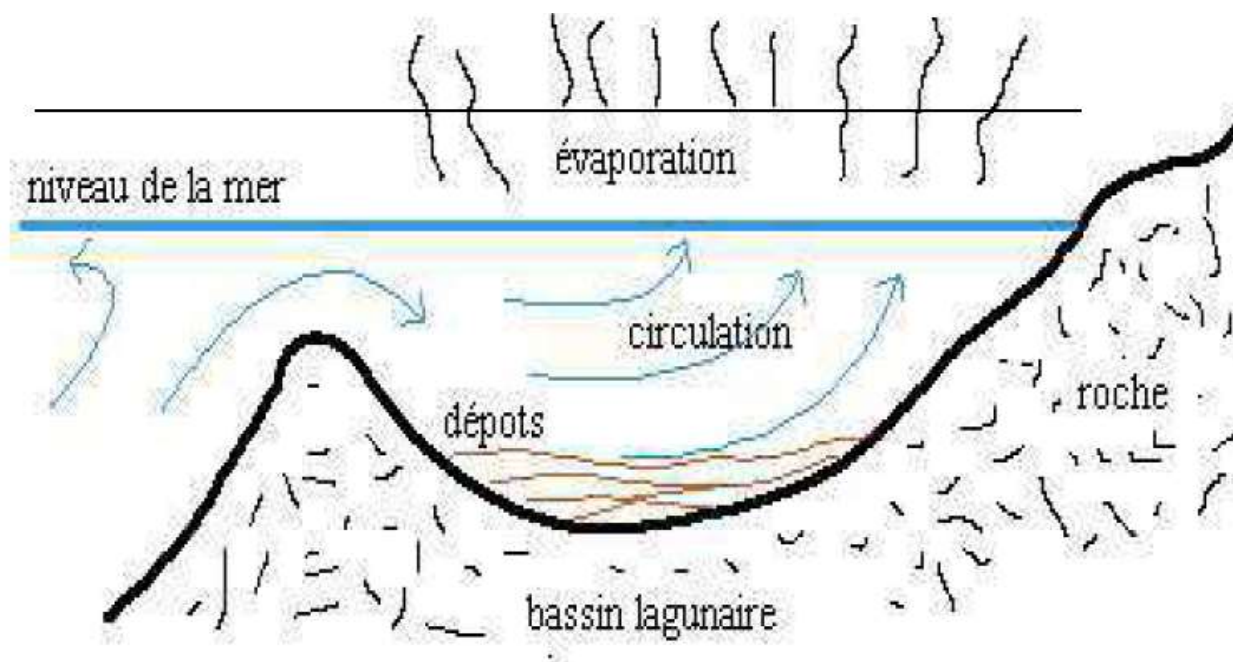


Figure I. 4: diagramme schématique montrant le mécanisme de formation du gypse[7] .

Selon Eswaran et al. [48], Le gypse se présente soit sous forme de masse granulaire ,soit en cristaux limpides et tabulaires minces à épais, parfois allongés, et peut apparaître sous forme d'agrégats fibreux de cristaux allongés et entrelacés (Spath satiné), ou sous forme de masse granulaire grossière (gypse Saccharoïde), ou sous forme de masse granulaire fine Très (albâtre) (O'Donoghue, [49]; Gautier, [50]).

Souvent, le gypse est à l'état impur, il peut contenir des impuretés de quartz, de sable et d'argile (Barriand et al., [51]) ou d'oxyde de fer (Benmati, [52]) [5].

Le gypse cristallise dans le système cristallin monoclinique (A2/a), le processus de fixation de l'eau (Hydratation ) s'accompagnant d'une augmentation de volume, comme le montre la relation suivante[7]:



Selon (Heijnen et Hartman, [53]; Sipple, [54]) , Les paramètres de la maille élémentaire du système monoclinique sont les Suivants :

a=5.6Å ;

b=15.2Å ;

$c=6.5\text{\AA}$  ;

$\beta=118\text{\AA}$  [5] .

Le cristal de gypse présente 3 clivages principaux, le premier côté (010) représentant un plan de clivage parfait où l'on obtient des fractions lisses, et les fractures secondaires (100) (011) où les fractures sont fibreuses et conchoïdales (dans l'ordre).

Une représentation schématique du réseau primaire du système monoclinique est illustrée dans la figure suivante [5]:

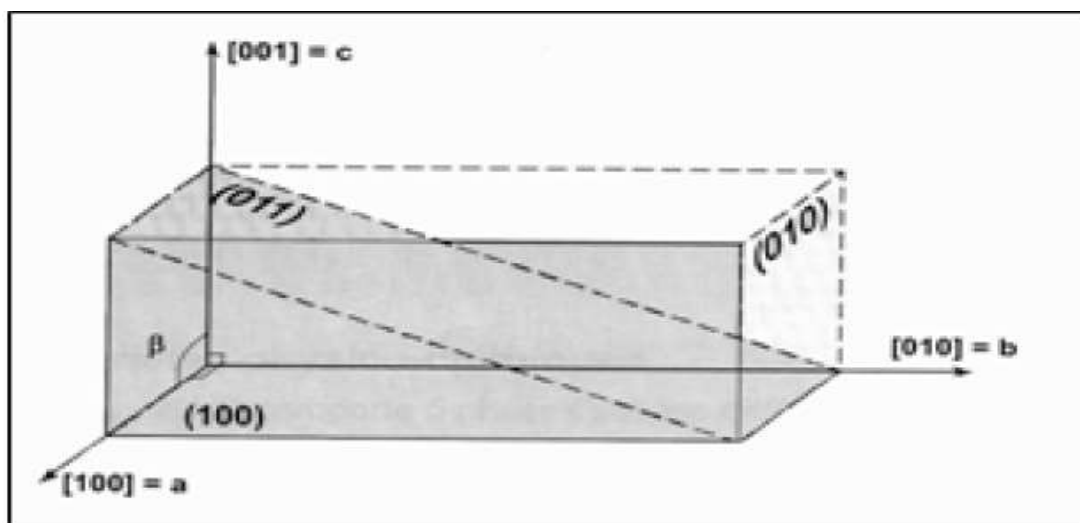


Figure I. 5: Représentation schématique du Réseau primaire d'un réseau cristallin monoclinique de gypse [5] .

#### I.4.1.2. Solubilité et processus de dissolution du gypse [5] .

D'après Gutierrez et Gutierrez [30], Comprendre les aspects de la réaction (dissolution du métal) est d'une grande importance, ce qui nécessite d'expliquer le processus de fusion, ainsi que d'expliquer les facteurs impliqués dans la réaction, est très important pour la détermination du taux de dissolution.

##### -Solubilité.

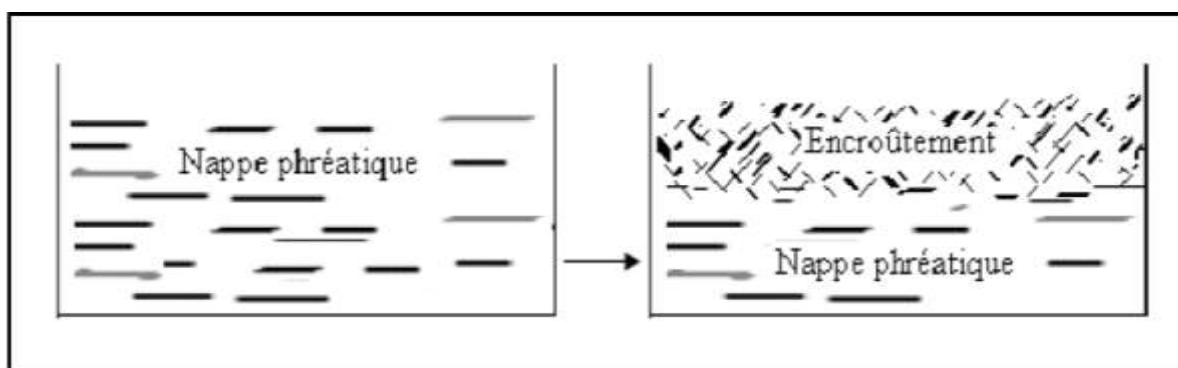
La solubilité du gypse est exprimée en grammes de sulfate de calcium dissous dans 1000 grammes d'eau pure, et à température ambiante (18-20 ° C), soit à raison de 2 g/l.

Le gypse est parfois présenté comme un minéral à solubilité limitée, dont le degré varie (peu soluble , faiblement soluble , semi-soluble ), et est contrôlé par plusieurs paramètres:

- la température ;
- la taille des particules de gypse ;
- le pH ;
- le type et la concentration des ions présents en solution .

#### I.4.2 les encroûtements gypseux [7].

Les encroûtes de gypse est située suffisamment près de la surface de la terre pour être exposée à l'évaporation et au-dessus du niveau de l'eau, ce qui permet le processus de dissolution des sels et des minéraux dans l'eau, et l'occurrence de ces deux processus est ce qui permet la formation de Les encroûtements gypseux , qui correspond et justifie l'existence d'une telle richesse dans le sud-est de l'Algérie et la wilaya de l'oued Plus précisément .



**Figure I. 6: Formation d'encroûtements par évaporation[24].**

Chaque grain de sable de gypse est un agrégat de cristaux microscopiques d'un diamètre compris entre 0,1 et 2 mm et pouvant dépasser 5 mm .

Ce minéral a une très faible dureté et peut être rayé avec un ongle, de sorte que son utilisation comme matériau de pavage est interdite dans les régions climatiques semi-humides et semi-arides[7].

##### I.4.2.1 Profil des encroûtements gypseux[7][24] .

En général, on constate que les encroûtements gypseux sont situés sous forme de couches, du formateur le plus ancien au nouvellement formé et de la densité la plus élevée à la plus basse, et que si l'on passe de la couche inférieure à la couche supérieure, et sur cette base les croûtes sont classées en 3 couches principales, nous les mentionnerons comme suit:

Horizon supérieur : A

Un horizon appelé "TIRCH" en arabe. Cet horizon est caractérisé par l'abondance de racines de gypse et l'écaillage intermittent des couches et des particules, et il est friable, poreux et souvent sableux.

Horizon massif ou pierre à plâtre : B

Un horizon appelé " TAFZA " en arabe, c'est la plus grosse croûte qui est compactée mais conserve une certaine porosité. C'est un grès solide de gypse-ciment qui prend la taille de grains de sable et sur lui s'appelle le sable de gypse, et c'est l'horizon qui est utilisé dans la construction de routes.

Horizon des roses de sable : C

Un horizon appelé "LOUSS" en arabe. Le sommet de la croûte est clair et sableux humide et se situe au-dessus du niveau de l'eau, généralement de 50 à 100 cm. Lorsque la croûte entre en contact avec la nappe phréatique, le gypse se cristallise en gros cristaux plats appelés roses des sables.



Figure I. 7: Profil d'un encroûtement gypseux[7] .

### I.4.2.2 Les essais fondamentaux [24] .

#### -Analyse chimique:

La quantité de gypse pour tous les échantillons testés (dans les laboratoires agréés) doit être comprise entre 20% et 90% de la quantité de substance.

#### -Granulométrie.

sa valeur doit correspondre aux fuseaux de référence de classe 0/5 et de classe 0/2.

### **-Résistance à la compression simple.**

C'est le test le plus important, les conditions pour le réaliser (le rapport idéal de l'eau à la qualité du sable) dépendent des résultats de Proctor.

Cela se fait en mélangeant les échantillons, puis en les décapant avec une presse, et enfin en les écrasant après séchage total.

#### **I.4.2.3 Préparation des matériaux [12] .**

En général, c'est l'horizon des encroûte tendres, c'est-à-dire l'encroûte de sable de gypse utilisée dans la technologie de la construction routière.

- A l'aide de machines de propulsion on pousse le matériaux de l'horizon A vers les bordures du gisement

- Après cela, l'horizon tendres , ou soi-disant sable de gypse, sont extraites et empilées, puis elles sont placées dans des camions de transport

- L'horizon suivant n'est pas homogène, ce qui exclut son exploitation dans le domaine de la construction routière.

\* On distingue deux types de sable de gypse (SG1, SG2) en fonction de sa granulométrie et de ses performances mécaniques .

- Fuseau 0/5 pour les sables gypseux de classe 1 : appelés SG1 .

- Fuseau 0/2 pour les sables gypseux de classe 2 : appelés SG2 .

#### **I.4.2.4 Domaine d'utilisation[12].**

En couche de base ou couche de fondation ; mais ce qui est important pour notre étude , c'est l'amélioration des propriétés ( physico-mécaniques ) du sable gypseux pour l'utiliser dans le couche de base .

#### **I.4.2.5 Mise en œuvre[12] .**

La Mise en œuvre de la couche de base à l'aide de sable de gypse, se fait de la façon suivant :

**-Répandage.**

premièrement, nous distribuons le sable de gypse sur la route afin que la teneur en eau naturelle du sable de gypse soit faible, puis nous l'étendons en ouvrant les cordes et en les déplaçant le long de la route en faisant des allers retours .

**-Humidification.**

A l'aide de réservoirs d'eau, le processus de humidification est réalisé, par aspersion successive de la route, suivi de l'étape de malaxage et le brasage par la niveleuse.

**-Compactage.**

L'épaisseur de la couche à comprimer est augmentée pour éviter les risques de feuilletage, puis on la compresse à l'aide d'un compresseur de pneu lourd.

**I.5 Les encroûtements calcaire.**

Il est principalement constitué de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  et de silicium ou quartz ( $\text{SiO}_2$  :sable), il contient également une petite quantité d'argile, de feldspaths et de chlorure de sodium, de sorte que ces croûtes diffèrent d'un endroit à l'autre dans le collage résultant de la nature des cycles naturels formés Il n'a aucune différence dans la nature de ses composants.

Il est également considéré selon « A.J. GOUDIE » , un matériau broyé à base de carbonate de calcium, est fourni à l'état poudreux, nodulaire ou très dur[6] .

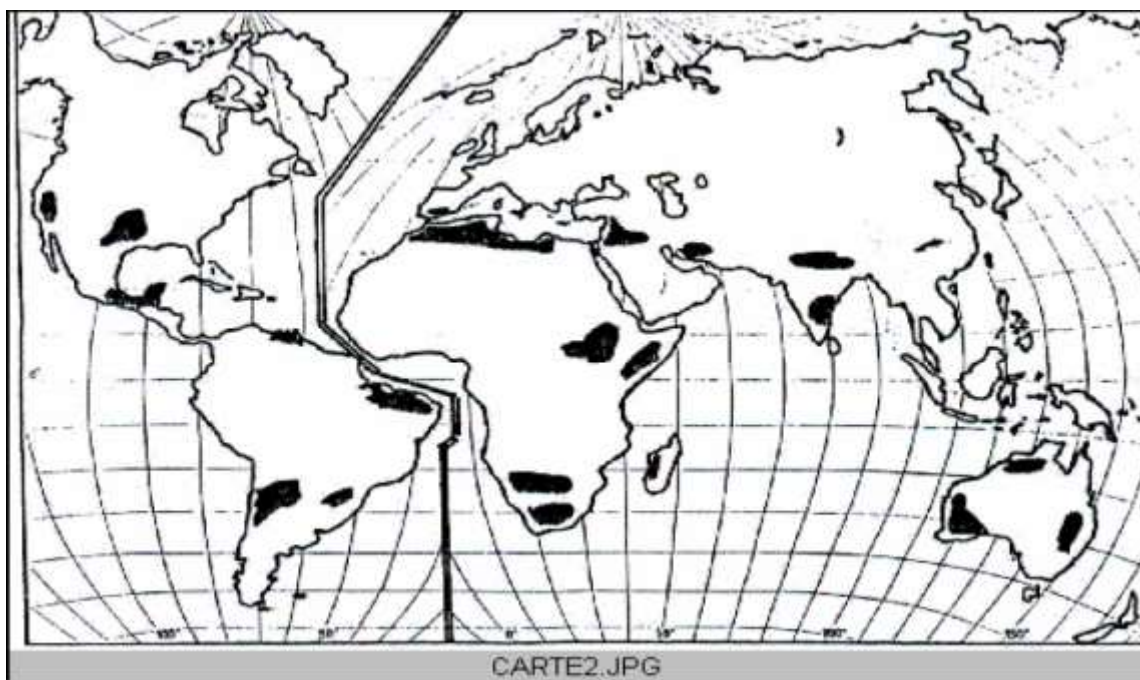


Figure I. 8: Répartition des encroûtements calcaires dans le monde[6] .

### I.5.1 Profil des encroûtements calcaires[24] :

Au début de la sédimentation, on trouve une couche en forme de nœud friable. Au fur et à mesure que la sédimentation progresse, la teneur en carbonate du sol augmente, puis on trouve une concentration continue appelée développement final, qui est l'encroûtement mur.

Les encroûtements de calcaire se forme de horizons suivants:

Horizon A.

La couche de végétation peut atteindre une épaisseur de quelques décimètres, et elle peut disparaître complètement en cas d'érosion.

Horizon Bca.

C'est l'horizon de la croûte elle-même, dont l'épaisseur varie de quelques décimètres à plusieurs mètres, et comprend:

sous forme de dalle dure comprimé à fort pourcentage de carbonate (40 à 80 %), son épaisseur peut aller jusqu'à 2 décimètres.

Il s'agit d'un placage avec une structure stratifiée (feuilles) dont la rigidité est inférieure à celle d'un panneau , et son épaisseur est d'environ 2 mètres.

Ce sont des nodules calcaires coincés dans une gangue calcaire.

Horizon C .

C'est le matériau d'origine d'enrichissement calcaire, dans lequel on trouve quelques complications .

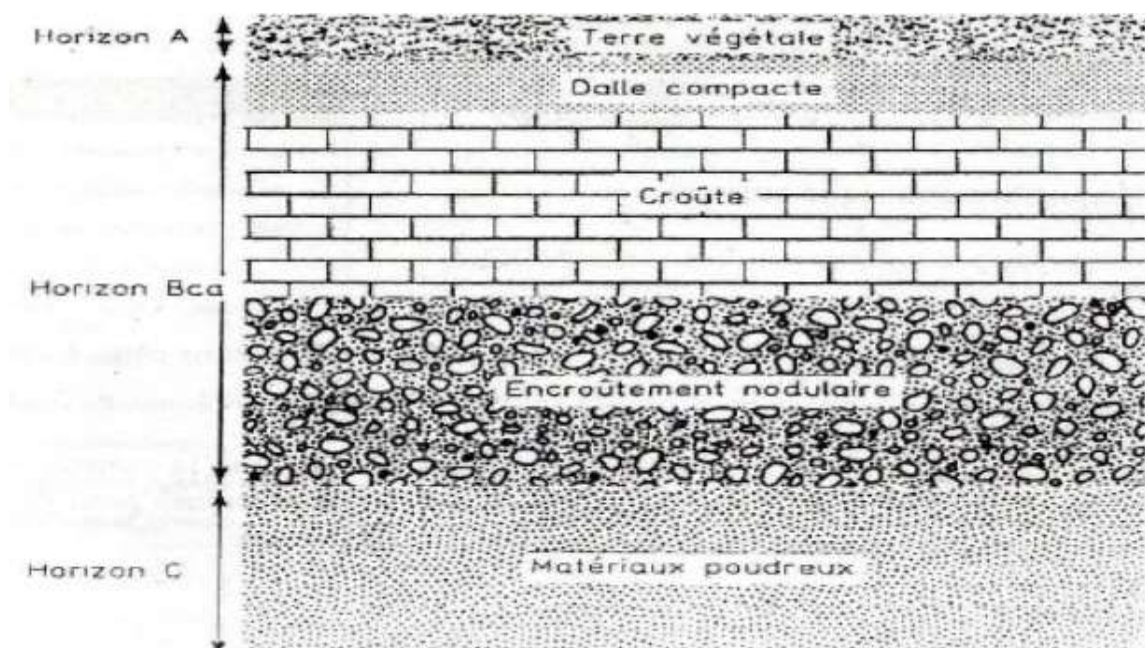


Figure I. 9: Profil d'un encroûtement calcaire mur [24] .

### I.5.2 Les essais fondamentaux[6].

#### -Analyse chimiques.

Les valeurs de carbonate de calcium pour tous les échantillons testés (dans des laboratoires agréés) doivent être comprises entre 50% et 95%.

#### -Granulométrie.

On regroupera les courbes granulométriques en trois fuseaux types :

0/D issu de concassage des éléments les plus durs d'un gisement (dalle et partie supérieure de la croûte).

0/D issu d'encroûtements feuilletés.

0/D issu d'un gisement massif tendre. ,

#### Dureté :

Le coefficient Los Angeles mesuré sur le matériau d'encroûtement varie entre 30% d'usure pour les dalles les plus compactes, et 60% d'usure pour les croûtes les plus faibles.

Tuf à squelette LA est inférieur à 40%.

Tuf friable LA varie entre 40% à 80%.

Tuf pulvérulent LA est supérieur à 80%.

### I.5.3 Hypothèses de formation[5][6] [7] .

Le calcaire est d'origine chimique ou biologique, formé dans un sol contenant du carbonate de calcium.

La composition chimique dépend de l'abondance de dioxyde de carbone dans l'eau et la chaîne de réaction chimique est la suivante:



*Insoluble*

*soluble*

Quant à la composition biologique, elle dépend des sécrétions d'organismes (directs) du calcaire  $\text{CaCO}_3$ , qui est à l'origine du calcaire.

La figure suivante représente le cycle de formation des encroûtements calcaires basée sur le carbonate de calcium dissous  $\text{CaCO}_3$  provenant de massifs rocheux élevés.

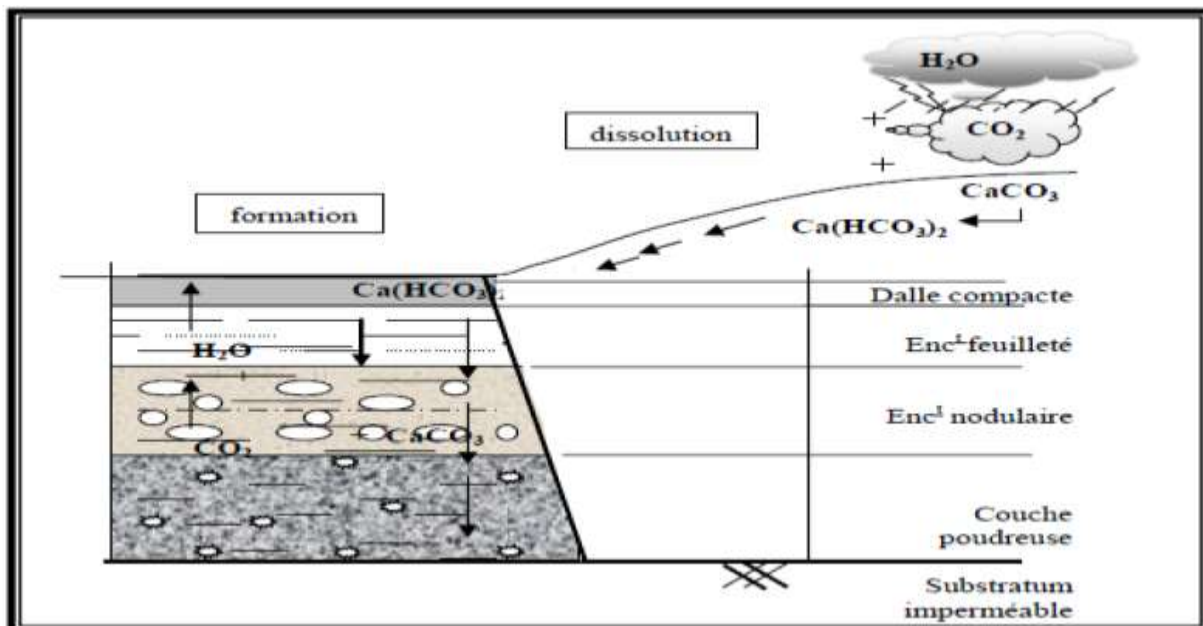


Figure I. 10: Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires[6] .

### I.5.4 Utilisation des tufs calcaires en constructions routière[6].

Selon leurs caractéristiques, les encroûtements calcaires sont utilisés différents cas :

- couches de fondation, couches de base, couches de forme et en accotement .

- pistes agricoles, routes moyennement ou fortement circulées et même autoroutes .
- remblais.

L'utilisation courante des encroûtements calcaires en Algérie est sur les routes à trafic modéré ou léger, en particulier dans les couches de fondation et de base, c'est-à-dire dans les couches d'assises.

En Algérie, les critères d'utilisation des encroûtements calcaires en couche de fondation, couche de base et en remblais sont les suivants:

**-Couche de fondation.**

La couche de fondation est le domaine privilégié des tufs calcaires, le rôle de cette couche est de recevoir les pressions résultant du mouvement du trafic en plus des auto-pressions et elle la répartit sur le sol support comme c'est le cas dans la couche de base (même rôle), l'épaisseur de cette couche varie après compactage en fonction de la nature du sol Sur la plate-forme et la quantité de pression (haute, moyenne ou basse).

**Tableau I.8: présente les différentes caractéristiques physiques et chimiques des tufs calcaires utilisés en couches de fondation en Algérie.**

Granulométrie	Suivant le fuseau
Limite de liquidité	$20 \% < W_L < 35 \%$
Indice de plasticité	$6 \% < I_p < 12 \%$
Equivalent de sable	$20 \% < ES < 35 \%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 45 \%$
CBR imbibé	$CV^{(1)} : CBR > 20$ $CW^{(1)} : CBR > 30$ $RN^{(1)} : CBR > 35$

Avec :  $CV^{(1)}$  = chemin vicinal       $CW^{(1)}$  =chemin wilaya       $RN^{(1)}$  = route nationale .

**-Couche de base.**

Les tufs naturels sont rarement aptes à être utilisés en couches de bases pour les routes à fort ou moyen trafic. La couche de base a pour rôle essentiel de reprendre les efforts verticaux et de répartir les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes, et le CBR doit être au minimum égale à 60.

(voir Tableau. I.3). Cette portance est rarement atteinte quand les tufs permettent une immersion de 4 jours. Dans les régions sèches, on peut prendre en compte un CBR non immergé, d'où une possibilité d'utilisation des tufs en couches de bases, puisque leur portance immédiate est en générale très élevée.

**Tableau I.9: Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de base en Algérie**

Granulométrie	Suivant le fuseau
Limite de liquidité	$20 \% < W_L < 30 \%$
Indice de plasticité	$5 \% < I_p < 10 \%$
Equivalent de sable	$20 \% < ES < 40 \%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 45 \%$
CBR imbibe	$CV^{(1)} : CBR > 20$ $CW^{(1)} : CBR > 30$ $RN^{(1)} : CBR > 35$

**-Remblais.**

Le remblayage est le remplissage et l'empilement du sol pour remplir les cavités, et il prend en considération le tassement et le coefficient de foisonnement du sol; le tableau suivant montre les critères qui doivent être dans le radeau pour être disponible pour une utilisation dans le remplissage.

**Tableau I. 10: Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie .**

Granulométrie	Ne doit pas être serrée
Limite de liquidité	$W_L < 45 \%$
Indice de plasticité	$I_p < 16 \%$
Equivalent de sable	$15 \% < ES < 40 \%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 30 \%$
CBR imbibé	$CBR > 14$
Densité sèche maximale	$\gamma_{d \max} > 1.6 \text{ g / cm}^3$
Teneur en eau optimale	$W_{opt} < 16 \%$

### **I.6 Les encroûtements Gypso- Calcaires (mixte) [24] .**

Ce sont des formations de tufs calcaires gypsiers que l'on trouve dans les régions arides et semi-arides.

Lorsque vous passez du climat désertique au climat semi-aride, le gypse devient instable, c'est-à-dire soluble dans la quantité de pluie dans la région, et il se déplace vers les croûtes de calcaire préformées (qui ont cessé de se former), vous obtenez donc à la fin des croûtes mixtes.

### **I.7 Le gypse dans la nature[7][24] .**

Le gypse est un sulfate naturel élaboré par la nature dans les dépôts d'évaporation de l'eau de mer, il est plus abondant que le sel gemme. Ces dépôts se forment par sédimentation de couches survenues lors de l'évaporation de lagunes coupées temporairement de la mer. Lorsque le niveau de la mer augmente les lagunes sont remplies à nouveau le reste du temps l'eau s'évapore et le gypse se dépose au fond jusqu'à créer des bancs très puissants.

Le gypse est une substance solide constituée de sulfate de calcium hydraté (formule chimique  $(CaSO_4, 2H_2O)$ ). L'une des propriétés les plus caractéristiques de ce minéral est sa faible dureté.

L'utilisation de granulats de gypse ne pourrait conduire qu'à des échecs, mais la sulfate de calcium possède d'autres propriétés qui lui permettent d'en faire un matériau de construction très apprécié.

La première de ces propriétés utilisées dans le plâtre est l'eau. Le gypse peut être dissous dans l'eau et recristallisé sous diverses formes .



Cette réaction peut se dérouler aussi de droite vers la gauche, lorsqu'on chauffe le gypse, il se déshydrate et des températures de cuisson pas trop élevées on obtient la forme hydratée intermédiaire qui constitue le plâtre très réactif.

La deuxième propriété importante du gypse est sa solubilité dans l'eau bien qu'il soit moins soluble que d'autres sels comme l'halite (NaCl), et le gypse a une solubilité assez élevée dans l'eau de l'ordre de quelques grammes par litre. . A 20 °C, il est proche de 2 g / l dans l'eau pure, et une particularité du gypse est que sa solubilité passe à une température maximale de 37-38 °C, puis diminue assez rapidement, devient très faible à haute température, et se transforme complètement en Demi hydraté .

Au niveau moléculaire, il a une structure stratifiée dans laquelle alternent deux couches d'eau et deux couches de sulfate de calcium. Chaque molécule d'eau d'un côté se lie à l'ion  $\text{Ca}^{+2}$  et à l'ion  $\text{O}^{-2}$  de son propre côté, d'autre part à l'ion  $\text{O}^{-2}$  de la feuille, d'autre part à l'ion  $\text{O}^{-2}$  de la feuille adjacente.

Le gypse est incolore à l'état pur, ou parfois légèrement jaune clair avec de l'oxyde de fer. Il peut prendre différentes formes:

- Forme cristalline: sélénite, verre marin, gypse lenticulaire, rose, etc.
- Forme cristalline ou granulaire: albâtre, gypse, foie, fibreux, etc.

Le gypse est mou et peut être rayé avec une vis, sa dureté est de 1,5 à 2 sur l'échelle de Mohs selon la direction de la face cristallisée et son poids spécifique est d'environ 2,31.

### I.8 Les gypses Pulvérulents[13].

C'est une formation résultant des détritiques d'un lac, qui apparaît sous forme de sédiment (dépôts) .

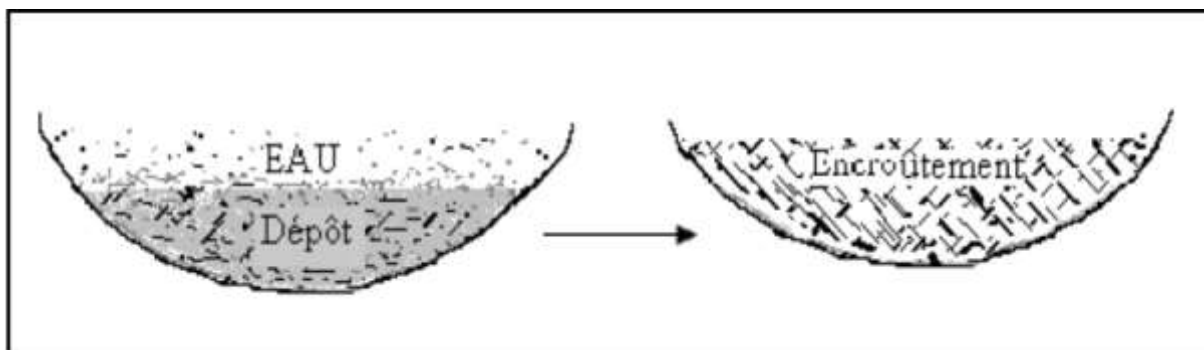


Figure I. 11: Formation d'encroûtements gypseux par dépôt selon DURAND [24].

### I.9 Utilisation du sable gypseux en technique routière[7].

En Algérie, il y a environ un demi-siècle, les régions désertiques du pays n'ont connu aucun développement en termes de construction routière, en raison de leurs conditions climatiques difficiles et de leur faible présence humaine, signifiant le manque de besoin et le manque d'expertise.

Avec le passage du temps et l'émergence de la nécessité de cela, les hommes ont exploré ces zones désertiques et exploré leur ressource la plus importante, qui est le Tiv 'en termes de construction de routes'.

Ces matériaux couvrent l'ensemble du réseau routier algérien dans les régions arides et semi-arides, et sont considérés comme une ressource économique importante.

Le début des routes sahariennes se situe vers 1955 par l'adoption de fondations techniques et d'études développées par la France à l'époque coloniale en Algérie (les axes Ghardaïa – El Goléa et Ghardaïa - Ouargla).

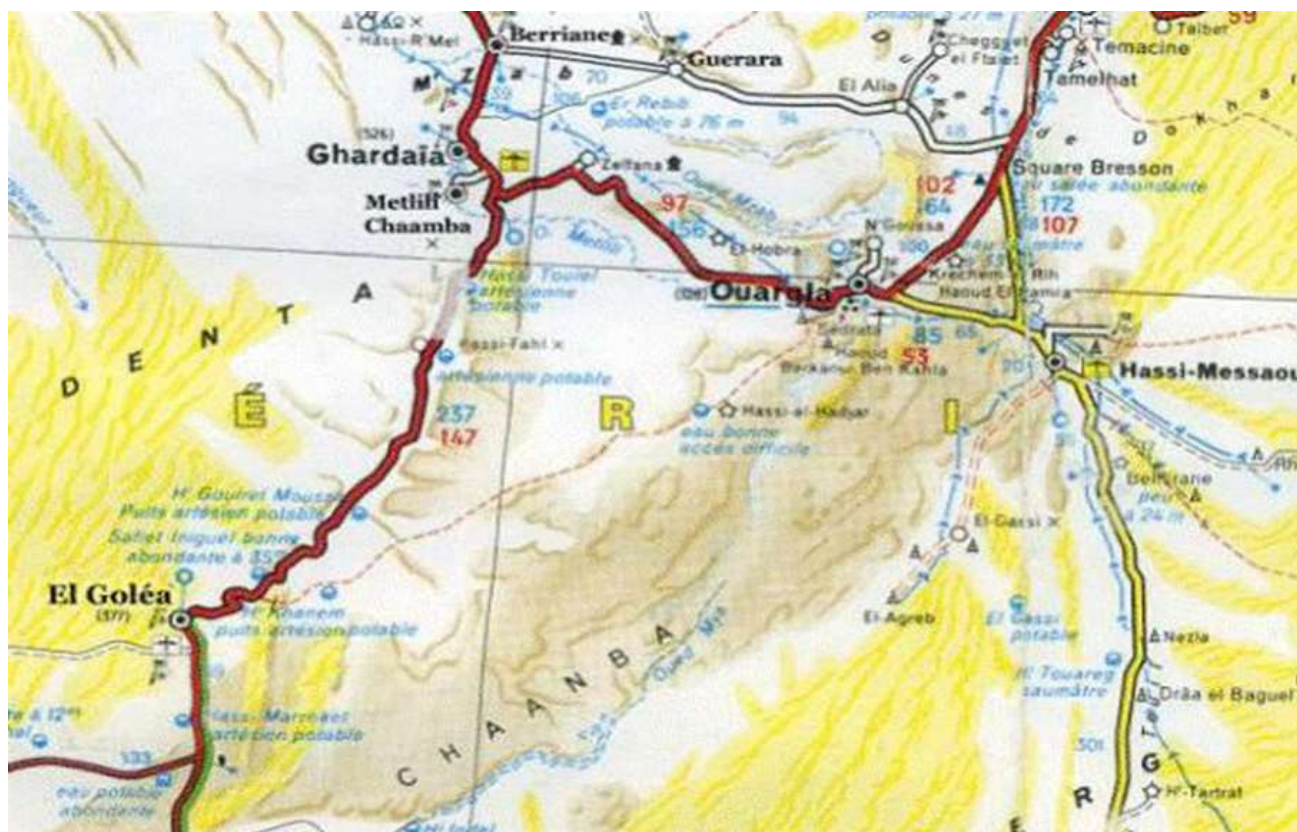


Figure I. 12: Carte illustrant les axes Ghardaïa – El Goléa et Ghardaïa – Ouargla [14] .

### I.10 Chaussées en sable gypseux[15].

Le sable de gypse est le seul matériau local (désertique) pouvant être utilisé dans le domaine de la construction de routes, et dans ce domaine il est considéré comme moins bon que le calcaire, de sorte que certaines dégradations comme fissuration, gonflement, et boursouflures , mais ce sont des défauts qui ne remettent pas en question la possibilité de son utilisation .

Les phénomènes de fissuration, de gonflement et de boursouflures sont connus comme suit :

#### -La fissuration.

Les manifestations de dégradations sont classées en deux familles (fissures longitudinales et fissures transversales), liées uniquement aux chaussées de sable de gypse.

Ces fissures proviennent des accotements de la route. Les fissures apparaissent sous forme de mailles de dimensions différentes à la surface du revêtement.

Horta [55] a montré que la cause de ces fissures est la déshydratation du gypse qui se produit pendant les périodes sèches, commençant par une diminution significative de volume, et cela provoque une traction qui conduit à l'apparition de fissures dans la couche de base puis à un transfert progressif vers la couche de roulement.

Alloul [56] a expliqué la cause des fissurations de ces chaussées, par la diminution de portance, en période hivernale, du sable gypseux de la couche de base suite à l'état humide de cette dernière, cet état est présent même en période sèche (teneurs en eau qui dépassent 2% en été).

Cette imbibition ne réduit pas significativement le soulèvement de la chaussée et n'est pas dangereuse à cet égard, alors qu'elle réduit en revanche fortement la force de cisaillement du sable de gypse, ce qui augmente l'effet de freinage ou la force de traction des roues des camions, provoquant un glissement horizontal sous la chaussée.

### **-Le gonflement.**

Parmi les défauts de surface courants dans les chaussées de sable gypseux, cela est dû à la grande finesse du gypse ou à la présence d'un pourcentage d'argile activée par l'eau.

### **-Les boursouflures.**

Ce sont des boursouflures salines ou encore les cloques, c'est un autre type de détérioration de la chaussée qui est causée par les chlorures, en particulier le chlorure de sodium (NaCl), et il est déconseillé d'utiliser du sable de gypse qui contient un pourcentage supérieur à 0,5% au minimum.

## **I.11 Structure De La Chaussée Saharienne[15].**

Les chaussées sont des structures constituées de plusieurs couches surmontant un ensemble appelé plateforme ou support de la chaussée, constitué du sol support le plus souvent protégé par une couche de forme.

### **a) Couche de forme.**

Il n'y a pas de sélection de matériaux pour la couche de forme à

l'exception des matériaux trop fins et pulvérulents qui sont écartés. Ce sont

généralement des tout-venant qui sont utilisés; cependant, dans les zones des dunes, le sable peut constituer le corps du remblai, mais sa mise en oeuvre pose des problèmes particuliers: faible portance du sable, sa fluidité et difficulté de répannage des matériaux d'assise de chaussée.

### **b) La couche de fondation.**

La couche de fondation est mise en place sur la plate-forme support de la chaussée par compactage avec humidification et est exécutée sur toute la largeur de la plateforme. Les matériaux couramment utilisés dans cette couche sont les tuf d'encroûtement.

La couche de fondation apporte la résistance mécanique aux charges verticales, répartissant les pressions sur la plate-forme afin de limiter les déformations à ce niveau au seuil admissible.

### **c) La couche de base.**

La couche de base, souvent on utilise la grave concassée, est aussi compactée avec humidification et exécutée sur toute la largeur de la plate forme, avec des élargissements sur certaines sections (passages submersibles, remblais de grandes hauteurs, etc.).

### **d) L'imprégnation.**

Préalablement à la réalisation d'une couche de roulement, les matériaux de la couche de base doivent recevoir une couche d'imprégnation bitumineuse ayant pour but :

- Assurer l'accrochages de la couche de roulement sur un matériau souvent très fermé en surface;- Servir éventuellement de couche de roulement provisoire;

- Protéger la couche de base d'éventuelles précipitations.

L'imprégnation est réalisée sur toute la largeur de la plateforme, le plus souvent au cut-back 0/1 et parfois au cut-back 10/15.

### **e) La couche de roulement.**

Selon l'intensité du trafic, la couche de roulement sera constituée par un enduitsuperficiel, un enrobé à froid, un enrobé à chaud ou un sable bitume.

Cette couche assure les fonctions d'adhérence avec les pneumatiques, elle doit résister aux actions directes du trafic et du climat.

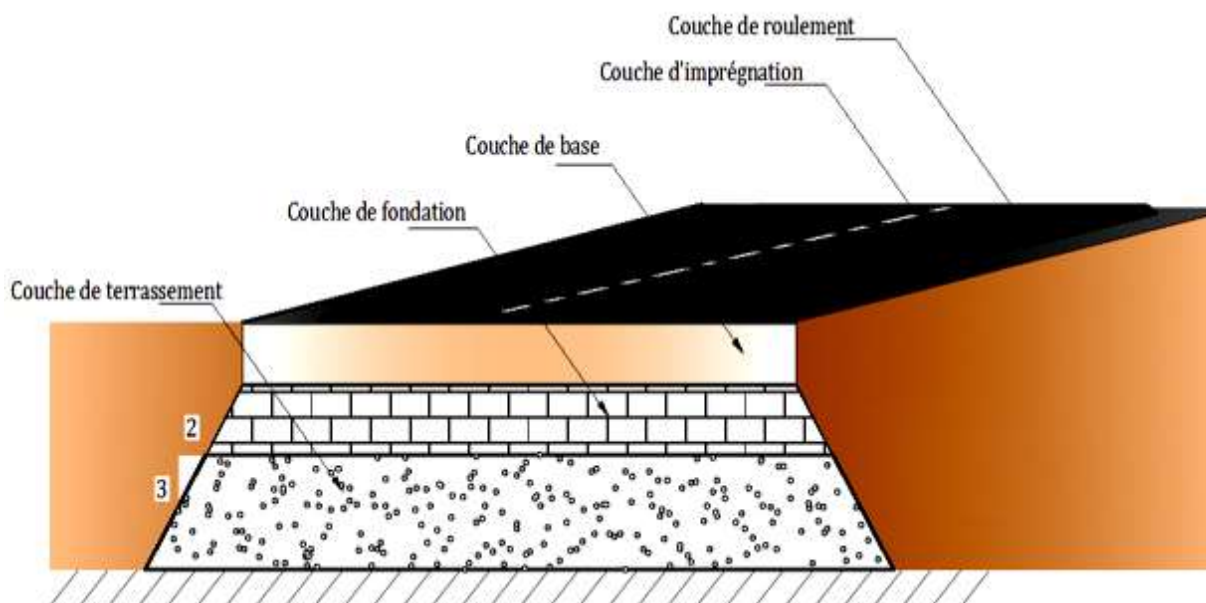


Figure I. 13: Coupe transversale type d'une chaussée saharienne[16] .

## I.12 Conclusion .

La règle générale pour choisir le sable de gypse requis ou le gisement est que le matériau doit répondre à toutes les exigences techniques de résistance, dont les plus importantes sont la résistance à la pression, les exigences de stabilité (telles que la procédure limites d' Atterberg Test), ainsi que les exigences économiques.

Nous avons également découvert les formations de surface utilisées dans la construction de routes et leur utilisation dans les zones arides et semi-arides

**Chapitre II**  
**Statistiques sur le sable**  
**gypseux dans la wilaya**  
**d'El-Oued**

## II.1. Introduction.

Depuis les années 1950 où les premières routes construites dans la région du souf et jusqu'à nos jours, les corps de chaussées ont été toujours réalisés avec le même type de matériau local à savoir le sable-gypseux.

La première réalisation fût un chantier en régie, entrepris en 1953 près d'El-oued, dans la traversée des Oasis du Souf, région où la pierre à plâtre ou le gypse ,seul matériau dur, est utilisé par les maçons locaux. On utilisa la croûte gypseuse de surface en blocage à la main; les intervalles ou "interstices" sont garnis de sable gypseux pulvérisé, après humidification et compactage, l'ensemble se soudait pour former une croûte très dure. La couche de chaussée ainsi réalisée fut recouverte d'un sable à bitume à base de sable de dune. Cette réalisation ayant donné de bons résultats pour une circulation peu intense et assez légère et qui servit de base "technique" aux réalisations futures: axe Biskra-Touggourt et Biskra-El-oued, lancés en 1955[17].

## II.2.Situation de la wilaya d'El Oued[18].

le souf est une région d'une superficie d'environ 10000Km<sup>2</sup>, située aux confins septentrionaux de l'erg oriental , qui s'étend entre 33 et 34 de latitude nord , et les 6 et 8 de longitude est.

C'est un état algérien situé au sud-est de l'Algérie, située au Sud-est de l'Algérie. Située au nord-est du Sahara algérien. Elle est délimitée:

- au nord, par les wilayas de Tebessa et Khenchela;
- au nord et au nord-ouest par la wilaya de Biskra;
- au sud et au sud-est par la wilaya de Ouargla;
- et à l'est par la Tunisie.

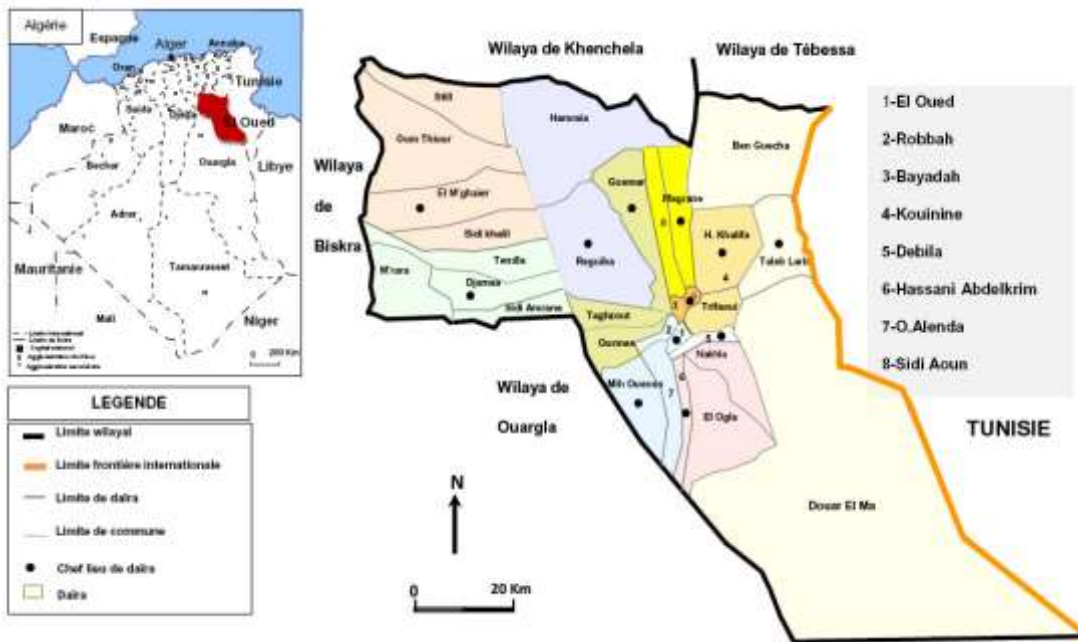


Figure II. 1: Plan la wilaya d'El Oued (Limites, grandes villes) [19]

### II.3.La Recherche de Gisement [5].

Quel que soit le problème à résoudre, le gisement à trouver devra répondre à trois impératifs :

- Un matériau ayant les qualités souhaitables.
- Permettre d'extraire dans des conditions économiques raisonnables.
- Etre situé le plus près possible du chantier ou au voisinage du " centre de gravité" des divers lieux d'utilisation.

#### II.3.1.La Prospection.

Avant d'effectuer une prospection par sondage ou méthodes géophysique ,l'utilisation de certains indicateurs pourront aider à la reconnaissance des gisements.

##### II.3.1.1.Le Climat.

La recherche sera limitée aux zones arides ou semi arides en éliminant les zones humides.

### **II.3.1.2.La Topographie .**

Les zones à forte pente sont en principe à éliminer de même que le fond des vallées, car le ruissellement aura érodé ou décomposé les encroûtements qui auraient pu se former antérieurement, dans ces zones, les encroûtements risquent d'être pollués.

Il est souhaitable de rechercher les gisement sur les glacis de faibles pentes, car ce sont dans ces zones que les encroûtements feuilletés (les plus favorable pour les emplois routiers) ont le plus de chance de ce trouver.

### **II.3.1.3.Les Indicateurs botaniques ou zoologiques .**

La présence de certains nombres de plantes dont souvent liée à l'existence de ces encroûtements, de même aussi pour certaines animaux et insectes. Ces indicateurs qui doivent être étudiés en fonction de la faune et la flore locales, n'ont cependant qu'une fiabilité restreinte.

### **II.3.1.4.La Photographie aérienne.**

Les photographies aériennes peuvent, notamment dans des zones d'accès difficiles, fournir des indications intéressantes à un géologue connaissant bien le contexte local. Par cette méthode, il est possible de sélectionner, dans une vaste région ,les sites favorables à la présence d'encroûtement.

### **II.3.1.5.Les Sondages.**

Seuls des sondage renseigneront sur la coupe du terrain et permettront de réaliser les prélèvements nécessaires pour analyser les matériaux. Il faut se rappeler que les encroûtements sont le plus souvent très variable dans leur épaisseur et qu'il est donc nécessaire de connaître l'épaisseur et les caractéristique géotechnique des différentes couche qui composent le gisement.

## **II.4.Le sable gypseux est distribué dans la wilaya d'El-Oued[18].**

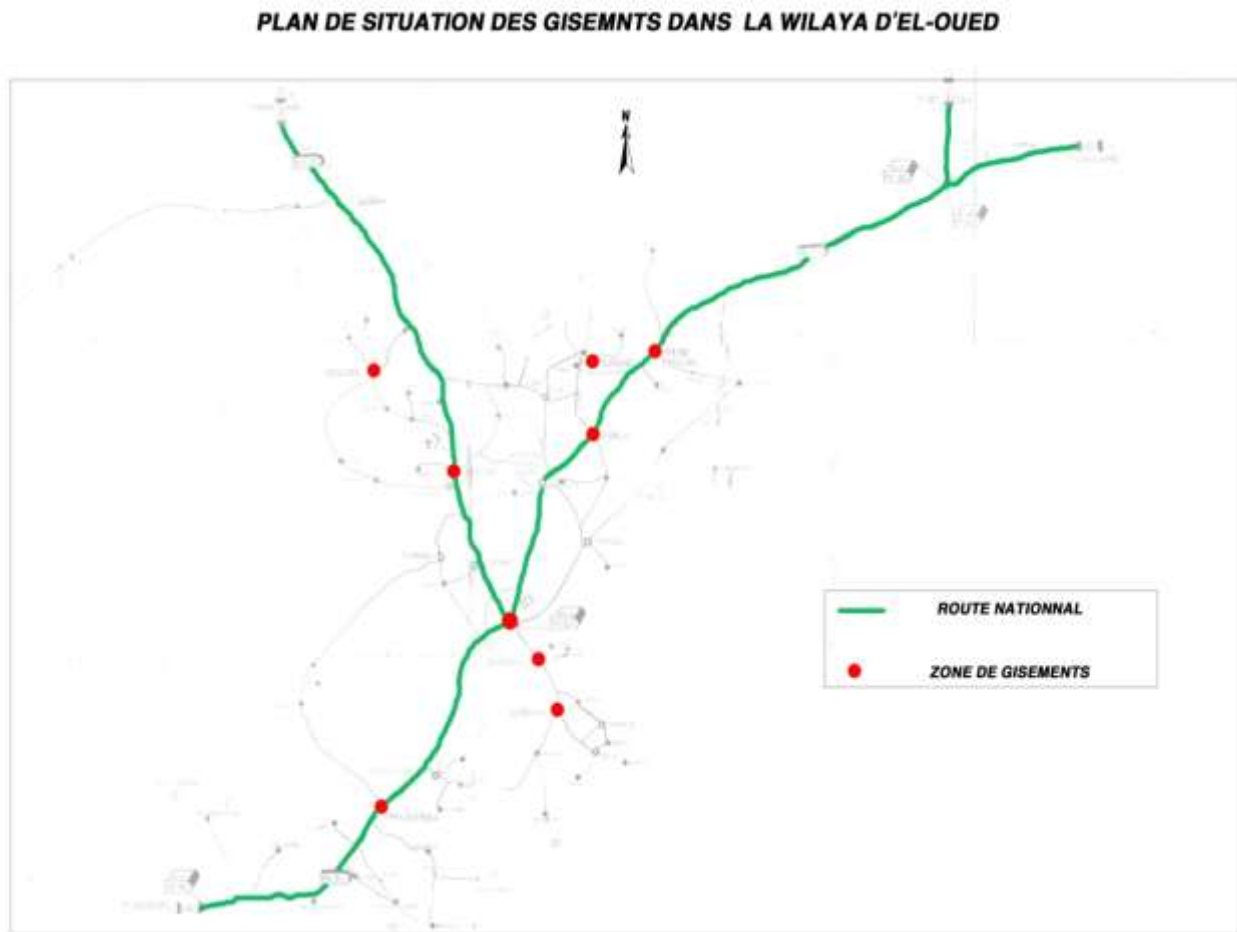
Le sable gypseux est réparti dans la wilaya d'El-Oued en 14 régions, et le sable gypseux de chaque région se distingue par ses caractéristiques géotechniques et opérationnelles des autres régions.

Le tableau présente les paramètres géotechniques et opérationnels des gisements On constate que ces paramètres (capacité, %Gyp+Calc, R.C , C.B.R ) diffèrent d'une région à l'autre.

**Tableau II. 1: Paramétrés géotechniques et d'exploitions des gisements.**

N <sup>0</sup>	Localité	Accès	Capacités (m <sup>3</sup> )	%Gyp+Calc	R . C (Bars)	C . B . R
1	HOBBA	Accessible	700.000	56 - 84	10 – 23	90 - 117
2	SAHANE BERRY	Accessible	15.000	44 - 50	10 – 12	76 - 80
3	SEHINE EST (ESSAHABI)  SEHINE EST (ZRAYAT)	Non Accessible	40.000	70	11 – 12	106 - 112
4	GHOUT SAIDI (H.KHALIFA)	Accessible	100.000	62 - 75	12 – 20	56 - 115
5	SEHINE SUD (TRIFAOUI)	Non Accessible	12.500	27 - 40	12 – 16	85 - 94
7 à 14	RN 48 EL- OUED / HAMRAIA DU PK : 34 au PK: 56	A proximité de la route	240.000	46 - 81	13 – 20	49 - 107
15	RN 16 EL- OUED / TALEB- LARBI PK : 60 (CARREFOUR)	Accessible	40.000	65 - 84	15 – 18	88 - 110
16	OUED EL	Accessible	200.000	57 - 65	12 – 20	65 - 90

	MALEH					
17	DEBDEBT MTH- LAACHECHE	Non Accessible	8.000	74 - 88	7 – 11	66 - 85
18	CHOUCHET ECHAANBA	Non Accessible	12.000	52	12	80
19	MIH-EL- GHAZALA	Non Accessible	30.000	52 - 55	7 - 8	58 - 66
20	EL-KHOBNA SAFRA	Non Accessible	30.000	61 - 75	11 – 12	73 - 82
21 à 25	DJEDAIDA	Accessible	600.000	55 - 77	12 – 25	65 - 126
26	EL-GADACHI	Non Accessible	50.000	55 - 69	7 – 16	53 - 68



**Figure II. 2: Plan de situation des gisement dans la wilaya d'el-oued en 1994 [20].**

### **II.5.Critères de sélection des matériau[18].**

Il existe de nombreuses normes réglementaires qui déterminent la validité de l'utilisation du sable de gypse comme couche de base dans les routes.

sur tous les échantillons prélevés étaient pratiques les essais suivants au laboratoire:

- Granulométrie .
- Equivalent de sable .
- Analyse chimique.
- Essais Proctor modifié .
- Essais C.B.R .
- Résistance à la compression simple .

en pratique ,on se base pour le choix des bons matériaux sur les trois essais suivants:

- Teneur en sulfates et en carbonates .
- Résistance à la compression simple .
- Indice portant C.B.R .

pratiquement ,il n'est pas encore possible de relier de façon systématique et précise un ou plusieurs de ces essais aux qualités routières cela n'a rien d'étonnant ,la qualité du gypse dépendant en premier lieu de la prise de ce matériau qui est elle même fonction:

- de la structure cristalline du gypse.
- de la présence éventuelle de cristaux qui seraient des "germes" de prise.
- des teneurs respectives non pas globalement en sulfates ,mais en gypse ,anhydrite et plâtre qu'il est à présent très difficile de mesurer par un essai de chantier.
- très probablement des sels contenus dans l'eau utilisée pour gâchage et certains sels seraient peut être des catalyseurs ou des inhibiteurs de prise.
- pour ces raisons ,il n'était pas possible de fixer arbitrairement des minima aux trois quantités mesurée .pratiquement la solution suivante fut adoptée pour le matériau de couche de base.

-Teneurs minima en sulfates et carbonates :65%.

-Résistances minima à la compression simple à sec :15 bars pour une compacité de 95% .

l'indice C.B.R n'a été utilisé que dans les cas limites ou lorsque les deux premiers essais semblaient contradictoires (résistance à la compression relativement faible et teneur en gypse très élevée ).

## II.6. Caractéristique géotechniques de certains gisements[3][18].

### II.6.1.Gisement : Robbah – elgadachi hassi ali [3][18] .

#### II.6.1.1.Caractéristiques géotechniques[18] .

**Tableau II. 2: Caractéristiques géotechniques du sable gypseux de Robbah – elgadachi hassi ali.**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		EQUIVALENT DE SABLE
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	E . S ( % )
1,79	10	92	27	39

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE			RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.		INDICE PORTANT C.B.R	
INSOLUBL (%)	SULFATES (%)	CARBON (%)	R .C (bars)	COMPACI (%)	IMME- DIAI	APRES 4 H IMMERSION
40	53	6	15	97	53	36
Matériau a utiliser : couche de base RN						

#### II.6.1.2.Avantages et inconvénient[3] .

**-Les avantages:**

- Matériel local
- Pratique

**-Les inconvénient:**

- Facilement affecté par l'eau
- Mauvaises caractéristiques mécaniques

**II.6.2.Gisement : Sehine sud (vers trifaoui ) [3][18].**

**II.6.2.1.Caractéristiques géotechniques[18] .**

**Tableau II. 3: Caractéristiques géotechniques du sable gypseux de Sehine sud (vers trifaoui ).**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		EQUIVALENT DE SABLE
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	E . S ( % )
1,79	10	94	38	16

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE			RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.		INDICE PORTANT C.B.R	
INSOLUBL (%)	SULFATES (%)	CARBON (%)	R .C (bars)	COMPACI (%)	IMME- DIAI	APRES 4 H IMMERSION
60	25	15	16	97	94	
Matériau a utiliser : couche de base RN						

**II.6.2.2.Avantages et inconvénient[3] .**

**-Les avantages :**

- Bonne résistance mécanique
- Pratique
- Matériel local

**-Les inconvénients:**

- Il contient de l'argile

### II.6.3. Gisement : Sahane berry [3][18].

#### II.6.3.1. Caractéristiques géotechniques [18] .

**Tableau II. 4: Caractéristiques géotechniques du sable gypseux de Sahane berry.**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		EQUIVALENT DE SABLE
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	E . S (%)
1,83	10	88	26	43

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE			RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.		INDICE PORTANT C.B.R	
INSOLUBL (%)	SULFATES (%)	CARBON (%)	R .C (bars)	COMPACI (%)	IMME- DIAI	APRES 4 H IMMERSION
50	43	7	12	96	76	
Matériau a utiliser : couche de base RN						

#### II.6.3.2. Avantages et inconvénient [3]

**- Les avantages:**

- Matériel local
- Pratique

**-Les inconvénients:**

- Mauvaises caractéristiques mécaniques.

**II.6.4.Gisement : Oued el melah (Magrane) [3][18] .**

**II.6.4.1-Caractéristiques géotechniques[18] .**

**Tableau II. 5: Caractéristiques géotechniques du sable gypseux de Oued el melah (Magrane).**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		EQUIVALENT DE SABLE
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	E . S ( % )
1,76	10	99	20	41

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE			RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.		INDICE PORTANT C.B.R	
INSOLUBL (%)	SULFATES (%)	CARBON (%)	R .C (bars)	COMPACI (%)	IMME- DIAI	APRES 4 H IMMERSION
43	50	7	17	97	80	
Matériau a utiliser : couche de base RN						

**II.6.4.2.Les avantages[3] .**

- Qualité mécanique assez bonne
- Matériel local
- Pratique.

### II.6.5. Gisement : Hobba[3][18].

#### II.6.5.1- Caractéristiques géotechniques [18].

Tableau II. 6: Caractéristiques géotechniques du sable gypseux de Hobba.

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		EQUIVALENT DE SABLE
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	E . S ( % )
1,72	10	88	34	44

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE			RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.		INDICE PORTANT C.B.R	
INSOLUBL (%)	SULFATES (%)	CARBON (%)	R .C (bars)	COMPACI (%)	IMME- DIAI	APRES 4 H IMMERSION
16	75	9	20	98	95	
Matériau a utiliser : couche de base RN						

#### II.6.5.2. Les avantages[3].

- Qualité mécanique assez bonne
- Matériel local
- Pratique.

**II.6.6.Gisement : RN 16 Touggourt el-oued (khobna safra ) [3][18].**

**II.6.6.1-Caractéristiques géotechniques [18] .**

**Tableau II. 7: Caractéristiques géotechniques du sable gypseux de RN 16 Touggourt el-oued (khobna safra ).**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		EQUIVALENT DE SABLE
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	E . S ( % )
1,82	10	94	24	54

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE			RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.		INDICE PORTANT C.B.R	
INSOLUBL (%)	SULFATES (%)	CARBON (%)	R .C (bars)	COMPACI (%)	IMME- DIAI	APRES 4 H IMMERSION
39	54	7	11	97	76	
Matériau a utiliser : couche de fondation CV						

**II.6.6.2. Avantages et inconvénient[3] .**

**-Les avantages:**

- Matériel local
- Pratique

**-Les inconvénients:**

- Mauvaises caractéristiques mécaniques

**II.6.7. Gisement : RN 48 el-oued –Hamraia[3][18].**

**II.6.7.1- Caractéristiques géotechniques [18] .**

**Tableau II. 8: Caractéristiques géotechniques du sable gypseux de RN 48 el-oued – Hamraia.**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		EQUIVALENT DE SABLE
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	E . S ( % )
1,78	10	96	12	62

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE			RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.		INDICE PORTANT C.B.R	
INSOLUBL (%)	SULFATES (%)	CARBON (%)	R .C (bars)	COMPACI (%)	IMME- DIAI	APRES 4 H IMMERSION
54	38	8	13	98	49	
Matériau a utiliser : couche de base CV						

**II.6.7.2. Les avantages[3].**

- Matériel local
- Pratique
- Qualité mécanique assez bonne.

### II.7.Remarques générales[18].

1- Nous attirons l'attention que les quantités de réserves de matériaux annoncées sont données à titre indicatif et les chiffres ne reflétaient pas la réalité vu que les gisements de sable gypseux prospectés sont cachés généralement par des amas de sable éolien; sont discontinus en surface, à différentes épaisseurs et vu.

2- L'indice de plasticité n'est pas significatif pour le cas des sables gypseux d'autant plus les matériaux de la région du souf sont dépourvus de matières d'argile , et donc aucune d'entre elles n'est répertoriée essais de limites d'atterberg .

3-Le sable gypseux ne peut pas être classé dans ces cas en raison du manque de conditions nécessaires ( $W_p$  , $W_l$  , $I_p$  , $C_u$  , $C_c$ ).

4- Le climat saharien est sec et les sols ont des teneurs en eau naturelle de l'ordre de 2 à 6 % , Alors limitez-vous à passer uniquement l'essai C.B.R immédiat ,sauf pour quelques échantillons afin de voir la différence.

5- Pour comparer les sables gypseux d'un même gisement ou de gisements voisins , été utilisé l'essai d'équivalent de sable quoique dépourvu de signification pour ce genre de matériau .

6- Le sable gypseux de carrière (Hobba, RN 48 el-oued –Hamraia et Oued el melah (Magrane)) est un sable pratique exempt de défauts qui peut être exploité sans traitement.

7- A l'imprégnation ,des déboires peuvent résulter de la présence de halite ,ce sel peut être contenu dans les matériaux utilisés ou provenir de l'eau de gâchage lors du compactage .lors de l'évaporation de celle-ci ,il cristallise en surface , si cette surface n'est pas balayée avant l'imprégnation au cut-back, il produit ce qu'on appelle "le mare de café " .l'imprégnation prend une couleur brune, manque de cohésion et alors se décolle .il convient donc de limiter à 0,5% ou 5 g/L maximum la teneur en chlorures des matériaux utilisés .la halite est également responsable d'une dégradation des chaussées typiques des climats arides à savoir champignons ou boursouflures salines .il s'agit de soulèvement de la coche de roulement suit à des pressions exercées vers le haut par des trichites de halite ,qui cristallisent par évaporation de solutions concentrées contenues dans les pores capillaires de la couche de base .

8- Afin d'éviter l'infiltration des eaux de ruissellements dans le corps de chassée ,il faudrait assurer un revêtement étanche et protéger aussi les accotements par un enduit.

### **II.8. Conclusions.**

l'utilisation des sable gypseux en construction routière est imposée par la nature de la région du souf .leur utilisation a donné satisfaction sur les deux plans technique et économique d'après, nous pouvons sélectionner les différents gisements selon les deux critères de qualité et de quantité.

**Chapitre III:  
Résumés des études  
précédentes**

### **III.1. Introduction.**

De ce que nous avons obtenu au deuxième Chapitre, il nous est apparu clairement que les sables gypseux sont abondants dans (la wilaya d'El-Oued) tant en quantité qu'en termes de qualité, ce qui a renforcé l'importance de les exploiter ou de les réhabiliter en les traitant pour la construction de routes (selon leur qualité).

En conséquence, nous avons résumé certaines études qui sont intéressées ou utiles dans la recherche basée sur l'amélioration des caractéristiques physiques- mécaniques des sables gypseux.

### **III.2. La première étude (Contribution à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques des sables gypseux de la région d'El-Oued. (Etude expérimentale)) [24] .**

#### **III.2.1. Introduction.**

L'abondance du sable gypseux en Algérie en général et dans la wilaya d'El-Oued en particulier a renforcé l'importance de son utilisation dans le domaine des routes et de son introduction comme alternative aux matériaux traditionnels utilisés dans les zones humides.

Les sables gypseux sont disponibles dans la région du Souf, avec différentes qualités qui déterminent la possibilité d'une utilisation directe ou non, selon un autre point de vue qui détermine la pertinence du traitement issu de l'exploitation directe.

Dans cette étude en laboratoire, la sélection s'est faite sur du sable de qualité moyenne. Il a semblé nécessaire de le traiter en améliorant ses propriétés physiques et mécaniques en incorporant de la chaux hydratée et sous l'influence de certains facteurs:

- Contenu du liant (chaux)
- Teneur en eau sous pression
- Temps de séchage
- Teneur en eau finale
- Et ce sont les facteurs que nous entendons par la wilaya d'El-Oued

#### **III.2.2. Le but de l'étude.**

D'améliorer la résistance à la compression simple et c'est à travers :

- Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité).
- Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre les particules.

#### **III.2.3. Les matériaux utilisés et les conditions de l'expérience.**

Pour répondre aux besoins de notre étude, nous avons prélevé un échantillon de sable gypseux dans les sédiments de la carrière routière Al-KHOBNA Al-SAFRA dans la région de d'oued Al-ALANDA dans la wilaya d'El-Oued.

Il a été traité en ajoutant différents pourcentages de chaux (2%, 4%, 6%, 8%) de chaux hydratée qui a été apportée de l'usine dans la wilaya de SAIDA, car la recherche a montré l'effet du rapport de liaison pour différents âges, l'effet de l'eau de compactage et le temps de séchage et Rapport final d'eau sur simple résistance à la pression du sable gypseux.

**III.2.4. Caractéristiques géotechniques de matériaux (avant traitement).**

**Tableau III. 1: Caractéristiques géotechniques du sable gypseux (avant traitement).**

ANALYSE CHIMIQUE SOMMAIRE			RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.		INDICE PORTANT C.B.R	
INSOLUBL (%)	SULFATES (%)	CARBON (%)	R .C (bars)	COMPACI (%)	IMME-DIAI	APRES 4 H IMMERSION
60	30	8	10	98	10.02	

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		EQUIVALENT DE SABLE	limites d'ATTERBERG		
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	E . S ( % )	Wl(%)	Wp(%)	Ip(%)
1,65	12	74	13	75	25.3	impossible	Non mesurable

**III.2.5. Résultats obtenus (après traitement).**

**III.2.5.1 Addition de la chaux à 2%.**

Résultats de mélange à sec (matériau + 2% de la chaux).

**Tableau III. 2: Caractéristiques géotechniques du (sable gypseux + 2% de la chaux).**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.	
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	R .C (bars)	COMPACI (%)
1,82	10	78	14	10.45	98

**III.2.5.2. Addition de la chaux à 4%.**

Résultats de mélange à sec (matériau + 4% de la chaux).

**Tableau III. 3: Caractéristiques géotechniques du (sable gypseux + 4% de la chaux).**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.	
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	R .C (bars)	COMPACI (%)
1,84	10	78	15	11.62	98

### III.2.5.3.Addition de la chaux à 6%.

Résultats de mélange à sec (matériau + 6% de la chaux).

**Tableau III. 4: Caractéristiques géotechniques du (sable gypseux + 6% de la chaux).**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.	
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	R .C (bars)	COMPACI (%)
1,85	10	80	15	16.31	98

### III.2.5.4.Addition de la chaux à 8%.

Résultats de mélange à sec (matériau + 8% de la chaux).

**Tableau III. 5: Caractéristiques géotechniques du (sable gypseux + 8% de la chaux).**

PROCTOR MODIFIE		GRANULOMETRIE		RESISTANCE A LA COMPRESSION.SIMP.	
DSM T/M3	W . OPM (%)	< 2 mm	< 0.08 mm	R .C (bars)	COMPACI (%)
1,86	10	81	17	17.43	98

### III.2.6.Influence du traitement sur la résistance à la compression simple.

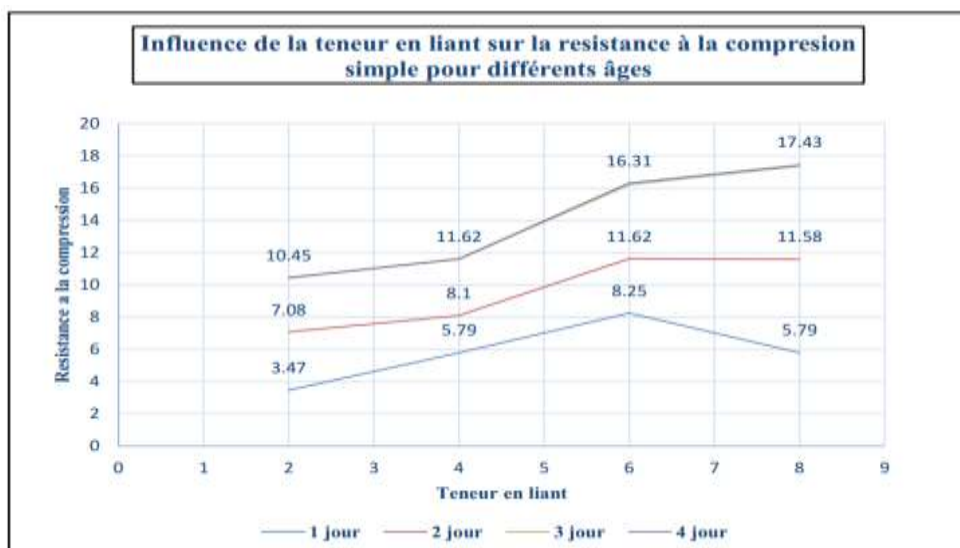
#### III.2.6.1 Influence de la teneur en liant sur la RC pour différents âges.

3 échantillons de test ont été réalisés pour chaque contenu de liant unique (2%, 4%, 6%, 8%), et ces échantillons ont été stockés à l'air libre pendant 1, 2, 3, 4 jours avec une teneur en eau OPM et une pression de 98%.

Les valeurs moyennes (à partir de 3 échantillons) reçoivent les résultats de compression comme suit:

**Tableau III. 6: Récapitulatif Influence de la teneur en liant sur la résistance à la compression simple pour différents âges.**

âges (jours) Teneur en liant (%)	âges (jours)			
	1	2	3	4
2	3.47	7.08	10.42	10,45
4	5.79	8.10	11.58	11.62
6	8.25	11.62	16.21	16.31
8	5.79	11.58	17.37	17.43



**Figure III. 1: Courbes Influence de la teneur en liant sur la résistance à la compression simple pour différents âges.**

À partir du graphique, on note que la résistance à la compression simple augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux hydratée, la résistance à la compression simple totale a été obtenue au troisième jour, et la résistance à la compression se stabilise ensuite pour tous les rapports de chaux, et une diminution de la résistance a été observée les premier et deuxième jours pour une teneur en liant de 8% Cela est dû à la sensibilité à l'eau (la quantité d'eau de préparation).

**III.2.6.2. Influence de l'eau de compactage sur la résistance à la compression simple.**

L'effet de l'eau sous pression sur la simple résistance à la pression de chaque dose de chaux hydratée a été examiné. Chaque dose a été préparée en trois échantillons avec une augmentation de la teneur en eau (6,8, 10, 12 et 14%) et du poids spécifique sec apparent correspondant à la courbe de Proctor avec résistance à la compression 98%.

Les échantillons à tester sont broyés après séchage en étuve à 60 ° C. Les résultats sont donnés dans la courbe comme suit:

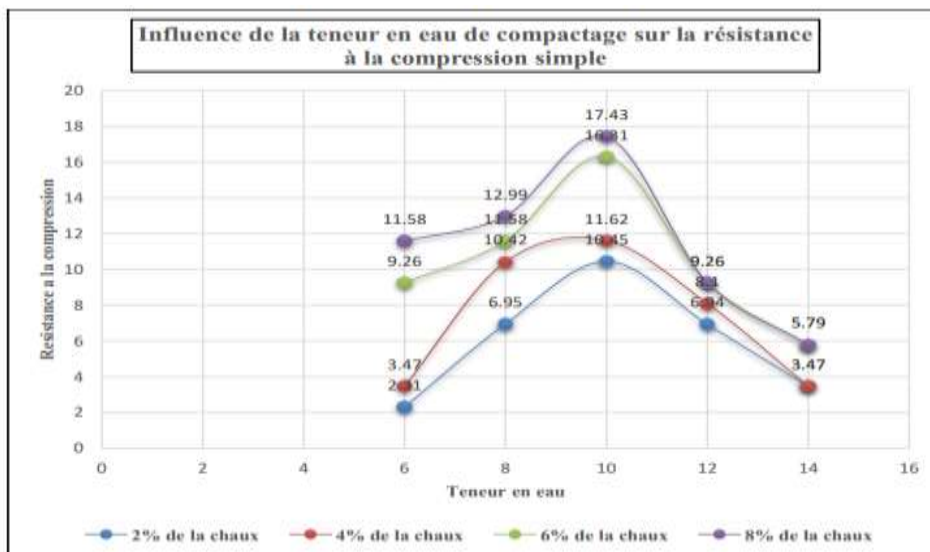


Figure III. 2: Courbes Influence de l'eau de compactage sur la résistance à la compression simple.

Les échantillons à tester ont été écrasés après avoir obtenu une teneur finale en eau de zéro, des courbes comme une courbe Proctor ont été obtenues pour que chaque courbe nous montre la présence d'un taux de liaison spécifique, d'une teneur en eau idéale et d'un RC optimal .

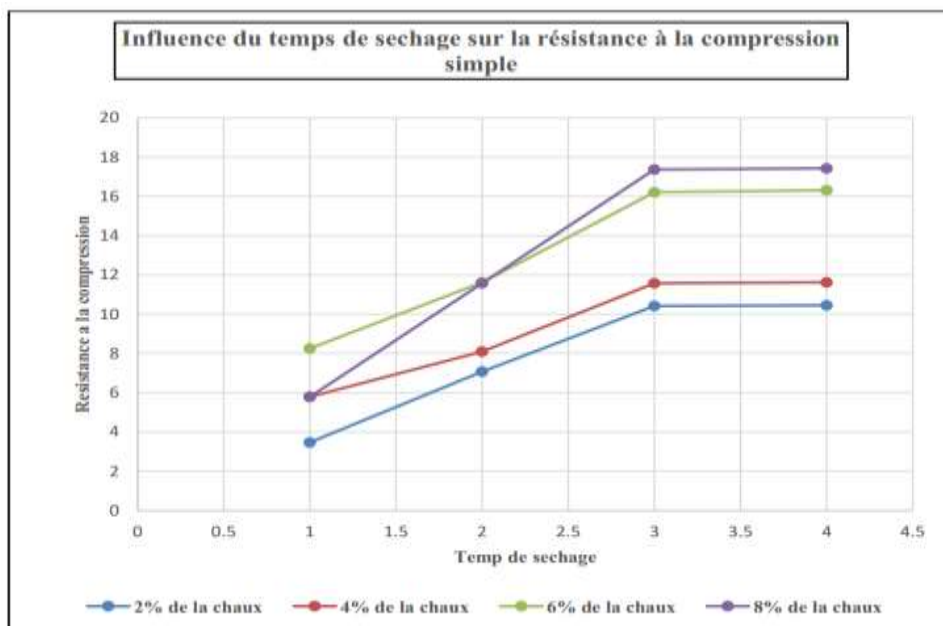
**III.2.6.3. Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC) pour différents teneurs en liant.**

L'effet du temps de séchage sur la résistance à la compression simple de chaque dose de chaux a été examiné séparément.

Les résultats sont donnés comme suit:

Tableau III. 7: Récapitulatif Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC).

Teneur en liant (%) \ Temps de Séchage (jour)	2	4	6	8
1	3.47	5.79	8.25	5.79
2	7.08	8.10	11.62	11.58
3	10.42	11.58	16.21	17.37
4	10.45	11.62	16.31	17.43



**Figure III. 3: Courbes Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression(RC).**

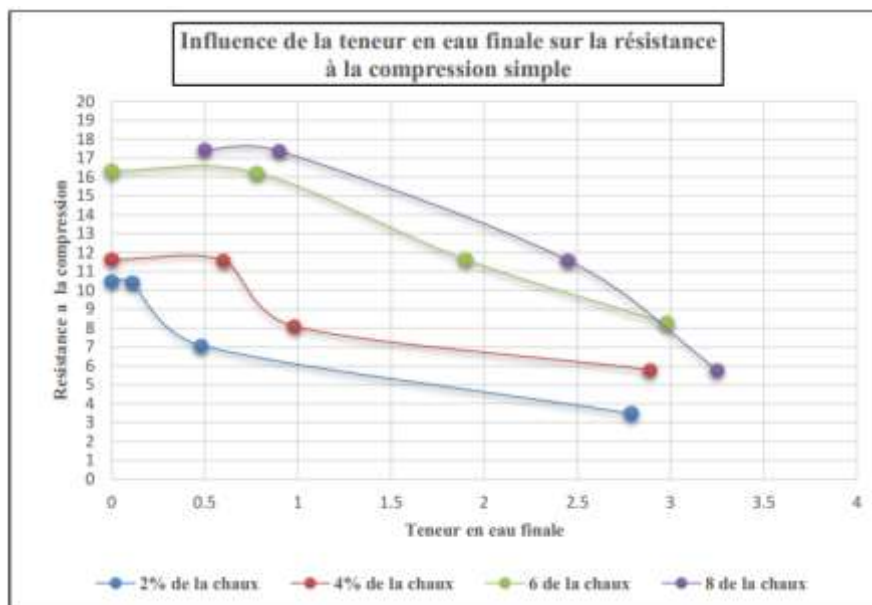
On remarque à travers la courbe que plus le temps de séchage est long, plus la résistance à la simple pression des différentes doses de liant est grande, et on comprend également de la courbe que le matériau traité à forte teneur en liant est plus sensible au changement de temps de séchage.

**III.2.6.4. Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).**

De la même manière(paragraphe III.2.6.1), cet effet a été étudié, et les résultats sont donnés comme suit:

**Tableau III. 8:Récapitulatif Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC) pour différents teneurs en liant.**

Teneur en chaux (%)	2	4	6	8
Teneur en eau finale (%)	0,48	0,5	0,5	0,5
RC (bars)	7,08	11,80	16,60	17,43



**Figure III. 4: Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).**

On observe une légère diminution de la résistance à la pression entre l'intervalle de 0,5 et on comprend que l'ajout de chaux n'améliore pas la résistance à l'eau des matériaux.

### III.2.7. Remarques.

Il fait partie de l'évaluation des matériaux locaux (sable gypseux) de la carrière AL-KHOBNA AL-SAFRA de la municipalité d'Oued El-ALLEENDA dans la wilaya d'El- Oued.

De là, nous tirons les conclusions suivantes:

- Le traitement à la chaux éteinte a amélioré la simple résistance à la pression à 16 bars, lors de l'ajout de 6% du liant.

- On obtient la résistance à la compression maximale du sable traité avec une teneur finale en eau nulle (= 0).

- L'ajout du liant n'améliore pas la sensibilité de l'eau au sable gypseux (en cas de séchage complet).

- L'hydratation fait diminuer la moindre résistance à la pression.

## III.3. La deuxième étude (Amélioration d'un sol de plate-forme de sable gypseux par un compactage accru) [21].

### III.3.1. Introduction.

Comme pour toute fondation, le sous-plancher de la voie express à chaussée doit être capable de supporter la charge imposée sans rupture de cisaillement ni déformation importante, d'autant plus qu'il est dynamique et répétitif.

Surtout lorsque le sol routier est constitué de gypse, on s'attend à ce qu'il y ait une diminution de la résistance et de graves déformations car il s'est largement répandu en Iraq, et des expériences ont montré que c'est un sol problématique qui nécessite une attention et une amélioration particulières. Cependant, le comportement du sol gypseux peut être modifié en augmentant la pression et Sous l'influence de trempage pendant des périodes spécifiques.

### III.3.2.Le but de l'étude.

Amélioration des propriétés du sable gypseux pour la région d'Al Dur en Irak en appliquant différents efforts de pression, et en étudiant son comportement sous l'influence du trempage pendant certaines périodes (amélioration du facteur de perméabilité).

### III.3.3.Matériaux utilisés et conditions de traitement.

- Sables argileux du groupe SM selon le système de classification uniforme des sols, et du groupe A.1 .b selon le système de sol de l'American Association of Transportation and Highway Official (AASHTO).

Ce sont des sables argileux contenant 28% de gypse qui ont été soumis à quatre efforts différents, où 24 paires ont été testées. Ils ont été divisés en quatre groupes d'énergies de pression correspondantes: 480, 1437, 2395 et 3353 (KN.m / m<sup>3</sup>) en utilisant: 10, 30 , 50, 70 (course / couche), dans lequel les paires individuelles ont ensuite été trempées, pendant une période de: 4, 7, 15, 13, 60 et 120 jours pendant que les échantillons ont subi une charge supplémentaire de 40 livres (178 N), à une température comprise entre 358 et 408 degrés Celsius.

### III.3.4.Propriétés du sol (avant traitement).

Selon (ASTM12): Le sol est non plastique, avec une densité  $G_s = 2,46$  (méthode standard britannique en bouteille).

Le schéma de gradient pour le sol de gypse sableux de la région d'Al-Dur est présenté comme suit:

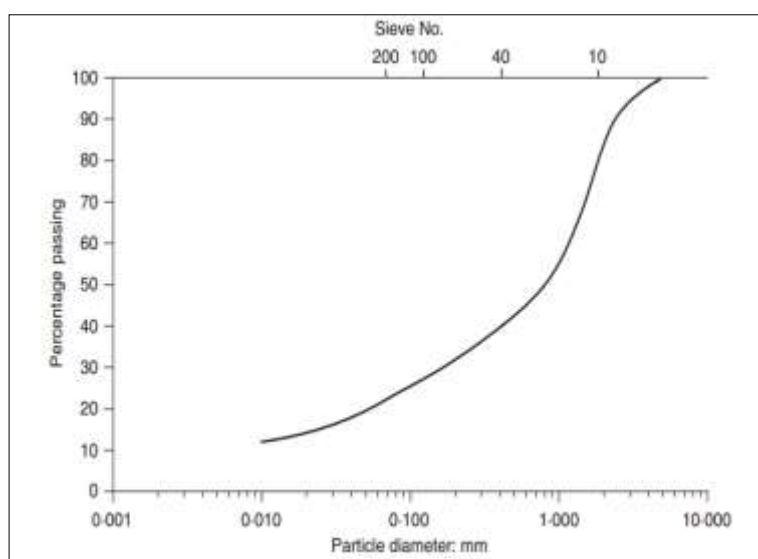


Figure III. 5: Distribution granulométrique du sol gypsifère d'Al-Dore.

- Selon BS 1377.14: La teneur totale en chlorure est estimée à 0,34%.
- Selon 11: n BS 1377: pH (PH = 8, 2) c'est-à-dire que le sol est alcalin.
- Teneur en sel soluble TSS = 29%
- la teneur en sulfate du sol testé 12, 9%
- La teneur en sulfate de gypse calculée est estimée à 27,7%.
- Poids sec 18,7 (KN / m3) à une teneur en humidité idéale de 14% selon Modijide AASHTO Compactage.
- Poids sec 16,8 KN / m3 à une teneur en humidité optimale de 14% selon AASHTO Compactage.

### III.3.5.Résultats obtenus (après traitement).

Influence de la période de trempage de diverses tensions sous pression sur les valeurs CBR:

Le traitement a été effectué avec de l'eau du robinet, où l'eau du bac de trempage a été mise en circulation en continu à un débit de 56( litres / jour) pour éviter la saturation en gypse. Les résultats des tests CBR sont présentés à (la figure III.6):

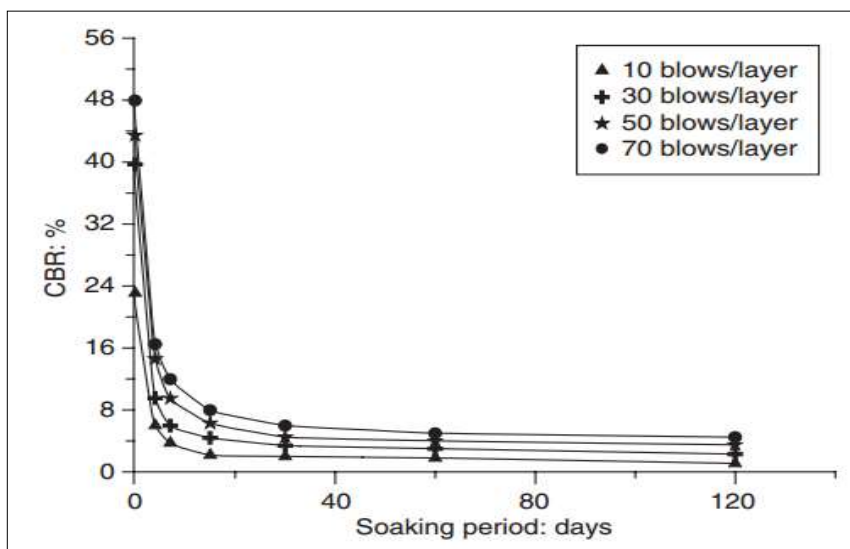
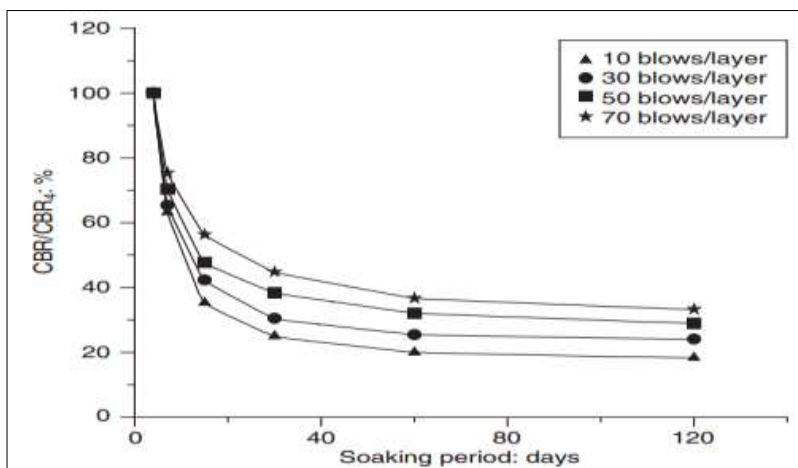


Figure III. 6: Variation du CBR avec période de trempage pour différents efforts de compactage.

De cela, nous concluons que la période de trempage a un effet significatif sur le CBR.

### III.3.6.L'effet de la période de trempage sur les rapports de CBR trempé à non trempé.

Les conditions de traitement sont expliquées dans le (matériaux utilisés et conditions de traitement) et les résultats se présentent comme suit:

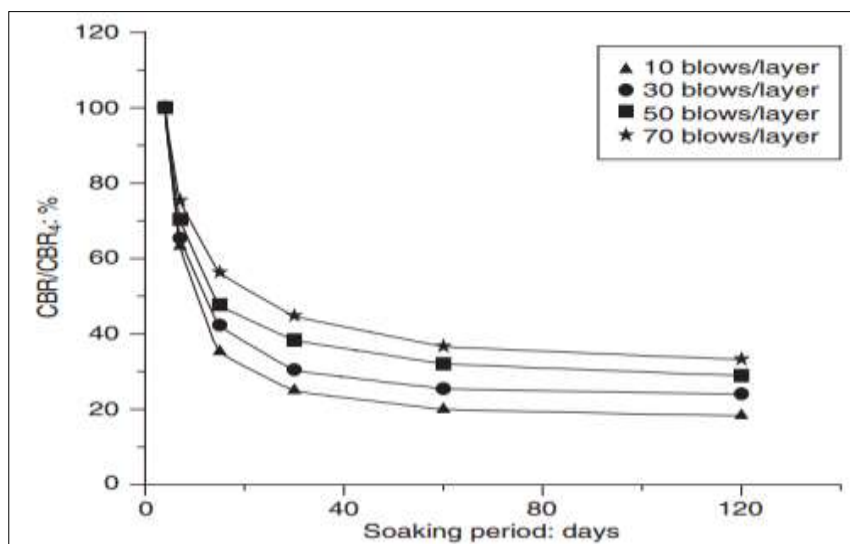


**Figure III. 7: Effet de la période de trempage sur le rapport entre trempé et non trempé CBR.**

A partir des courbes, on note qu'une augmentation de la période de trempage conduit à une diminution significative de la valeur du CBR trempé au niveau de non trempage pour chaque niveau de contrainte de pression.

Les échantillons conduits sous des tensions basse pression ont été plus affectés que ceux conduits sous des tensions élevées (effet du facteur de perméabilité).

### III.3.7. Effet de la période de trempage sur le rapport de résistance CBR / CBR<sub>4</sub>.

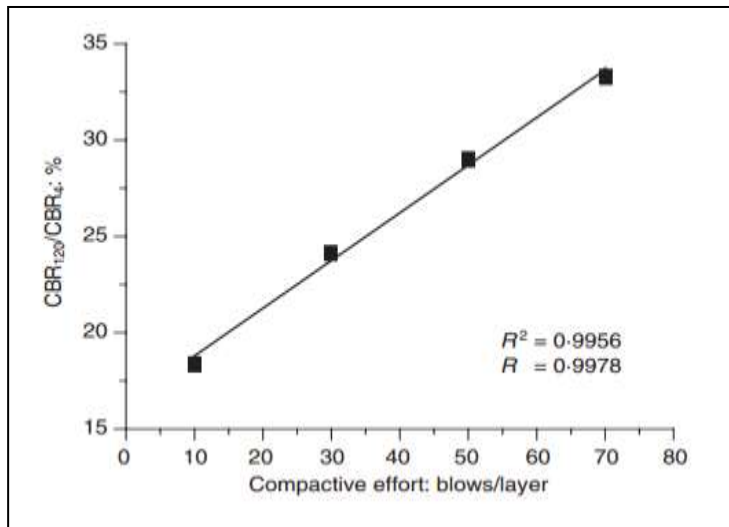


**Figure III. 8: Effet de la période de trempage sur le rapport CBR / CBR<sub>4</sub> pour différents efforts de compactage.**

Les résultats obtenus renforcent la nécessité d'un long trempage de la matière lors du test et de l'évaluation du sol gypseux, en particulier à basse tension.

### III.3.8. Effet de la tension de compression sur le rapport CBR<sub>120</sub> / CBR<sub>4</sub>.

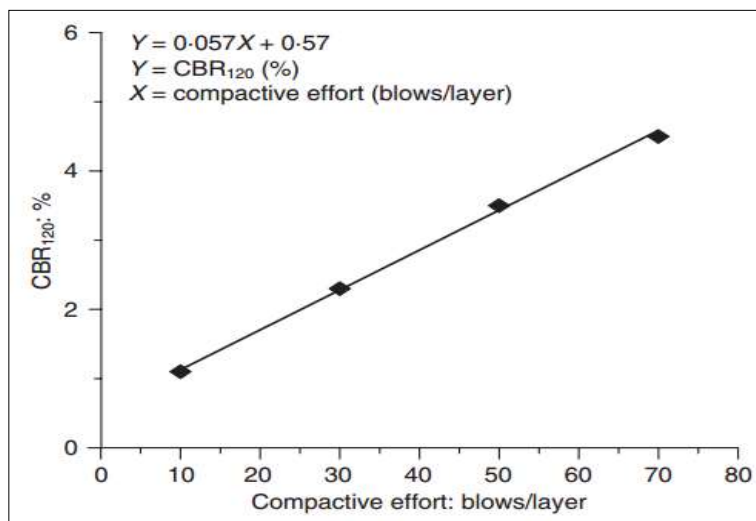
CBR<sub>4</sub> et CBR<sub>120</sub> font référence au ratio de tolérance de la Californie après un trempage de 4 jours et 120 jours, respectivement, les résultats sont donnés comme suit:



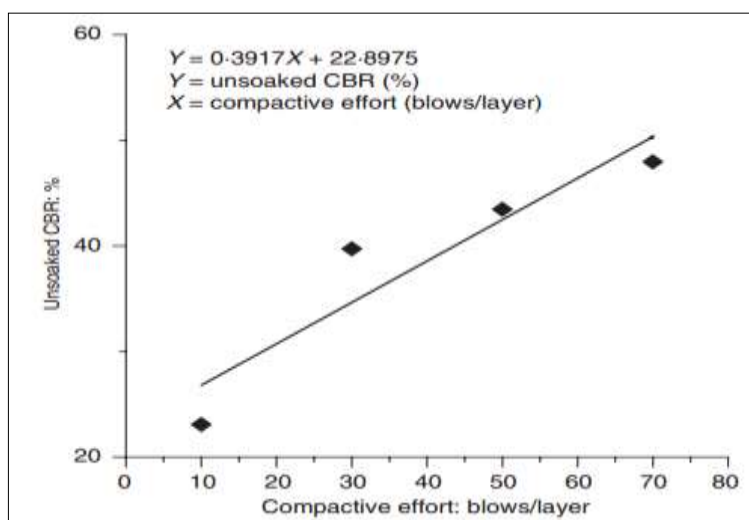
**Figure III. 9: Effet de l'effort de compactage sur le rapport CBR<sub>120</sub> / CBR<sub>4</sub>.**

Notez que le rapport augmente linéairement avec l'augmentation de la tension de pression.

### III.3.9.L'effet de la tension de compression sur les valeurs CBR<sub>120</sub> et CBR non cuites respectivement.



**Figure III. 10: Effet de l'effort de compactage sur CBR<sub>120</sub>.**



**Figure III. 11: Effet de l'effort de compactage sur le CBR non trempé.**

L'augmentation du CBR avec la tension de pression était dans une relation linéaire. Pour les échantillons de CBR non immergés, l'augmentation était initialement non linéaire, puis est devenue linéaire avec l'augmentation de la tension de pression.

#### III.3.10. Remarques.

- La contrainte de pression a un effet significatif sur les valeurs CBR du sol humide et non trempé testé où à la contrainte de pression 70 (course / couche) nous avons obtenu une valeur CBR 4,1 fois supérieure à celle obtenue à la tension 10 (course / couche) au bout de 120 jours.

### III.4. La troisième étude (Amélioration du module élastique d'un sable gypseux sol de la plate-forme par un compactage accru) [22].

#### III.4.1. Introduction.

Le module élastique du sol gypseux inférieur pour les changements de pavage dus à l'impact des changements saisonniers tels que la teneur en eau sous le sol, la température et d'autres facteurs environnementaux, Habituellement, une augmentation de la teneur en eau du substrat entraîne une diminution du module d'élasticité, réduisant ainsi la durée de vie de la conception de la chaussée. Par conséquent, une étude approfondie doit être menée pour déterminer la possibilité de son utilisation et améliorer son comportement.

#### III.4.2. Le but de l'étude.

Le but de cette étude est de démontrer l'effet de l'augmentation de la tension de pression en laboratoire, sur l'amélioration du module d'élasticité du sable routier riche en gypse en utilisant la technique de propagation des ondes.

#### III.4.3. Matériaux utilisés et conditions de traitement.

C'est le sable gypseux du sol routier d'une zone proche de Bagdad, en Irak avec les mêmes caractéristiques de sol dans les études précédentes (étude Razzouki et Ibrahim (2007)) avec les mêmes caractéristiques et classification, et nous trouvons également une grande

similitude dans la méthode de traitement puisque 28 paires ont été traitées et divisées en quatre groupes qui ont été soumis à Efforts de 10, 30, 50, 70 (course / couche), où chacune des sept paires de chaque groupe a été trempée pendant une certaine période de temps qui sont 0 (non immergé), 4, 7, 15, 30, 60 et 120 jours sous l'influence de 40 Lbs (78 N) (charge supplémentaire due à l'impact de l'eau).

Un test d'élasticité non destructif (MR) a été réalisé à l'aide d'une nouvelle visionneuse sonique Avant d'effectuer le test CBR, les temps de diffusion des ondes de pression et de cisaillement ont été mesurés pour permettre le calcul du module d'élasticité avant et après chaque période de trempage.

#### III.4.4. Caractéristiques du sol (avant traitement).

Les mêmes propriétés du sol traité dans l'étude précédente (étude Zarrouki et Ibrahim (2007)) avec une très légère différence (augmentation de 0, 1 m<sup>3</sup> / kn) du poids sec à une teneur en humidité idéale de 14% pour le test de pression AASHTO modifié (= 18,8 m<sup>3</sup> / kn).

#### III.4.5. Préparation des échantillons de sol pour les tests de module d'élasticité.

Les 4 échantillons CBR (non trempés) ont été préparés pour différentes pressions, et de même les échantillons restants ont été préparés pour différentes périodes de trempage 6 puis pressés à une teneur en humidité optimale de 14% avec différents niveaux de pression.

#### III.4.6. Résultats obtenus (après traitement).

La vitesse des ondes de pression et de cisaillement varie avec l'augmentation de la période de trempage pour chaque tension de pression.

Les résultats des deux tests sont présentés comme suit:

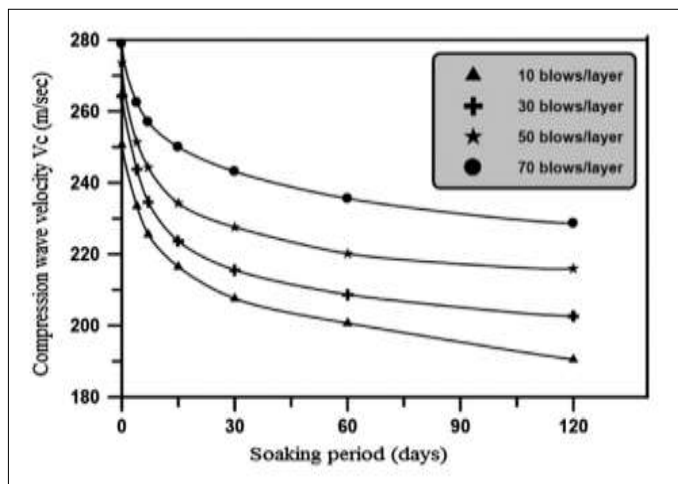
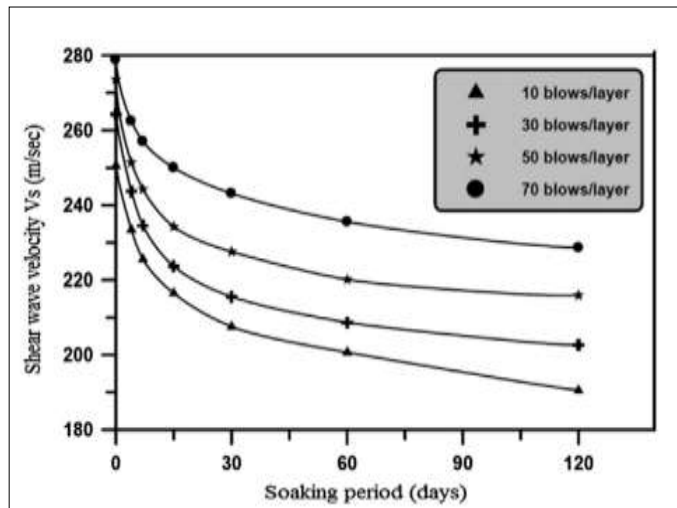


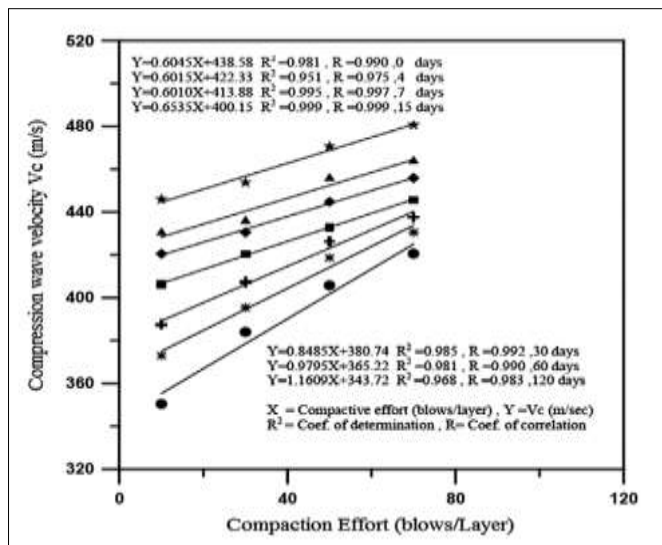
Figure III. 12: L'effet de la période de trempage sur la vitesse de l'onde de compression pour différentes tensions de compression.



**Figure III. 13: Effet de la période d'imprégnation sur la vitesse de l'onde de cisaillement pour différents efforts de compactage.**

La vitesse des ondes de pression et de cisaillement diminue avec l'augmentation de la période d'immersion pour chaque tension de pression, en particulier dans des conditions de contrainte de pression plus faible.

-L'effet de la contrainte de compression sur les vitesses des ondes de pression et de cisaillement, respectivement:



**Figure III. 14: Relation entre la vitesse de l'onde de compression et l'effort de compactage pour différentes périodes de trempage.**

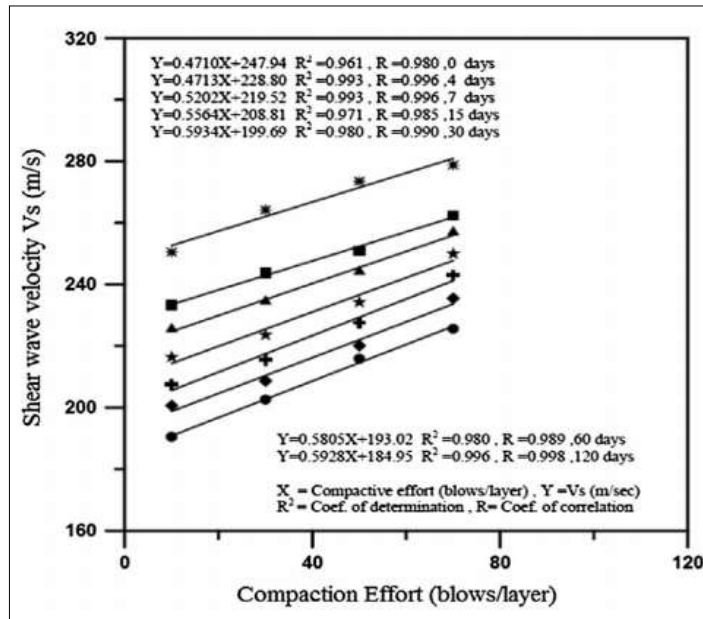


Figure III. 15: Relation entre la vitesse de l'onde de cisaillement et l'effort de compactage pour différentes périodes de trempage.

Ces résultats renforcent le fait qu'une contrainte de compression accrue augmente la résistance du sol.

Tableau III. 9: effet de l'effort de compactage sur la masse volumique, les vitesses des ondes de compression et de cisaillement et le module élastique du sable gypseux testé avant et après 120 jours de trempage.

Nb de coups par couche	Avant trempage				Après trempage			
	masse volumique	V <sub>c</sub>	V <sub>s</sub>	M <sub>R</sub>	masse volumique	V <sub>c</sub>	V <sub>s</sub>	M <sub>R</sub>
	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	m/s	m/s	MPa	ρ (kg/m <sup>3</sup> )	m/s	m/s	MPa
10	1928	375.94	196.47	195.30	2010	350.41	190.52	188.25
30	2110	389.80	220.73	259.88	2156	383.97	202.62	231.38
50	2124	415.10	225.85	279.4	2162	405.71	215.91	262.53
70	2128	441.82	276.77	383.74	2169	440.46	225.61	291.93

Le tableau précédent montre l'amélioration du module d'élasticité en augmentant la contrainte de pression pour les échantillons trempés et non trempés.

### III.4.7. Corrélation entre module d'élasticité et CBR.

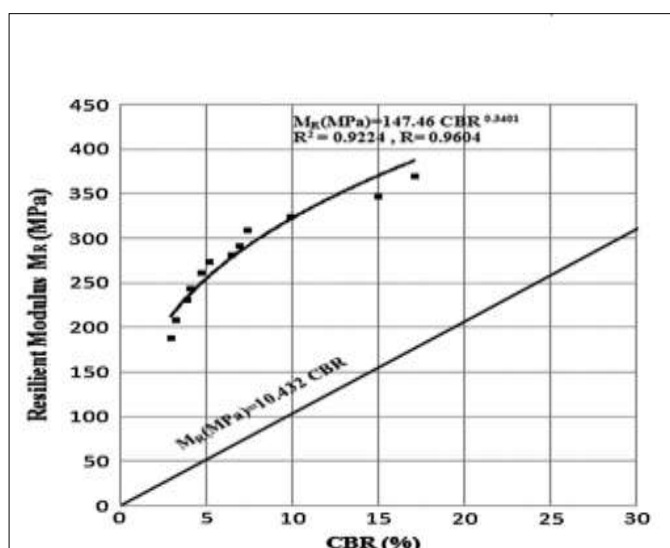
Le tableau 3 montre les valeurs CBR des échantillons de sable gypseux trempé et non trempé, à relier aux résultats de module d'élasticité mesurés correspondants par l'équation de régression non linéaire développée:

$$-MR \text{ (MPa)} = 147,46 \text{ CBR}^{0,34}.$$

- Les résultats RM et CBR sont présentés à la figure:

**Tableau III. 10: Comparaison des résultats mesurés du module résilient avec ceux calculés à partir de la formule Garber et Hoel (2015) pour des conditions non trempées.**

Effort de compactage (coups / couche)	CBR %				
	0 journée Trempage	4 journée Trempage	30 journée Trempage	60 journée Trempage	120 journée Trempage
10	23.4	6.4	3.5	3.2	2.9
30	39.7	9.8	4.2	4.0	3.8
50	43.8	14.9	5.3	5.1	4.7
70	48.2	17.1	7.6	7.3	6.9



**Figure III. 16: Corrélation entre les valeurs mesurées du module élastique et les valeurs CBR correspondantes pour le sable gypseux trempé.**

#### III.4.8. Remarques .

- Les résultats ont montré que le MR augmente avec l'augmentation de l'effort de pression et diminue avec l'augmentation de la période de trempage

- La réduction des valeurs RM est apparue après 120 jours de trempage 38, 7%; 36, 84%; 33, 53% et 29, 15% pour 10, 30, 50 et 70 (course / couche) respectivement.

Il est recommandé d'adopter l'équation de régression non linéaire développée pour corréler les valeurs MR et CBR pour le sable de route riche en gypse trempé.

### **III.5. La quatrième étude(Effet de la fréquence de trempage-séchage sur le sable de chaussée riche en gypse) [23].**

#### **III.5.1. Introduction.**

L'exposition du sol aux cycles de trempage et de séchage est une simulation de la réalité de l'effet des conditions climatiques sur le comportement de la couche de sol gypseux de la route, donc une quantité de sable gypseux a été prélevée dans une zone proche de Bagdad - l'Irak - et elle a été examinée dans le laboratoire de l'Université de technologie de Bagdad.

Lorsque l'effet du trempage et du séchage périodiques répétés a été étudié en adoptant un test CBR dans les 3 longueurs des cycles 8, 14 et 60 jours (les périodes ont été jugées appropriées pour différentes conditions climatiques).

#### **III.5.2. Le but de l'étude .**

C'est l'étude de l'effet de la fréquence des cycles de trempage et de séchage sur le sol du fond des méthodes de gypse en adoptant le California Tolerance Ratio (CBR) ainsi que son effet sur la variation temporelle de la teneur en humidité dans les parties supérieure, moyenne et inférieure des échantillons CBR.

#### **III.5.3. Matériaux utilisés et conditions de traitement.**

L'étude a appliqué une quantité de sable gypseux dans une zone proche de Bagdad, en Irak, avec une teneur en gypse d'environ 39%, où 13 paires d'échantillons de sol CBR ont été préparées pour chaque répétition à l'étude (8, 14, 60 jours) avec une teneur en humidité optimale de 10, 8% et à la densité sèche maximale. Pour une pression AASHTO modifiée de 95%, les échantillons ont été soumis aux mêmes heures supplémentaires de 45 psi (200 N) pendant le trempage et le séchage.

- Pour chaque itération à l'étude, une paire a été sélectionnée dans des conditions non humides et les autres paires ont été trempées dans des cuves de trempage de 90 litres d'eau du robinet.

Les détails de la procédure pour chaque itération (durée du cours) sont donnés comme suit:

#### **-Première répétition (8 jours).**

Ici, le cycle de trempage / séchage consiste à immerger les échantillons pendant 4 jours, puis à les placer sur la table pour qu'ils sèchent pendant 4 jours à température ambiante.

13 paires d'échantillons CBR ont été préparées; la première paire a été testée (non trempée), la deuxième paire testée après 4 jours et la troisième après 8 jours de trempage (4 jours de trempage + 4 jours de séchage), un cycle a été complété après le test de la troisième paire et continué. Ce processus est effectué jusqu'à ce que le sixième cycle soit terminé au bout de 48 jours.

#### **-Deuxième fréquence (14 jours).**

Pour chaque itération, 13 paires d'échantillons CBR sont préparées et effectuent les mêmes étapes, sauf que chaque cycle consiste en une semaine de trempage + une semaine de séchage.

-Les échantillons ont été testés dans les 3 semaines à une température ambiante moyenne de  $33,7^{\circ}\text{C}$  avec un écart type de  $2,05^{\circ}\text{C}$ .

**-La troisième récursive (60 jours).**

Les mêmes étapes du cycle de 8 jours diffèrent par la durée du cycle (un mois de trempage + un mois de séchage) et le dernier test a été réalisé 360 jours après le début du premier cycle.

**III.5.4. Propriétés du sol (avant traitement).**

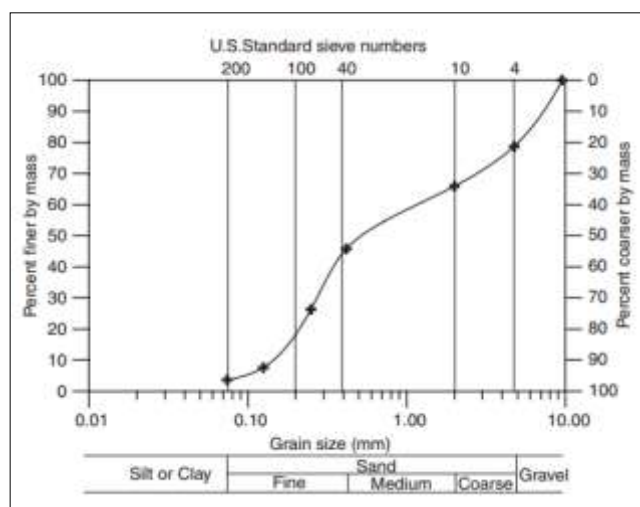
Selon AASHTO (1986) Sol Classification System, le sol de sable gypseux étudié appartient au groupe de sols A - 1 - b, ses propriétés sont:

-Teneur en sel soluble = 42,6%.

-Teneur en gypse 38,8%

-Sol non plastique

-Poids spécifique de  $2,47 = G_s$ , avec le gradient granulaire suivant:



**Figure III. 17: Distribution granulométrique du sable gypseux testé.**

Poids sec  $18,27\text{ (KN / m}^3\text{)}$  à une teneur en humidité optimale de  $10,8\%$  (test de pression AASHTO modifié).

**III.5.5. Résultats obtenus (après traitement).**

La valeur CBR moyenne des deux échantillons de chaque paire a été adoptée dans ce travail.

-l'effet d'un trempage répété et d'un séchage périodique sur la durabilité du sol:

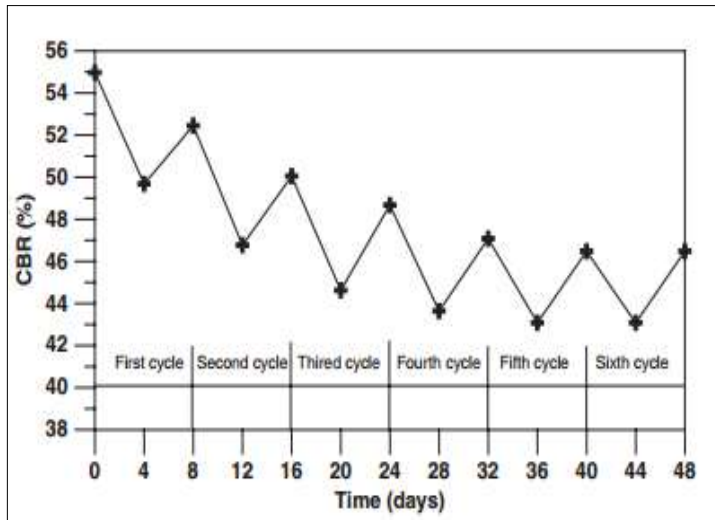


Figure III. 18: Variation temporelle du CBR pendant le trempage cyclique et séchage pendant une durée de cycle de 8 jours.

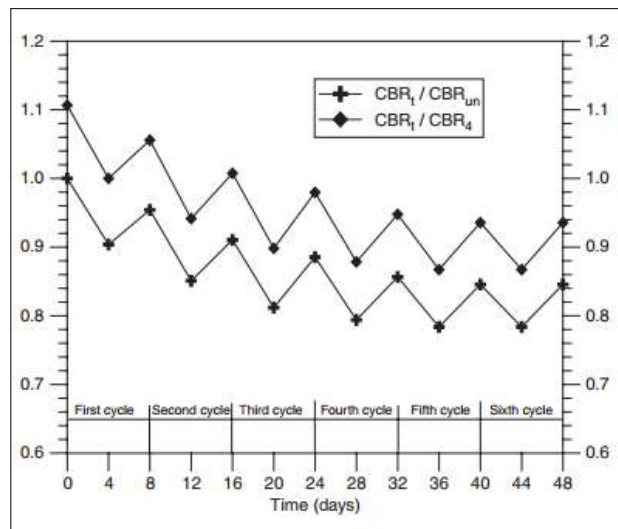


Figure III. 19: Effet du trempage et du séchage cycliques sur la résistance ratios  $CBR_t / CBR_{un}$  et  $CBR_t / CBR_4$  pour une durée de cycle de 8 jours.

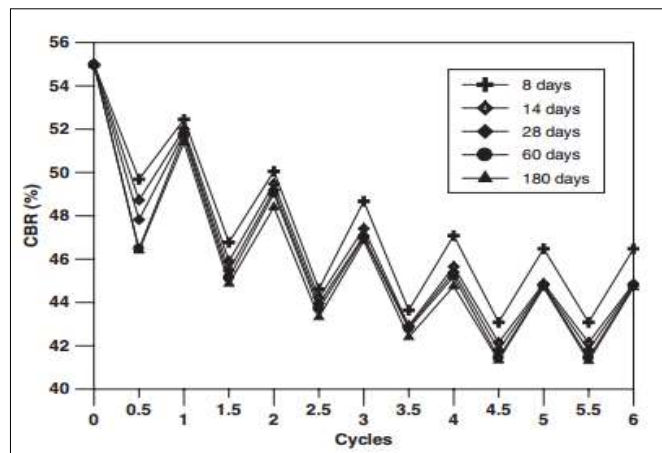


Figure III. 20: Variation temporelle du CBR en fonction du nombre de cycles pour toutes les fréquences étudiées.

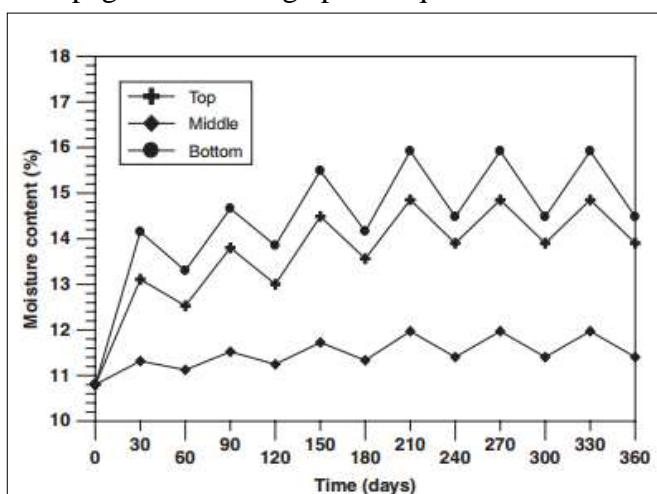
À travers les figures III (18, 19 et 20), il est clair que le comportement du CBR au fil du temps suit la même tendance observée pour toutes les fréquences étudiées (diminuant lors du trempage et augmentant lors du séchage), et il atteint un état stable après le cinquième cycle quelle que soit la fréquence, comme le montre (Figure III.20) qu'une diminution de la fréquence (augmentation de la durée du cycle) conduit à une diminution significative de la valeur CBR du sol par rapport à des fréquences plus élevées.

**Tableau III. 11: Diminution de la résistance du sol due aux cycles de trempage-séchage.**

Durée du cycle (journées)	Trempé CBR <sub>equ</sub> / CBR <sub>u</sub> (%)	Trempé CBR <sub>equ</sub> / CBR <sub>4</sub>
8	78.4	86.7
14	76.4	84.8
60	75.4	83.4

On comprend à partir du tableau qu'une augmentation de la durée du cycle (une diminution de la fréquence de trempage et de séchage périodique) entraîne une diminution de la résistance du sol.

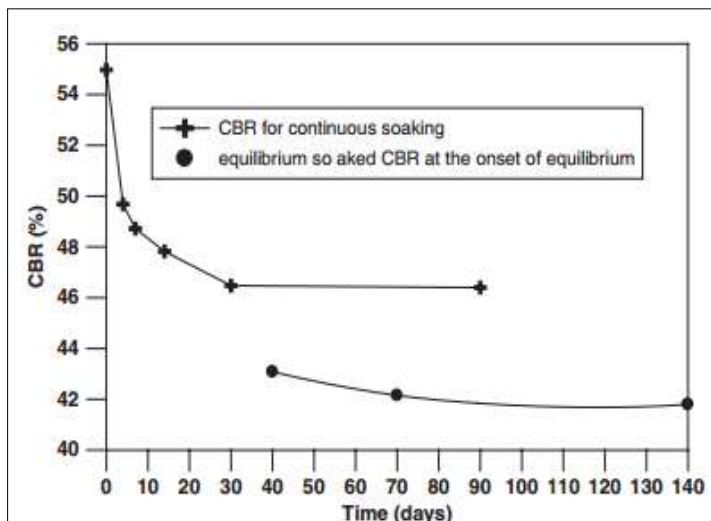
-L'effet du trempage et du séchage périodique sur l'humidité:



**Figure III. 21: Effet du trempage et du séchage cycliques sur la teneur en humidité en haut, au milieu et au bas des échantillons de sol pendant une durée de cycle de 60 jours.**

Il est montré à travers les oscillations des courbes (Fig III.21) que la teneur en humidité au bas des échantillons est supérieure à celle du haut (pour toutes les étapes de trempage et de séchage), tandis que la teneur en humidité au milieu de l'échantillon affiche le CBR avec moins de fluctuation pour toutes les longueurs de cycle (8, 14, 60 jours). La teneur en humidité augmente progressivement avec l'augmentation du nombre de cycles jusqu'à ce qu'elle se stabilise à la fin du cinquième cycle au cours duquel le CBR se rapproche de l'équilibre.

-Comparaison entre trempage périodique et trempage et séchage continu:



**Figure III. 22: Comparaison entre le CBR trempé pour le trempage continu et le CBR trempé à l'équilibre pour le trempage et le séchage cycliques.**

A travers les résultats présentés dans (Fig.III.22), on peut comprendre que le CBR trempé en équilibre à son départ (pour chaque répétition) est inférieur au CBR correspondant à un trempage continu, et on pense que le trempage et le séchage périodiques provoquent une fatigue, ce qui conduit à un affaiblissement du sol à l'état de trempage continu (état de repos) De plus, la différence entre le CBR correspondant au trempage continu ( $CBR_{cont}$ ) et le CBR était légèrement égal à l'augmentation de la durée du cycle.

### III.5.6. Remarques .

En plus de ce que nous avons conclu dans la section sur les résultats obtenus après traitement (à partir de cette étude), nous pouvons résumer les points les plus importants comme suit:

- Pour chaque cycle, la valeur CBR diminue pendant le trempage et augmente pendant le séchage.

- Il est recommandé lors de la conception de la chaussée de prendre en compte les cycles de trempage et de séchage soit par trempage et séchage périodiques (test CBR) soit en corrigeant la valeur CBR du trempage continu.

## III.6. Cinquième étude (Caractérisation et étude de la durcissement d'un sable gypseux de Ben Guesha, dans le domaine de la géotechniques routières) [9].

### III.6.1. Introduction.

Le sable gypseux a été introduit comme matériau de construction des routes dans les régions sèches et semi-arides, et ce grâce à sa propriété de durcissement. L'étude a examiné la recherche d'une relation possible entre le pourcentage de gypse contenu et les propriétés mécaniques d'une quantité de sable de carrière à Bin Quesha situé à 120 km au nord-est de la wilaya d'El-Oued. Etudier la propriété de durcissement de cette quantité

**III.6.2.Le but de l'étude .**

Évaluer la dureté des sables gypseux en lait de paille par un simple test de pression à l'aide d'une presse CBR et rechercher une relation possible entre le pourcentage de gypse contenu dans le sable étudié et ses propriétés mécaniques.

Etudier l'évolution de la résistance aux contraintes simples en fonction de:

- Teneur en eau
- La durée de vie utile des échantillons
- Teneur en eau résiduelle

**III.6.3.Matériaux utilisés et conditions d'expérimentation.**

Il s'agit d'un sable gypseux prélevé dans la carrière de Bin Quesha située à 200 mètres à gauche de la RN.16 a été étudié expérimentalement dans le laboratoire des travaux publics du sud du LTPS - Ghardaia dans le laboratoire central du LCTP.

Il est classé comme suit:

**Tableau III. 12: Classification du sable gypseux de Ben Guecha.**

Method de classification	Denomination
GTR	limons peu plastiques, lœss, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques
Abaque de Casagrande et LPC	Sable limoneux
Diagramme de Taylor	Limon sableux
TRS	Sable gypseux, famille des matériaux fins

-Pour réaliser les tests, plus de 70 échantillons ont été préparés, selon les normes suivantes:

-Quatre contenus aqueux (4 chaînes): 0; 7,5; 11 et 14,5% .

- 6 périodes de maintien en plein air sans prévenir la déshydratation:

0, 1, 4, 7, 14 et 28 jours "selon la teneur en eau" de sorte que chaque série contienne trois échantillons pour chaque période de stockage, soit 12 éprouvettes.

Tous les échantillons sont constitués d'éléments de moins de 5 mm de diamètre, pressés à la teneur en humidité optimale du test Proctor modifié dans une matrice cylindrique de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur.

-Selon:  $\gamma_d = 1,62 \text{ g/cm}^3$  et  $14,5 = W_{opm}$

**III.6.4.Propriétés du sable (avant traitement).**

-Caractéristiques géotechniques de matériaux (avant traitement ):

**Tableau III. 13: Caractéristiques géotechniques et mécaniques du sable gypseux de Ben Guecha.**

Chaut de portance (%)	Fines (%)	IP (%)	ES (%)	VB (%)	CaSo4 (%)	CaCo3 (%)	Wopm (%)	$\gamma_d$ (g/cm3)	Rc98 (bars)	ICBR (c=96%)	ICBR (c=98%)
5,5	34	6	5	0.35	57.7	7.35	14.5%	1.62	16	32,5	38

- (Le sable gypseux étudié a des propriétés de compression relativement faibles)

**III.6.5. Résultats obtenus (après traitement).**

-L'étude est conduite dans trois directions :

**1. Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de :**

la teneur en eau de confection

la durée de conservation des éprouvettes.

la teneur en eau résiduelle.

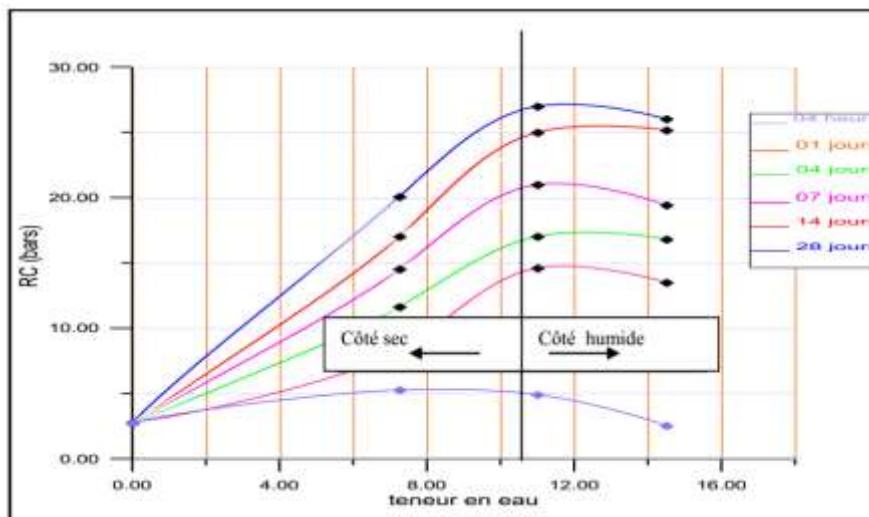
**2. Détermination du module de Young dans les différents états de confection et de conservation des éprouvettes.**

**3. Etude microscopique de matériaux extraits de trois éprouvettes compactées à Wopm et de part et d'autre de Wopm (branche humide et branche sèche de la courbe Proctor modifié).**

**III.6.6. Evolution de la résistance à la compression simple.**

**a) en fonction de la teneur en eau de confection.**

Les graphes de (la figure III.23) sont tracés pour des teneurs en eau de confection se situant dans la branche sèche de la courbe Proctor modifié,  $W \leq W_{opm}$ .

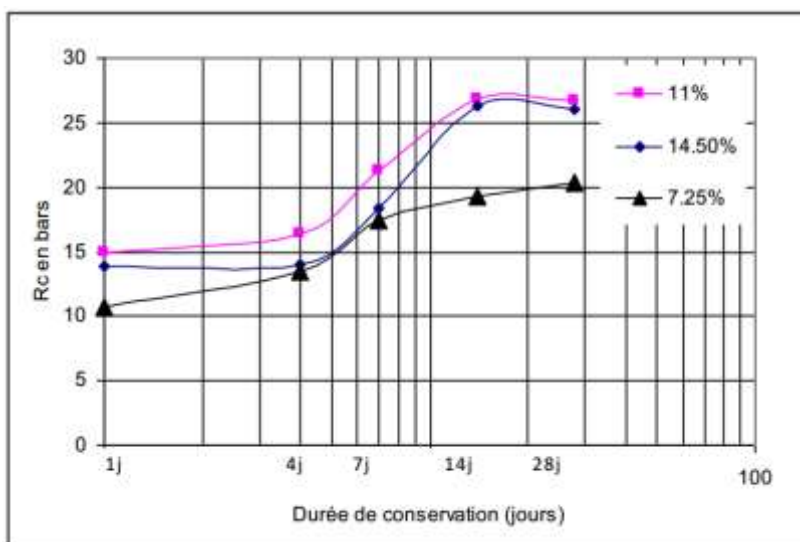


**Figure III. 23: L'influence de la teneur en eau sur la résistance a la compression à différentes durées de conservation.**

-D'après les résultats d'une simple pression, nous comprenons que:

- La force augmente avec l'augmentation de la teneur en eau sous pression jusqu'à  $W_{opt}$  puis diminue
- La solidification est faible lorsque la teneur en eau est de 0%.
- La courte durée de vie ne permet pas l'achèvement du durcissement

**b) en fonction de la durée de conservation.**



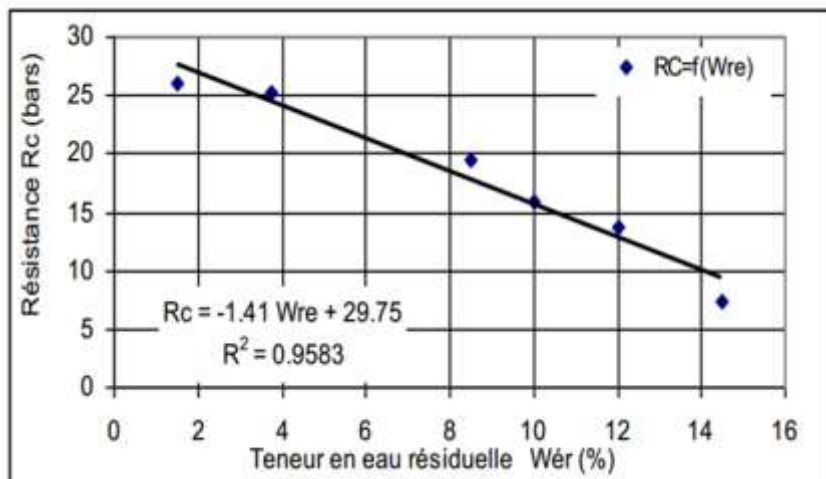
**Figure III. 24: Influence de la durée de conservation sur la résistance à la compression du sable de Ben Guecha.**

À partir des données des courbes de (FigureIII.24), nous comprenons que:

- La résistance évolue avec le temps
- Le durcissement s'opère principalement entre le 4<sup>ème</sup> et le 14<sup>ème</sup> jour
- Le durcissement ralenti après le 14<sup>ème</sup> jour.
- La solidification maximale se produit pour une teneur en eau inférieure à la teneur optimale en eau de Proctor.

**c) en fonction de la teneur en eau résiduelle.**

Les éprouvettes sont préparées dans des conditions OPM stockées à des moments différents



**Figure III. 25: Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau résiduelle.**

-RC (diminution de 21 bar à 6 bar) lorsque la teneur en eau résiduelle augmente

**III.6.7. Etat hydrique des échantillons.**

Le taux de perte de teneur en eau est donné par la formule suivante:

$$\text{Perte (\%)} = (W \text{ initiale} - W \text{ finale}) / W \text{ initiale}$$

(Pour les échantillons pressurisés avec une teneur en eau optimale)

**Tableau III. 14: Taux de perte en teneur en eau avec le temps de conservation à l'air libre.**

jours	W initiale	W finale	perte
1	14,5%	12%	17,24%
4	14,5%	10%	31,03%
7	14,5%	8,5%	41,37%
14	14,5%	3,75%	74,13%
28	14,5%	1,5%	89,65%

On remarque que les échantillons ont perdu plus de 40% de leur teneur en eau au bout de 7 jours mais ils conservent toutefois près de 10% après 28 jours de conservation.

**III.6.8. Détermination du modèle de Young pour les différents états de confection et de conservation des éprouvettes.**

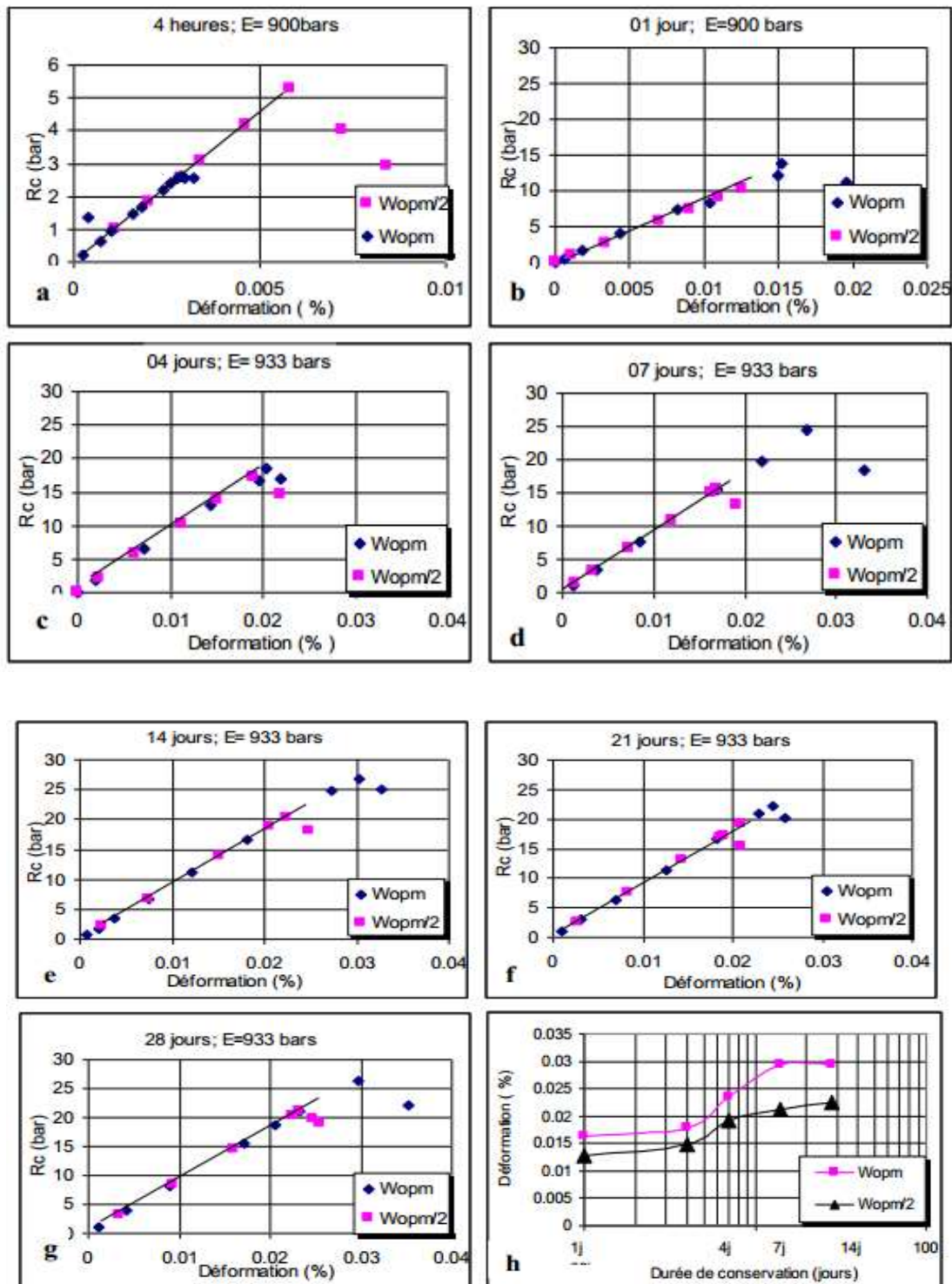
**III.6.8.1 Le module de Young.**

Le module d'élasticité est appelé le module d'élasticité et c'est une constante qui relie la contrainte à la compression d'un matériau spécifique en soumettant une éprouvette cylindrique de section S comme illustré ci-dessous:

$$\Delta L / L = \sigma / E \dots\dots\dots(8)$$

$$\Delta L = FL / ES \dots\dots\dots(9)$$

-Un test de traction a été réalisé afin de déterminer le module d'élasticité E de l'échantillon:



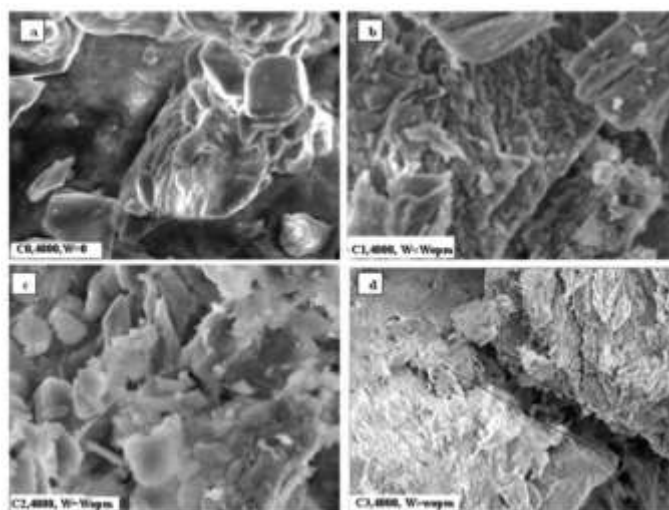
**Figure III. 26: Courbes contraintes –déformation : essai de compression simple sur sable gypseux de Ben Guecha, à différentes durée de conservation et pour deux teneurs en eau de compactage.**

Sur la base des données précédentes, il a été constaté que le module d'élasticité du bac à sable gypseux Qesha se situe dans la plage de 930 bars. Cela ne dépend pas de la teneur en eau de la préparation ou de la durée de conservation des échantillons.

### III.6.9. Observation au MEB de poudres d'échantillons de sable gypseux compactés et séchés.

Les poudres extraites d'échantillons pressés en divers contenus aqueux ont été observées et séchées pendant plus de 28 jours par microscopie électronique à balayage.

Le microscope électronique est un appareil pour l'observation des objets minces, dont les dimensions latérales n'excèdent pas quelques microns. Et son principe est le même que celui du microscope photonique



**Figure III. 27: Photos MEB de poudre du sable gypseux de Ben Guecha extraites d'échantillons séchés après compactage respectivement à  $W=0\%$  ;  $W= 11\%$  ( $3/4W_{opm}$ );  $W= w_{opm}=14.5\%$  et  $W= 16\%$ .**

Les résultats de l'étude microscopique d'échantillons séchés et comprimés montrent le phénomène de solidification et l'émergence de liaisons cimentaires par dissolution d'une fine pièce de plâtre dans l'eau de compactage.

### III.6.10. Remarques .

Les résultats obtenus grâce à cette étude ont prouvé que:

Le confinement de l'échantillon à 50% de gypse est une condition nécessaire mais non suffisante pour obtenir une solidification complète, comme le démontre sa méthode expérimentale sur la présence d'une quantité d'eau pour laquelle la solidification est la plus forte.

Il est recommandé de contrôler le degré de compression du matériau lors de son installation.

### III.7. Conclusion.

Les études précédentes sont utiles pour guider les idées et faciliter le chemin du chercheur, c'est pourquoi dans ce chapitre nous avons essayé de compiler et de mettre en évidence l'élément le plus important et de le placer dans notre recherche de la manière la plus simple possible.

L'une des choses les plus importantes que nous ayons obtenues grâce à ces études est résumée dans les étapes de traitement du sable gypseux, qui sont les suivantes:

-Caractérisation du sable gypseux à traiter.

- Méthode de traitement (ajout d'une substance telle que la chaux hydratée - application de forces de pression .....).

-Prise en compte des conditions climatiques de la région et étude de leur impact (teneur en eau .....).

# **Conclusion générale et Recommandations**

### Conclusion générale

Sur la base de cette étude, nous proposons de définir les matériaux utilisés dans les méthodes, appelés (sable gypseux). Le sable gypseux est un type de sédiment de gypse qui est extrait de formations de surface naturelles qui occupent une grande surface dans les zones désertiques et cette dernière se caractérise par une certaine capacité de fragmentation qui confère à ces matériaux une résistance remarquable lorsqu'ils sont comprimés et séchés. .

À partir de données bibliographiques, de résultats d'essais en laboratoire et d'études antérieures, cette étude a permis de présenter le contexte désertique avec ses caractéristiques géotechniques et plus que cela, les caractéristiques de l'utilisation du sable gypseux.

Après cette étude théorique sur le raffinage ou le traitement du sable gypseux, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes:

- L'ajout de 6% de chaux hydratée a amélioré les propriétés du sable gypseux grâce à une simple résistance à la compression de 10 bars à 16 bars, et ceci dans le respect des conditions climatiques de la région.
- La contrainte de compression a un effet important et linéaire sur les valeurs CBR des sols testés qui sont humides à non trempés.
- Des temps de trempage courts conduisent à des résultats dangereux.
- MR, c'est-à-dire le module d'élasticité, augmente avec l'augmentation de la tension de pression et diminue avec l'augmentation de la période de trempage.
- L'équation de régression non linéaire «développée» met en relation les valeurs MR et CBR du sable gypseux trempé.
- Les valeurs CBR diminuent pendant le trempage et augmentent pendant le séchage.
- Les échantillons de sable gypseux contiennent 50% de gypse, condition nécessaire mais non suffisante pour obtenir un durcissement complet.

## Recommandations

Pour le traitement du sable de gypse, les connaissances et recommandations techniques suivantes doivent être prises en compte:

- Avant de réaliser des expériences en laboratoire, toutes les quantités nécessaires doivent être fournies à partir de la carrière pour garantir l'exactitude des résultats (homogénéité du matériau)
- L'aspect économique en termes de coûts de traitement doit être pris en considération et comparé aux coûts de prise directe des carrières (par mètre carré)
- Mener plus de recherches qui dépendent des matériaux locaux comme matériaux d'amélioration (réduction des coûts et utilisation des ressources)
- Essayer de traiter en combinant du sable gypseux avec des propriétés qui peuvent être complémentaires, par exemple du sable gypseux de faible cohésion avec du sable gypseux contenant un pourcentage d'argile.
- Il est très important de prendre en compte le côté pratique du traitement, comme l'application de simples forces de pression.

Enfin, il convient de noter qu'il est très important d'étudier l'impact des facteurs naturels et climatiques dans toute étude.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

- [1] **MOHAMED AMINE BEDRANE** ".agronomie.info/fr/classification-des-sols-gypseux".
- [2] interview avec **KARROUCHI MBAREK** "Ingénieur travaux publics, Un employé de la Direction des travaux publics".
- [3] interview avec **KHALIFA NDJIEMA** "Ingénieur d'application dans les travaux publics ,Responsable du laboratoire du hall d'expérimentation des travaux publics du sud" .
- [4] **MADANI DJAMILA** " relation entre le couvert végétal et les conditions édaphiques en zone a déficit hydrique – Mémoire de Magister, université de batna".
- [5] **M. OUAMER-ALI KARIM** " contribution a l'étude des sols gypseux d'Algérie , valorisation d'une banque de données et détermination des profils référence- Diplôme de Magister , (ALGER) (I.N.A)" .
- [6]**Khalili Khadîdja .2016** "Caractérisation mécanique d'un mélange : Tuf + sable de dunes , mémoire de fin d' études de master" .
- [7] **KHELLOU Abderrazak . 2011**" modélisation du comportement des matériaux sable gypso-calcaires " Mémoire de Magister, Ouargla.
- [8] **DTP & COCOURS (C.T.T.P)** " Deuxième séminaire les techniques routières sahariennes ", Béchar .
- [9] **METTAI MOHAMED .2009** " Caractérisation et étude du durcissement d' un sable gypseux de BEN GUECHA , dans le domaine de la géotechnique routière" Mémoire de Magister , de l'université Hassiba Ben Bouali Chlef .
- [10] **Carpenter M. 1997** " Terminologie de la pédologie français-anglais " SFT. Société française des traducteurs, France.
- [11] **Magnan J. P. 1997**" Description, identification et classification des sols "Techniques de l'Ingénieur, traité de construction.
- [12] Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves MTP ( Fascicule 3 ).

[13] **P. BUREAU et P. ROEDERER . 1960** " contribution a l' étude des sols gypseux du sud Tunisien croutes et encroutements gypseux de la partie sud du golfe de Gabes " .

[14] 01/08/2020," <http://www.3emegroupedettransport.com/GAGS.htm>".

[15] **MORSLI Mérièm1, AMERAOUI Zoubida1, BALI Abdelrahim1, FLEUREAU Jean-Marie2 .2002** . " Conception et réalisation des chaussées en milieux désertique " , 1Alger et 2Paris .

[16] **GOUAL Idriss .2012** " Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat " Diplôme de Docteur en Génie Civil , Université ABOUBAKR Belkaid TLEMCCEN .

[17] **BAHI E. 2009** "Sable Gypseux Utilisé En Technique Routière Au Sud-Algérien" Alger.

[18]**LTP-Sud .1994** " Recherche de carrières dans la région du Souf " .

[19] **Hana Medarag Narou Boubir et Abdallah Farhi** " Le rôle des services et des investissements dans l'hypertrophie de la ville d'El Oued au bas Sahara algérien"

[20] **LTP-Sud .1994** "Plan de situation des gisement dans la wilaya d'el-oued en 1994"

[21] **S. S. Razouki PhD, Dipl-Ing, CEng, MASCE and A. N. Ibrahim MSc .2006** " Improving a gypsum sand roadbed soil by increased compaction " , Iraq .

[22] **Sabah Said Razouki & Ali Nasir Ibrahim .2017** " Improving the resilient modulus of a gypsum sand roadbed soil by increased compaction " , Iraq .

[23]**Sabah Said Razouki & Bushra M. Salem. 2013** " Soaking–drying frequency effect on gypsum-rich roadbed sand " .

[24] **BELLABACI Salem MAHMOUDI Bachir2019**" Contribution à l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques des sables gypseux de la région d'El-Oued.(Etude expérimentale)."

[25] **van Alphen, J. G., et de los Rios Romero, F. (1971)**. Sols gypsifères: notes sur leurs caractéristiques et leur gestion. (Bulletin / Institut international pour la remise en état et l'amélioration des terres; n ° 12) .

[26] **FAO. 1990**. La conservation et la réhabilitation des terres africaines: un programme international. ARC / 90/4. Rome.

- [27] **Mashali A., 1995** Soil management practices for Gypsiferous soils. Land and Water development Division. Workshop on Management of Gypsiferous – Damascus, Syria, pp: 1-21.
- [28] **Carter B.J, Inskeep W.P., 1988** Accumulation of pedogenic gypsum in Western Oklahoma soils. *Soil Sci.Soc.Am.J.*52, pp: 1107-1113.
- [29] **Porta J., Herrero J., 1988.** Micromorphology and genesis of soils enriched with gypsum. In *Soil Micromorphology*. Douglas, L.A (edit). Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp: 321-339.
- [30] **Gutierrez E.M., Gutierrez S.F., 1996.** Geomorphology of the tertiary gypsum formation in the Ebro Depression. Proc. International Symposium on Soils with gypsum. Llieda, Catalonia, Spain, pp:1-20.
- [31] **Cantonb Y., Solé-Benet A., Lazaro R., Puigdefabregas J., 1996** Relationships between pedogenesis stages and hydrogeological properties on gypsiferous mudstone in the tabernas desert (Se Spain). Proc. Int. Symposium on soil with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain.
- [32] **Roquero E.G.-C., Perez Arias J., 1996.** Influence of slope degree and orientation on geomorphological and pedological differences on gypsiferous soils from miocene formations in central Spain. Proc. Int. Symposium on soil with gypsum. Lleida, Catalonia, Spain.
- [33] **Herrero J., Boixadera J., 2002** Gypsic Soils. *Encyclopedia of Soil Science.*, pp: 635-639.
- [34] **Buck B.J., Monger H.C., 1999** Stable isotopes and soil-geomorphology as indicators of Holocene climate change, Northern Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments*, 43, pp: 357-373.
- [35] **Buck B.J., Van Hoesen J.G., 2005** Assessing the applicability of isotopic analysis of pedogenic gypsum as a paleoclimate indicator, Southern New Mexico. *Journal of Arid Environments*, 60, pp: 99-114.
- [36] **Fedoroff N., Courty M.A., 1989** Indicateurs pédologique d'aridification : Exemple du Sahara. *Bull. Soc. Géol. France*, (8) t.,V. N°1, pp : 43-53.
- [37] **Boyadgiev T.G., Verheye W.H., 1996** Contribution to a utilitarian classification of gypsiferous soil *Géoderma* 74, pp: 321-338.
- [38] **Herrero J., Porta J., 2000.** The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma* 96, pp: 47-61.
- [39] **Dekkiche B., 1974** Contribution à l'étude des sols du Hodna et corrélation géochimique des eaux de la nappe. Thèse Université de Gant, Belgique, 210p .
- [40] **Kulke H., 1974** Zur geologie und mineralogy der kalk-und giskrusten Algeriens. *Geologische Rundschau* 63, pp: 970-998.

- [41] **Halitim A, 1988.** Les sols des régions arides d'Algérie. Ed. OPU., 361p.
- [42] **Abdesselam S., 1999** Contribution à l'étude des sols gypseux au Nord-Est du Sahara Algérien: Caractérisation et Genèse. Cas des oasis de Tolga (Région des Zibans).Thèse Mag., I.N.A., El-Harrach, 147p.
- [43] **Coque R., 1962** La Tunisie présaharienne. Etude géomorphologique. Arm.Colin Ed., Paris, thèse d'état, 488p.
- [44] **Trichet J., 1963.** Description d'une forme d'accumulation de gypse par voie éolienne dans le Sud tunisien.Bull.Soc.Géol.France, pp :617-628.
- [45] **Drake N.A., 1997** Recent aeolian origin of surficial gypsum crusts in southern Tunisia : Geomorphological, Archaeological and remote sensing evidence. Earth surface processes and landforms.Vol.22, pp: 641-656.
- [46] **Bourque P.A., 1997** Les minéraux et la séquence évaporitique. Source : Ed. Spéc.Revue planète terre, 75p.
- [47] **Khademi H., Mermut A.R., Krouse H.R., 1997** Sulfur Isotope geochemistry of gypsiferous arid soils from central Iran. Geoderma 80, pp : 195-209.
- [48] **Eswaran H., Stoops G., Abtahi A., 1981** SEM morphologies of Halite. J.Micorso., 120, pp: 343-352.
- [49] **O'Donoghue M., 1997.** Roches et Minéraux.Ed. Fontaine- Paris, Guide d'identification, 218p.
- [50] **Gautier Y, 2004.** Les climats méditerranéens comme intersection des régions arrosées en hiver et sèches en été. Ed. Du monde, Encyclopædia Universalis.
- [51] **Barriand P., Cesbron F., Geffroy J., 1978.** Les minéraux, leurs gisements, leurs associations. Editions du B.R.G.H., 298p.
- [52] **Benmati A., 1993.** Contribution à l'étude de l'altération des roches carbonatées tendres en milieu semi-aride de Souaghi (Bni-Slimane).Relation avec la pédogenèse fersiallitique et la formation des croûtes et encroûtements calcaires. Thèse de magistère, I.N.A., El-Harrach, 255p.
- [53] **Heijnen W. M. M., Hartman P. 1991** Structural morphology of gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), brushite ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) and pharmacolite ( $\text{CaHAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Journal of Crystal Growth, vol. 108, pp: 290-300.
- [54] **Sipple. M., 1999** . Réarrangements structuraux et modifications microstructurales associés aux transformations de phases dans le système  $\text{CaSO}_4 (\text{s})\text{H}_2\text{O} (\text{g})$ .Thèse de Doctorat de l'université de Bourgogne, 140 p.
- [55] **Ramos-Horta(1979)**, Member of the Central Committee of the Frente Revolucionaria de Timor Leste Independente (FRETILIN), addressed to the Chairman of the 4th Committee.

**[56] BELAID Alloul (1981) ,. ETUDE GEOLOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES TUFES CALCAIRES ET GYPSEUX D'ALGERIE EN VUE DE LEUR VALORISATION ROUTIERE .**

**[57] Morsli M. 2007** "Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière saharienne" thèse de doctorat d'état école nationale polytechnique, Alger.

**[58]Colombier G., 1988** – Tufs et encroûtements calcaires : Utilisations routières – Synthèse, ISTED.

**[59]CTTP., 2001** – Catalogue de Dimensionnement des Chaussées neuves – Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics, Algérie.