

République Algérienne Démocratique Et Populaire
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

École Nationale Supérieure Polytechnique



Département de Génie Civil
Laboratoire Construction et Environnement

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par :

METTAI MOHAMED

Ingénieur d'Etat en Génie Civil de l'université Hassiba Ben Bouali Chlef

Thème :

**CARACTERISATION ET ETUDE DU DURCISSEMENT D'UN
SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA, DANS LE DOMAINE DE
LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE**

Soutenu le :08 juillet 2009

Devant le jury composé de :

| | | | | |
|----------------------|-----|------------|-----------------------|------|
| Président: | Mr | A. BALI | Professeur | ENSP |
| Directeur de mémoire | Mme | M. MORSLI | Maitre de Conférences | ENSP |
| Examineurs | Mme | R. KETTAB | Maitre de Conférences | ENSP |
| | Mr | M. DEMIDEM | Chargé de cours | ENSP |
| | Mr | A. LARIBI | Chargé de cours | ENSP |

Année Universitaire 2008/2009

Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier et en premier lieu **Dieu, le Tout Puissant et Miséricordieux** qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour mener à bonne fin ce travail.*

Je remercie mes très chers parents pour toute l'aide et le soutien qu'ils m'ont offerts tout au long de mes études.

Mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance vont à mon Directeur de mémoire Dr. M. MORSLI pour son dévouement, ses conseils et son soutien moral et matériel tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier tous les membres de jury Mr Pr BALI, Mr DEMIDEM, Mr LARIBI et Mme R.KETTAB pour leurs encadrements de ce mémoire.

Ma reconnaissance va également à Mr SOUFI, PDG du laboratoire LTPS Ghardaïa, qui m'a ouvert les portes de son laboratoire y compris la salle des archives.

*Je tiens à remercier toute l'équipe de **laboratoire LTP Sud**, à leur tête Mr E. KDIAD et Mr B. GUERBOUSE pour leur soutien moral et matériel.*

Que l'équipe du laboratoire LCTP et tous ses techniciens, qui m'ont apporté leur aide dans la partie expérimentale, trouvent ici mes remerciements les plus sincères.

*Je n'oublierai pas de remercier Mr **BEN SEDDIK MOUNIRE**, ingénieur géotechnicien dans le bureau d'étude français Luis Bergé, qui m'a aidé dans la rédaction et la correction de mon mémoire.*

Mes pensées vont à tous les enseignants qui ont participé à ma formation, en graduation et en post-graduation.

*Finalement, Je remercie tous mes amis **Mezidi Sid Ahmed, Zekara, Yacin, Rafic Yacin, Hamid Z**, et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

ملخص:

تعتبر الرمال الجبسية من المواد المحلية التي تستعمل في بناء الطرقات تحت ظروف مناخية جافة, و هذا بفضل خاصية التصلب التي يتميز بها بعد عملية الرص و التجفيف. تناولت الدراسة البحث عن احتمال وجود علاقة بين نسبة الجبس المحتواة و الخصائص الميكانيكية لهذا النوع من المواد و لذلك دراسة خاصية التصلب للرمال الجبسي لمنطقة بن قشة.

إن معالجة المعطيات الجيوتقنية لعدة مواد من هذا النوع أثبتت أن 50% من نسبة الجبس المحتواة شرط ضروري و غير كاف من أجل الحصول على التصلب الكامل. كما أثبتت الدراسة في شقها التجريبي على وجود كمية من الماء التي يكون من أجلها التصلب أعظميا. الملاحظة على MEB المطبقة على عدة عينات مرصوفة و مجففة بينت وجود تقاربا نحو تفسير ظاهرة التصلب بدورات تحليل و إعادة تبلور مما يسمح بإيجاد روابط إسمنتية محلية

الكلمات المفتاحية: رمل جبسي, تصلب, جاف, طريق, حركة مرور, تبلور

Résumé :

Les sables gypseux sont des matériaux sub-normaux utilisés en corps de chaussée, en milieu aride, grâce à leur faculté de durcir après compactage et séchage. Notre travail est une contribution à une meilleure maîtrise de ce type de matériaux en vue d'optimiser leur emploi. L'étude est menée sous deux aspects : recherche d'éventuelles corrélations entre la nature du matériau (pourcentage de gypse) et ses caractéristiques mécaniques et étude du durcissement d'un sable gypseux de Ben Guecha.

Un traitement de données géotechniques - relatives à une quarantaine sables gypseux- recueillies au laboratoire LTPS a montré que le taux de 50% de gypse est une condition nécessaire mais non suffisante pour obtenir le durcissement attendu.. Par ailleurs, il a été mis en évidence l'existence d'une teneur en eau optimale pour laquelle le durcissement est maximal. L'observation au MEB de poudres d'échantillons de sable gypseux compactés et séchés convergent vers une explication du phénomène de durcissement par une dissolution d'une partie des fines gypseuses dans l'eau de compactage en faveur d'une recristallisation lors de l'évaporation donnant naissance à des liens cimentés locaux.

Mots clés : Encroûtements gypseux, durcissement, aride, chaussée, trafic, cristallisation.

Abstract :

Gypsum sands are sub-standard materials used in body of pavement, dry land, by their ability to harden after drying and compaction. Our work is a contribution to a better control of this kind of materials in order to optimizing its use. The study was conducted in two ways: looking for any correlation between the nature of the material (percentage of gypsum) and its mechanical characteristics and study of hardening of gypsum sand of Ben Guecha.

Geotechnical data processing - for a forty-gypsum sand collected in LTPS laboratory has shown that the rate of 50% of gypsum is a necessary but not sufficient to get the expected hardening. Furthermore, it was revealed the existence of an optimum water content for which the hardening is maximal. The MEB observation of samples of powdered gypsum sand compacted and dried converge towards an explanation of the phenomenon of hardening by dissolution of part of fine gypsum in water compaction for a recrystallisation at the evaporation gives rise to local cemented ties.

Key words: gypsum, crusts, hardening, dry, roadway, traffics, crystallization

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....10

CHAPITRE I : LE GYPSE ET LES ENCROUTEMENTS GYPSEUX

I.1. INTRODUCTION.....13
I.2. LE GYPSE13

1.2.1 Définition.....13
I.2.2 Origine et propriétés du gypse.....14
I.2.3 Caractéristiques physico-chimiques.....15
I. 2.4 Comportement thermique.....15
I.2.5 Origine des formations gypseuses.....16
I.2.6 Problèmes d'analyse des sols gypseux.....17
I.2.6.1 Problèmes rencontrés lors de l'analyse granulométrique.....17
I.2.6.2 Problèmes rencontrés lors de la mesure de l'humidité.....18
I.2.6.3 Problèmes rencontrés lors de l'analyse minéralogique.....18
I.3 Les Encroutements gypseux.....18
I.3.1 Formation des encroutements gypseux.....18
I.3.2 Profil d'un encroutement gypseux.....19
I.3.3 Durcissement des encroutements gypseux.....20
I.3.3.1 Résumé synthétique de l'étude du phénomène de durcissement du tuf gypso-calcaire de Hassi – Messaoud.....21
I.3.4 Extension géographique des encroutements gypseux.....25
I.3.5 Relation gypse-calcaire.....26
I.3.6 Distribution comparée du gypse et du quartz dans un encroutement gypseux.....27

I.4 LES SABLES GYPSEUX.....28
I.5 CONCLUSIONS.....30

CHAPITRE II LES SABLES GYPSEUX : CARACTERISTIQUES CLASSIFICATION ET UTILISATION EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE

II. 1 CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES ET MÉCANIQUES.....31

II.1.1 Caractéristiques des sables gypseux: identification et comportement.....31
II.1.1.1 Granulométrie.....31

| | |
|--|-----------|
| II.1.1.2 Analyses Chimiques..... | 31 |
| II.1.1.3 Limites d’Atterberg et Equivalent de Sable (ES)..... | 32 |
| II.1.1.4 Essai au bleu de méthylène..... | 32 |
| II.1.1.5 Essai Proctor modifié..... | 32 |
| II.1.1.6 Essai C.B.R..... | 33 |
| II.1.1.7 Essai de Compression Simple..... | 33 |
| II.1.2 Tableau récapitulatif des caractéristiques d’identification et de caractérisation des sables gypseux..... | 33 |
| II.2 COMPORTEMENT DU SABLE GYPSEUX EN LABORATOIRE..... | 34 |
| II.2.1 Influence du taux de sulfates et carbonates et du taux de fines sur la résistance de sables gypseux de la région d’Ouargla..... | 35 |
| II.2.1.1 Choix des fiches techniques..... | 35 |
| II.2.1.2 Influence du taux de sulfates et de carbonates sur la résistance à la compression..... | 35 |
| II.2.1.3 Influence du pourcentage de fines sur la résistance à la compression..... | 36 |
| II.2.2 Complément bibliographique..... | 38 |
| II.2.2.1 influence de la compacité sur la résistance à la compression simple..... | 38 |
| II.2.2.2 Influence de la teneur en eau résiduelle sur la résistance à la compression simple..... | 40 |
| II.2.2.3 Influence de la teneur en eau résiduelle sur le module d’élasticité E..... | 40 |
| II.2.2.4 Influence du taux de gypse sur l’indice CBR..... | 41 |
| II. 3 CLASSIFICATION DES SABLES GYPSEUX..... | 42 |
| II.3.1 Classifications géotechniques..... | 42 |
| II.3.2 Classification rationnelle..... | 43 |
| II.4 les chaussées en sable gypseux..... | 45 |
| II.4.1 Historique d’utilisation du sable gypseux en corps de chaussée..... | 45 |
| II.4.2 Dégradation des chaussées en sable gypseux..... | 46 |
| II.4.2.1 La fissuration..... | 46 |
| II.4.2.2 Le gonflement et boursouflures..... | 46 |
| II.4.2.3 Déformabilité..... | 47 |
| II.4.3 Caractéristiques de quelques routes construites en sables gypseux..... | 47 |
| II.4.3.1 Route Hassi Massaoud – Fort Lallemand..... | 47 |
| II.4.3.2 Route Hassi Massaoud – Rhourde El Baguel..... | 47 |
| II.4.3.3 Route square Bresson – Haoud El Hamra..... | 48 |
| II.5 CONCLUSIONS..... | 48 |

CHAPITRE III

CARACTERISATION ET ETUDE DU DURCISSEMENT D'UN SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA

III.1 CARACTERISATION DU SABLE GYPSEUX DE BEN-GUECHA.....50

| | |
|---|----|
| III.1.1 Présentation de l'échantillon..... | 50 |
| III.1.1.1 Localisation du gisement étudié..... | 50 |
| III.1.1.2 Méthode de prélèvement et échantillonnage..... | 51 |
| III.1.1.3 But et principe de l'échantillonnage..... | 51 |
| III.1.1.4 Echantillonnage en laboratoire..... | 52 |
| III.1.2 Essais de caractérisation..... | 52 |
| III.1.2.1 Granulométrie..... | 52 |
| III.1.2.2 Analyses chimiques..... | 55 |
| III.1.2.3 Limites d'Atterberg..... | 55 |
| III.1.2.4 Qualité les fines..... | 56 |
| III.1.3 Essais des comportements..... | 58 |
| III.1.3.1 Essai Proctor..... | 58 |
| III.1.3.2 Essai de portance CBR..... | 60 |
| III.1.3.3 Essai de résistance à la compression simple..... | 63 |
| III.1.4 Résultats des essais d'identification et de comportement..... | 64 |
| III.1.5 Classification du sable gypseux de Ben Guecha..... | 65 |
| III.1.5.1 Classification GTR des sols fins..... | 65 |
| III.1.5.2 Abaque de CASAGRANDE et LCPC..... | 65 |
| III.1.5.3 Classification triangulaire ou diagramme de Taylor des sols fins..... | 65 |
| III.1.5.4 Technique routière saharienne..... | 65 |
| III.1.6 Conclusions..... | 66 |

III.2 ETUDE EXPERIMENTALE DU DURCISSEMENT DU SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA.....67

| | |
|---|----|
| III.2.1 Plan expérimental..... | 67 |
| III.2.1.1 Paramètres d'étude..... | 67 |
| III.2.1.2 Essais..... | 68 |
| III.2.2 Interprétation des résultats..... | 69 |
| III.2.2.1 Evolution de la résistance à la compression simple..... | 69 |
| III.2.2.2 Etat hydrique des échantillons..... | 73 |
| III.2.3 Détermination du module de Young pour les différents états de confection des éprouvettes..... | 75 |
| III.2.3.1 Le module de Young..... | 75 |
| III.2.3.2 Les graphes expérimentaux..... | 77 |

III.4 OBSERVATION AU MEB DE POUDRES D'ÉCHANTILLONS DE SABLE GYPSEUX COMPACTÉS ET SÉCHÉS.....78

III.3 .1 Définition.....78

III.3.2 Observation des échantillons.....79

III.3.4 Conclusions.....81

VI CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....83

VI.1 CONCLUSION.....83

VI.2 RECOMMANDATIONS.....85

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|-----|
| Tableau 1.1 : Distribution du gypse et du quartz dans un sol gypseux | 28 |
| Tableau 2.1 : Récapitulatif des caractéristiques géotechniques et mécaniques des sables gypseux..... | 34 |
| Tableau 2.2 : Récapitulatif des différentes classifications sur les sables gypseux..... | 43 |
| Tableau 3.1 : Quantités prévues pour les essais de laboratoire..... | 51 |
| Tableau 3.2 : Les résultats obtenus par les essais mécaniques..... | 62 |
| Tableau 3.3 : Caractéristiques géotechniques et mécaniques du sable gypseux de Ben Guecha.. | 64. |
| Tableau 3.4 : Classification du sable gypseux de Ben Guecha..... | 66 |
| Tableau 3.5 : Taux de perte en teneur en eau avec le temps de conservation a l'air libre..... | 74 |

LISTE DES PHOTOS

| | |
|--|----|
| Photo 1 : Sable gypseux de Ben Guecha..... | 50 |
| Photo 2 : Immersion du matériau avant l'essai granulométrique..... | 52 |
| Photo 3 : Confection des éprouvettes..... | 63 |
| Photo 4 : Essai de compression simple..... | 63 |
| Photo 5 : conservation des éprouvettes à 28 jours | 69 |
| Photo 6 : Eprouvettes confectionnées à différente teneur en eau et exposées à l'air libre..... | 70 |
| Photo 7 : Echantillons après écrasement, à différentes durées de conservation ($W = W_{opm}$)..... | 71 |
| Photo 8 : Echantillons après écrasement, à différentes durées de conservation ($W = 3/4 W_{opm}$).. | 71 |

NOTATION

| | |
|---------------------------------|--|
| C | : Compacité (en %) |
| E | : Module de Young |
| ES | : Equivalent de sable |
| GNT | : Grave non traitée |
| I_{CBR} | : Indice Portant Californien (Californian Bearing Ratio) |
| I_p | : Indice de plasticité |
| OPM | : Optimum Proctor modifié |
| R_{compactage} | : Composante de R _c due au compactage (sans dessiccation) |
| R_{dessiccation} | : Composante de R _c due à la dessiccation |
| R_c | : Résistance à la compression simple |
| R_{durcissement} | : Résistance à la compression simple obtenue après compactage |
| V.B | : Valeur au bleu de méthylène |
| W | : Teneur en eau exprimée en % |
| W_l | : Limite de liquidité |
| W_{opm} | : Teneur en eau optimale Proctor modifié |
| W_p | : Limite de plasticité |
| γ_d | : Densité sèche optimale de l'essai Proctor modifié |
| ε | : Déformation axiale (en %) |
| ε_z | : Déformation verticale (en %) |
| σ | : Contrainte normale |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Fig 1.1 : Déshydratation du gypse à température croissante (Weisser et al. 1936)..... | 16 |
| Fig 1.2 : Formation d'encroûtements gypseux par dépôt | 18 |
| Fig 1.3 : Formation d'encroûtements par évaporation | 19 |
| Fig 1.4 : Profile type d'un encroûtement gypseux19 | |
| Fig 1.5 – Evolution de la cohésion sous l'effet de la durée de conservation et de la teneur en eau de confection..... | 23 |
| Fig 1.6 : Variation de chacune des deux composantes à 28 jours de conservation..... | 23 |
| Fig 1.7 : Répartition des encroûtements en Algérie..... | 25 |
| Fig 1.8 : Relation gypse-calcaire (d'après BOYADJIEV, 1974)..... | 27 |
| Fig 1.9 : Distribution du gypse et du quartz dans un sol gypseux..... | 28 |
| Fig 2.1 : Influence du taux de sulfate et de carbonates et du taux des fines sur la résistance à la compression..... | 36 |
| Fig 2.2 : Influence du pourcentage de fines sur la résistance à la compression..... | 37 |
| Fig 2.3 : Influence de la compacité sur la résistance à la compression à différents matériaux..... | 39 |
| Fig 2.4 : Influence de la compacité sur la résistance à la compression en fonction de W (%) finale..... | 39 |
| Fig 2.6 : Module de Déformation en fonction de la teneur en eau finale..... | 40 |
| Fig 2.7 : Influence du taux de gypse sur l'indice portant CBR..... | 42 |
| Fig 2.8 : Classification des tufs au TCR selon leurs performances mécaniques | 44 |
| Fig 3.1 : Courbe granulométrique et sédimentemétié | 53 |
| Fig 3.2 : Courbe granulométrique après compactage..... | 54 |
| Fig 3.3 : Essai d'équivalent de sable..... | 57 |
| Fig 3.4 .Courbes Proctor du sable de Ben Guecha à différentes énergies de compactage | 59 |
| Fig 3.5 : Influence de l'énergie de compactage sur la densité sèche..... | 60 |
| Fig 3.6 : Variation de l'indice CBR en fonction de la compacité..... | 61 |
| Fig 3.7 : Variation de l'indice CBR du sable de Ben Guecha en fonction de la teneur en eau..... | 62 |
| Fig 3.8 : Résistance à la compression en fonction de la compacité | 63 |
| Fig 3.9 : L'influence de la teneur en eau sur la résistance a la compression à différentes durées de conservation. (Conservation à l'air libre)..... | 69 |
| Fig 3.10 – Influence de la durée de conservation sur la résistance à la compression du sable de Ben-Guecha..... | 72 |
| Fig 3.11 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau résiduelle..... | 73 |
| Fig 3.12 : Taux de perte en teneur en eau en fonction de la durée de conservation..... | 74 |
| Fig 3.13 : Essai de compression simple..... | 75 |
| Fig 3.14 : Courbe contrainte – déformation..... | 76 |
| Fig 3.15 : 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..... | 77 |
| Fig 3.16 – Photos MEB de poudre du sable gypseux de Ben Guecha extraites d'échantillons séchés après compactage respectivement à W=0% ; W= 11% ; W= wopm=14.5% et W= 16%..... | 80 |

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les tufs d'encroûtements font partie des matériaux subnormaux utilisés en construction routière dans de nombreux pays à climat aride ou sub-humide.

Ils sont classés, suivant leur nature chimique, en trois catégories Horta (1971).

Les tufs essentiellement calcaires : ils se rapprochent, par leurs caractéristiques d'identification, des graves classiques de zones à climat tempéré avec, néanmoins, un pourcentage de fines un peu plus élevé.

Les sables gypseux : pour cette catégorie, le terme *tuf* est remplacé par le terme *sable* car le matériau se débite en sable lors des premières manutentions. Ce sont des matériaux fins, qui s'éloignent des graves classiques par leur granularité et la prédominance du gypse, ce dernier est caractérisé par une certaine friabilité qui confère à ces matériaux des résistances appréciables lorsqu'ils sont compactés et desséchés.

Les tufs gypso-calcaires : la granulométrie de ces tufs est aléatoire, avec une tendance à se classer du côté des matériaux fins.

Les matériaux appartenant à la première catégorie sont les plus prisés pour la construction routière mais sont peu abondants. Ceux appartenant aux deux autres catégories font partie des matériaux fins, sans squelette granulaire. Leur utilisation est admise en Technique Routière Saharienne à condition qu'ils remplissent un certain nombre de critères.

Les propriétés des matériaux gypseux ont été dégagées petit à petit au cours de l'expérience de leur utilisation. La première réalisation fût un chantier en 1953 près d'El-Oued : on utilisa la croûte de surface en blocage, à la main, les intervalles étant garnis de sable gypseux friable, recueilli sous la croûte mis en place par compactage humide. Après séchage l'ensemble se soudait pour former une croûte très dure représentant, en somme, la carapace naturelle de l'encroûtement.

On a ensuite remplacé la mise en œuvre à la main par un répandage au camion de « tout venant » de blocs et sable mélangés puis écrasés au cylindre in situ, après arrosage.

Cette réalisation ayant donné de bons résultats sur les routes secondaires peu circulées a toute fois servi de base pour les travaux de construction d'itinéraires plus importants : Biskra-Touggourt et Biskra-El Oued en 1955.

Les croûtes gypseuses et le sable gypseux sous-jacent étaient utilisés comme tout-venant, après passage au concasseur. On s'est aperçu vite que l'épaisseur de la croûte était trop faible pour justifier le concassage et que le sable gypseux, grâce au phénomène de durcissement après humidification, compactage et séchage, pouvait donner à lui seul une bonne couche de base.

On cessa donc de se préoccuper de la croûte de surface et les prospections sont dirigées vers la recherche de gisements de sable gypseux assez épais pour une extraction commode aux engins. Suite à la réussite de ces deux routes, on généralisa l'utilisation du sable gypseux dans toutes les régions d'El-Oued, Touggourt et Ouargla.

En Algérie, depuis près d'un demi-siècle, des milliers de kilomètres de routes économiques, de désenclavement ont été réalisés, dans l'ensemble avec succès, en tufs d'encroûtements. La bonne tenue des routes construites à partir de ces matériaux est obtenue grâce aux conditions environnementales favorables (qualité des sols supports, conditions pluviométriques..), aux critères de choix des matériaux mis en œuvre, aux propriétés particulières des tufs (bonne cohésion intergranulaire après compactage et séchage) et au savoir faire des techniciens de la route.

Aujourd'hui, avec l'augmentation du trafic et la raréfaction des tufs répondant aux exigences de la Technique Routière Saharienne, des insuffisances sont de plus en plus constatées dans le comportement des chaussées sahariennes, insuffisance souvent liées à la dégradation du matériau mis en œuvre.

De nombreuses études ont été menées, dans les pays utilisateurs de ces matériaux, sur l'influence des facteurs environnementaux sur le comportement des tufs d'encroûtements. Cette bibliographie a été rapportée dans les travaux antérieurs portant sur les *tufs calcaires* et tufs *gypso-calcaires*, réalisés au Laboratoire Construction et Environnement –LCE- Améraoui (2001) ; Bouleghiout (2002) et (Morsli, 2007).

Le travail présenté dans ce mémoire vient compléter la série, en proposant des résultats de recherche relatifs aux *sables gypseux*

Dans la présente étude, les conclusions tirées de la première partie de l'étude sont mises à profit pour alléger le plan expérimental : seuls les paramètres ayant donné des résultats intéressants sont retenus dans cette étude : ce qui réduit le nombre d'échantillons à tester et nous permet d'utiliser des éprouvettes standardisées en lieu et place d'éprouvettes réduites comme cela a été dans les études antérieures.

Le travail est divisé en trois parties :

1. Etude bibliographique sur la genèse des encroutements gypseux.
2. Traitement de données géotechniques recueillies au Laboratoire Travaux Publics Sud (LTPS) et compléments bibliographiques portant sur la caractérisation, la classification et l'utilisation routière du sable gypseux.
3. Etude expérimentale. Cette partie expérimentale a été réalisée en laboratoire du LTPS. Après le choix du matériau et sa caractérisation, on s'est appliqué à étudier l'influence des paramètres liés à l'environnement et à la mise en œuvre du matériau - intensité de compactage, teneur en eau de compactage, teneur en eau d'écrasement, durée de conservation des échantillons compactés - sur les caractéristiques initiales des sables gypseux.

CHAPITRE I

LE GYPSE ET LES ENCROUTEMENTS GYPSEUX

I. 1 INTRODUCTION

Les encroûtements gypseux sont des formations superficielles du Quaternaire, des zones à climat aride à hyperaride. Ce sont des sols caractérisés par une forte teneur en gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ils sont répandus dans des régions où les précipitations sont inférieures à 400 mm/an, quantité insuffisante pour lixivier le gypse Alfaya (2004) ; Schiote (2003) ;Frenkel (1986).

Les formations gypseuses que l'on rencontre dans le contexte climatique cité, ont été étudiées notamment par Durand en Algérie Durand (1963) mais surtout en Tunisie où elles font partie de tous les paysages du sud. Les investigations ont porté sur l'inventaire et la classification des encroûtements gypseux Bureau et Roederer (1960); Viellefon (1978), la morphologie des encroûtements dits "de nappe" Coque (1962); Pouget (1968), et leur fonctionnement hydrique. Les encroûtements gypseux se dressent généralement en couches horizontales affleurantes à subaffleurantes.

En Algérie, ils occupent la grande surface au Sud et Sud-Ouest de Biskra jusqu'en Tunisie.

I.2. LE GYPSE

1.2.1 DÉFINITION

De « *gypsos* ». Ancienne dénomination grecque du minéral, le gypse appartient à la famille des évaporites qui sont les roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. Il résulte généralement de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Le gypse se rencontre à tous les niveaux des ères géologiques depuis le cambrien (Pakistan) jusqu'à l'oligocène (étalée, France, inde) et même le quaternaire (Ethiopie) Daligand (1996).

1.2.2 ORIGINE ET PROPRIÉTÉS DU GYPSE

Le gypse appartient à la famille des évaporites qui sont les roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. Il résulte généralement de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Le gypse se rencontre à tous les niveaux des ères géologiques depuis le Cambrien (Pakistan) jusqu'à l'Oligocène (Italie, France, Inde) et même le Quaternaire (Ethiopie).

Le gypse s'est accumulé dans les matériaux sédimentaires, à partir de Crétacé inférieur et jusqu'au Miocène sous forme de cristaux ou feuilletés disséminés dans les bancs de marne et d'argile et parfois en bancs continus de gypse blanc.

Avant la formation des croûtes une vaste dissémination a dû s'accomplir et expliquerait leur étendue à la quasi-totalité de la topographie.

Deux agents atmosphériques ont permis cette dissémination :

- L'eau : le ruissellement a favorisé l'érosion du gypse et l'enrichissement de ces eaux en sulfates. Au terme de cette course le gypse se concentre dans les sebkhas et les lagunes. Il peut être mobilisé localement par les infiltrations latérales et alimenter les nappes déjà plus ou moins séléniteuses.
- Le vent : il est fréquent de rencontrer des fins cristaux de gypses mélangés à des sables dunaires. A l'occasion, ils peuvent former de véritables amas en bordure des sebkhas. R. Coques (1964), souligne qu'il n'est pas interdit de penser que le rôle du vent ait pu être plus important qu'aujourd'hui.

Le gypse est un sulfate de calcium hydraté ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Il cristallise dans le système monoclinique. A l'échelle de la molécule, il présente une structure feuilletée dans laquelle alterne une couche d'eau et deux couches de $CaSO_4$. Les principales variétés que l'on trouve dans la nature sont :

- Sous formes macrocristallisées : le gypse lamellaire, le fer de lance, le gypse lenticulaire, la rose des sables, etc.;
- Sous formes microcristallisées ou granulaires : l'albâtre, le gypse fibreux, le gypse saccharoïde, le gypse éolien, le gypse pulvérulent, etc.

Le gypse est naturellement pur, il se trouve mélangé à des impuretés en nombre et proportions variables d'une carrière à l'autre : argile, calcaire, silice, dolomie, anhydrite, etc.

D'autres impuretés syncristallisées, présentes en quantités très faibles, colorent généralement les gypses naturels en rose, beige, gris, ... Halitime (1988).

II.2.3 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

Les deux propriétés les plus caractéristiques de ce matériau sont sa très faible dureté et sa solubilité : a priori, l'utilisation de ce granulat en construction routière ne pourrait conduire qu'à l'échec. Cependant, le manque de dureté est compensé par d'autres propriétés du gypse (durcissement après compactage et séchage). Quand à la solubilité, elle impose des limites très strictes à l'utilisation des sables gypseux dans les chaussées Razi Sabah (2006)

- Masse volumique : 2.31 kg/dm^3 ;
- Système cristallin : monoclinique;
- Dureté (sur l'échelle de Mohs) : 1.5 à 2 suivant l'orientation de la face cristalline;
- Solubilité : (en gramme de sulfate de calcium par kg d'eau)

| | | | | |
|----------------|------|------|------|-------|
| T C° | 3°c | 20°c | 38°c | 100°c |
| Solubilité g/l | 1.81 | 2.04 | 2.1 | 1.69 |

Cette solubilité dépend surtout des qualités d'autres sels dissous, chlorure de sodium *NaCl* en particulier Cherrak (2003), Horta (1979).

I. 2.4 COMPORTEMENT THERMIQUE

Le gypse se présente sous forme de deux minéraux : le **gypse** hydraté ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), et **l'anhydrite** CaSO_4 . Seul le premier semble exister dans les sols. C'est, surtout artificiellement, que des espèces plus ou moins déshydratées, apparemment stables, ont été obtenues, dont le type général serait le semi-hydraté $\text{CaSO}_4, 0,5 \text{H}_2\text{O}$. Vieillefon (1979)

L'allure des phénomènes de déshydratation dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels la température, et surtout la vitesse de chauffe, la tension de vapeur, et leurs interactions. En phase sèche, et sous tension normale, on observe en général, sur les courbes de déshydratation (perte de poids en fonction de la température), un palier correspondant au semi-hydraté. Ce palier apparaît pour le minéral pur vers $70\text{-}95^\circ\text{C}$, mais la déshydratation reprend dès 100°C et conduit plus ou moins rapidement à l'anhydrite. Pouget (1968)

Les premières mesures faites à la thermobalance montrent que la déshydratation peut commencer dès 40°C et s'accélère à partir de 60°C Weisen et al (1936) Figure 1.1.

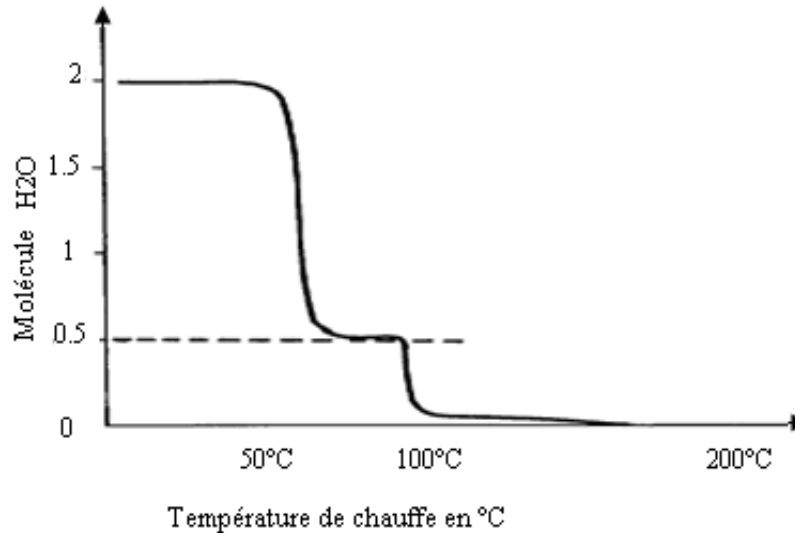


Fig 1.1 – Déshydratation du gypse à température croissante (Weisser et al. 1936)

Si on procède à une montée de température par paliers, on s'aperçoit que le passage au semihydraté ne s'effectue bien qu'à partir de 80 °C Eipeltauer (1958) ou même plus Pouget, (1968).

I.2.5 ORIGINE DES FORMATIONS GYPSEUSES

Au cours du quaternaire, le ruissellement a favorisé l'érosion de ces roches mobilisant ainsi une importante quantité de gypse qui s'est concentrée dans les sebkhas et les lagunes où il peut être remobilisé localement par des infiltrations latérales et alimenter les nappes déjà plus au moins séléniteuses Coque (1955).

L'eau de la nappe phréatique intervient en premier lieu dans l'élaboration des croûtes gypseuses par des mouvements verticaux et latéraux diffus. Les infiltrations se produisent lors des pluies. Les fortes chaleurs accompagnées de vents chauds engendrent une évaporation intense, une remontée capillaire des eaux enrichies en sels. La cristallisation du gypse se fait plus facilement que celle du calcaire. La continuité du phénomène est assurée par les fissurations de la partie superficielle en périodes sèches. Cela provoque de nouvelles infiltrations des eaux de surface et la réalimentation de la nappe.

Durant en 1953 distingue, en Algérie, les gypses pulvérulents et les encroûtements gypseux.

I.2.6 PROBLÈMES D'ANALYSE DES SOLS GYPSEUX

L'analyse des sols par les méthodes classiques se heurte à de nombreux obstacles dus à l'influence des propriétés physico-chimiques du gypse.

Parmi celles qui sont susceptibles de provoquer ces difficultés analytiques tout en ayant par ailleurs une forte influence sur leur pédogenèse Viellefon (1979) il y a :

- Sa solubilité limitée, mais variable en fonction de la saturation.
- Sa facilité de déshydratation et de réhydratation inférieure à celle des constituants minéraux habituels des sols
- Sa densité (ou poids spécifique)

I.2.6.1 Problèmes rencontrés lors de l'analyse granulométrique

- Les propriétés du gypse qui interviennent pour fausser l'analyse granulométrique par suite de floculation, de perte de poids et d'inadéquation des paramètres de prélèvement sont :
- La floculation partielle entraînant une sous estimation manifeste des fractions fines (argiles plus limons fins) en gonflant par ailleurs la fraction limon grossier obtenue par différence, après le tamisage des sables
- L'utilisation d'un poids spécifique théorique largement supérieur à celui du gypse a un effet contraire. Les prélèvements contiendront des particules de diamètres équivalents supérieurs à ceux que définissent les paramètres classiques.
- Le séchage à 105°C, en éliminant une partie de l'eau de constitution des particules gypseuses, conduit lui aussi à une sous estimation à la fois dans les fractions fines et dans les fractions grossières Viellefon (1979) propose dans le cas de l'analyse granulométrique, de traiter l'échantillon gypseux par le chlorure de baryum afin d'enrober les particules de gypse par mince film de sulfate de baryum pour empêcher la floculation, d'autre part il préconise de modifier les paramètres de prélèvement des fractions fines à la pipette en fonction de la teneur en gypse (modification de la constante de Stocks)

Enfin de ramener à 70°C maximum la température de séchage à l'étuve des diverses fractions.

I.2.6.2 Problèmes rencontrés lors de la mesure de l'humidité

La méthode classique de détermination de l'humidité d'un échantillon de sol gypseux (étuve ordinaire à la température de 105°C) donne des résultats erronés dans le cas des sols gypseux pour cela Pouget (1968) propose de retrancher environ 1/5 de la teneur en gypse de la perte d'eau à 105°C.

I.2.6.3 Problèmes rencontrés lors de l'analyse minéralogique

Dans certains minéraux de trop grande finesse, ou amorphes comme certains gels, la diffraction de rayons X devient incapable de donner des résultats précis.

Certaines variétés de l'argile appartenant à un groupe structural, par exemple montmorillonite type beidellite. Ici la diffraction de rayon X n'est pas adaptée pour différencier ces variétés de montmorillonite pour les quelles elle donne pratiquement les mêmes diagrammes. Voinovitch, (1971)

I.3 LES ENCROUTEMENTS GYPSEUX

I.3.1 FORMATION DES ENCROUTEMENTS GYPSEUX

Les gypses pulvérulents sont décrits comme étant des « dépôts lagunaires formés au moment de l'assèchement des lacs » (figure 1.2).

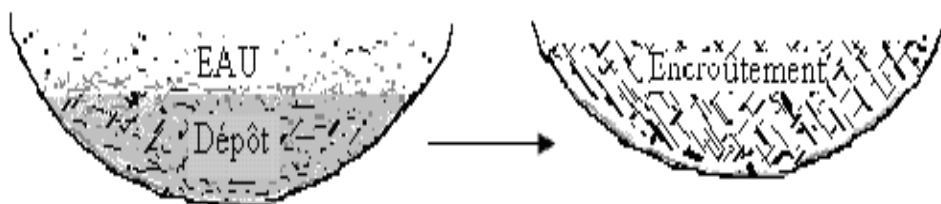


Fig 1.2 – Formation d'encroûtements gypseux par dépôt selon Durant, (1963)

Les encroûtements gypseux et salins se forment au dessus des nappes phréatiques, suffisamment près de la surface du sol pour subir une évaporation telle que la nappe se concentre et dépose des sels (Fig 1.3).

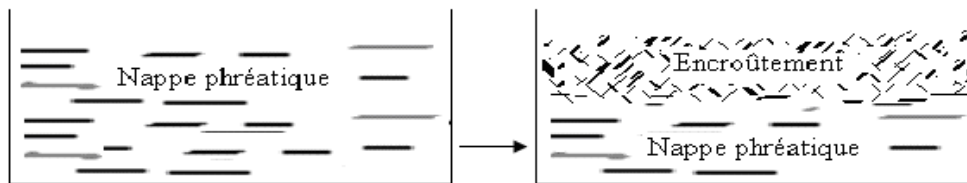


Fig 1.3 – Formation d’encroûtements par évaporation selon Durant (1963)

I.3.2 PROFIL D’UN ENCROUTEMENT GYPSEUX

Le profil d’un sol encroûté par le gypse présente généralement, de haut en bas, trois horizons principaux Horta (1979) (fig 1.4).

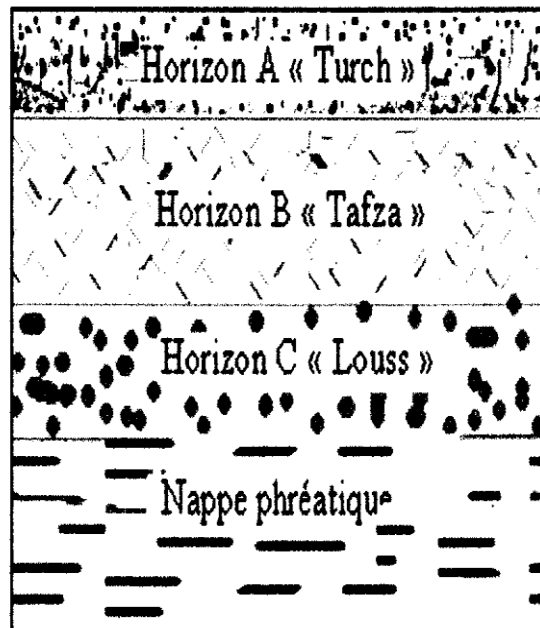


Fig 1.4 : Profil type d’un encroûtement gypseux

Horizon supérieur : A

Appelé (turch) en arabe, cet horizon a une épaisseur comprise entre 10 et 20 cm, il est l'équivalent de la terre végétale en zone tempérée. Cet horizon est caractérisé par l'abondance de racines gypsifiées et par un encroûtement discontinu en feuillets et granules, il est friable, poreux et souvent sableux.

Horizon massif ou pierre à plâtre : B

(Taffeza) en arabe, son épaisseur varie généralement entre 1 et 2 m, il vient juste après l'horizon supérieur. C'est un véritable grès à ciment gypseux, utilisé souvent comme pierre à bâtir à cause de sa dureté remarquable.

Horizon des roses de sable : C

A la base de l'horizon massif, l'encroûtement devient clair, humide et sableux. De gros cristaux de gypse imbriqués apparaissent « *Louss* » en arabe, la nappe est souvent de 50 cm à 1 m en dessous. Au contact direct de la nappe, le gypse cristallise en agrégats de cristaux larges et aplatis qui englobent des grains de sable.

I.3.3 DURCISSEMENT DES ENCROûTEMENTS GYPSEUX

L'hypothèse avancée jusqu'à présent pour expliquer le durcissement des encroûtements gypseux fait intervenir des ciments, en particulier calcaire et argileux Kulke (1974) ; Dekkich (1974). Il semble que cette explication ne soit pas tout à fait satisfaisante puisque d'une part on constate expérimentalement que l'élimination par voie chimique de ces ciments n'affecte pas la cohésion de l'encroûtement gypseux, et d'autre part que des encroûtements gypseux se sont formés dans un matériau presque uniquement quartzéux. Une explication de ce durcissement peut être suggérée par l'observation en MEB de ces niveaux très pauvres en calcaire et en argile. Il n'y a presque jamais un contact serré entre l'argile ou la calcite d'une part et le gypse d'autre part.

Dans les encroûtements gypseux, les cristaux plus gros présentent des 'échancrures' où viennent s'incruster les lentilles de gypse reliées à leur tour à d'autres cristaux formant ainsi une sorte de charpente (constituée de macles) emprisonnant différents constituants (gypse, quartz, argile, calcite). La liaison des cristaux de gypse semble être due à des processus de dissolution et de croissance cristalline ou de nucléation qui diluent et repoussent le matériau d'accueil. Halitim, (1985)

I.3.3.1 Résumé synthétique de l'étude du phénomène de durcissement du tuf gypso-calcaire de Hassi - Messaoud

Les tufs d'encroûtements sont des matériaux dotés de cohésion qu'ils acquièrent après compactage puis dessiccation prolongée. C'est ce durcissement, appelé aussi auto-stabilisation, qui a permis leur utilisation en corps de chaussée malgré des caractéristiques géotechniques qui s'écartent des spécifications usuelles des pays tempérés Alloul (1981) ; Ben-Dhia (1983) ; Fumet (1959) ; Peltier (1959) ; Améraoui (2002) Morsli (2007).

Le durcissement est quantifié par l'essai de compression simple. L'analyse des facteurs influents sur le durcissement se rapporte généralement à l'étude de l'impact des facteurs en question sur la résistance à la compression simple.

Le but de l'étude expérimentale portant sur le durcissement d'un tuf gypso-calcaire de Hassi-Messaoud, Améraoui (2002) Morsli (2007) est d'analyser l'impact des facteurs environnementaux sur la cohésion et le durcissement.

La procédure suivie, lors de l'étude citée ci-dessus, est en partie dictée par le souci d'apporter une explication probable sur l'origine du durcissement.

a/ Procédure suivie

Les éprouvettes ont été confectionnées avec des éléments dont le diamètre des grains est inférieur à 2 mm, à différents teneurs en eau et portées à la densité Proctor modifiée. L'essai retenu pour évaluer la cohésion est l'essai de compression simple. Il est réalisé à l'aide d'une presse CBR. Le chargement est appliqué à vitesse constante à raison de 0.5 mm/min. La charge maximale est relevée directement à partir du dispositif expérimental.

Etant donné la quantité importante d'échantillons à tester, nous avons réalisé un moule de dimensions réduites, de 2.2 cm de diamètre et 4.4 cm de hauteur, équivalent au moule standard sol-ciment.

Les échantillons sont conservés selon deux modes :

Mode avec dessiccation : les échantillons sont placés, après démoulage, dans une étuve ventilée, chauffée à 40°C.

Modes sans dessiccation : les échantillons sont placés dans la même étuve en prenant soin de les envelopper, juste après démoulage, dans du plastique de congélation en polypropylène.

b/ Les paramètres arrêtés

Les paramètres arrêtés à l'issue du choix de la procédure d'analyse sont les suivants :

- Six teneurs en eau de confection: 0 ; 3 ; 6 ; 8 ; 11 et 13 %, chaque teneur en eau représente une série.
- Cinq durées de conservation : 1 ; 4 ; 7 ; 14 et 28 jours par teneur en eau.
- Deux modes de conservation : avec et sans dessiccation

Deux options pour le mode avec dessiccation avaient été retenus : à l'air libre et à l'étuve. Mais les premiers résultats ont montrés de grandes similitudes entre les résultats des deux options. Ainsi la conservation à l'air libre a été abandonnée.

Chaque série comporte trois échantillons par durée de conservation soit 15 éprouvettes. Elle est doublée par une série équivalente pour assurer les deux modes de conservation. Au total près de 300 éprouvettes ont été confectionnées.

Le « *mode avec dessiccation* » permet au durcissement de s'opérer dans ses deux phases (formule 1). Ce mode permet d'analyser la variation du durcissement ($R_{\text{durcissement}}$) en fonction de la teneur en eau pour différentes durées de conservation (fig 3.9 a et c).

Le « *mode sans dessiccation* » empêche l'eau de s'évaporer. La composante liée à la dessiccation est donc freinée. Il permet d'analyser l'évolution de la cohésion obtenue par compactage ($R_{\text{compactage}}$), en fonction de la teneur en eau de confection pour différentes durées de conservation (fig 3.9 b et d).

La « *différence entre les deux composantes* » donne la résistance de dessiccation $R_{\text{dessiccation}}$ (fig3.10).

c/ Résultats obtenus

Cette approche a permis de « disséquer » la mode de durcissement par l'analyse de l'évolution macroscopique de la cohésion (R_c) à différentes durées et modes de conservation.

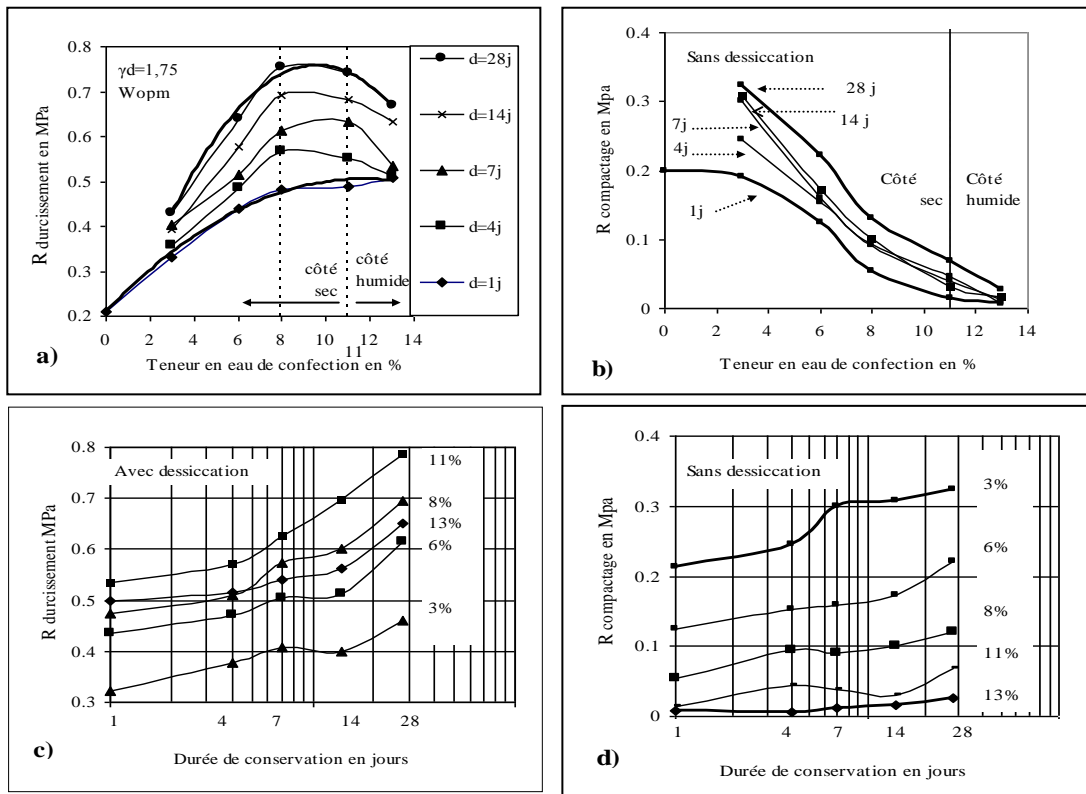


Fig 1.5 – Evolution de la cohésion sous l'effet de la durée de conservation et de la teneur en eau de confection :

- a) Influence de la teneur en eau de confection sur la $R_{durcissement}$ (avec dessiccation)
- b) Influence de la teneur en eau de confection sur $R_{compactage}$ (sans dessiccation)
- c) Influence de la durée de conservation sur $R_{durcissement}$ (avec dessiccation)
- d) Influence de la durée de conservation sur $R_{compactage}$ (sans dessiccation)

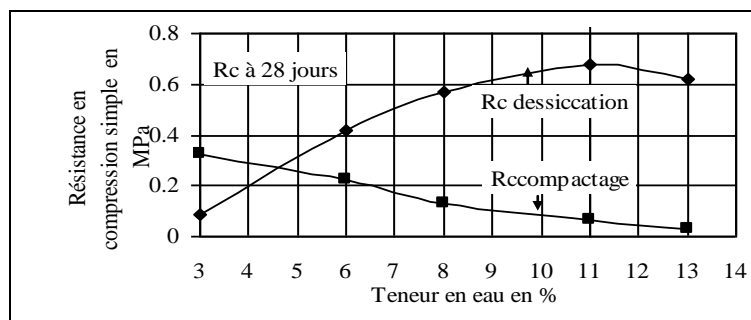


Fig 1.6 : Variation de chacune des deux composantes à 28 jours de conservation

ON CONCLU

- Lorsque les éprouvettes sont soumises à la dessiccation, la résistance évolue avec le temps. Cette évolution s'opère principalement entre 7 et 28 jours et se poursuit au-delà quelle que soit la teneur en eau de confection.
- La chaleur précipite le durcissement mais ne l'améliore pas.
- A une teneur supérieure à Wopm, le durcissement ne s'opère pas.
- Le compactage à sec du tuf gypso-cacaire n'est pas à envisager.
- Il existe une teneur en eau optimale, inférieure à Wopm, pour laquelle le durcissement est optimal : la valeur de cette teneur peut être expliquée par le mode d'évolution de chacune des deux composantes de durcissement.
- L'évolution de la cohésion macroscopique tend vers une explication par un changement minéralogique ou une dissolution partielle des carbonates et du gypse, formant un soluté dont la concentration augmente lors de l'évaporation provoquant une recristallisation des fractions dissoutes.

I.3.4 EXTENSION GÉOGRAPHIQUE DES ENCROÛTEMENTS GYPSEUX

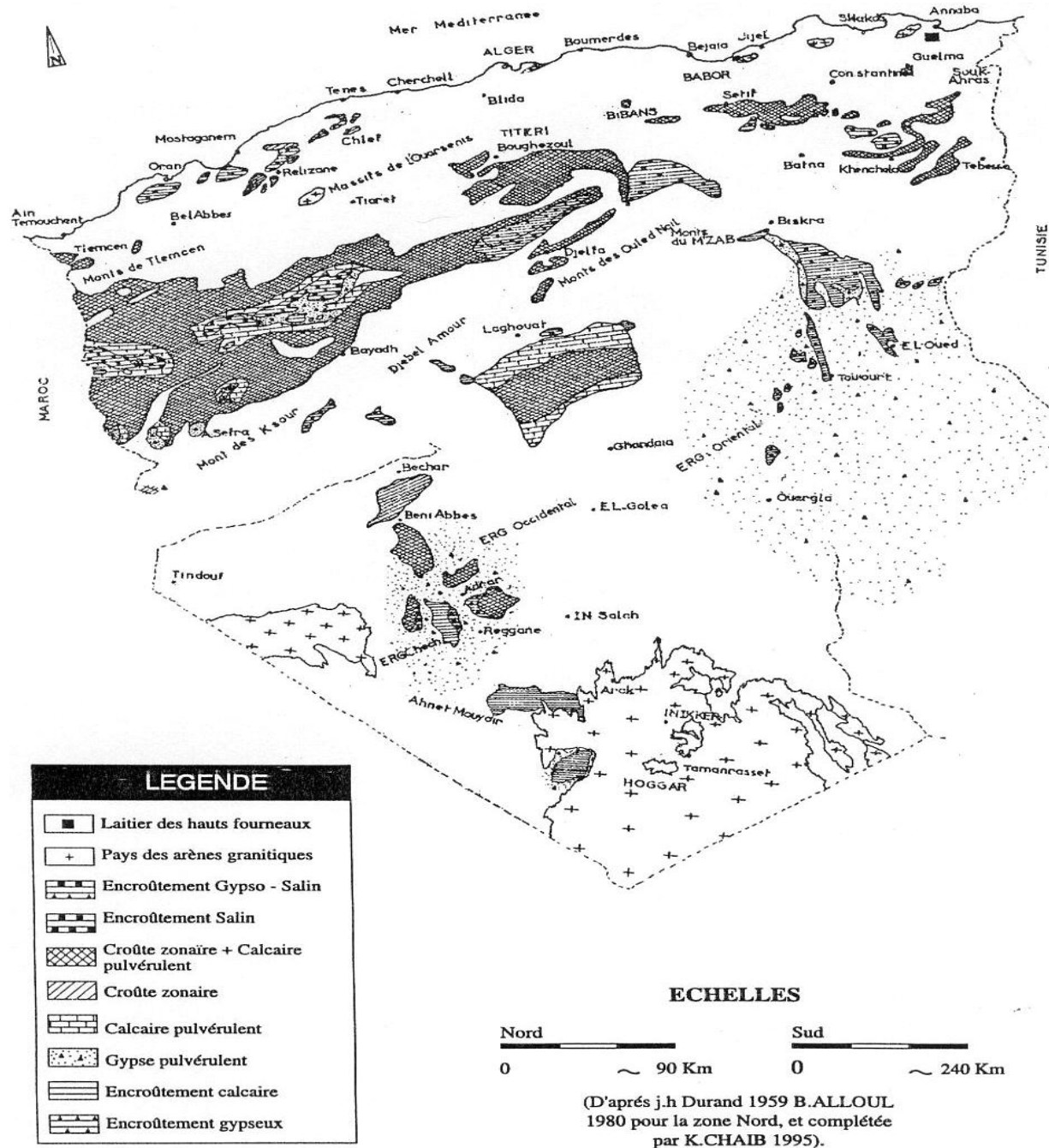


Fig 1.7 : Répartition des encroûtements en Algérie

Les encroûtements gypseux fréquents dans le sud d'Algérie (région de Souf de l'oued Righ et à Touggourt) et dans la région de Breziane des grands chotts et de nombreuses sebkhas.

Les gypses pulvérulents sont localisés dans la partie sud du chott Chergui El-Merrir Razi Sabah (2006). A l'étage aride les taux de gypse sont assez élevées, ainsi Horta (1980) montre que les croûtes gypseuses se localisent en Afrique du nord et particulièrement en Algérie, Au Sahara les accumulations gypseuses sont très répandues et ne sont pas étudiées. FAO (1990).

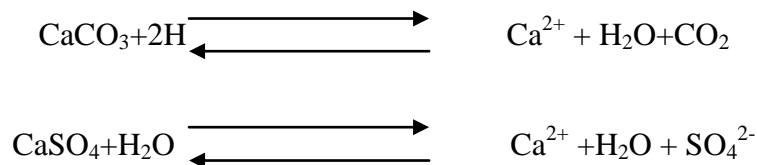
D'après le Durand (1953), (fig 1.5), les tufs gypseux couvrent une grande surface du nord et presque toute la superficie nord-est.

I.3.5 RELATION GYPSE-CALCAIRE

La plupart des sols gypseux contiennent des carbonates de calcium à différentes teneurs. En effet, les teneurs en carbonates de calcium diminuent quand celle du gypse augmente. Le gypse lessive, car sa solubilité est importante, il s'accumule en profondeur et forme des horizons gypseux, le calcaire très peu soluble reste dans la partie médiane du profil formant des individualisations visuelles.

Dans les zones arides d'Algérie, le gypse est toujours postérieur à la calcite, la pression de cristallisation du gypse détruit les individualisations calcaires par suite de l'arrivée continue de solution sulfo-calcique et la précipitation de cette dernière à ce niveau Halitim (1985).

Dans le système gypso -calcaire avec l'ion Ca^{2+} en commun, la solubilité des deux minéraux et la composition ionique de la solution en équilibre sont dominés par le produit de la solubilité simultanée des deux réactions suivantes



L'augmentation du taux de gypse entraîne la diminution de la teneur en calcaire et vis-versa Boyadjiev (1974)

Lorsque le calcaire est sous forme de sable, de cristaux individualisés ou d'amas, la relation est moins prononcée.

Quand le gypse et le calcaire se trouvent sous forme de poudre tendre, la relation entre eux est bonne.

En cas de présence des sels solubles, la teneur en calcaire reste faible et ne présente pas une bonne relation avec le gypse.

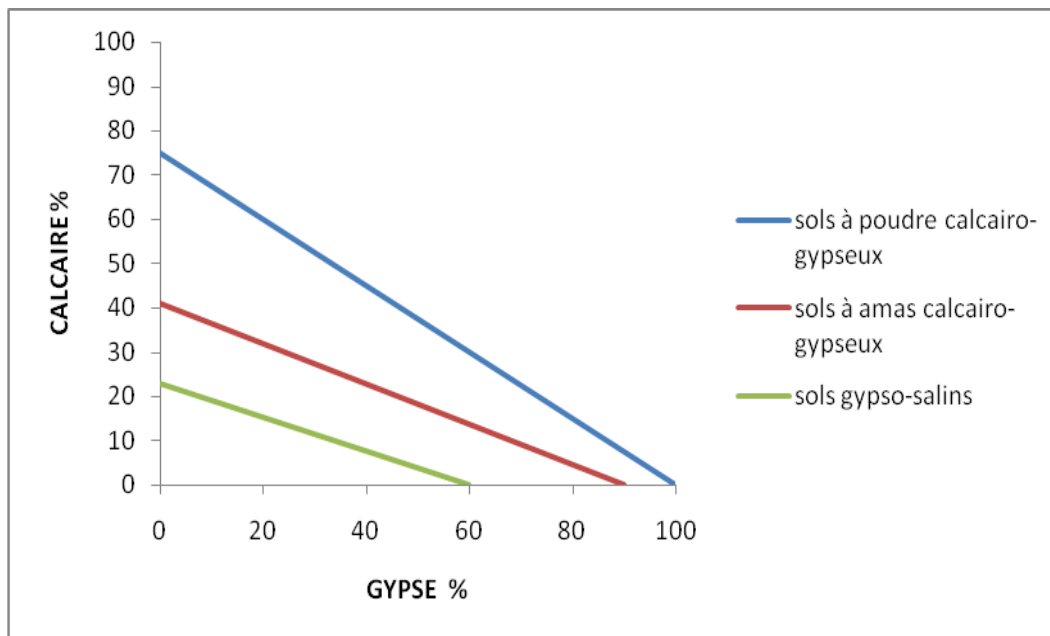


Fig 1.8 : Relation gypse-calcaire d'après BOYADJIEV, (1974)

I.3.6 DISTRIBUTION COMPARÉE DU GYPSE ET DU QUARTZ DANS UN ENCROûTEMENT GYPSEUX

La liaison des cristaux de gypse semble être due à des processus de dissolution et des croissances cristallines ou de nucléations qui diluent et repoussent le matériau d'accueil, ceci apparaît à l'examine des profils quartzeux des sols et encroûtements gypseux.

Tableau 1.1 : Distribution du gypse et du quartz dans un sol gypseux des régions arides d’Algérie Halitim, (1988).

| Profondeur (cm) | Gypse (%) | Quartz (%) |
|-----------------|-----------|------------|
| 0 | 10 | 20 |
| 15 | 20 | 40 |
| 30 | 45 | 35 |
| 60 | 75 | 20 |
| 90 | 60 | 50 |
| 120 | 5 | 80 |

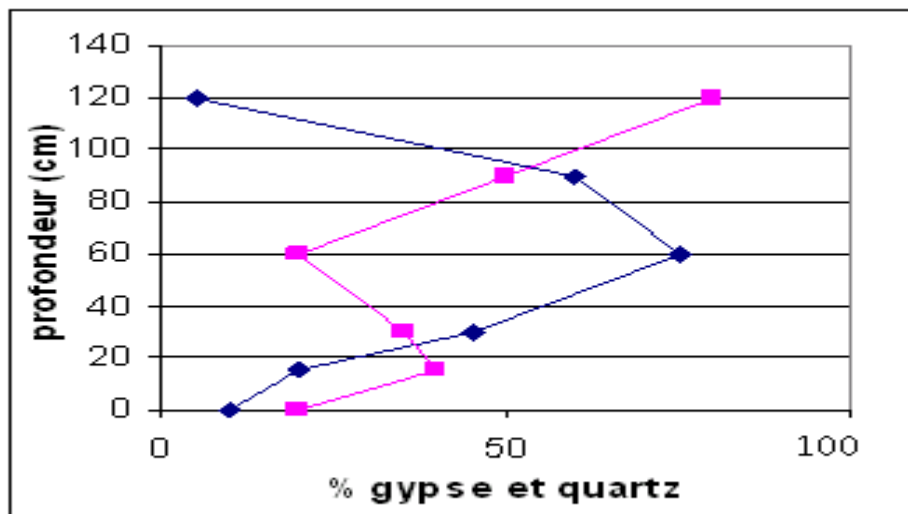


Fig 1.9 Distribution du gypse et du quartz dans un sol gypseux

La concentration du gypse coïncide toujours avec une forte diminution du quartz par rapport aux horizons sus-jacents Halitim (1988).

I.4 LES SABLES GYPSEUX

Les encroûtements dits « tendres » sont les principaux gisements de tufs gypseux, appelés plus couramment « **sables gypseux** » car ils se débitent en sables dès les premières manutentions. C’est uniquement cet horizon qui a un intérêt en construction routière.

Les encroûtements tendres ne se différencient des encroûtements massifs que par la dureté. L'éloignement de la nappe phréatique a souvent été observé dans ces cas mais n'est pas une règle générale applicable à tous les gisements.

La friabilité de ces encroûtements serait due :

- Soit à un manque de maturité de l'encroûtement. La proximité et la fluctuation de la nappe phréatique prouvent que sa porosité n'est pas entièrement masquée par les cristallisations.
- Soit à un vieillissement de la croûte. La nappe étant très profonde, la régénération ne se fait plus. Les infiltrations superficielles augmentent sa porosité et diminuent sa cohésion.

Le sable gypseux est en général composé d'éléments fins, une partie peut être agglutinée en modules friables mais d'une faible pression, Leur composition chimique montre souvent la présence de gypse (CaSO_4), de calcaire (CaCO_3) et de sable siliceux en proportion variable mais celle du gypse est prédominante. Les gypses se présentent souvent en sable dont les grains ont un diamètre compris entre 0.1 et 2 mm, mélangés à des blocs assez gros, chaque grain est une agglutination de cristaux microscopiques, il peut se présenter aussi des cristaux plus grands allant jusqu'à 5 mm, dans ce cas, Il n'acquiert pas de cohésion au compactage et séchage et ne doit pas être utiliser en corps de chaussées Horta (1979).

Le sable gypseux formé aux alentours des chotts contient une proportion plus au moins importante de sel (chlorure de sodium).

I.5 CONCLUSION

Les encroûtements gypseux sont des formations superficielles du quaternaires. Ils occupent les régions à climat hyperaride où le gypse existe déjà dans des formations géologiques anciennes. Les fluctuations de la nappe phréatique ainsi que l'évaporation de la frange capillaire entraînent le dépôt du gypse. Les encroûtements tendres, d'extractions faciles sont utilisés comme matériaux de chaussée et appelés « sables gypseux ».

Le gypse, principal composant actif du sable gypseux, est caractérisé par sa très faible dureté et sa grande solubilité. Sa déshydratation peut commencer dès 40°C et s'accélère à partir de 60°C. Le passage au semi-hydraté ne s'effectue bien qu'à partir de 80 °C. L'anhydrite est obtenue à partir de 100°C. Ce qui expliquerait l'absence de cette forme dans la nature même en zone hyperaride.

Les encroûtements dits « tendres » sont les principaux gisements de tufs gypseux, appelés plus couramment « sables gypseux » car ils se débitent en sables dès les premières manutentions. C'est uniquement cet horizon qui a un intérêt en construction routière.

CHAPITRE II

LES SABLES GYPSEUX : CARACTÉRISTIQUES, CLASSIFICATION ET UTILISATION ROUTIÈRE

II. 1 CARACTÉRISTIQUES GÉOTECHNIQUES ET MÉCANIQUES

Les sables gypseux font partie de la grande famille des tufs d'encroûtements. Ils présentent des caractéristiques très dispersées en fonction du gisement d'où ils sont extraits, de la profondeur d'extraction, de l'échantillonnage ...

Les sables gypseux ont fait l'objet d'essais en laboratoires qui visent à déterminer leurs caractéristiques géotechniques. Ces données sont destinées d'une part à identifier le matériau et d'autre part à prévoir leur comportement vis-à-vis des sollicitations qu'ils auront à subir en corps de chaussée.

II.1.1 CARACTÉRISTIQUES DES SABLES GYPSEUX: IDENTIFICATION ET COMPORTEMENT

Les essais d'identification sont quasi les mêmes que pratiqués sur les autres sols avec néanmoins quelques adaptations et une détermination systématique de la teneur en gypse et en carbonate.

II.1.1.1 Granulométrie

La granulométrie humide (pour disloquer les granules de gypse) effectuée sur un échantillon de sable gypseux et celle d'un sable plus au moins grossier selon le degré de finesse d'éléments constituant l'échantillon.

II.1.1.2 Analyses Chimiques

Les analyses chimiques réalisées sur des échantillons du matériau montrent la prédominance du gypse dans la constitution de matériau (20 à 90 %).

Les carbonates sont souvent présents, mais à faible pourcentage de 1 à 10%, cette calcite cristallise en fines particules disséminées dans les encroûtements gypseux, ne se trouve jamais en granulats ou nodules de la taille du centimètre ou du millimètre. Alloul (1981)

En plus de la teneur en sulfate et carbonate, le taux de chlorure sous forme de Na Cl est déterminé. Leur présence est nocive et très limitée dans les matériaux choisis en corps de chaussées (Na Cl < 0.5%) Colombier (1988).

II.1.1.3 Limites d'Atterberg et Equivalent de Sable (ES)

En effet les matériaux tufs présentent des indices de plasticité IP plus faibles, cette faible valeur de IP due à un pourcentage d'argile fibreuse faible, mais constant et adéquat, car il donne une certaine cohésion, sans tout de même excéder à une plasticité qui le rend impropre à l'utilisation routière, notamment dans les zones climatiques subhumide et semi-arides Alloul (1981)

Parfois l'indice de plasticité (IP) est généralement non mesurable et l'équivalent de sable (ES) n'a pas de signification pour les sables gypseux lorsque la teneur en éléments inférieur à 0.080mm qui sont entre 10 à 80%. Cette proportion des fines influe considérablement sur la valeur de l'équivalent de sable ES Colombier (1988).

II.1.1.4 Essai au bleu de méthylène

Cet essai a pour but de déterminer l'activité globale de la fraction argileuse, il est réalisé sur la fraction 0/2mm ;

L'essai au bleu de méthylène peut conduire à une analyse plus fine de l'argile, contenue dans les tufs encroûtement, et pourrait se révéler un bon indicateur de la plasticité et de la réactivité des fines Amraoui (2002).

II.1.1.5 Essai Proctor modifié

L'essai Proctor modifiée a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible.

Cet essai est appliqué lorsque le matériau est destiné à être utiliser en corps de chaussée.

L'essai Proctor modifié réalise sur les matériaux gypseux est effectué de la manière classique.

Les caractéristiques PROCTOR obtenue s'étalent entre :

$$7\% < W_{opm} < 15\% \quad \text{pour la teneur en eau}$$

$$1.62 < \gamma_{d\ opm} < 1.90 \quad \text{pour la densité sèche}$$

Les courbes OPM sont relativement plates pour les tufs gypseux non plastique ($IP < 5$), et la densité optimale est peu influencée par la variation de la teneur en eau Colombier (1988).

II.1.1.6 Essai C.B.R

Les essais CBR immédiates pour les sables gypseux (réalisés à la teneur en eau OPM sans imbibition) ont donné de fortes valeurs jusqu'à 120% avec une moyenne de 40%. Mais après l'imbibition de 04 jours L'indice CBR peut chuter jusqu'à 08%

En fait l'imbibition de 04 jours réalisée usuellement n'est pas applicable en climat désertique où on admet généralement qu'une imbibition de 04 heures est suffisante. (LTPS)

II.1.1.7 Essai de Compression Simple

Cet essai nous a permis d'estimer la cohésion du matériau est effectuée par moulage et serrage du matériau à la presse aux conditions de l'optimum PROCTOR dans un moule du type sol-ciment.

L'écrasement se fait à une teneur en eau finale de 2 à 0 %. Les résultats obtenus varient dans les limites.

$$3 \leq RC \leq 40 \text{ (Kg /Cm}^2\text{)}$$

II.1.2 TABLEAU RÉCAPITULATIF DES CARACTÉRISTIQUES D'IDENTIFICATION ET DE CARACTÉRISATION DES SABLES GYPSEUX

Les résultats consignés dans ce tableau sont un récapitulatif des différents travaux effectués par Alloul (1981); Colombier (1988) ; LTPS (2005)

Tableau 2.1 – Récapitulatif des caractéristiques géotechniques et mécaniques des sables gypseux.

| Sables gypseux (40% à 90% de gypse et moins de 10% de calcaire) | | |
|---|---------------|-------------------------------------|
| Valeur Los Angeles | | Non mesurable |
| Granulométrie | | Matériau fin à pulvérulent |
| Limites d'Atterberg | | Ordre de 6% |
| Equivalent de sable | | Sans signification |
| Valeur au bleu | | 0.3 et 0.4 |
| Essai Proctor | Densité sèche | $1.60 < \gamma_d < 1.90$ |
| | Teneur en eau | $8 \% < W_{opm} < 20\%$ |
| Essai CBR | Immédiat | Jusqu'à 112 avec une moyenne de 40. |
| | Imbibé | Peut chuter jusqu'à 8 |
| Essai Compression simple | | entre 3 et 50 bars |

II.2 COMPORTEMENT DU SABLE GYPSEUX EN LABORATOIRE

D'après la littérature consultée, les caractéristiques mécaniques des sables gypseux peuvent être influencées à la fois par la nature minéralogique des matériaux (% de gypse), le pourcentage de fines (éléments < 0.08mm), les conditions de mise en œuvre (taux de compactage, teneur en eau de compactage) et les conditions d'exploitation (teneur en eau sous chaussée, trafic..).

Pour faire le point sur l'influence des ces différents facteurs sur le comportement du sable gypseux, nous présentons les résultats d'une étude menée, par nos soins, à partir de données recueillies au Laboratoire Travaux Publics Sud. Cette étude est suivie d'un complément bibliographique.

II.2.1 INFLUENCE DU TAUX DE SULFATES ET CARBONATES ET DU TAUX DE FINES SUR LA RESISTANCE DE SABLES GYPSEUX DE LA RÉGION D'OUARGLA

Dans le cadre de la préparation de ce mémoire, nous avons effectué un séjour au Laboratoire de Travaux Public Sud. Les portes du laboratoire et celle de la salle des archives nous ont été ouvertes.

II.2.1.1 Choix des fiches techniques

Dans un premier temps, nous avons retiré des étals de la salle d'archive, tous les documents ayant trait aux matériaux issus d'encroûtements (tufs- calcaire, tufs gypso-calcaire et sables gypseux).

Chaque dossier comporte une fiche technique incluant : l'analyse chimique, la courbe granulométrique, les résistances à la compression simple à 95 ; 98 et 100% de compacité ainsi que les caractéristiques de compactage (densité et teneur en eau optimale, Proctor modifié).

Comme il n'y'a pas de consensus autour de la définition d'un sable gypseux. Nous avons opté pour la proposition d'Alloul (1981) qui définit un sable gypseux comme un tuf d'encroûtement contenant plus 10% de gypse et de moins de 10% de calcaire le reste étant des insolubles (quartz).

Sur la totalité des matériaux répertoriés 37 correspondent à cette définition. Leur résistance varie de 2.5 à 30 bars. Le taux de carbonates et sulfates de 18 à 85%. Le taux de fines oscille entre 6 et 50%. Ils sont numérotés, de 1 à 37 par ordre de résistance croissante.

II.2.1.2 Influence de taux de sulfate et de carbonates sur la résistance à la compression

L'observation des graphes de la fig 2.1 ne laisse percevoir aucune tendance quant à l'influence du taux de sulfates et carbonate ou du taux de fines sur la résistance.

On peut noter que :

- ❖ Des matériaux présentant des résistances relativement proches, ont un taux de sulfates et carbonates très différents (18 % à 75% pour les matériaux 3 à 10 sur la fig 2.1)
- ❖ Des matériaux présentant un fort pourcentage de gypse et carbonate (78%) présentent une résistance très faible (moins de 5 bars).

- ❖ Seuls les matériaux ayant plus de 50% de sulfates et carbonates ont une résistance supérieure à 15 bars.
- ❖ Le taux de fines oscille entre 5% et 30% pour les 22 premiers matériaux sans pour autant noter d'irrégularités dans l'allure de la courbe de résistance.
- ❖ La résistance de certains matériaux (N° 22, 23 et 24 notamment) présentant un taux de carbonates dépassant les 70% n'est pas affectée par le taux de fines qui lui varie du plus bas niveau au taux maximal (6 à 50%).

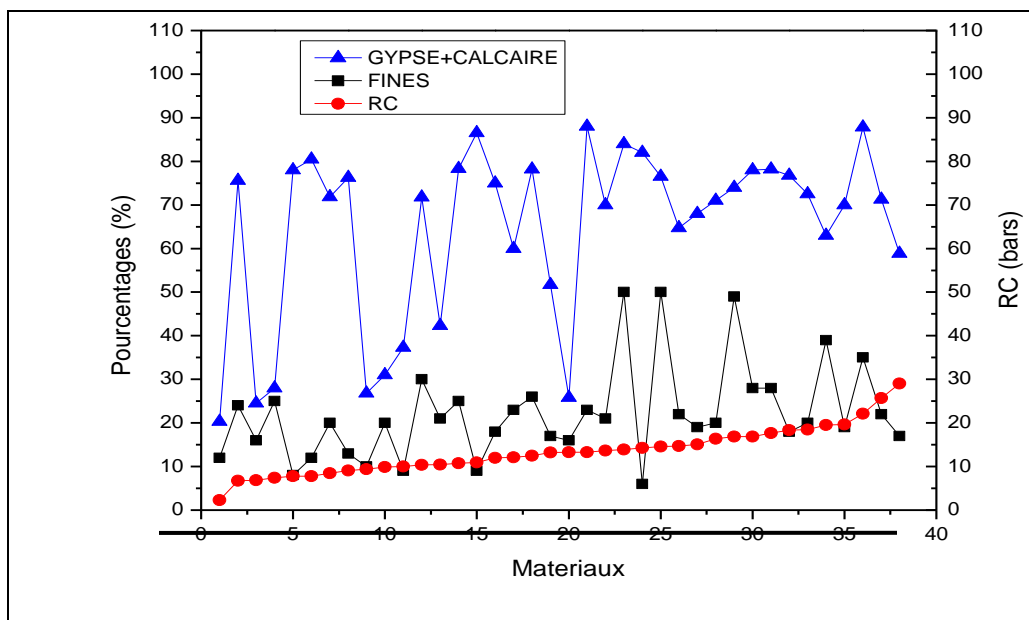


Fig 2.1 : Influence de taux de sulfate et de carbonates et du taux des fines sur la résistance à la compression

II.2.1.3 .Influence du pourcentage de fines sur la résistance à la compression

La fig 2.2 suivante donne la résistance des différents matériaux classés par ordre de taux de fines croissant.

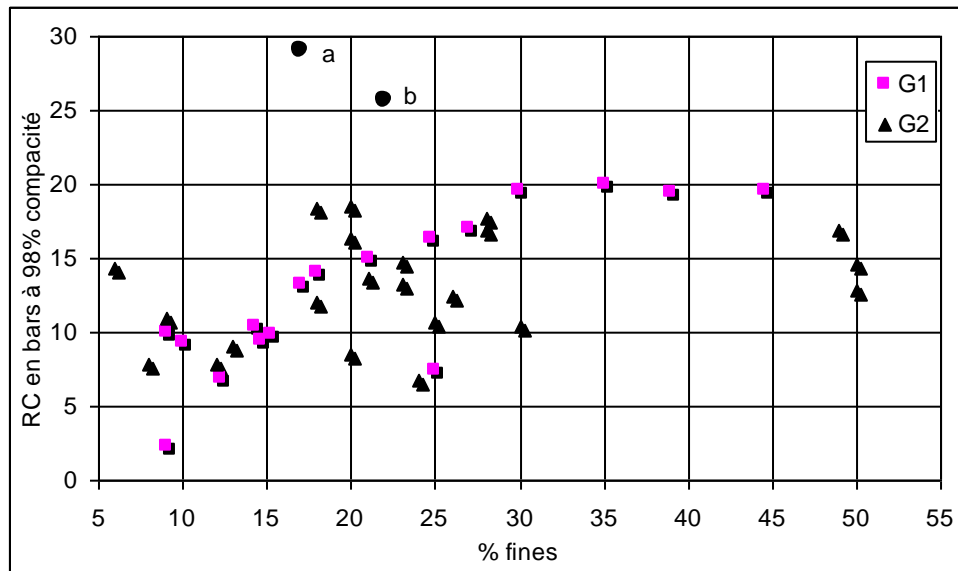


Fig 2.2 : Influence du pourcentage de fines sur la résistance à la compression

L'influence du taux de fines semble se confirmer pour les matériaux du groupe **G1**.

Pour un pourcentage élevé, la résistance augmente en même temps qu'augmente le taux de fines, puis tend vers une asymptote à 30% de fines.

Aucune tendance ne se dessine pour le groupe **G 2**.

Pourtant, l'essentiel des sables gypseux qui intéressent les ingénieurs routiers se situent dans le groupe G2

On conclut :

- ❖ Aucune relation entre la résistance à la compression simple et la teneur en gypse n'a pu être établie.
- ❖ Il est à remarquer qu'un sable gypseux à teneur en gypse plus carbonaté, dépassant les 90% peut donner de faibles résistances.
- ❖ Cependant, aucune bonne résistance (plus de 20 bars) n'a pu être obtenue avec moins de 50% de gypse + carbonate de calcium.
- ❖ Le taux de plus de 30% de fines semble être écarté bien plus pour des problèmes pratiques de mise en œuvre du matériau (compactage difficile, teneur en eau optimale élevée) que pour son influence sur Rc.

II.2.2 COMPLÉMENT BIBLIOGRAPHIQUE

II.2.2.1 Influence de la compacité sur la résistance à la compression simple

❖ D'après les rapports d'analyses des matériaux gypseux on a retenu uniquement ceux qui ont la proportion de gypse supérieure ou égale 50% pour les trois cas des taux de compacités (95%, 98%, 100%) à partir de ces données nous avons représenté la courbe indiquant la relation entre la résistance à la compression et la compacité de tous les matériaux analysés.

❖ A travers la courbe obtenu fig 2.3 nous concluons que :

❖ La résistance à la compression des matériaux analysés est nettement proportionnelle aux taux de compacité.

❖ La courbe tendance des résistances à la compression correspond à 98% de la compacité est située au dessus du niveau de 15 bars valeur limite pour les matériaux gypseux utilisés en corps de chaussée.

❖ Il est donc tout à fait démontré que la compacité est l'un des critères de sélection des sables gypseux (Basliman, 1994)

L'étude de l'influence de la compacité sur la résistance à la compression indiquée sur la fig 2.4 ci-dessous selon (Baslimane, 1994) sur deux sables gypseux de deux régions différentes enrichissent que:

❖ La relation établie entre la résistance à la compression simple et la compacité est linéaire et croissante, autrement dit, il est tout à fait indiqué de pousser le compactage de la couche exécutée pour en tirer le maximum de performance.

❖ La relation entre la résistance à la compression et la compacité est varie d'un matériau à un autre ce qui montre que les caractéristiques géotechniques de compactage des matériaux gypseux variées d'un gisement à l'autres.

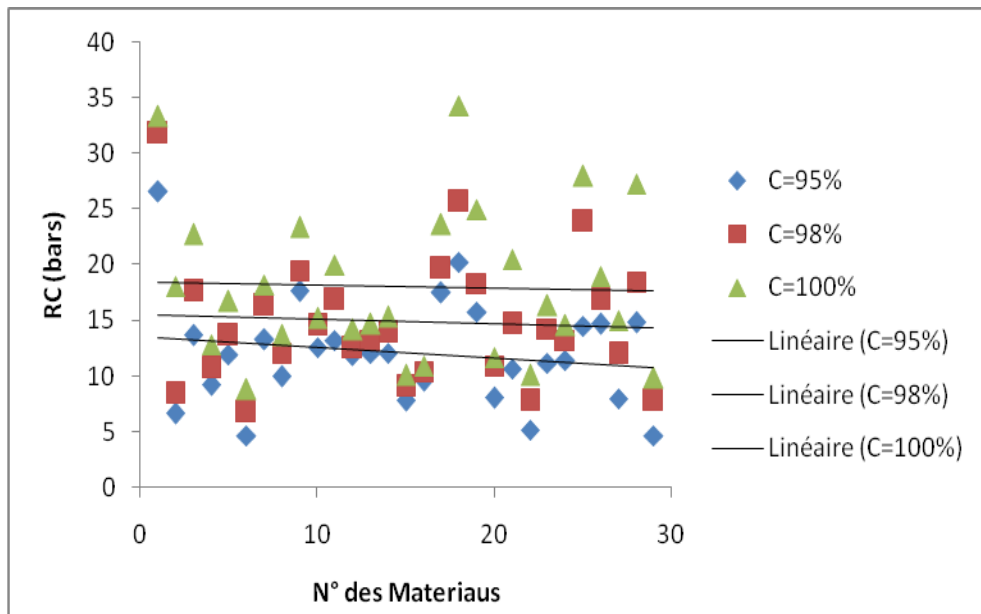


Fig 2.3 : Influence de la compacité sur la résistance à la compression de différents matériaux (Analyse des matériaux LTPS)

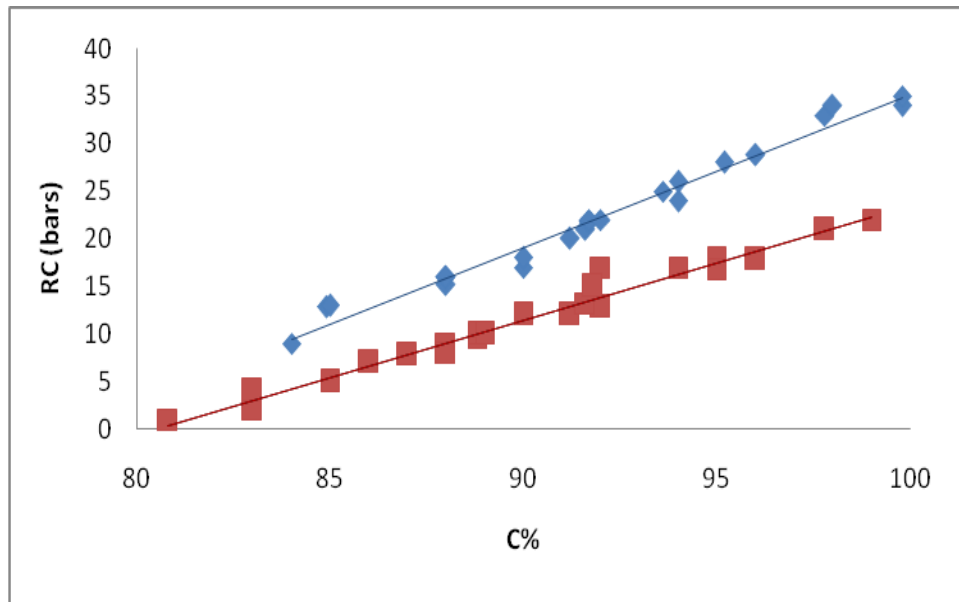


Fig 2.4 : Influence de la compacité sur la résistance à la compression pour le sable gypseux deux régions différentes (El-oued, Touggourt) Baslimane (1994)

II.2.2.2 Influence de la teneur en eau résiduelle sur la résistance à la compression simple

La résistance à la compression simple chute considérablement lorsque la teneur en eau passe de 0% à 4%, il a été donc conclu qu’une imbibition de quelques heures peut augmenter fortement la déformation des chaussées d’un sable gypseux.

Le durcissement du sable gypseux est très sensible à l’humidité, dès que le matériau passe de l’état sec à l’état humide (3% d’eau) on perd entre 45% à 80% de sa résistance. (B Kharfi)

Selon Fanzly (1970) la valeur nécessaires de la résistance à la compression simple du matériau gypseux en construction de chaussées est 25bars ce qui correspond à une teneur en eau finale de 7%, cela indique que pour une meilleure chaussée en sable gypseux, la teneur en eau finale doit être toujours inférieure à 7% pour une meilleure tenue du corps de chaussée (fig 2.5)

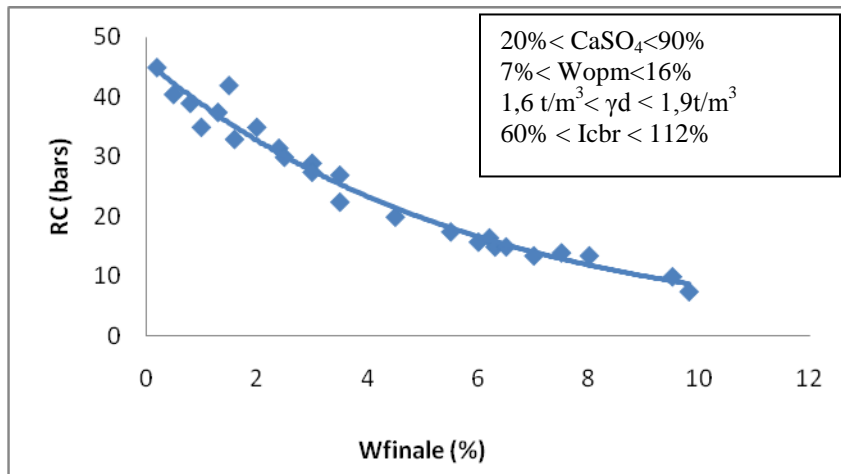


Fig 2.5 : Résistance à la compression en fonction de W (%) finale, (Gerbouz, 1985)

II.2.2.3 Influence de la teneur en eau résiduelle Wf sur le module d’élasticité E

Dans le dimensionnement des chaussées, un facteur important intervient lors des calculs, pour déterminer les épaisseurs respectives de la couche de fondation, de la couche de base et du revêtement. Il s’agit du coefficient d’équivalence noté (a) et ayant pour expression :

$$a = \sqrt[3]{E/5000}$$

Où E (bars) est le module d’élasticité du matériau. Il est donc clair que le coefficient d’équivalence dépend du module d’élasticité (E), et ce dernier dépend de la courbe effort-déformation.

La relation entre le module de déformation calculé à partir des courbes effort-déformation et la teneur en eau résiduelle montre que la déformabilité de la chaussée en sable gypseux est très influencée par l'eau, ainsi la valeur du module de déformation chute de 3600 bars à 450 bars lorsque la teneur en eau passe de 0% à 4% (fig 2.6)

Il a été conclu que les sables gypseux sont des matériaux routiers très sensibles à l'eau Basslimane (1994) Gerbouz (1985)

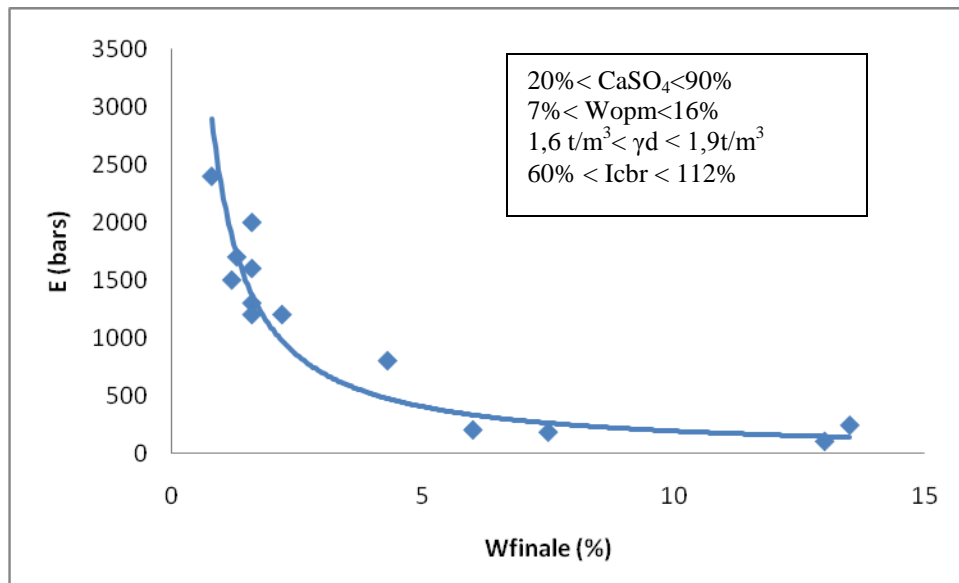


Fig 2.6: Module de déformation en fonction W (%) finale (Baslimane, 1994)

II.2.2.4 Influence du taux de gypse sur l'indice CBR

❖ Sur la totalité des dossiers techniques répertoriés en laboratoire LTP Sud, on a retenu uniquement ceux qui ont la proportion de gypse supérieure ou égale 50%, les résultats obtenus sont représentés dans la courbe (fig 2.7) L'observation du graphe ne laisse percevoir la tendance entre le taux de gypse et l'indice CBR.

❖ La majorité des matériaux gypseux ont un indice CBR supérieur à 40 %. Alloul (1981), Fanzly (1970).

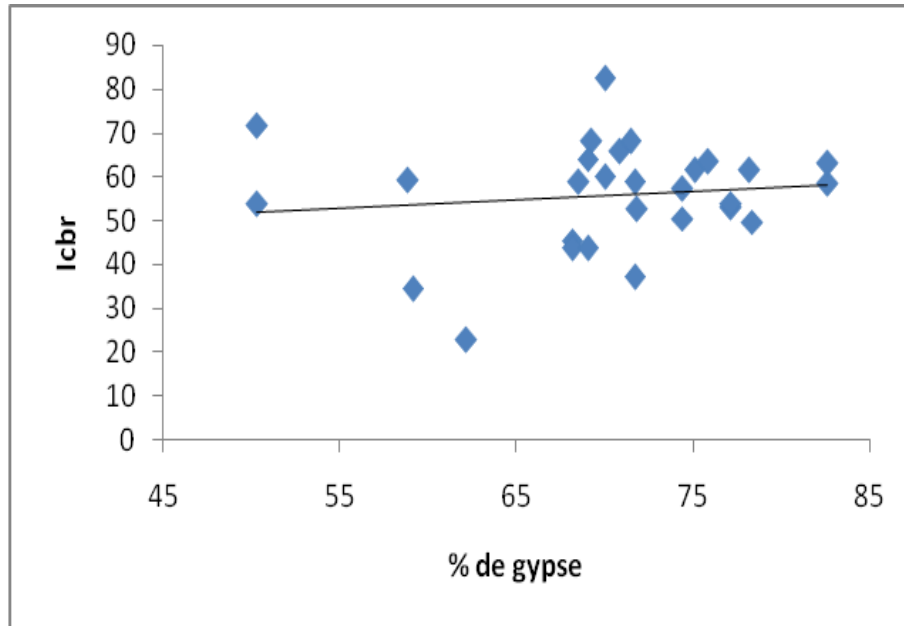


Fig 2.7: Influence de taux de gypse sur l'indice portant CBR (Analyse matériaux LTPS)

II. 3 CLASSIFICATION DES SABLES GYPSEUX

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 Calland (2004).

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.

II.3.1 CLASSIFICATIONS 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 établi à partir de différents résultats recueillis dans la bibliographie (Baslimane, 1994) et (2^{ème} séminaire sur les techniques routières sahariennes, 2001) ; Gerbouz (1989)

Tableau 2.2 : Récapitulatif des différentes classifications sur les sables gypseux

| Méthode de classification | Caractéristiques prises en considération | Dénomination |
|---|--|----------------------------------|
| Américaine H .R.B | Limite d'Aterberg W_l, I_p) | Sable limoneux ou argileux |
| Diagramme de Taylor | Granulométrie | Sable limoneux (SA-LI) |
| Abaque de CASAGRANDE | Limite d'Atterberg (W_l, I_p) | 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.

II.3.2 CLASSIFICATION 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 (1987) et Paute (1994), Morsli (2007) 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 Porctor modifié. Les teneurs en eau de l'essai, $W_{\text{essai}} = W_{\text{opm}} - 4\%$ correspondant à celle rencontrée dans les chaussées (Djelfa, El-Bayadh).

Des essais au TCR réalisés par le CTTTP (CTTP, 2001) ont permis de classer les tufs en fonction des performances mécaniques du mélange granulaire selon la grille pré-établie décrite ci dessus (fig 2.3).

Une Résistance à la compression : $R_c > 15$ bars à 95 % de la densité OPM et à teneur en eau nulle.

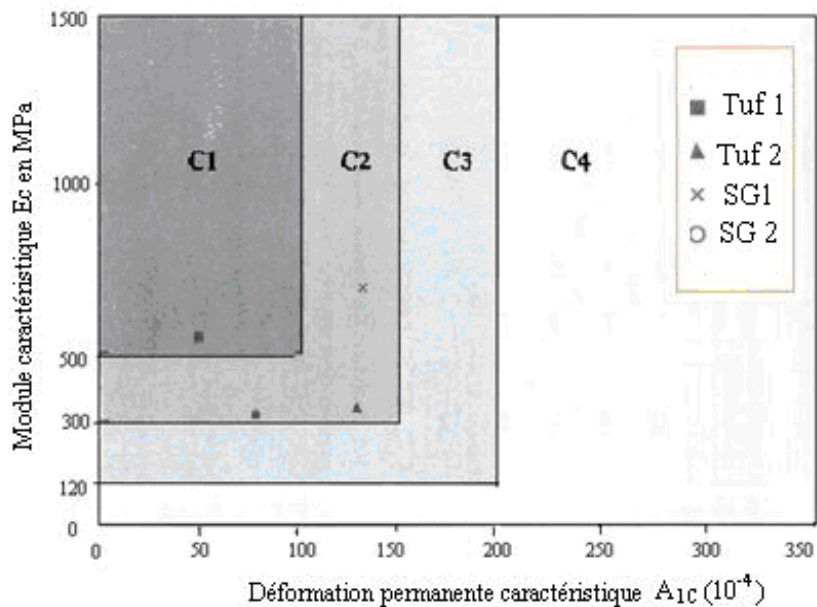


Fig 2.8 – Classification des tufs au TCR selon leurs performances mécaniques (CTTP, 2001)

Les caractéristiques mécaniques obtenues à partir de ces essais sont reportées dans la grille de classification (fig 2.8). On note que les matériaux présentent des performances mécaniques satisfaisantes. Ils sont classés dans les zones C_1 ou C_2 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.

II.4 LES CHAUSSÉES EN SABLE GYPSEUX

Les gisements de sable gypseux en zone aride sont concentrés surtout dans les régions situées entre Ouargla et la frontière Tunisienne.

Le matériau se présente souvent sous forme de sable dont les grains ont un diamètre compris entre 0,1 et 2 mm, mélangé à des blocs assez gros. Chaque grain est une agglutination de cristaux microscopiques. Il peut se présenter aussi en cristaux plus grands allant jusqu'à 5mm.

Seuls les sables gypseux dans lesquels le gypse est finement divisé et qui se rencontrent fréquemment sous la croûte durcie de "timchent", parfois mêlés à une brèche calcaire sous une carapace de surface en calcaire dur, sont utilisables en technique routière. Leur intérêt routier tient à leur propriété d'acquérir une cohésion notable après compactage et séchage, attribuable à un phénomène de "prise" Cherrak (2003). On obtient alors des sortes de dalles assez friables, mais présentant une surface supérieure remarquablement unie et ferme Alloule (1981).

Le sable gypseux formé aux alentours des chotts contient une proportion plus ou moins importante de sel (chlorure de sodium).

II.4.1 HISTORIQUE D'UTILISATION DU SABLE GYPSEUX EN CORPS DE CHAUSSÉE

Les propriétés des matériaux gypseux ont été dégagées petit à petit au cours de l'expérience de leur utilisation. La première réalisation fût un chantier en 1953 près d'El-Oued : on utilisa la croûte de surface en blocage, à la main, les intervalles étant garnis de sable gypseux friable, recueilli sous la croûte mis en place par compactage humide. Après séchage l'ensemble se soudait pour former une croûte très dure représentant, en somme, la carapace naturelle de l'encroûtement Fenzy (1970).

On a ensuite remplacé la mise en œuvre à la main par un répandage au camion de « tout venant » de blocs et sable mélangé puis écrasés au cylindre in situ, après arrosage.

Cette réalisation ayant donné de bons résultats sur les routes secondaires peu circulées a toute fois servi de base pour les travaux de construction d'itinéraires plus importants : Biskra-Touggourt et Biskra-El Oued en 1955.

Les croûtes gypseuses et le sable gypseux sous-jacent étaient utilisés comme tout-venant, après passage au concasseur. On s'aperçu vite que l'épaisseur de la croûte était trop faible pour justifier le concassage et que le sable gypseux, grâce au phénomène de durcissement après humidification, compactage et séchage, pouvait donner à lui seul une bonne couche de base.

On cessa donc de se préoccuper de la croûte de surface et les prospections sont dirigées vers la recherche de gisements de sable gypseux assez épais pour une extraction commode aux engins. Suite à la réussite de ces deux routes, on généralisa l'utilisation du sable gypseux dans toutes les régions d'El-Oued, Touggourt et Ouargla.

II.4.2 DÉGRADATION DES CHAUSSÉES EN SABLE GYPSEUX

II.4.2.1 La fissuration

Il se forme, dans les chaussées en sable gypseux, deux familles de fissures : l'une transversale et l'autre longitudinale, qui apparaissent indépendamment du trafic. Cette fissuration se développe à partir des accotements et provoque un craquèlement du revêtement selon des mailles de différentes dimensions.

Ces fissures, qui ne concernent que les chaussées en sable gypseux, ont été attribuées, par Horta (1979), à la déshydratation du gypse durant la période sèche qui s'accompagne d'une forte réduction de volume et provoque des tractions puis des fissures dans la couche de base, qui se transmettent à la couche de roulement.

Alloul (1981) 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 n'est pas très grave, en ce sens qu'elle ne réduit pas d'une façon importante la portance de la chaussée. Elle réduit cependant beaucoup plus la résistance au cisaillement du sable gypseux : des glissements horizontaux se produisent alors par endroit, sous le revêtement, sous l'effet des coups de freins ou de l'effort de traction des roues motrices des camions Peltier (1959).

II.4.2.2 Le gonflement et boursouflures

Certaines chaussées en sable gypseux ont présenté des gonflements au niveau de leur surface. Ce phénomène a été attribué généralement à une trop grande finesse du gypse ou à la présence d'une fraction d'argile active.

Un autre type de dégradation des chaussées, typique des climats arides, est les *boursouflures salines* ou encore les *cloques*.

Il s'agit de soulèvement de la couche de roulement suite à des pressions exercées vers le haut par les cristaux en forme de cheveux d'halite (Chlorure de Sodium NaCl). De très faibles quantités de chlorures dans les matériaux suffisent pour déclencher le phénomène. Cette décohérence serait liée également à l'absorption sélective du solvant du cut-back en profondeur. Il y a donc lieu, de limiter la teneur en chlorures des matériaux utilisés ; une valeur maximum de 0.5% est recommandée Horta (1979), revêtir la chaussée en enrobés et procéder à l'imprégnation au cut-back visqueux Cherrak (2003).

II.4.2.3 Déformabilité

Les mesures de déflexions effectuées à la plaque ou au défléctographe sur des chaussées en sable gypseux ont montré que, malgré une imbibition du gypse, ces chaussées ne sont pas très déformables Baslimane (1994).

II.4.3 CARACTÉRISTIQUES DE QUELQUES ROUTES CONSTRUITES EN SABLES GYPSEUX

chacun des nombreuses routes construites avec un sable gypseux récemment à travers tout le Sahara a apporté son lot de difficultés et d'échecs dont il est intéressant de tirer des renseignements

II.4.3.1 Route Hassi Massaoud – Fort Lallemand

Le matériau utilisé en couche de base a été en majorité extrait de la carrière de Hassi kadour, ce matériau est fin et contient en moyenne 92% de gypse. L'épaisseur de la couche de base mise en place variant de 15 à 30 cm selon la couche de fondation, les densités sèches obtenues étaient de l'ordre de 95% du maximum Proctor modifié.

Cette route construite en 1957-1958 n'a jamais bénéficié d'aucun entretien, aucune déformation permanente n'était apparue, une couche de roulement plus mince aurait vraisemblablement eu une meilleure tenue. De même un tapis beaucoup plus épais en renforçant la résistance par effet de dalle ne se serait pas non plus fissuré.

II.4.3.2 Route Hassi Massaoud – Rhourde El Baguel

La couche de base du premier tiers partant de l'embranchement de Hassi Massaoud a été constituée par le matériau gypse calcaire du plateau, ce matériau n'a posé aucun problème. Au delà du tiers les matériaux ont été des mélanges de cailloux et graviers gypseux et de fines siliceuses, calcaires et caractéristiques très variables. Le matériau gypseux utilisé est composé de 50% de gros cristaux (1 à 2mm) et 50% d'éléments assez fins, l'analyse chimique donnait un pourcentage important de gypse de l'ordre de 85%. La compression simple en laboratoire varie entre 35 et 40 Kg/cm²

Lorsque la mise en œuvre n'était pas absolument parfaite et notamment donnait une densité sèche inférieure à 95% de maximum Proctor modifié la prise habituelle du gypse n'apparaisse pas. La tenue réelle en route n'a pas été expérimentée mais la décohesion était telle qu'il ne pouvait y avoir aucun espoir.

II.4.3.3 Route square Bresson – Haoud El Hamra

Le matériau de la région est un mélange de cailloux-graviers de grès fin très dur dont le diamètre est supérieur à 5mm et de sable gypseux inférieur à 0,4mm, l'analyse chimique donnait 40 à 65 % de gypse et 10 à 30% de calcaire, le complément étant insolubles vraisemblablement de la silice, la qualité du sable exceptionnellement bonne celui-ci finement cristallisé mais contient une proportion assez faible d'éléments très fins. Le compactage est assez aisé, et le durcissement au séchage donne des résistances très importantes. Ce matériau est utilisé en couche de base.

Le corps de chaussée a été composé des parties suivantes :

- Les 10cm supérieurs de terrassement dont les matériaux sont choisis et contrôlés ont été compactés humides.
- La couche de base de 10cm d'épaisseur a été constituée par du matériau dont la courbe granulométrique était satisfaisante.

Son compactage a permis d'obtenir en général une densité sèche supérieure à 97% du maximum Proctor modifié.

II.5 CONCLUSIONS

- ❖ Les sables gypseux font partie de la grande famille des tufs d'encroûtements.
- ❖ Ils présentent des caractéristiques très dispersées en fonction du gisement d'où ils sont extraits, de la profondeur d'extraction, de l'échantillonnage : l'échantillonnage doit être fait avec beaucoup de rigueur.
- ❖ Les essais d'identification sont quasi les mêmes que ceux pratiqués sur les autres sols avec néanmoins quelques adaptations.
- ❖ La détermination de la teneur en gypse et en carbonate est systématique.
- ❖ Aucune relation entre la résistance à la compression simple et la teneur en gypse n'a pu être établie.
- ❖ Il est à remarquer qu'un sable gypseux à teneur en gypse plus carbonate, dépassant les 90% peut donner de faibles résistances.
- ❖ Cependant, aucune bonne résistance (plus de 20 bars) n'a pu être obtenue avec moins de 50% de gypse + carbonate de calcium.

- ❖ Le taux de plus de 30% de fines semble être écarté bien plus pour des problèmes pratiques de mise en œuvre du matériau (compactage difficile, teneur en eau optimale élevée) que pour son influence sur R_c .
- ❖ Le sable gypseux est un matériau fin à pulvérulent, peu pollué par l'argile, relativement léger, la teneur en eau optimale peut, cependant, atteindre les 20%.
- ❖ Les classifications classiques des sols ne répondent pas à ce type de matériau.
- ❖ Les sables gypseux présentent des performances mécaniques satisfaisantes comparables à celles des graves non traitées.
- ❖ Certaines dégradations ont été notées sur les routes en sables gypseux mais ne remettent pas en cause l'utilisation des sables gypseux.
- ❖ L'utilisation des sables gypseux en corps de chaussée, en zones arides, tend à se généraliser, grâce à l'état de sécheresse qui règne dans ces zones, à la bonne portance du sol support et à une bonne pise en place du matériau.
- ❖ Il est à souligner que les sables gypseux sont l'unique matériau disponible sur de très vastes régions du Sahara

CHAPITRE III

CARACTERISATION ET ETUDE DU DURCISSEMENT D'UN SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA

III.1 CARACTERISATION DU SABLE GYPSEUX DE BEN-GUECHA

L'utilisation de matériaux locaux en technique routière saharienne permet de palier au manque de matériaux classiques, de diminuer le coût du transport des matériaux et de réaliser des chaussées durables et économiques.

Ce type de matériau étant spécifique, généralement très hétérogène (cas des tufs d'encroûtements) chaque gisement prospecté fait l'objet de divers prélèvements soumis à des essais de caractérisation géotechnique, mécanique et minéralogique.

III.1.1 PRÉSENTATION DE L'ÉCHANTILLON

III.1.1.1 Localisation de gisement étudié

Notre matériau provient des plateaux de tuf de carrière BEN GEUCHA située à 200m à gauche de la RN 16, Cette carrière s'éloigne de 120Km au nord-est d'El oued, Ce gîte de tuf a fait l'objet d'une prospection visant à choisir les matériaux d'assise de chaussées.



Photo 1 : Sable gypseux de Ben Guecha

Le matériau est un tuf à forte teneur en gypse (sulfate CaSO_4).

Les essais d'identification et les essais de compression simple ont été conduits au laboratoire des travaux public sud –LTPS- Ghardaïa au laboratoire central –LCTP-.

III.1.1.2 Méthode de prélèvement et échantillonnage

Avant de se déplacer et de choisir cette carrière nous avons pris toute la documentation - études géologiques et analyses géotechniques effectuées par le laboratoire des travaux publics LTPS- relative à différentes carrières exploitées en zone d'El-oued.

- Nous avons prélevé des petits échantillons en plusieurs points pour faire les analyses chimiques et minéralogiques
- Après avoir terminé les analyses chimiques on a choisi la carrière qui nous a donné les résultats adéquats pour notre étude (sable gypseux), et nous avons prélevé la quantité suffisante suivant les indications du tableau 3.1 et les essais complémentaires prévus. Soit un total de (plus de 100Kg). Les prélèvements ont été effectués en plusieurs points de la même carrière après avoir procéder au décapage de la terre végétale sur 30cm d'épaisseur.

Tableau 3.1 : Quantités prévues pour les essais de laboratoire

| | |
|-------------------------|--|
| Analyse granulométrique | 200D < P (g) < 500D / D (mm) > 500g |
| Limites d'Atterberg | Quantité suffisante pour obtenir 200g à 400g de mortier |
| Analyses chimiques | 25D < 5mm avec P > 100g |
| Equivalent de sable | 300g < P < 500g |
| Essai Proctor | Si D < 5mm P=25 kg D > 5mm P=50 kg (condition qu'il y ait moins de 25% d'éléments > 20mm) |
| Essai CBR | P=50 kg à condition qu'il y ait moins de 25% d'éléments > 20mm |

III.1.1.3 But et principe de l'échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites du matériau, celles-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble de matériau dans lequel on a fait le prélèvement, il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

III.1.1.4 Echantillonnage en laboratoire

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur, où l'échantillon est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés, cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération a été réitérée trois fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial.

III.1.2 ESSAIS DE CARACTÉRISATION

III.1.2 .1 Granulométrie

a/ Le tamisage

L'essai consiste à déterminer les proportions des éléments d'un matériau en le criblant sur des tamis standard selon la norme 'NF P 18-560'. Avec toutefois cette particularité : avant de procéder au tamisage, l'échantillon sera mis à détremper dans un bac d'eau pendant 12 à 24 heures Domec (1980) et CTPP (2001). Cette opération permet aux mottes de se désagréger afin d'arriver aux conditions les plus défavorables de friabilité.



Photo 2 : Immersion du matériau avant l'essai granulométrique

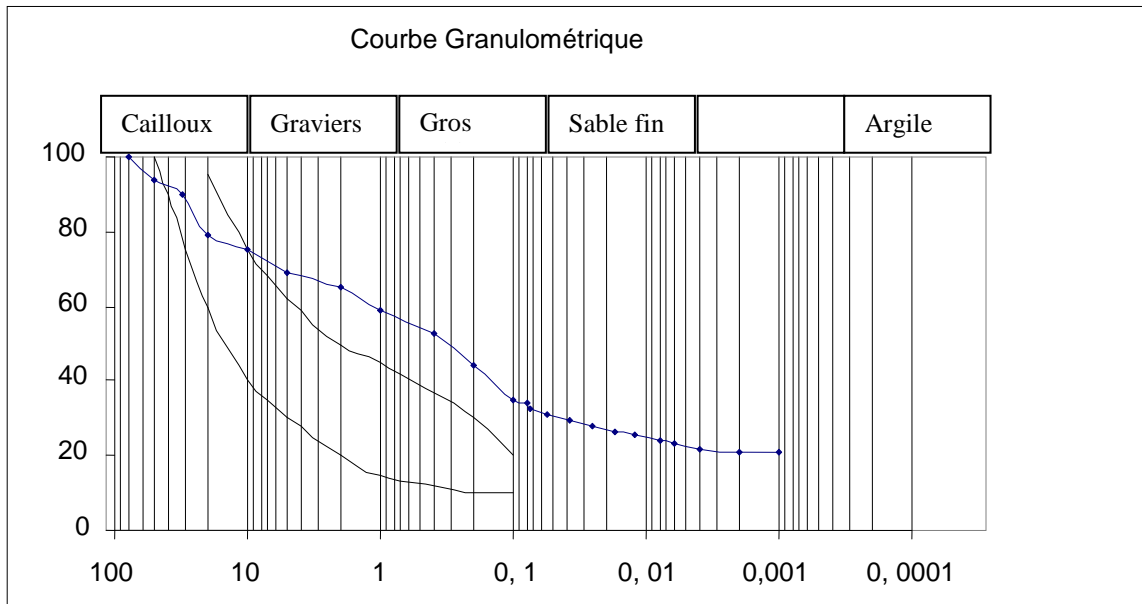


Fig 3.1: Courbe granulométrique et sédimentométrie

Nous avons obtenu une courbe continue et étalée ($CU > 2$ selon la courbe granulométrique fig 3.1). Elle se trouve partiellement au dessus du fuseau de Bénis Abbés, comme nous le montre la figure 3.1 : le matériau étudié appartient à de la famille III (Annexe), qui englobe les matériaux fins ; la proportion des fines (inférieure à 0.080 mm) est de l'ordre de 34 %.

b/ La sédimentométrie

Vu la quantité de fines, l'analyse granulométrique est complétée par la sédimentométrie. Cet essai est appliqué sur les particules de diamètre inférieur à 0,0080mm, à l'aide d'un appareil de mesure appelé « densitomètre », basé sur la loi de stocke qui s'articule sur le principe suivant :

Vitesse de chute = f (diamètre, densité, viscosité et densité de fluide)

➤ *Résistance opposée par le liquide*

$$F = 3\pi\mu DV \dots\dots\dots(1)$$

μ : Viscosité dynamique - D : Diamètre des particules - V: Vitesse de chute

➤ *Le poids de la particule :*

$$W = 1/6 \pi D^3 (\gamma_s - \gamma_0) \dots\dots\dots(2)$$

γ_s = Poids volumique de la particule sphérique

γ_0 = Poids volumique du liquide (eau + défloculant)

Cet essai nous a montré que la courbe granulométrique reste étalée jusqu'au diamètre 0.001mm (1 μ) où les passants sont de 21.25%, c'est-à-dire la fraction inférieure au 0.080mm est très fine.

c/ L'évolution granulométrique

L'étude de l'évolution granulométrique présente un grand intérêt pour les matériaux friables notamment les tufs d'encroûtements, ces matériaux évoluent pour s'opposer aux actions du trafic.

Après le compactage nous avons effectué une analyse granulométrique sur le matériau compacté. On a obtenu la courbe granulométrique portée sur la figure 3.2.

Nous remarquons que :

La courbe granulométrique après compactage passe au-dessus de la courbe avant compactage. Le matériau a évolué vers les matériaux fins, ce qui démontre la friabilité des tufs.

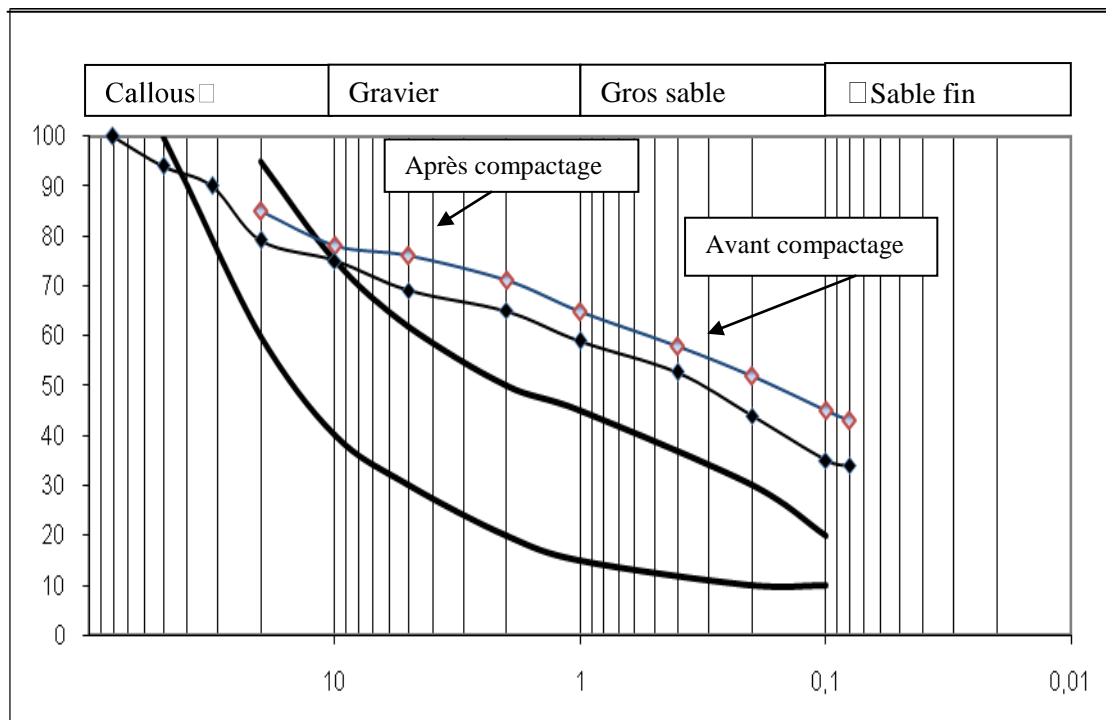


Fig 3.2: Courbe granulométrique après compactage

III.1.2.2 Analyses chimiques

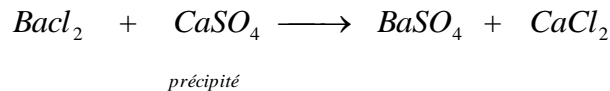
Ces deux essais sont réalisés sur la fraction granulométrique inférieure à 1 mm. Les teneurs en calcaire et en gypse sont systématiquement déterminées pour les matériaux sahariens ; elles sont généralement un bon indicateur pour le choix des gisements. Un pourcentage assez fort en carbonates et sulfates ($CaCO_3 + CaSO_4$) dans la fraction fine dénote d'un matériau qui contient peu d'argile, donc qui sera peu plastique Alloul (1981), Fenzy (1966), Domec (1980).

a/ Détermination du taux de carbonates

Cet essai est effectué selon 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 qui est obtenu sur une poudre étalon de carbonate de calcium pur.

b/ Détermination du taux de sulfates solubles

Cet essai est effectué selon la norme : ISO-9280. On précipite, dans une prise d'essai de 1g, les sulfates par le chlorure de Baryum ($BaCl_2$) selon la réaction suivante :



La teneur en sulfates est évaluée en gypse $CaSO_4, 2H_2O$.

Valeurs obtenues : $CaSO_4 = 57.7\%$; $CaCO_3 = 7.35\%$; insoluble = 33.1%.

III.1.2.3 Limites D'Atterberg : (NF P94 051)

Elles sont mesurées sur les matériaux routiers contenant beaucoup d'éléments fins inférieurs à 0.080mm, elles sont effectuées sur le mortier, sur la fraction de matériaux passant au tamis de 0.4 mm, le comportement d'un sol fin remanié contenant beaucoup d'éléments fins dépendra beaucoup plus de sa teneur en eau que de son squelette ou de sa structure caractérisée par la dimension des grains.

L'indice de plasticité I_p est l'intervalle de teneur en eau dans lequel le matériau reste plastique et déformable sans qu'il s'écoule librement, soit :

$$I_p = W_L - W_p \dots \dots \dots (3)$$

Rappelons que toutes ces valeurs qui caractérisent les sols : I_p , W_L et W_p sont des teneurs en eau exprimées en % du poids de matériaux secs.

L'essai nous a donné les résultats suivants :

$$W_L = 32\% ; W_P = 26\% ; IP = 6\%$$

L'indice de plasticité est inférieur à 10%, ce qui montre que notre matériau est peu plastique selon la classification de Casagrande, et les éléments argileux sont inexistant, ou à l'état de trace, et on peut conclure que ce matériau aura une courbe Proctor aplatie.

III.1.2.4 Qualité les fines

Ce sont surtout les fines argileuses qui posent des problèmes comme la sensibilité à l'eau, les déformations sous circulation ..., leur appréciation est déterminée par les résultats de l'Equivalent de Sable (ES) complété par l'essai au bleu ou valeur au bleu (VB).

a/ Equivalent de sable (NF P18 – 598)

L'essai d'équivalent de sable permet de déterminer dans un sol la proportion relative de sol fin et de sol grenu. Cet essai est important, car la présence d'éléments fins peut modifier le comportement de ces sols. Il est effectué sur les éléments de dimensions inférieures à 5 mm (fraction 0/5 mm du sol).

L'essai consiste à mettre dans une éprouvette contenant un flocculant de la fraction 0/5 mm, du matériau, l'éprouvette est mise en position verticale, sans perturbation pendant 20 minutes pour décanter ; on mesure alors la hauteur (h1) du sédiment et (h2) du flocculant.

Le coefficient ES est donné par la formule suivante :

$$ES = (H_1/H_2)*100 \dots \dots \dots (4)$$

Avec :

| | |
|-------------|---------------------|
| E. S = 100% | Sable pur et propre |
| E.S = 20% | Sol non plastique |
| E.S = 40% | Sol plastique |
| E. S = 0% | Argile pure |

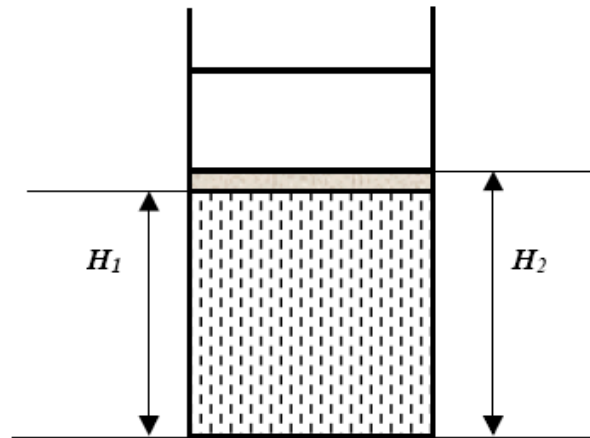


Fig 3.3 : Essai d'équivalent de sable

L'essai a révélé une valeur de ES = 4,6%. Cette faible valeur est caractéristique d'une argile pure. Or on sait que le matériau n'est pas une argile. Il faut alors étudier la qualité des fines pour pouvoir bien interpréter ce résultat.

b/ Essai au bleu : (NF P18 – 093)

Il s'agit aussi d'un paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol. Ce paramètre, noté VB (valeur au bleu), représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules argileuses contenues dans la fraction du sol considéré; c'est donc une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

L'essai consiste à introduire progressivement du bleu de méthylène dans une suspension de sol maintenue en agitation. On prélève périodiquement une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier chromatographique. Dès qu'une auréole bleutée se développe autour de la tache ainsi formée on peut considérer que l'adsorption du bleu de méthylène sur les particules d'argile est terminée. En effet, c'est l'excès de bleu de méthylène qui apparaît dans l'auréole.

La VB traduit globalement la quantité et la qualité (activité) de la fraction argileuse du sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100g de sol.

La classification au Bleu a été adaptée aux tufs Colombier, (1988) selon le tableau suivant

| | |
|----------------|----------------------------|
| VB < 0.2 | Matériau propre |
| 0.2 < VB < 0.5 | Matériau légèrement pollué |
| 0.5 < VB < 1 | Matériau pollué |
| VB > 1 | Matériau pollué |

La valeur obtenue par l'essai au bleu est 0.35, cette faible valeur indique que notre tuf est un matériau légèrement pollué. Ce résultat confirme les résultats des limites d'Atterberg et remet en cause celui de l'ES

III.1.3 ESSAIS DE COMPORTEMENT

III.1.3.1 Essai Proctor

La portance d'un sol est la caractéristique qui définit sa capacité à supporter les charges qui lui sont appliquées. La portance dépend de la nature du sol, de son pourcentage d'eau et du degré de compactage.

L'essai Proctor a pour but de déterminer la *teneur en eau optimale* conduisant à une *force portante maximale* pour un sol donné, selon des conditions de compactage normalisées.

Le principe de base est que l'on compacte avec la même intensité un sol. Mais avec des teneurs en eau différentes, on constate que la densité sèche γ_d passe généralement par un maximum.

Il existe deux essais normalisés :

L'essai Proctor Normal (PN) et

L'essai Proctor Modifié (PM).

Le Proctor Normal est généralement utilisé pour les terrassements (remblais), et le Proctor Modifié pour le corps de chaussées (couche de forme, fondation et base). Comme notre étude porte sur l'utilisation du sable gypseux en corps de chaussée, nous avons effectué l'essai proctor modifié.

La courbe Proctor est la présentation graphique de la variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau. Elle permet de donner la teneur optimale en eau donnant le maximum de densité sèche.

Tenant compte du caractère évolutif des tufs les plus tendres, on ne réutilise pas le même échantillon pour les différents points de teneur en eau Alloul (1981 ; Domec, (1980) ; CTPP (2001).

a/ Courbe Proctor Modifié

Les caractéristiques optimales de compactage à l'énergie Proctor Modifié sont :

$$\gamma_d = 1.62 \text{ t/m}^3 \text{ et } W_{opm} = 14.5\%.$$

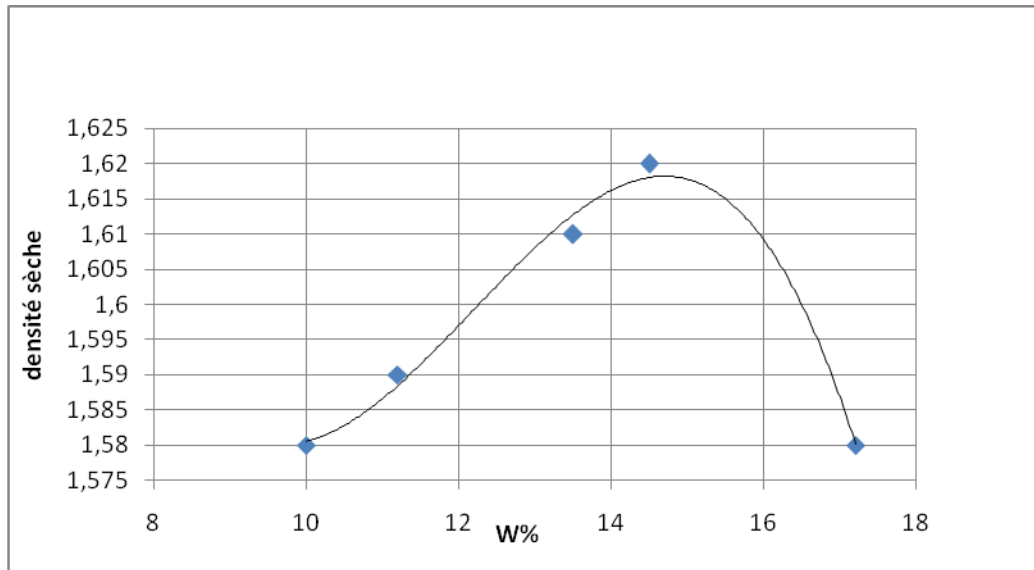


Fig 3.4 .Courbe Proctor du sable de Ben Guecha à différentes énergies de compactage.

On remarque que :

- le matériau a une faible densité (due à la présence de gypse en grande quantité).
- La teneur en eau optimale est relativement élevée à cause de la finesse du matériau (grande surface spécifique)

La courbe Proctor $\gamma_d = f(w\%)$ relativement plate : le matériau garde pratiquement la même densité autour de la teneur en eau optimale : $\gamma_d = 1,58 \text{ t/m}^3$ coté sec et coté humide

b/ L'effet de l'énergie de compactage sur la densité sèche

Il est utile, afin d'apprécier le comportement du matériau lors du compactage, de réaliser des essais à différentes énergies de compactage.

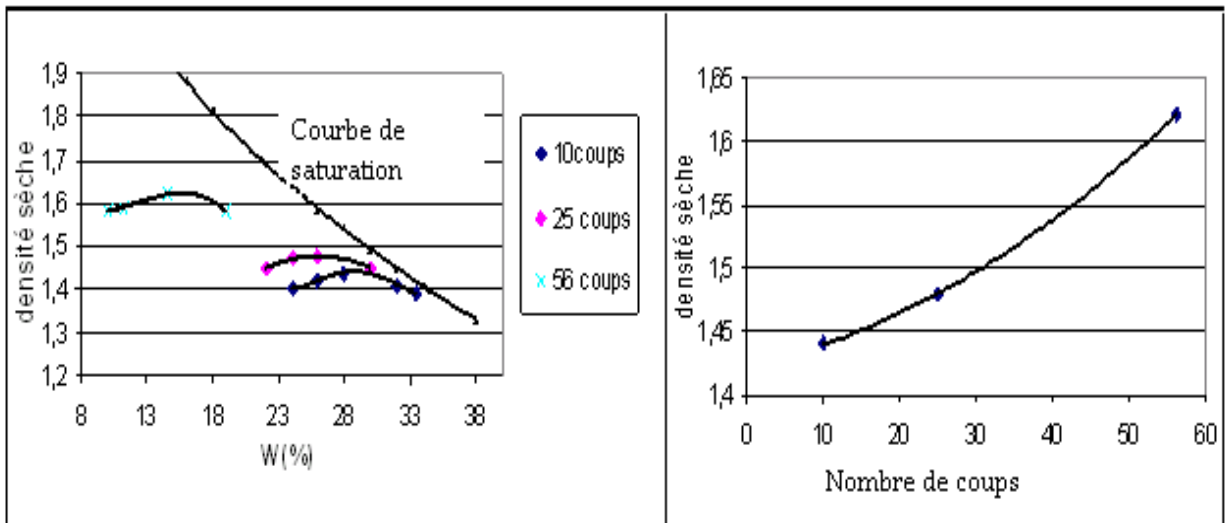


Fig 3.5 : Influence de l'énergie de compactage sur la densité sèche

Les courbes tracées à partir d'essais réalisés à différentes énergies de compactage montrent (fig3.5) que:

- la densité sèche du matériau, pour une énergie donnée, varie peu avec la teneur en eau
- la densité sèche du matériau, dépend de l'énergie de compactage : $\gamma_d < 1.45 \text{ t/m}^3$ pour 10 coups et passe à 1.58 t/m^3 à 56 coups.
- La teneur en eau optimale est également très sensible à l'énergie de compactage : elle baisse d'environ 50% (29% à 10 coups elle passe à 14.5% à 55 coups).

Il est à remarquer d'après la (fig, 3.5), que l'accroissement de l'énergie de compactage n'augmente pas uniquement la densité mais elle diminue aussi la teneur en eau optimale.

III.1.3.2 Essai de portance CBR

C'est un essai de poinçonnement. L'essai est réalisé selon la norme : NF P 94-078, immédiatement après le compactage.

L'Indice Portant Californien (Indice CBR) est un nombre sans dimension exprimant, en pourcentage, le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau à étudier d'une part (avec ou sans immersion au préalable) et dans un matériau type d'autre part. Il caractérise implicitement le tenue au poinçonnement d'un sol.

Les résultats des essais de portance dépendent principalement de l'énergie et de la teneur en eau de compactage.

a/ Variation de l'indice CBR en fonction de la compacité

Une série d'échantillons est compactée à la teneur en eau optimale, à différentes énergies (on fait varier le nombre de coups)

Pour chaque échantillon testé on mesure la densité sèche. Le rapport entre la valeur mesurée et la densité de référence (densité sèche maximale de l'essai Proctor modifié), nous donne la compacité du dit échantillon.

$$C (\%) = \gamma_{sol} / \gamma_d \dots\dots\dots (5)$$

Les indices portants sont alors reportés sur la fig 3.6 en fonction de la compacité.

Cet essai nous permet d'avoir l'indice portant du matériau aux compacités usuelles du chantier.

La fig 3.6 met en évidence une étroite relation entre le taux de compactage et la portance, une inter-dépendance caractéristique des tufs d'encroûtements : une chute de compacité de 2 points (98 à 96%) fait chuter l'indice portant de 38% à 32,5%.

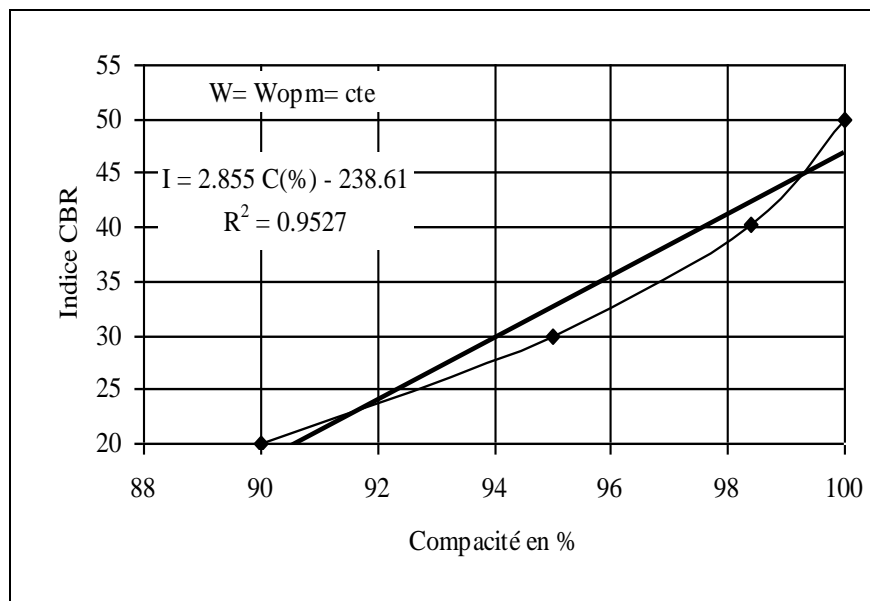


Fig 3.6. Variation de l'indice CBR en fonction de la compacité

Tableau 3.2 : Les résultats déduits par les essais mécaniques.

| W _{opm} % | γ_d (kg/cm ³) | I CBR (C=98%) | ICBR (C= 96%) | Chute de portance (%) |
|--------------------|----------------------------------|---------------|---------------|-----------------------|
| 14.5 | 1.62 | 38 | 32,5 | 5,5 |

b/ Variation de l'indice CBR en fonction de la teneur en eau

Cet essai permet, pour une énergie donnée (Proctor Modifié dans notre cas), de voir l'impact de la teneur en eau de compactage sur la portance du matériau.

Le sable gypseux de Ben Guecha atteint sa portance maximale avec un indice égale à 50 à une teneur en eau légèrement inférieure à W_{opm}. (à W_{opm}, l'indice portant est égal à 48).

La portance de ce matériau n'est pas très affectée par la variation de la teneur en eau de compactage, dans le domaine des teneurs en eau usuelles.

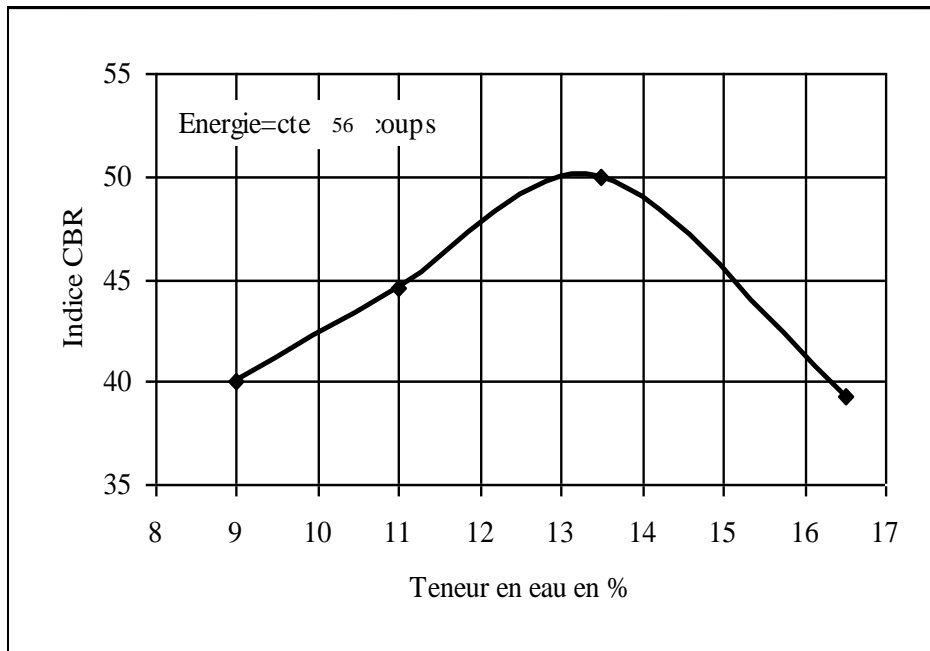


Fig 3.7. Variation de l'indice CBR du sable de Ben Guecha en fonction de la teneur en eau

III.1.3.3 Essai de résistance à la compression simple

Cet essai a été introduit d'une manière empirique par Fenzly (1957), pour apprécier la cohésion des matériaux locaux soumis à un état de sécheresse. Les échantillons sont confectionnés avec des éléments dont le diamètre est inférieur à 5mm et compactés à la teneur en eau optimale de l'essai Proctor modifié, dans un moule cylindrique de 5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur. Le compactage est effectué à la presse. Les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve pendant 48h.



Photo 3 : Confection des éprouvettes



Photo 4 : Essai de compression simple

Les résultats des essais en compression simple sur des éprouvettes confectionnées à la teneur en eau optimale Proctor Modifié, compactées à différentes énergies sont rapportés sur la fig 3.8.

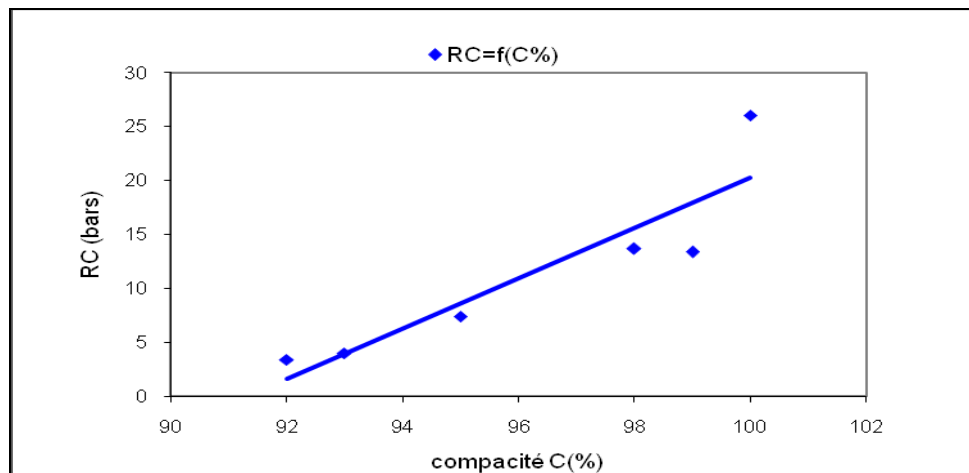


Fig 3.8 : Résistance à la compression en fonction de la compacité

Il en ressort une relation linéaire entre la compacité et la résistance à la compression simple

$$RC \text{ (bars)} = 2.28 * \text{compacité (\%)} - 208.62 \dots\dots\dots(6)$$

La résistance à la compression correspond 98% de compacité de l'ordre de 15 bars.

Lorsque la compacité passe de 92% à 95%, la croissance est d'environ de 32%.

Lorsque la compacité passe de 95 et 98%, la croissance est de 7,5 à 15bars

Cela rejoint la conclusion selon laquelle il faut pousser le compactage de la couche exécutée jusqu'à au moins 98% de compacité Proctor Modifié (LTPS)

III.1.4 RÉSULTATS DES ESSAIS D'IDENTIFICATION ET DE COMPORTEMENT

La caractérisation de notre matériau a pour but d'évaluer ses caractéristiques géotechniques et minéralogiques pour les situer par rapport aux normes et spécifications retenues pour leur emploi en corps de chaussées.

Tableau 3. 3– Caractéristiques géotechniques et mécaniques du sable gypseux de Ben Guecha.

| Fines (%) | IP (%) | ES (%) | VB (%) | CaSo4 (%) | CaCo3 (%) | Wopm (%) | γd. (g/cm ³) | Rc98 (bars) |
|-----------|--------|--------|--------|-----------|-----------|----------|--------------------------|-------------|
| 34 | 6 | 5 | 0.35 | 57.7 | 7.35 | 14.5% | 1.62 | 16 |

CaSO4 : gypse ; *CaCO3* : calcaire ; *VB* : valeur au bleu ; *W_{opm}* : teneur en eau optimale proctor modifié ; *γ_d* densité sèche optimale proctor modifié ; *CBR₉₈* : indice portant californien immédiat a 98% de compacité ; *Rc₉₈* : résistance à la compression simple a 98% de compacité proctor modifié

L'utilisation d'un sable gypseux en corps de chaussée, en zone aride, est essentiellement conditionnée par :

- Le pourcentage de gypse et de calcaire ($CaSO_4 + H_2O + CaCO_3 \geq 45\%$)
- Ses caractéristiques de compactages (densité Proctor, teneur en eau)
- Sa teneur en fines ($\leq 30\%$)
- Et sa résistance à la compression simple ≥ 25 bars

Par rapport à ces seuils, le sable gypseux étudié présente des caractéristiques de compactage relativement médiocres : faible densité sèche et teneur en eau optimale relativement élevée; le pourcentage de fine est important.

La compilation des résultats de compacités moyennes obtenues sur plusieurs chantiers du sud algérien a permis de dégager la compacité espérée pour les sables gypseux des régions d'El

Oued, Touggourt, etc. Elle est de l'ordre de : $96 \pm 2\%$ (LTPS). A ces stades de compacité, la résistance de notre matériau est de 10 ± 6 bars (en deçà de la limite imposée par la TRS).

Au vu de ces résultats, on conclut que le sable gypseux de Ben Guecha ne peut être retenu (selon la TRS) pour une utilisation en corps de chaussée car il présente des caractéristiques de compactage médiocres aggravées par une faible cohésion ne pouvant compenser le manque d'ossature du matériau.

III.1.5 CLASSIFICATION DU SABLE GYPSEUX DE BEN GAUCHA

III.1.5.1 Classification GTR des sols fins

Selon la classification du guide technique routière, notre matériau est classé comme suit,

Sous l'application de ces deux conditions :

$$D_{max} > 50\text{mm}$$

$$\% \text{ tamisât à } 0,080 > 12\%$$

Ces deux paramètres nous permettent de classer ce matériau en classe C qui est « sols comportant des fines et des gros éléments »

Ces différentes caractéristiques d'identification peuvent préciser la classification suivante :

$$\% \text{ de la fraction } 0/50 \text{ mm} > 60\%$$

$$IP \leq 12 \%$$

$$VBS \leq 2,5 \%$$

Selon ces caractéristiques géotechniques la classification devient CA1 sachant que l'indice A1 est « limons peu plastiques, lœss, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques »

III.1.5.2 Abaque de CASAGRANDE et LCPC

Ces deux classifications s'articulent sur la granulométrie et les résultats de limites d'ATTERBERG, notre matériau est classé comme un : sable limoneux

III.1.5.3 Classification triangulaire ou diagramme de Taylor des sols fins

Cette classification s'articule essentiellement sur l'analyse granulométrique, et cette dernière et nous permet de classer notre matériau comme : limon sableux

III.1.5.4 Technique routière saharienne:

Matériau fin gypseux

Bien que les utilisateurs des tufs d'encroûtements nous aient signalé que les classifications classiques ne répondaient pas à leurs attentes néanmoins nous avons tenté une classification par le GTR, les abaques de Casagrange, le Diagramme de Taylor, et enfin la TRS à titre indicatif.

Le tableau suivant résume les conclusions de l'opération

Tableau 3.4 : Classification du sable gypseux de Ben Guecha

| Méthode de classification | Dénomination |
|-----------------------------|---|
| 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 |

Ces résultats confirment la non adéquation des classifications usuelles des sols aux cas des sables gypseux.

III.1.6 CONCLUSIONS

La partie caractérisation et classification du matériau a permis :

De passer en revue les différents stades d'identification des sables gypseux en vue d'une utilisation routière en zone aride, sous faible trafic.

De mettre en relief la non-conformité des classifications usuelles des sols pour ce type de sol.

De mettre en évidence l'importance, pour ce type de matériau :

- Des analyses chimiques dans l'identification.
- Du taux de compactage.
- De l'essai de compression simple dans les critères de choix du matériau : *la résistance à la compression simple étant l'indice retenu pour évaluer la cohésion ou « durcissement » ou encore « auto-stabilisation » des tufs d'encroûtements.*

III.2 ETUDE EXPERIMENTALE DU DURCISSEMENT DU SABLE GYPSEUX DE BEN GUECHA

Le but de la présente étude est d'enrichir, de compléter, de confirmer ou d'infirmer les résultats de l'étude précédente.

La démarche est la suivante :

1. On suppose que le phénomène de durcissement d'un sable gypseux est comparable à celui du tuf gypso-calcaire étudié précédemment.
2. On met alors à profit les résultats obtenus lors de la première étude pour soulager le plan expérimental de la présente étude; de ce fait on pourra réduire le nombre d'éprouvettes et utiliser des moules standards à la place des moules réduits.
3. Par ailleurs, l'étude de l'origine du durcissement se fera pas par l'analyse par une approche microscopique et non macroscopique comme précédemment.

III.2.1 PLAN EXPÉRIMENTAL

Le plan expérimental est donc reconduit selon la procédure décrite en §I.3.3, mais toutefois allégée :

- Seules les teneurs en eau ayant présenté un intérêt dans l'étude du durcissement du tuf gypso calcaire sont maintenues (le coté sec de la courbe Proctor, autour de la valeur optimale repérée dans l'étude du tuf-gypso-calcaire) soit : W ; $W/2$ et une valeur intermédiaire entre W et $W/2$).
- Le compactage à sec (à teneur en eau nulle) est reconduit, vu sa signification pratique.
- La notion de dissolution et de recristallisation mise en évidence par l'approche des deux composantes ($R_{compactage}$ et $R_{dessiccation}$) n'est pas reprise dans ce paragraphe ; elle est cependant complétée par des observations au MEB de poudres d'échantillons compactés à différentes teneurs en eau. donc un seul mode de conservation (à l'air libre).

Ceci nous a permis de réduire le nombre d'éprouvettes de plus de la moitié et de travailler avec des moules normalisés (5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur).

III.2.1.1 Paramètres d'étude

Les paramètres arrêtés à l'issue des ces remarques sont les suivants:

- Quatre teneurs en eau : 0 ; 7.5, 11 et 14.5 % chaque teneur en eau représente une série.
- Six durées de conservation : 0 ; 1 ; 4 ; 7 ; 14 et 28 jours par teneur en eau.

- Un seul mode de conservation : à l'air libre sans protection contre la dessiccation.

Chaque série comporte trois échantillons par durée de conservation soit 12 éprouvettes. Au total plus de 70 éprouvettes ont été confectionnées à différents teneurs en eau.

Pour la teneur en eau $W = 0$ uniquement trois éprouvettes ont été écrasées immédiatement. Les autres se sont détériorées lors de l'extraction du moule.

Toutes les éprouvettes sont confectionnées à la densité OPM. Nous rappelons que le matériau d'épreuve est un sable gypseux dont les caractéristiques Proctor sont les suivantes :

$$W_{omp} = 14.5\% \text{ et } \gamma_d = 1.62 \text{ t/m}^3$$

III.2.1.2 Essais

L'essai retenu pour évaluer la cohésion est l'essai de compression simple. Il est réalisé à l'aide d'une presse CBR. Le chargement est appliqué à une vitesse constante à raison de 1.27 mm/mn. Les lectures sont notées toutes les 15 secondes. Les résultats sont reportés sur un graphe charge - déformation axiale. La teneur en eau résiduelle est mesurée pour chaque échantillon.

Les éprouvettes sont confectionnées avec des éléments dont le diamètre des grains est inférieur à 5 mm.

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 W_{omp} et de part et d'autre de W_{omp} (branche humide et branche sèche de la courbe Proctor modifié).

III.2.2 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

III.2.2.1 Evolution de la résistance à la compression simple

a) en fonction de la teneur en eau de confection

Les graphes de la figure 3.11 sont tracés pour des teneurs en eau de confection se situant dans la branche sèche de la courbe Proctor modifié, $W \leq W_{opm}$.



Photo 5 : conservation des éprouvettes à 28 jours

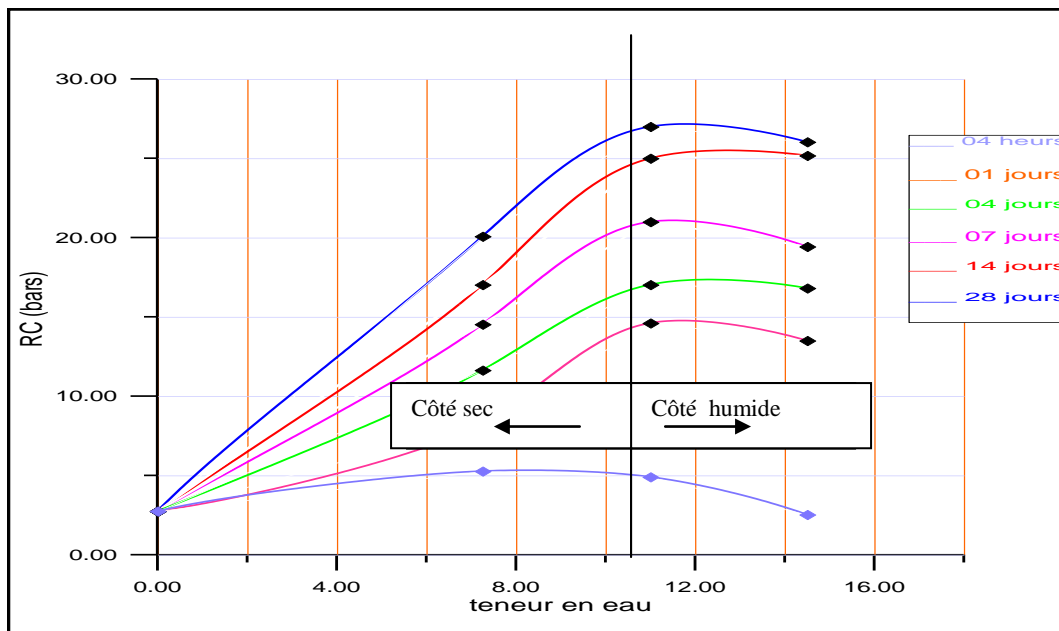


Fig 3.9 : L'influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression à différentes durées de conservation.

- Les résultats des essais de compression simple montrent que la résistance augmente avec la teneur en eau de compactage jusqu'à une valeur optimale $W_{\text{durcissement}} < W_{\text{opm}}$. Ces résultats confortent ceux obtenus lors de l'étude du durcissement du tuf gypso-calcaire de Hassi-Messaoud.
- Au-delà de cette valeur, la résistance décroît tout en restant supérieure aux valeurs obtenues pour les autres teneurs en eau étudiées.
- A une teneur en eau nulle le durcissement est faible.
- A 4 Heures de conservation, à 7.25% et 11% de teneurs en eau, la résistance est pratiquement la même (5 bars) et chute de moitié à $W_{\text{opm}}=14.5\%$. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que la courte durée de conservation n'a pas laissé le temps à la composante de durcissement de se réaliser et, en parallèle, la composante de compactage est plus importante à faible teneur (Morsli, 2007).

Remarque : les courbes de la fig 3.9 sont à rapprocher de celles de la fig 1.5 (a).

b) en fonction de la durée de conservation



Photos 6 : Eprouvettes confectionnées à différente teneur en eau et exposées à l'air libre

Les photos ci-dessous représentent quelques échantillons, après écrasement, des deux séries compactés l'une à $3/4 W_{opm}$ ($W=11\%$) et l'autre à W_{opm} ($W=14,5\%$).

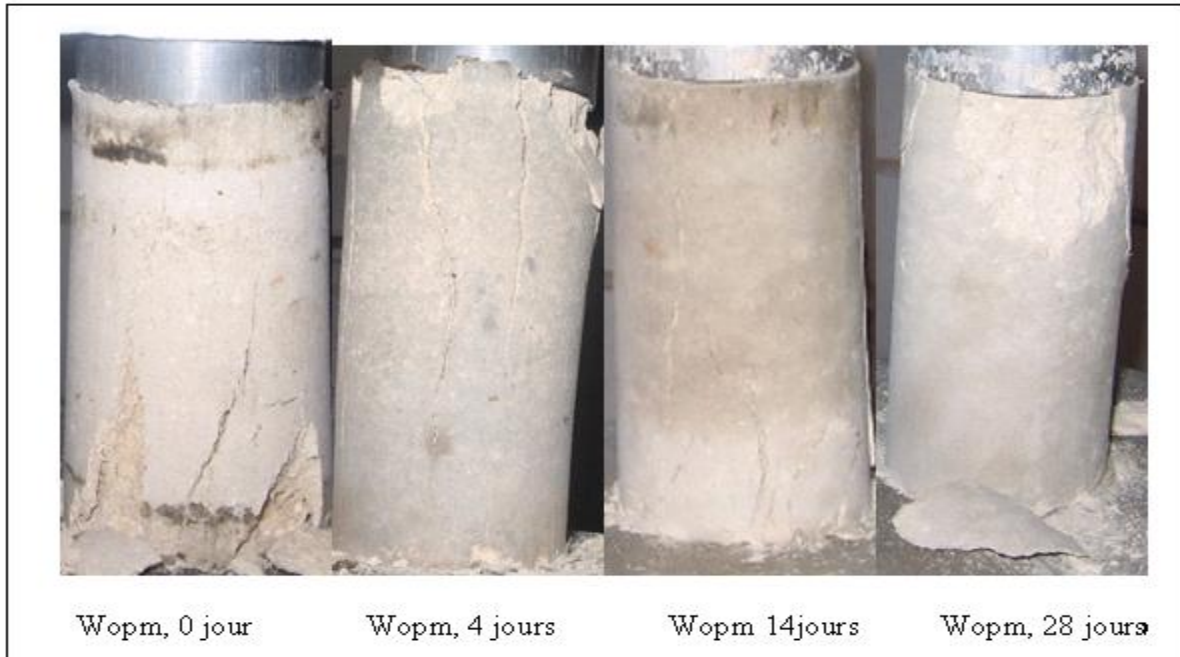


Photo 7 : Echantillons après écrasement, à différentes durées de conservation ($W = W_{opm}$)

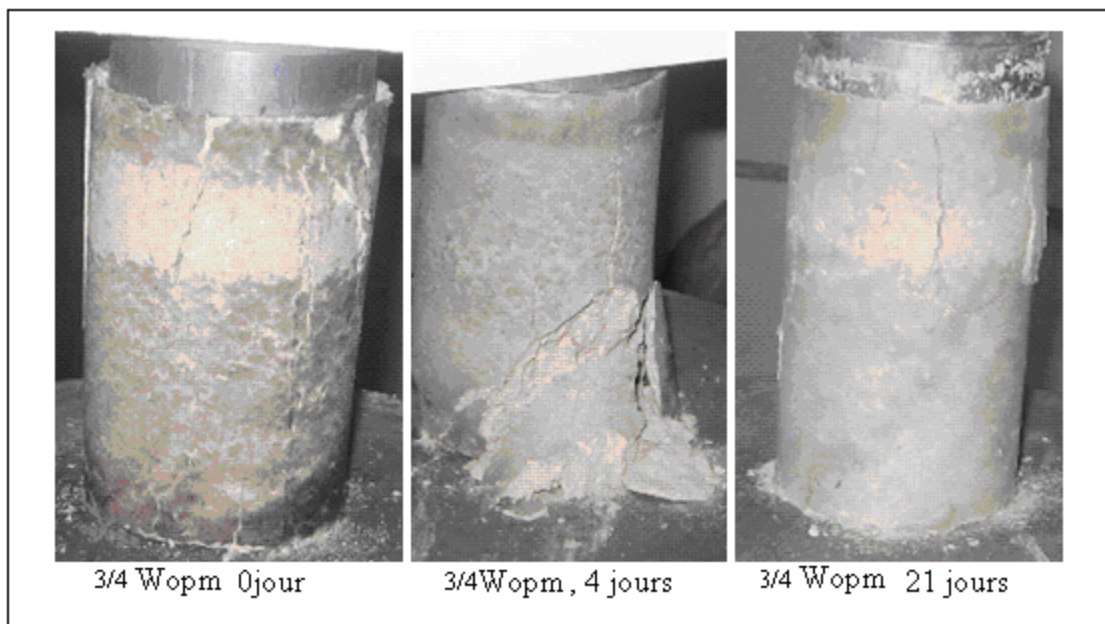


Photo 8 : Echantillons après écrasement, à différentes durées de conservation ($W = 3/4 W_{opm}$)

On notera une meilleure tenue, après écrasement, des échantillons de la série à 3/4Wopm par rapport aux échantillons de la série à Wopm.

Les courbes ci après sont tracées d'après les résultats d'essais d'écrasement à différentes durées de conservation et différentes teneur en eau de confection.

On note que les trois courbes ont des allures semblables :

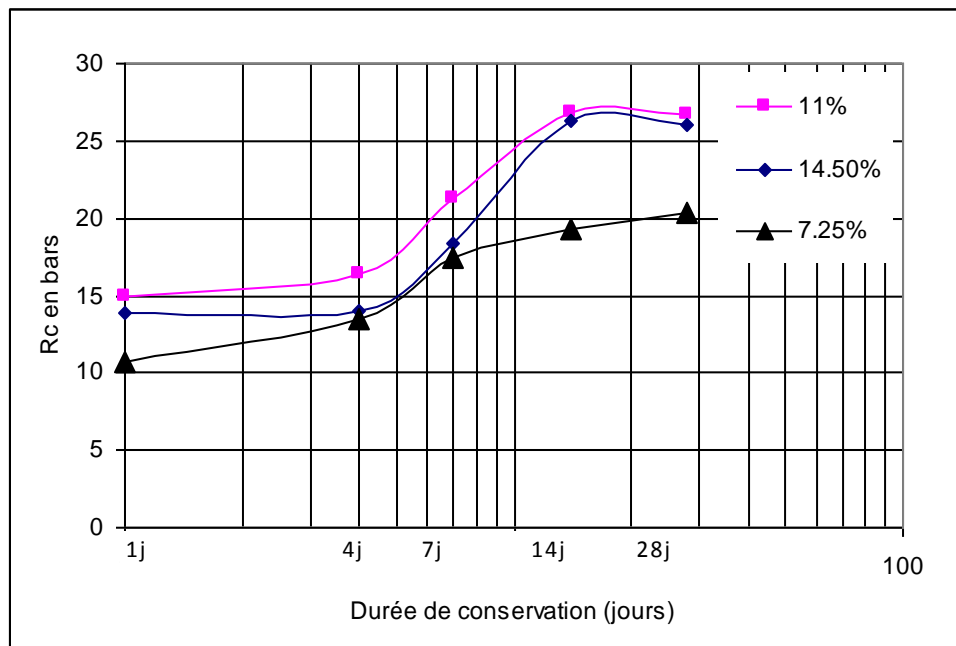


Fig 2.10 – Influence de la durée de conservation sur la résistance à la compression du sable de Ben-Guecha

- La résistance évolue avec le temps
- Le durcissement s'opère principalement entre le 4^{ème} et le 14^{ème} jour
- Le durcissement ralenti après le 14^{ème} jour.

Par ailleurs :

- La courbe donnant les plus faibles résistances en fonction de la durée de conservation est celle représentant les échantillons compactés à 7.5% de teneur en eau.
- La courbe donnant les résistances les plus élevées est celle représentant les échantillons compactés à 3/4 Wopm (11%) et ce quelque soit la durée de conservation.

En conclusion : le durcissement maximal s'opère pour une teneur en eau inférieure à la teneur en eau Optimal Proctor Modifié.

c) en fonction de la teneur en eau résiduelle

les résultats des essais de compression simple ont été reportés sur la courbe (fig. 3.11). en fonction de la teneur en eau mesurée (tableau 3.5) sur les échantillons après chaque écrasement des éprouvettes confectionnées sous condition d’OPM ($W=14,5$ et $\gamma_d=1,62t/m^3$) et conservées à différentes durées.

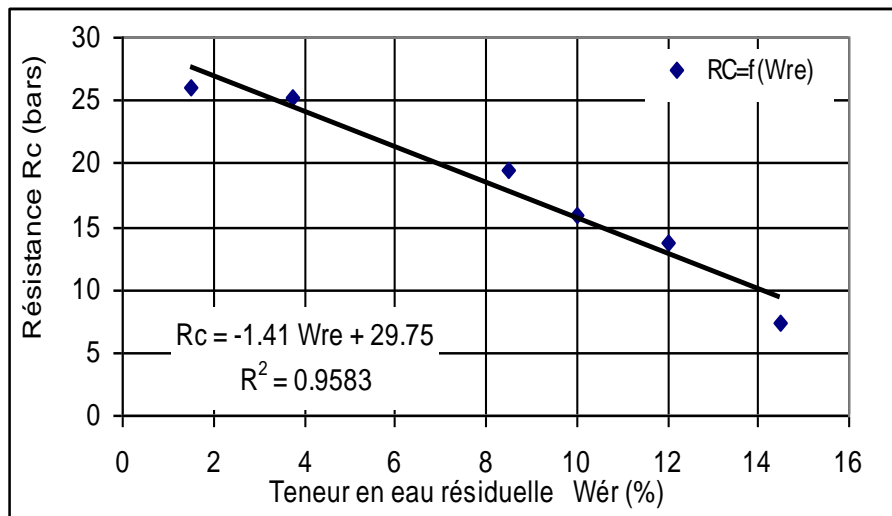


Fig 3.11 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau résiduelle

La résistance à la compression a chuté avec l’augmentation de la teneur en eau résiduelle. Cette chute varie sensiblement lorsque la teneur en eau passe de (2 à 8) %, Nous notons aussi une chute considérable de la résistance à la compression simple lorsque la teneur en eau est passée de 8% à 15% où la valeur de Rc chute de 21 bars à 6 bars.

III.2.2.2 Etat hydrique des échantillons

La mesure de la teneur en eau finale (ou résiduelle) a été faite uniquement sur les échantillons compactés à la teneur en eau optimale. L’opération a été réalisée sur les éprouvettes, à différentes durées de conservation ; le taux de perte en teneur en eau a été déduit par la formule suivante

$$\text{Perte (\%)} = (W \text{ initiale} - W \text{ finale}) / W \text{ initiale} \dots \dots \dots (7)$$

Les résultats sont notés dans le tableau suivant.

Tableau 3.5 : 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.

Le graphe de la fig 3.12 tracé à partir des résultats du tableau 3.5, montre une tendance logarithmique du phénomène de dessiccation.

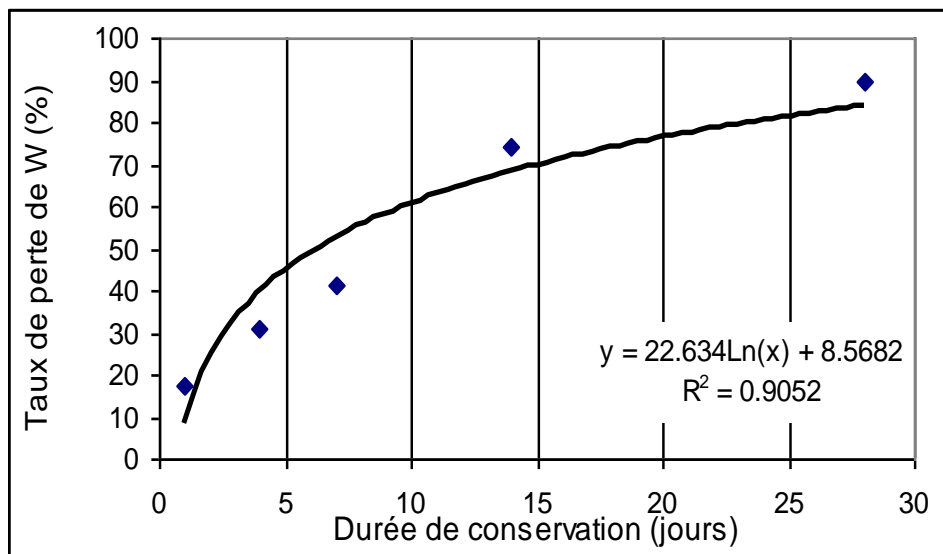


Fig 2.12 : Taux de perte en teneur en eau en fonction de la durée de conservation.

On retrouve un départ important d'eau lors des premiers jours de conservation, l'assèchement se poursuivant d'une manière plus lente au bout de 10 jours. Ce résultat est à mettre en relation avec l'évolution de la résistance constatée en fig. 3.12.

III.2.3 DÉTERMINATION DU MODULE DE YOUNG POUR LES DIFFÉRENTS ÉTATS DE CONFECTION ET DE CONSERVATION DES ÉPROUVETTES

III.2.3.1 Le module de Young

Le module d'élasticité, appelé également module de Young, du nom d'un médecin et physicien anglais (1773-1829) est la constante qui relie la contrainte (traction ou compression) et la déformation pour un matériau donné.

L'essai de compression simple consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de section S comme indiqué ci-dessous

La compression de l'élément est donnée par : $\Delta L/L = \sigma / E$(8)

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

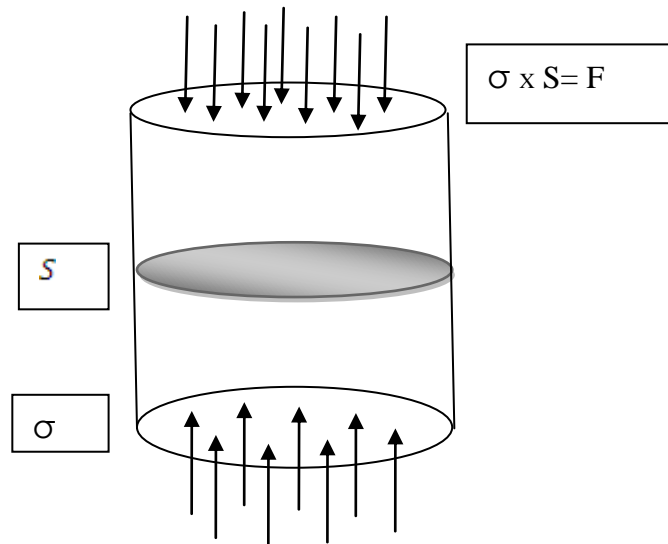


Fig 3.13 : Essai de compression simple

Pour déterminer le module d'élasticité E d'un matériau, on réalise un essai de traction (ou de compression) et on enregistre la courbe contrainte = f (déformation). La pente de la courbe dans sa partie linéaire correspond au module d'élasticité en traction (ou en compression) du matériau.

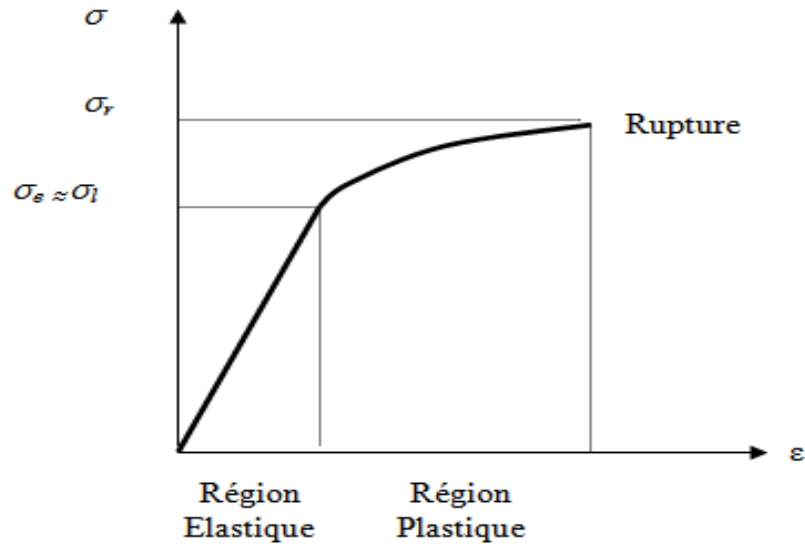
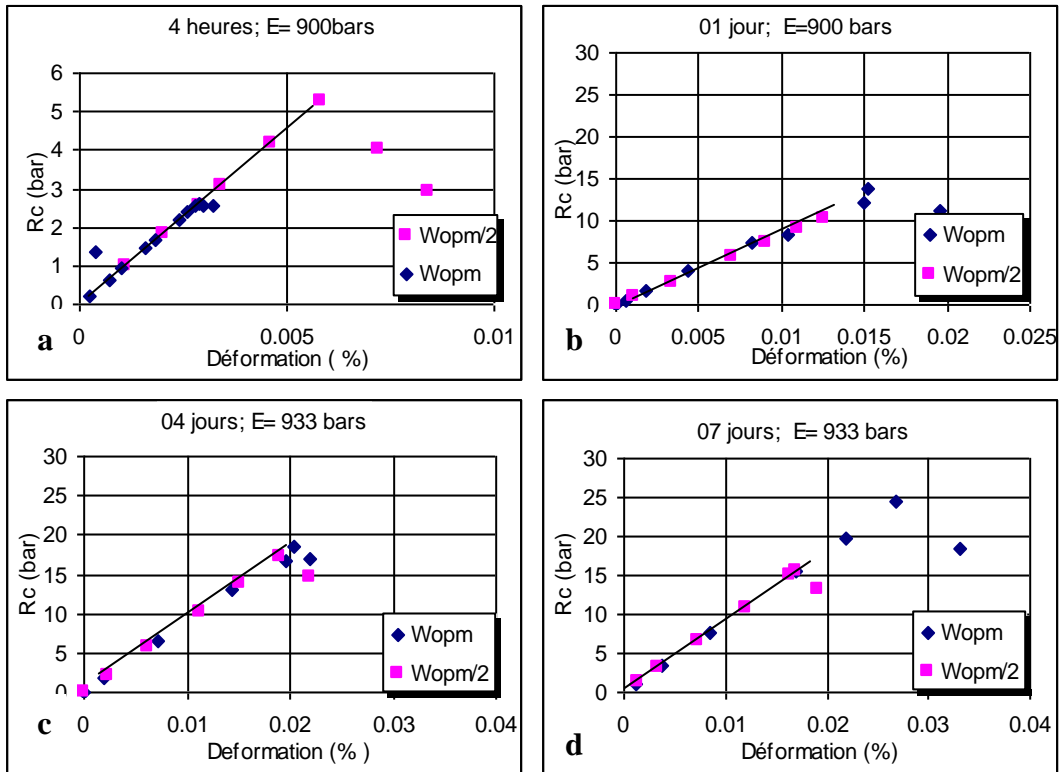


Fig 2.14 : Courbe contrainte – déformation



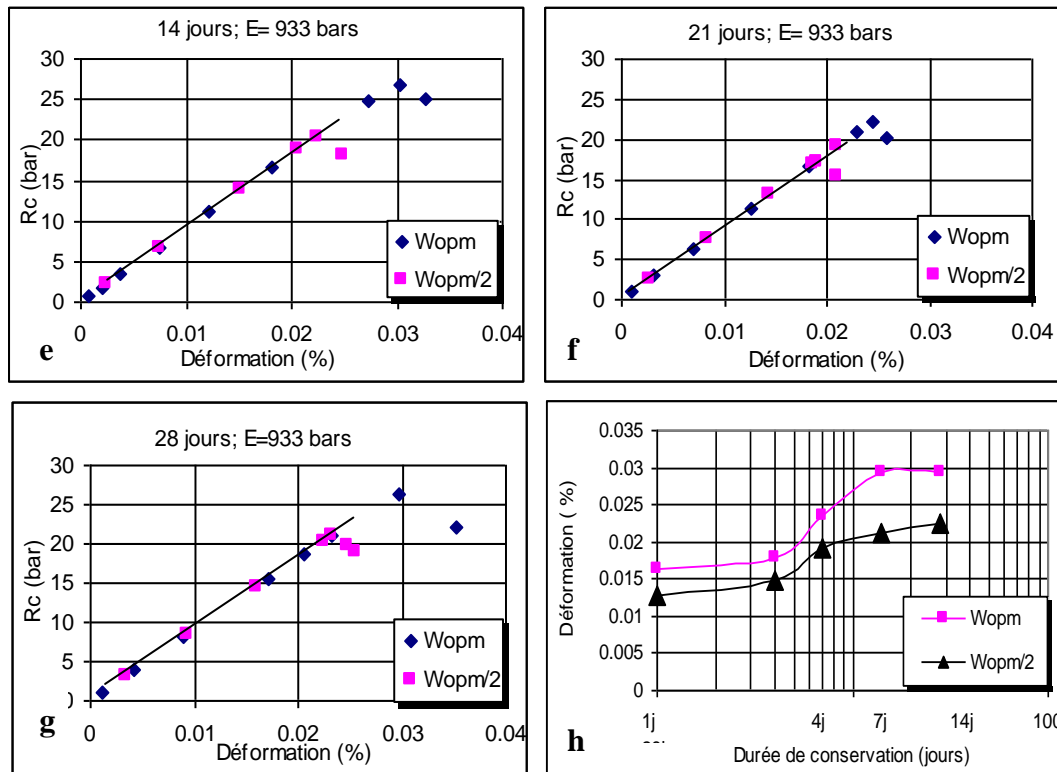


Fig 2.15 : Courbes contraintes –déformation : essai de compression simple sur sable gypseux de Ben Guecha, à différentes durée de conservation et pour deux teneurs en eau de compactage

III.2.3.2 Les graphes expérimentaux

Les points expérimentaux reportés sur les fig 3.15 ci-dessus, représentent les résultats des échantillons de deux séries d'éprouvettes : une à $W_{opm}=14.5\%$ et l'autre à $W_{opm}/2$, écrasés à différentes durées de conservation. Chaque point étant la moyenne de trois lectures.

On observe que :

- Une zone linéaire dans laquelle la résistance croît en même temps que les déformations, suivie d'une zone où le matériau continue à se déformer mais il présente des résistances de plus en plus faibles.
- Les points expérimentaux des deux séries sont alignés dans la première zone et ce pour toutes les durées de conservation (fig 3.15).
- Les droites passant par ces points présentent quasiment la même pente quelque soit la durée de conservation (voir les modules d'élasticité déduit des différentes courbes).

- Seules les valeurs limites des déformations (début de la chute de résistance et déformation maximale) diffèrent d'une série à une autre.
- La durée de conservation améliore la résistance mais augmente la déformation axiale.
- La série Wopm donne de meilleures résistances et de plus grandes déformations que Wopm/2 sauf pour le cas de conservation à 4 heures pour lequel, le durcissement n'a pas eu le temps de se faire et que le compactage à faible teneur en eau a donné de meilleurs résultats.

On conclu

Le module d'élasticité du sable gypseux de Ben Guecha est de l'ordre de 930 bars. Il ne dépend pas de la teneur en eau de confection ni de la durée de conservation des échantillons.

III.3 OBSERVATION AU MEB DE POUDRES D'ÉCHANTILLONS DE SABLE GYPSEUX COMPACTÉS ET SÉCHÉS

III.3.1 Définition

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 pour améliorer le pouvoir séparateur, cette technique permet en pratique l'observation de plages allant de 25μ pour un grandissement de 4000 jusqu'à moins de 1μ pour un grandissement de 100000, un pouvoir de séparateur permet d'un examen très fin de (Dedligen M L G)

Le microscope électronique à balayage (MEB) consiste à éclairer un échantillon massif par un faisceau d'électron monocinétique qui en bombardant un solide fait que la surface irradiée émet des électrons. L'émission des électrons dépend de l'énergie du faisceau incident et de la composition de la cible, pour les roches – matériaux non conducteurs il faut déposer un film métallique sur l'échantillon pour rendre sa surface conductrice électriquement.

Les observations sur le MEB permettent de reconnaître les minéraux cristallisés ou non est surtout l'arrangement spatial des grains et leurs liaisons, et la connaissance de la texture renseigne sur deux nombreuses propriétés, que soit pour la minéralogie, la photographie ou dans le domaine géotechnique. Ben Dhia (1983)

Dans la microscopie électronique la perte d'énergie des électrons diffusées inélastiquement par la matière est caractéristique des éléments qui composent l'échantillon traversé.

Le microscope électronique ne nous donne pas des informations absolues sur la minéralogie des échantillons, mais sa contribution n'en demeure pas moins précieuse et on peut connaître la nature de substitution atomique existant au sein de cristaux dont l'espace méninétique aura peut être identifiée par ailleurs à partir de leur morphologie et de leur spectre de diffraction électronique. Sierra R. Bernard A (1964)

III.3.2 Observation des échantillons

L'observation a porté sur des poudres extraites d'échantillons compactés à différentes teneurs en eau et séchés à plus de 28 jours.

A travers les images obtenus au MEB, on observe des grains présentant un aspect lisse dur pour ceux correspondant au compactage à sec (photo a) à un aspect de plus en plus rugueux au fur et à mesure que la teneur en eau de compactage augmenté (photo b, c et d).

Sur la photo (a), les grains ne présentent pas de liaison, ils sont superposé les uns sur les autres.

L'aspect de la photo correspondant au compactage à $W < W_{opm}$ fait penser à l'aspect des roses de sable.

La cassure de la liaison entre deux grains (photo d) correspondant à $W > W_{opm}$ laisse apparaître un enchevêtrement de fibres parfois tissées en toile fine. Les contacts entre grains se font par imbrication et par ponts de gypse. Le gypse recouvre la quasi-totalité de la superficie des grains : il est déposé sous forme de lamelles ou de bâtonnets constituant des liaisons en forme de ponts entre les cristaux préexistants

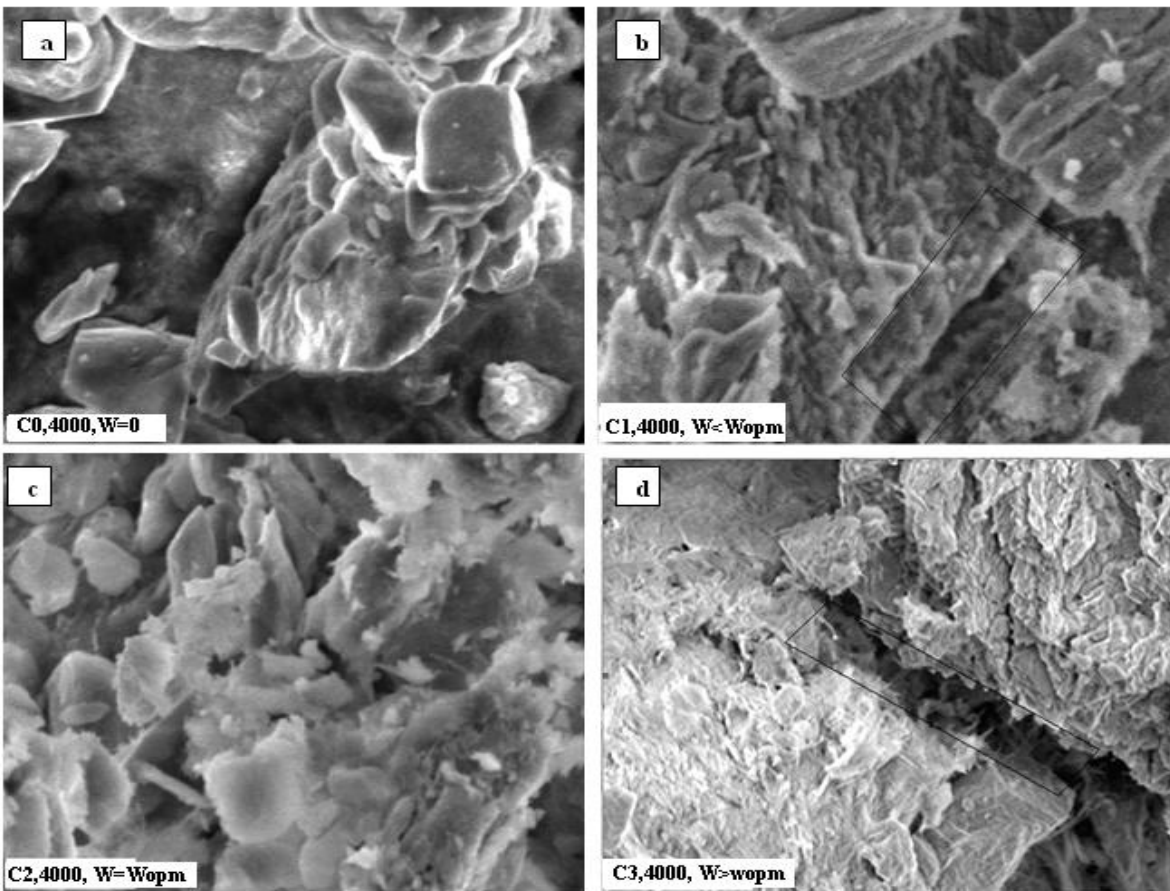


Fig 3.16 – Photos MEB de poudre du sable gypseux de Ben Guecha extraites d'échantillons séchés après compactage respectivement à $W=0\%$; $W= 11\%$ ($3/4W_{opm}$); $W= w_{opm}=14.5\%$ et $W= 16\%$.

III.3.3 Conclusions

Les résultats de l'analyse de l'évolution de la cohésion macroscopique du matériau gypso calcaire et les observations au MEB de poudres d'échantillons de sable gypseux compactés et séchés convergent vers une explication du phénomène de durcissement par une dissolution d'une partie des fines carbonatées et gypseuses dans l'eau de compactage en faveur d'une recristallisation lors de l'évaporation donnant naissance à des liens cimentés locaux.

III.4 CONCLUSIONS

La partie caractérisation et classification du matériau a permis :

- De passer en revue les différents stades d'identification des sables gypseux en vue d'une utilisation routière en zone aride, sous faible trafic.
- De mettre en relief la non-conformité des classifications usuelles des sols pour ce type de sol.
- De mettre en évidence l'importance, pour ce type de matériau :
 - ◇ Des analyses chimiques dans l'identification.
 - ◇ Du taux de compactage.
 - ◇ De l'essai de compression simple dans les critères de choix du matériau.

Par ailleurs, l'hypothèse de travail semble être confirmée : le phénomène de durcissement du sable gypseux, analysé à travers l'évolution de la résistance en compression simple en fonction des paramètres environnementaux, est comparable à celui du tuf gypso-calcaire de Hassi - Messaoud.

- Les résultats des essais de compression simple confirment l'existence d'une teneur en eau optimale de durcissement W_{od} telle que :
 - $W_{opm}/2 < W_{od} < W_{opm}$.
- A une teneur en eau nulle le durcissement est faible.
- A quelques heures de conservation, les échantillons compactés à faible teneur en eau présentent une meilleure cohésion que ceux compactés à W_{opm} .
- Le durcissement s'opère principalement entre le 4^{ème} et le 14^{ème} jour.
- La résistance à la compression chute avec l'augmentation de la teneur en eau résiduelle.
- 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 à 28 jours de conservation.
- La résistance est très sensible aux taux de compactage.
- Le module d'élasticité du sable gypseux de Ben Guecha ne dépend ni de la teneur en eau de confection ni de la durée de conservation des échantillons : seules les valeurs limites des déformations (début de la chute de résistance et déformation maximale) diffèrent d'une série à une autre.

- Les observations au MEB de poudres d'échantillons de sable gypseux compactés et séchés convergent vers une explication du phénomène de durcissement par une dissolution d'une partie des fines gypseuses dans l'eau de compactage en faveur d'une recristallisation lors de l'évaporation donnant naissance à des liens cimentés locaux.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

VI CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

VI.1 CONCLUSION

Nos travaux qui ont essentiellement portés sur une étude de données recueillies au laboratoire LTPS, une étude expérimentale à travers laquelle nous avons tenté, dans les limites de temps et de moyens qui nous ont été disponibles, de mieux connaître la nature et le comportement de notre matériau d'étude et enfin une observation au MEB d'échantillons, objet de l'étude expérimentale, nous permettent de conclure :

- Qu'aucune relation ne lie la résistance à la compression simple et la teneur en gypse des tufs d'encroûtements. Cependant, une bonne résistance (plus de 20 bars) ne peut-être obtenue avec moins de 50% de (gypse + carbonate de calcium). Cette condition étant nécessaire mais non suffisante.
- Une forte présence de gypse ne garantit pas nécessairement une bonne cohésion du matériau après compactage puis séchage.
- La classification des sables gypseux n'obéit pas aux classifications des sols classiques.
- le matériau appartient à la classe des matériaux fins nécessitant une certaine cohésion selon la technique routière saharienne.
- L'identification du matériau a permis de comparer ses caractéristiques aux seuils exigés par les normes. C'est un sable gypseux à fort pourcentages de gypse, présentant des caractéristiques de compactage médiocres et une faible cohésion étroitement liée au taux de compactage : son éventuel utilisation en technique routière saharienne nécessite une forte énergie de compactage (au delà des 98% de compacité) pour gagner en cohésion.

Par ailleurs, cette étude nous a permis :

- De passer en revue les différents stades d'identification des sables gypseux.
- De mettre en relief la non-conformité des classifications usuelles des sols pour ce type de sol.
- De mettre en évidence l'importance, pour ce type de matériau :

- Des analyses chimiques dans l'identification.
- Du taux de compactage.
- De l'essai de compression simple dans les critères de choix du matériau.

L'étude du durcissement, articulée autour de la variation de la résistance en compression simple et de l'observation des échantillons au MEB a donné les résultats suivants :

- Le durcissement optimal est obtenu pour une teneur en eau optimale W_{od} telle que :
$$W_{opm}/2 < W_{odurcissement} < W_{opm}.$$
- Le durcissement est faible pour une teneur en eau nulle.
- Le module d'élasticité du sable gypseux de Ben Guecha ne dépend ni de la teneur en eau de confection ni de la durée de conservation des échantillons : seules les valeurs limites des déformations (début de la chute de résistance et déformation maximale) diffèrent d'une série à une autre.

L'observation au MEB de poudres d'échantillons de sable gypseux compactés et séchés convergent vers une explication du phénomène de durcissement par une dissolution d'une partie des fines gypseuses dans l'eau de compactage en faveur d'une recristallisation lors de l'évaporation donnant naissance à des liens cimentés locaux.

L'évolution du durcissement observé dans le temps, des chaussées en sable gypseux, s'opérerait donc grâce aux cycles d'humidification et de séchage induit par le climat ambiant et aux caractéristiques minéralogiques et physiques du gypse.

VI.2 RECOMMANDATIONS

- Une classification des matériaux sub-normaux devrait être élaborée en tenant compte du savoir faire et des recommandations existantes actuellement.
- Vu la relation étroite entre la cohésion et le compactage, il est recommandé d'atteindre au moins 98% de compacité à chaque fois que cela est possible.
- Le taux de compacté du matériau doit être contrôlé lors de sa mise en œuvre.
- Des études plus approfondies du phénomène de durcissement des sables gypseux pourraient apporter des solutions et des moyens pour l'améliorer (compactage avec de l'eau additionnée de gypse...).
- La réalisation des planches d'essais et leur suivi est indiqué afin d'améliorer la méthodologie de la mise en œuvre des sables gypseux sachant qu'ils sont dans certaines régions du sud algérien les seuls matériaux routiers.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Alloul B., 1981 – Etude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux d’Algérie en vue de leur valorisation routière – Thèse de docteur de 3ème cycle de l’Université de Paris VI.

Améraoui Z., 2002 – Les tufs d’encroûtements, utilisation dans la géotechnique routière, Thèse de magistère – Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

Arquié G., 1972 – Théorie du compactage : routes et pistes – Eyrolles Editeur, Paris.

Baslimane B., 1994 – Etude en laboratoire du comportement des sables gypseux– IIème séminaire : Les techniques routières sahariennes, Beni Abbès.

Ben Dhia M.H., 1983 – Les encroûtements calcaires en Tunisie et dans le monde – Bull. de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 126, pp. 5-14.

Ben Dhia M.H., 1983 – Les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière – Thèse de docteur de 3ème cycle, Université de Paris VI.

Boulkhiout M., 2002 – Utilisation des tufs calcaires- sable de dune en géotechnique routière – Mémoire de Magister, ENP Alger.

Bureau P. et Roederer P., 1960 – Contribution à l’étude des sols gypseux du Sud Tunisien : croûtes et encroûtements gypseux de la partie Sud de Gabes – Cah. Pédol. ORSTOM.

Calland M 2004 « cours de mécanique des sols » tome 01

Colombier G., 1988 – Tufs et encroûtements calcaires : Utilisations routières – Synthèse, ISTD.

Coque R., 1962 – La Tunisie présaharienne. Etude morphologique – A. Colin, Paris.

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

Delage P., Fry J-J., 2001 – Comportement des sols compactés : apport de la mécanique des sols non saturés – Revue Française de Géotechnique, N° 92. pp 17-29.

Deuxième séminaire 2001 (les techniques routières sahariens janvier 2001)

Djili K. et al., 1999 – Analyse de la distribution verticale et spatiale du calcaire dans les sols de l’Algérie Septentrionale – Revue Etude et Gestion des Sols, pages 201 à 213.

Domec M., Alloul B., 1980 – Construction des chaussées au Sahara – Rapport technique du Laboratoire central des travaux publics, Alger.

Durand J. H., 1953 – Etude géologique, hydrogéologique et pédologique des croûtes en Algérie – Serv. Etud. Sci. Pédol. S.E.S. Alger.

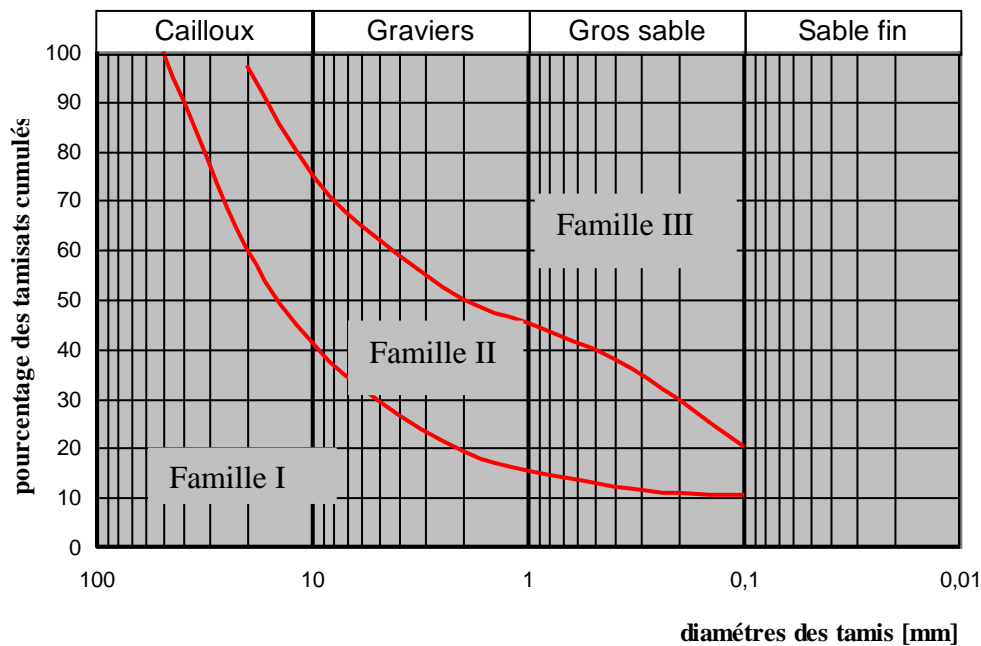
Durand J. H., 1963 – Les croûtes calcaires et gypseuses en Algérie : formation et âge – Bull. Soc. Géol. De France.

FAO 1990 “gypsiferous soil in the world soils ser FAO land and water dvptbul 62 Rome Rome”.

- Fenzy E., 1966** – Particularité de la technique routière au Sahara – Revue générale des routes et aérodromes, N° 411, p. 57-71.
- Fenzy E., 1970** – L'état actuel de la Technique Routière au Sahara – Rapport technique, Direction de l'Infrastructure de l'Organisme Saharien, Ministère des travaux publics, Algérie.
- Fumet P., 1959** – Chaussées en sables gypseux et en sables stabilisés chimiquement – Revue général des routes et aérodromes, numéro spécial Sahara, N° 329, p. 169-178.
- Halitim A., 1988** – Sols des régions arides d'Algérie – O.P.U. Alger.
- Horta O S., 1979** – Les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux en géotechnique routière – Service des publications du laboratoire de M.D.S., Base SONATRACH, Blida, Algérie.
- Horta O. S., 1980** – Calcrète, Gypcrete and soil classification in Algeria – Engineering Geology 15. 15-52.
- Inal A., 1980** –Route en milieu désertique – IVème Conférence routière Africaine, Nairobi.
- Kharfi b** - Comportement des sables gypseux en corps de chaussée - Ingénieur laboratoire des travaux publics du sud Ouargla, Algérie
- LTP Sud, 1989** - Utilisation des matériaux locaux en technique routière : les sables gypseux - Rencontre Maghrébine sur les techniques routières, Tunis.
- Morsli M 2007**- Etude du durcissement d'un tuf d'encroûtement de Hassi- Massaoud -Algérie
- Peltier R. 1959** « Le rôle du laboratoire dans la technique routière saharienne », *Revue générale des routes et aérodromes*, Numéro spécial Sahara, N°329, pp. 165-168.
- Pouget M., 1968** – Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud-tunisien – Cah. ORSTOM, sér. Pédol. vol. VI. No 3-4.
- Pouget M., 1980** – Les sols à croûtes calcaires dans les steppes algériennes. Quelques aspects morphologiques et esquisse d'une évolution actuelle – Cah. ORSTOM Sec. Pédol. 18, 3.4, 235-236.
- Razi Sabah 2006b** -Etude expérimentale de l'influence du gypse sur la dynamique du phosphore dans le sol et sa cinétique d'absorption par la ray-grass -.
- Sierra R., Bernard A. 1964** Analyse thermogravimétrie ses applications à l'étude de sols, argiles et ciments. Bull. liaison L.C.T.P.
- Vieillefon J., 1979** – Contribution à l'amélioration de l'étude des sols gypseux – ORSTOM, sér. pédol, vol XVII, N° 3, 195-223.
- Voinovitch L.A, 1971** « l'analyse des minéralogique des soles argileux »

ANNEXE

- ◆ **Famille I** : ce sont les matériaux à squelettes purement frottant, se situant au-dessous du fuseau, non évolutif et à fort angle de frottement ($\varphi > 45^\circ$).
- ◆ **Famille II** : présente tout les matériaux dont la courbe granulométrique s'inscrit entièrement dans le fuseau, à condition qu'ils soient non évolutifs (restriction sur la valeur de Los Angeles LA). Ces matériaux se rapprochent des graves non traitées.
- ◆ **Famille III** : comprend les matériaux dont la courbe granulométrique se trouve entièrement ou partiellement au-dessus du fuseau. Ce sont des matériaux fins dont la résistance est obtenue principalement par cohésion.



Annexe I - fuseau saharien de Beni Abbés

Tableau A - Propositions de spécifications pour L'ALGERIE par STRUILLOU et ALLOUL

| | | | Poids lourds/ jour | | | | |
|---|---|----|--------------------|------------|------------|-------------|-----------|
| | | | <130 | 130 300 | 300 600 | 600 1200 | >120 0 |
| Zone II sub-humide H=350 à 600mm de pluie par an Avec bon drainage exigé | % <80µ max. | BF | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | % > 4 mm min. | BF | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | % > 12,5 mm min. | BF | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | L.A. max. sur > 12,5 mm sec | B | 100 | 55 | 35 | | |
| | | F | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | Ip max. < 0,4mm | BF | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | CBR _c à 4 j d'immersion min. | BF | 40 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| | % CaCO ₃ min. sur <1 | B | 70 | 70 | 70 | | |
| F | | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | |
| % CaSO ₄ max. sur <1 | BF | Tr | tr | tr | tr | Tr | |
| Zone III semi-aride H=100 à 350mm de pluie par an Sans exigence de bon drainage | % <80µ max. | BF | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | % > 4 mm min. | BF | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| | % > 12,5 mm min. | BF | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | L.A. max. sur > 12,5 mm sec | B | 100 | 55 | 35 | | |
| | | F | 100 | 100 | 100 | 100 | 35 |
| | Ip max. < 0,4mm | BF | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |
| | CBR _c à 4 j d'immersion min. | BF | 40 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| | % CaCO ₃ min. sur <1 | B | 70 | 70 | 70 | 70 | |
| F | | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | |
| % CaSO ₄ max. sur <1 | BF | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | |
| Zone IV aride H<100 mm de pluie par an Sans exigence de bon drainage | Rc (MPa) min. sur <5 ; (γ _d = 0,95 · γ _d OPM ; 48h à 55 °C | B | 2,5 | 3,0 | 3,5 | | |
| | | F | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 | 3,5 |
| | IP max sur < 0,4 mm | BF | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| | CBR _c à 4 j d'immersion min. | BF | 30 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| | % (CaCO ₃ + CaSO ₄) min. sur < 1mm | B | 70 | 70 | 70 | | |
| | | F | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| % NaCl max. sur < 1 mm | BF | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | |

Légende : Caractéristiques à viser, si possible, en Algérie pour le choix des tufs d'encroûtements, suivant la zone climatique et le trafic prévu.

■ Tufs d'encroûtements déconseillés ; B : pour couche de base ; F : pour couche de fondation ; tr : traces ; Rc (en Mpa) : compression simple sur cylindre (5x10cm) sèche 48h à 55 °C ; Ip : indice de plasticité ; granulométrie sous eau après 48h dans l'eau ; compactage CBR à 55 coups/couche à W_{OPM} puis 4 j d'immersion ; L.A. (%) : Los Angeles sur granulométrie A.

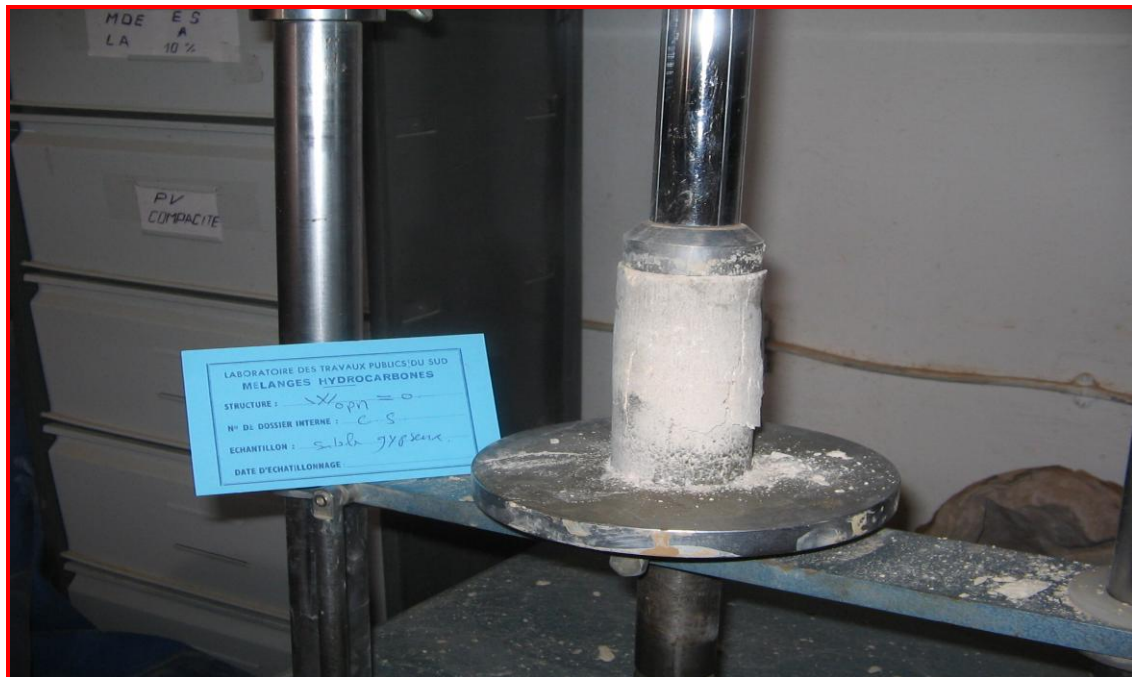
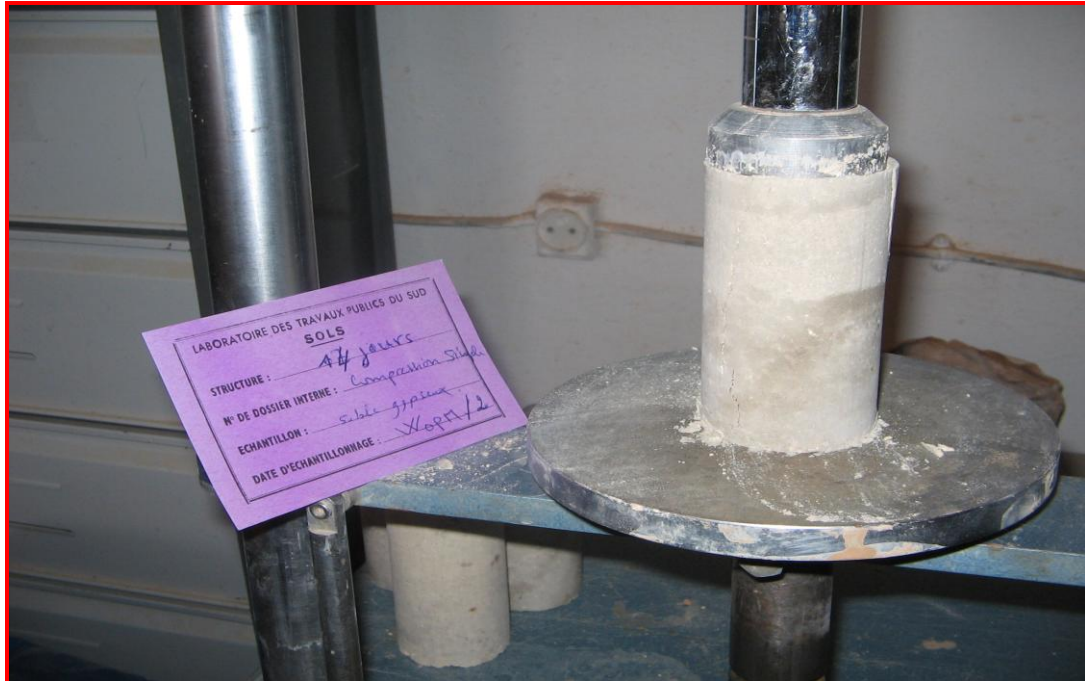
Tableau : Caractéristiques des éprouvettes

| DUREE DE CON | W | N | Phconf (g) | Pfcons (g) | Wconf | H(cm) | yd ecra | Com% | Rc(bars) | Def (%) |
|--------------|---------|---|------------|------------|-------|-------|---------|-------|----------|---------|
| 04 heures | Wopm/2 | 1 | 340 | 337,7 | 7,25 | 10,1 | 1,72 | 106,7 | 5.24 | 0.58 |
| 04 heures | Wopm/2 | 2 | 340 | 338 | 7,25 | 9,98 | 1,72 | 106,1 | 5.17 | 0.57 |
| 04 heures | Wopm/2 | 3 | 339,2 | 339,2 | 7,25 | 9,98 | 1,72 | 106 | 5.09 | 0.56 |
| 04 heures | 3Wopm/4 | 1 | 352,89 | 351 | 11 | 9,95 | 1,78 | 109 | 4.91 | 0.54 |
| 04 heures | 3Wopm/4 | 2 | 352,89 | 352,04 | 11 | 9,98 | 1,75 | 108 | 4.82 | 0.53 |
| 04 heures | 3Wopm/4 | 3 | 352,89 | 352,15 | 11 | 10 | 1,75 | 108 | 4.91 | 0.54 |
| 04 heures | Wopm | 1 | 364 | 364 | 14,5 | 10 | 1,85 | 114 | 2.82 | 0.30 |
| 04 heures | Wopm | 2 | 346 | 364 | 14,5 | 10 | 1,85 | 114 | 2.82 | 0.31 |
| 04 heures | Wopm | 3 | 362 | 362 | 14,5 | 9,98 | 1,84 | 143,5 | 2.80 | 0.31 |
| 01 jour | Wopm/2 | 1 | 340,4 | 319,4 | 7,25 | 10 | 1,62 | 100 | 11.64 | 1.28 |
| 01 jour | Wopm/2 | 2 | 339 | 318,4 | 7,25 | 9,99 | 1,62 | 100 | 11.27 | 1.30 |
| 01 jour | Wopm/2 | 3 | 338 | 316,7 | 7,25 | 9,99 | 1,61 | 100,6 | 11.82 | 1.24 |
| 01 jour | 3Wopm/4 | 1 | 352,4 | 319,9 | 11 | 9,99 | 1,63 | 100,6 | 14.90 | 1.64 |
| 01 jour | 3Wopm/4 | 2 | 352,56 | 320,1 | 11 | 9,97 | 1,63 | 100,6 | 14.81 | 1.63 |
| 01 jour | 3Wopm/4 | 3 | 352 | 321 | 11 | 9,96 | 1,63 | 100,6 | 14.76 | 1.62 |
| 01 jour | Wopm | 1 | 364 | 321,9 | 14,5 | 10 | 1,63 | 100,6 | 13.82 | 1.52 |
| 01 jour | Wopm | 2 | 362 | 320 | 14,5 | 9,99 | 1,63 | 100,6 | 14.00 | 1.54 |
| 01 jour | Wopm | 3 | 362,2 | 321,1 | 14,5 | 9,99 | 1,63 | 100,6 | 13.63 | 1.50 |
| 4 jours | Wopm/2 | 1 | 339,7 | 322,2 | 7,25 | 9,99 | 1,6 | 98 | 14.73 | 1.62 |
| 4 jours | Wopm/2 | 2 | 338,2 | 319 | 7,25 | 9,98 | 1,6 | 98 | 14.54 | 1.60 |
| 4 jours | Wopm/2 | 3 | 334 | 315,5 | 7,25 | 9,97 | 1,6 | 98 | 14.36 | 1.58 |
| 4 jours | 3Wopm/4 | 1 | 352,1 | 318,6 | 11 | 9,98 | 1,62 | 100 | 17.27 | 1.72 |
| 4 jours | 3Wopm/4 | 2 | 352,7 | 317,9 | 11 | 9,99 | 1,61 | 99 | 17.17 | 1.89 |
| 4 jours | 3Wopm/4 | 3 | 352,33 | 318,5 | 11 | 10,2 | 1,62 | 100 | 17.30 | 1.90 |
| 4 jours | Wopm | 1 | 362,7 | 322,2 | 14,5 | 9,98 | 1,64 | 101,2 | 15.63 | 1.72 |
| 4 jours | Wopm | 2 | 362,9 | 322,1 | 14,5 | 9,99 | 1,64 | 101,2 | 16.50 | 1.74 |
| 4 jours | Wopm | 3 | 360 | 319 | 14,5 | 9,97 | 1,63 | 100,6 | 15.63 | 1.72 |
| 7 jours | Wopm/2 | 1 | 340,2 | 318,2 | 7,25 | 10 | 1,61 | 99 | 17.45 | 1.92 |
| 7 jours | Wopm/2 | 2 | 339,5 | 318 | 7,25 | 9,99 | 1,61 | 99 | 16.91 | 1.86 |

Mémoire de Magister

| | | | | | | | | | | |
|----------|---------|---|--------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|
| 7 jours | Wopm/2 | 3 | 337 | 316,4 | 7,25 | 9,99 | 1,61 | 99 | 17.09 | 1.88 |
| 7 jours | 3Wopm/4 | 1 | 352,14 | 316,8 | 11 | 9,98 | 1,61 | 100 | 21.26 | 2.34 |
| 7 jours | 3Wopm/4 | 2 | 352,8 | 317,8 | 11 | 9,99 | 1,61 | 99 | 21.08 | 2.32 |
| 7 jours | 3Wopm/4 | 3 | 352,77 | 318 | 11 | 9,99 | 1,62 | 100 | 20.99 | 2.31 |
| 7 jours | Wopm | 1 | 363,9 | 317,5 | 14,5 | 9,97 | 1,63 | 100,6 | 19.27 | 2.12 |
| 7 jours | Wopm | 2 | 362,7 | 37,5 | 14,5 | 9,99 | 1,63 | 100,6 | 19.45 | 2.14 |
| 7 jours | Wopm | 3 | 362 | 317,7 | 14,5 | 9,98 | 1,63 | 100,6 | / | / |
| 14 jours | Wopm/2 | 1 | 339,1 | 317,8 | 7,25 | 9,98 | 1,62 | 100 | 19.27 | 2.13 |
| 14 jours | Wopm/2 | 2 | 339,5 | 318,8 | 7,25 | 9,97 | 1,62 | 100 | 19.63 | 2.16 |
| 14 jours | Wopm/2 | 3 | 339,8 | 316,6 | 7,25 | 9,98 | 1,61 | 99 | 19.36 | 2.94 |
| 14 jours | 3Wopm/4 | 1 | 352,6 | 315,8 | 11 | 10,01 | 1,6 | 99 | 26.72 | 2.95 |
| 14 jours | 3Wopm/4 | 2 | 352,2 | 317,3 | 11 | 10 | 1,61 | 99 | 26.81 | 2.95 |
| 14 jours | 3Wopm/4 | 3 | 352,55 | 316,9 | 11 | 9,99 | 1,61 | 100 | 26.88 | 2.95 |
| 14 jours | Wopm | 1 | 363,5 | 317,5 | 14,5 | 9,99 | 1,61 | 99 | 14.73 | 1.62 |
| 14 jours | Wopm | 2 | 362,5 | 317,5 | 14,5 | 9,99 | 1,61 | 99 | 26.36 | 2.90 |
| 14 jours | Wopm | 3 | 362,4 | 317,7 | 14,5 | 9,98 | 1,62 | 100 | 26.72 | 2.94 |
| 28 jours | Wopm/2 | 1 | 339,2 | 315,8 | 7,25 | 10 | 1,6 | 98 | 20.36 | 2.24 |
| 28 jours | Wopm/2 | 2 | 339 | 315,2 | 7,25 | 10 | 1,6 | 98 | 21.27 | 2.34 |
| 28 jours | Wopm/2 | 3 | 338,8 | 315 | 7,25 | 9,99 | 1,6 | 98 | 20.72 | 2.28 |
| 28 jours | 3Wopm/4 | 1 | 352,6 | 314 | 11 | 9,99 | 1,6 | 98 | 26.72 | 2.94 |
| 28 jours | 3Wopm/4 | 2 | 352,67 | 315 | 11 | 10 | 1,6 | 99 | 26.68 | 2.93 |
| 28 jours | 3Wopm/4 | 3 | 352,79 | 317,2 | 11 | 9,99 | 1,61 | 99 | 26.52 | 2.91 |
| 28 jours | Wopm | 1 | 359,6 | 317,4 | 14,5 | / | 1,61 | 99 | 25.99 | 2.86 |
| 28 jours | Wopm | 2 | 360,2 | 315,7 | 14,5 | 10 | 1,6 | 98 | 26.54 | 2.92 |
| 28 jours | Wopm | 3 | 363,4 | 315,2 | 14,5 | 10,02 | 1,6 | 98 | 26.08 | 2.87 |

- W** : teneur en eau.
H : hauteur de l'éprouvette
Phconf : poids de l'éprouvette de confection
Wconf : teneur en eau de confection.
Pfcons : poids de l'éprouvette après conservation.
Comp : compacité de l'éprouvette.
 γ_d : densité sèche après écrasement
Rc : résistance à la compression simple.
Def : déformation des éprouvettes



L'écrasement des éprouvettes

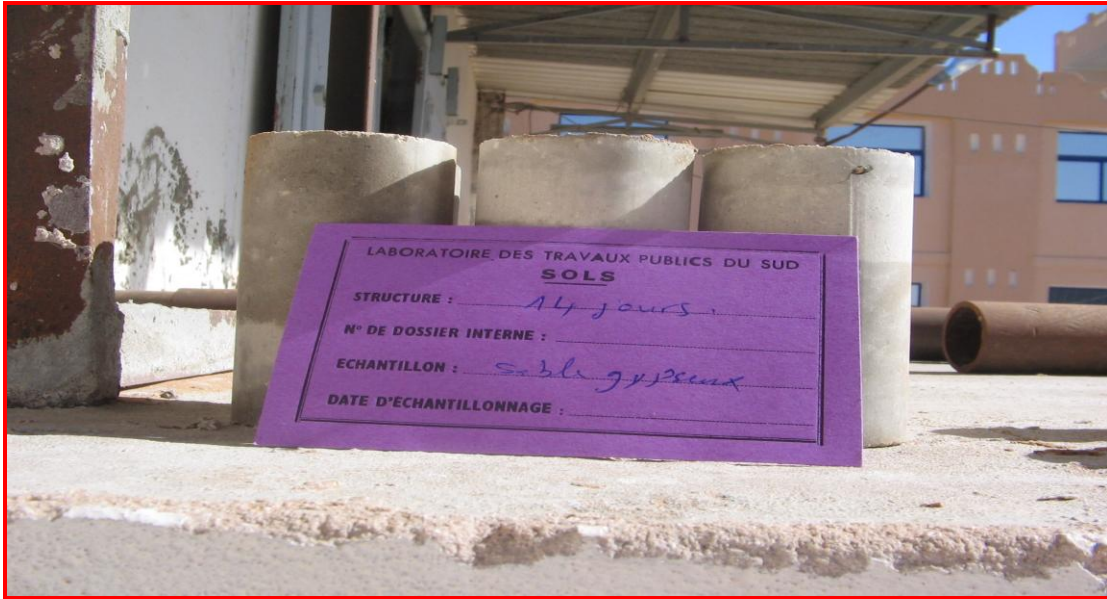
Eprouvettes de 04 jours de conservation



Eprouvettes conservées à 07 jours à l'air libre



Eprouvettes conservées 14 jours à l'air libre.

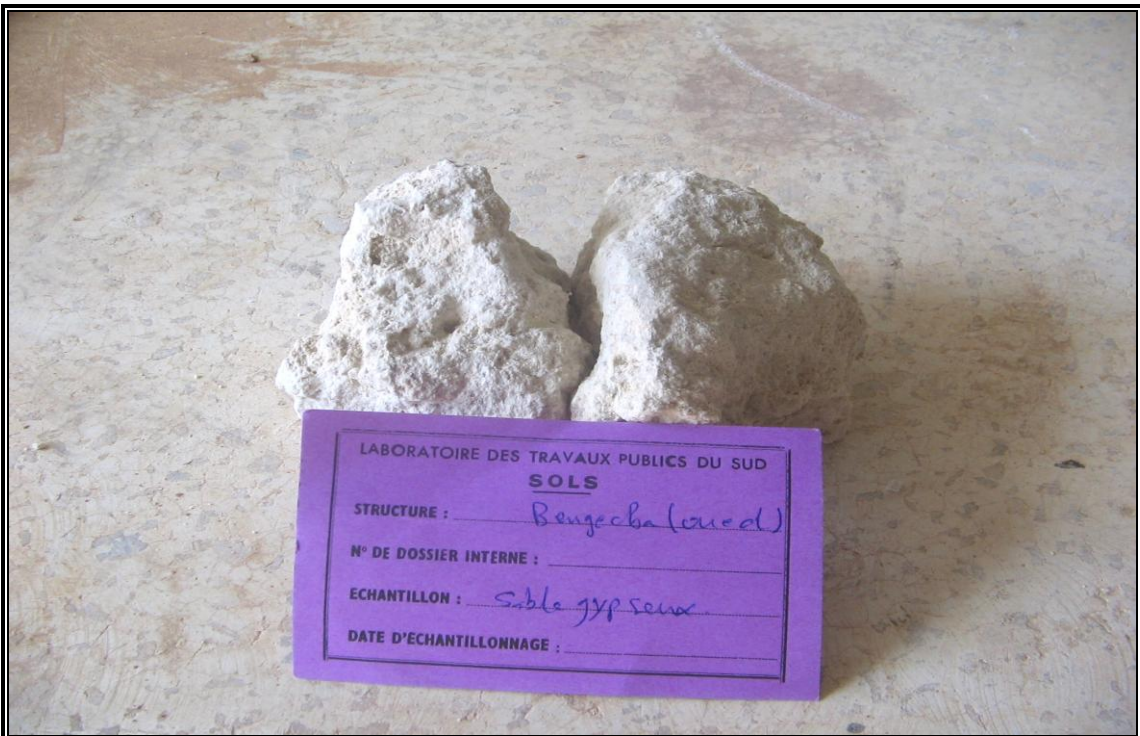


Eprouvettes conservées 28 jours à l'air libre.





Sable gypseux encroûtement



Sable gypseux (bloc)

Résultats d'analyse des différents matériaux effectués par LTPS

| N° | w % | yd(g/cm3) | CBR % | Rc95% | Rc98% | Rc100% | insol% | gypse% | calc% |
|----|-------|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | 8,96 | 1,65 | 18 | 4,5 | 6,86 | 8,27 | 76,24 | 24,48 | 0 |
| 2 | 8,32 | 1,79 | 59,23 | 26,59 | 31,83 | 33,39 | 30,52 | 58,87 | 0 |
| 3 | 9 | 1,67 | 52,53 | 6,63 | 8,45 | 18,08 | 12,42 | 71,84 | 0 |
| 4 | 8,6 | 1,7 | 61,46 | 13,64 | 17,67 | 22,74 | 10,69 | 78,18 | 0 |
| 5 | 8,1 | 1,7 | 49,67 | 9,22 | 10,73 | 12,86 | 11,2 | 78,33 | 0 |
| 6 | 10 | 1,75 | 68,2 | 11,95 | 13,64 | 16,76 | 19,12 | 69,23 | 0,43 |
| 7 | 8,5 | 1,64 | 61,47 | 4,67 | 6,75 | 8,83 | 12,1 | 75,09 | 0,43 |
| 8 | 9,8 | 1,75 | 65,81 | 13,28 | 16,35 | 18,2 | 17,14 | 70,84 | 0,46 |
| 9 | 6,4 | 1,79 | 51,19 | 7,97 | 10 | 11,95 | 56,7 | 36,27 | 0,86 |
| 10 | 6,5 | 1,87 | 55,2 | 8,29 | 10,46 | 14,222 | 51,43 | 41,28 | 0,86 |
| 11 | 7,1 | 1,81 | 34,52 | 10 | 12,08 | 13,64 | 30,3 | 59,13 | 0,86 |
| 12 | 9,4 | 1,8 | 22,73 | 17,67 | 19,49 | 23,39 | 28,82 | 62,17 | 0,86 |
| 13 | 9,5 | 1,76 | 63,49 | 12,6 | 14,55 | 15,2 | 7,22 | 75,84 | 0,86 |
| 14 | 7,8 | 1,78 | 53,04 | 13,25 | 16,89 | 20 | 9,83 | 77,13 | 0,86 |
| 15 | 8,8 | 1,73 | 53,9 | 11,86 | 12,5 | 14,15 | 9,83 | 77,13 | 0,86 |
| 16 | 7,5 | 1,69 | 46,66 | 11,67 | 13,25 | 17,28 | 76,24 | 24,48 | 1,24 |
| 17 | 9,8 | 1,79 | 46,66 | 7,02 | 9,36 | 11,15 | 72,01 | 25,5 | 1,3 |
| 18 | 8 | 1,9 | 38,73 | 14,15 | 15,05 | 17,47 | 42,39 | 46,44 | 1,3 |
| 19 | 11 | 1,72 | 53,89 | 12,08 | 13,23 | 14,68 | 40,59 | 50,35 | 1,3 |
| 20 | 10,9 | 1,63 | 58,43 | 12,08 | 13,9 | 15,33 | 12,07 | 82,62 | 1,3 |
| 21 | 10,9 | 1,67 | 57,25 | 7,8 | 9,09 | 10,13 | 16,4 | 74,42 | 1,73 |
| 22 | 9 | 1,75 | 82,51 | 9,62 | 10,39 | 10,91 | 19,2 | 70 | 1,74 |
| 23 | 5,2 | 1,89 | 45,47 | 17,53 | 19,65 | 23,64 | 22,13 | 68,16 | 2,17 |
| 24 | 10,26 | 1,77 | 63,99 | 20,25 | 25,72 | 34,3 | 20,1 | 69,04 | 2,17 |
| 25 | 9,8 | 1,83 | 58,75 | 15,81 | 18,36 | 25 | 14,91 | 71,7 | 2,17 |
| 26 | 11,1 | 1,78 | 72 | 1,3 | 2,3 | 5,7 | 76 | 18 | 2,6 |
| 27 | 10,1 | 1,71 | 71,56 | 8,05 | 10,91 | 11,69 | 8,59 | 50,35 | 2,6 |
| 28 | 10,6 | 1,67 | 63,13 | 10,65 | 14,68 | 20,53 | 20,93 | 82,62 | 3,04 |
| 29 | 9 | 1,7 | 50,51 | 5,19 | 7,79 | 10,13 | 5,03 | 74,42 | 3,04 |
| 30 | 9,7 | 1,68 | 59,94 | 11,18 | 14,26 | 16,38 | 5,66 | 70 | 3,04 |
| 31 | 14,06 | 1,62 | 43,78 | 11,43 | 13,25 | 14,55 | 8,5 | 68,16 | 3,04 |
| 32 | 9,8 | 1,74 | 43,78 | 14,5 | 23,9 | 28 | 3,54 | 69,04 | 3,04 |
| 33 | 11,6 | 1,7 | 37,04 | 14,7 | 16,89 | 18,97 | 20 | 71,7 | 3,47 |
| 34 | 7,6 | 1,71 | 68,2 | 8 | 12 | 15 | 18,78 | 71,48 | 3,47 |
| 35 | 8,5 | 1,7 | 28,79 | 8,31 | 9,87 | 14,04 | 66,82 | 26,54 | 3,48 |
| 36 | 10,5 | 1,71 | 58,88 | 14,81 | 18,45 | 27,29 | 12,18 | 68,55 | 3,91 |
| 37 | 10,7 | 1,68 | 48,32 | 5,45 | 7,4 | 9,09 | 42,2 | 23,8 | 4,32 |

Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature

