

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
LABORATOIRE CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT

THESE DE MAGISTER

Présentée par :

Mlle Zoubida AMERAoui
Ingénieur d'état en Travaux Publics de l'E.N.T.P.
Option : Infrastructure des transports

Thème

TUFS D'ENCROUTEMENTS : UTILISATION DANS LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE

Soutenue le : 15 / 05 / 2002

Devant le jury composé de :

Président	: Mr A.BALI	Professeur ENP
Rapporteurs	: Mme M.MORSLI Mr S.BELKACEMI	Chargée de cours ENP Maître de conférences ENP
Examineurs	: Mr N.LARADI Mme R.KETTAB Mr R.BOUTEMEUR	Maître de conférences USTHB Chargée de cours ENP Chargé de cours ENP
Invités	: Mr M.BEDRICI Mr HAOUCHINE	Directeur du laboratoire central SONATRO Président directeur général CTPP

Remerciements

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à ma directrice de thèse Madame M. MORSLI, chargée de cours à l'ENP, pour le suivi qu'elle m'a accordé, ses conseils et orientations qui m'ont été de grande utilité ainsi que ses encouragements tout au long de ce travail.

Ma reconnaissance va à Monsieur S. BELKACEMI, maître de conférences à l'ENP, pour son aide et ses conseils judicieux, qui malgré ses nombreuses occupations, a consacré une partie de son temps pour la correction de cette thèse.

Mes remerciements vont également au Professeur A. BALI, le chef du laboratoire de construction et environnement à l'ENP, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider ce jury. Je le remercie aussi pour son accueil chaleureux au sein de son laboratoire. Qu'il trouve ici, l'expression de ma sincère gratitude.

Je tiens à remercier sincèrement Madame R. KETTAB, chargée de cours à l'ENP, qui me fait l'honneur de participer à ce jury et d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements à Monsieur R. BOUTEMEUR, chargé de cours à l'ENP, d'avoir bien voulu faire partie du jury et enrichir ce travail avec sa contribution.

Je remercie également Monsieur N. LARADI, maître de conférences à l'USTHB, d'avoir bien voulu examiner mon travail, malgré ses charges pédagogiques.

Je ne saurais remercier l'équipe du laboratoire central de la SONATRO de Réghaïa qui m'ont grand ouvert leur porte, en particulier Monsieur BEDRISSI, le directeur du laboratoire central, Monsieur ZITOUNI, Monsieur BOUSEBAA, Madame BOUKERROU, Mademoiselle FARES, Monsieur AOUN, qui n'ont pas hésité d'apporter leur précieuse aide morale et technique.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe du CRD (SONATRACH), en particulier Madame BOUTEMEUR, le chef du département environnement, ainsi que Monsieur BELKADI, le chef de service « Rayons X » et Madame BELLIL, je leur remercie pour leur accueil chaleureux et leur aide concernant mes analyses aux rayons X.

De même, je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux personnels et aux techniciens du Laboratoire des Travaux Publics du Centre (Alger), en particulier Monsieur MEZAACHE, le chef du département laboratoire, pour son accueil chaleureux dans son département et Madame KOUHADADOU, chef de service chimie pour sa disponibilité et sa précieuse aide concernant mes analyses chimiques.

Sans oublier Monsieur B. ALLOUL, chargé de cours à l'institut de science de la terre d'USTHB et Monsieur S. CHERMOUTI, ingénieur au CTIP qui n'ont pas hésité d'apporter leur contribution à la discussion de mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur le Professeur FLEUREAU de l'Ecole Centrale de Paris pour son accueil chaleureux et son aide.

Mes remerciements vont à l'adresse des personnels et techniciens du département mécanique de l'ENP pour leur précieuse contribution à la réalisation du moule de confection.

Enfin, que toute personne qui a contribué de près ou de loin à la mise au point de ce travail trouve ici ma profonde gratitude.

TUFS D'ENCROUÈMENTS : UTILISATION DANS LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE

ملخص

ظلت المواد المستعملة في جيوتقنية الطرقات محل اهتمام مهندسي وتقنيي الطرقات . حيث كانت موضوع التعريفات الهادفة لتقييسها . غير أن هذه المواد المسماة بـ " الكلاسيكية " هي إما متوفرة بكميات قليلة و إما منعدمة في بعض المناطق ؛ هذا ما دفع لاستعمال الموارد المتوفرة محليا ، حتى و إن لم تطابق خصائصها المقاييس المعمول بها .
في هذا المنظار ، أبحاث أتبع في مختلف المخابر الوطنية ، وضعت أساسا من أجل تقييم هذه المواد من أجل استعمال أمثل في شبكة الطرقات .
رسالتنا هذه تدخل في هذا الإطار ، حيث نتناول دراسة سلوك تف جبسي جيرى من منطقة حاسي مسعود خاضع للمحيط الصحراوي ، بدون معالجة أولاً ثم بإضافة الجير .

الكلمات المفتاحية: جيوتقنية الطرقات - التعريفات - المواد الكلاسيكية - تف جبسي جيرى - معالجة - الجير .

Résumé

Les matériaux utilisés dans la géotechnique routière ont de tout temps été le centre d'intérêt d'ingénieurs et techniciens routiers. Ils ont fait l'objet de spécifications visant à les standardiser. Cependant, ces matériaux dits « classiques » sont soit en quantité insuffisante soit inexistants dans certaines régions ; le recours à l'utilisation des matériaux disponibles localement, même si leurs caractéristiques s'éloignent des critères habituels, devient alors incontournable.

Des recherches sont menées dans différents laboratoires nationaux visant à valoriser ces matériaux pour une meilleure utilisation routière. Notre thèse rentre dans cette optique; elle traite le comportement d'un tuf gypso-calcaire de la région de Hassi Messaoud sous un environnement saharien. L'étude porte sur le matériau non traité puis sur sa stabilisation à la chaux.

Mots-clefs : géotechnique routière – spécifications - matériaux classiques – tufs gypso-calcaire – stabilisation – chaux.

Abstract

The materials used in road geotechnical engineering have been at all times the focus of the road engineers and technicians. They were the subject of specifications aiming at standardize them. However, these road materials called «classical», are either in insufficient quantity or non-existents in some areas; the recourse to the use of the materials available locally, even if theirs characteristics pass over of the habitual criteria, becomes unavoidable.

For this purpose, researches works are undertaken in national laboratories in order to valorizate these road materials for the best road uses. Our thesis is included within this framework; it treats the behaviour of a gypcalcrete tuff of the Hassi Messaoud area, under a saharan environment. The investigation rest on the unbound material then on its stabilization with lime.

Key-words : road geotechnical engineering – specifications – classical materials – gypcalcrete tuff – stabilisation – lime.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1	Caractéristiques de la RN6.....	31
Tableau V.1	Caractéristiques Proctor et CBR.....	40
Tableau V.2	Analyse chimique sommaire.....	43
Tableau VI.1	Résistance en compression simple en fonction de la teneur en eau, à différentes durées de conservation (conservation à l'étuve avec dessiccation).....	48
Tableau VI.2	Résistance en compression simple en fonction de la teneur en eau, à différentes durées de conservation (conservation à l'air libre).....	50
Tableau VI.3	Résistance en compression simple en fonction de la teneur en eau, à différentes durées de conservation (conservation à l'étuve sans dessiccation).....	52
Tableau VII.1	Caractéristiques chimiques de la chaux.....	61
Tableau VII.2	Variation de la Rc en fonction du temps, à différents dosages en chaux et teneurs en eau.....	62
Tableau VII.3	Résistances à la compression simple sur des éprouvettes standards traitées à 2% de chaux.....	64
Tableau VII.4	Valeurs de l'indice CBR à différentes durées de conservation, à 2% de chaux.....	65

LISTE DES FIGURES

Figure II.1	Répartition des encroûtements calcaires dans le monde.....	9
Figure II.2	Carte des encroûtements calcaires.....	10
Figure II.3	Encroûtement mûr.....	12
Figure IV.1	Evolution de la Rc dans le temps pour deux tufs, à différents modes de conservation.....	36
Figure V.1	Courbe granulométrique.....	39
Figure V.2	Courbe Proctor.....	41
Figure V.3	Courbe granulométrique après compactage.....	42
Figure V.4	Influence de la compacité sur la Rc.....	43
Figure VI.1	Influence de la teneur en eau sur la Rc, à différentes durées de conservation (conservation à l'étuve avec dessiccation).....	49
Figure VI.2	Influence de la teneur en eau sur la Rc, à différentes durées de conservation (conservation à l'air libre).....	51
Figure VI.3	Influence de la teneur en eau sur la Rc, à différentes durées de conservation (conservation à l'étuve sans dessiccation).....	53
Figure VI.4	Influence de la durée de conservation sur la Rc, à différentes teneurs en eau (conservation avec dessiccation).....	54
Figure VI.5	Influence de la durée de conservation sur la Rc, à différentes teneurs en eau (conservation sans dessiccation).....	55
Figure VI.6	Evolution de la Rc en fonction du mode de conservation	
Figure VI.6.a)	Evolution de la Rc en fonction du mode de conservation, pour $w = 11\%$	56
Figure VI.6.b)	Evolution de la Rc en fonction du mode de conservation, pour $w = 8\%$	57
Figure VI.6.c)	Evolution de la Rc en fonction du mode de conservation, pour $w = 6\%$	57
Figure VI.6.d)	Evolution de la Rc en fonction du mode de conservation, pour $w = 3\%$	58

Figure VII.1	Influence de la teneur en chaux sur la Rc	
Figure VII.1.a)	Influence de la teneur en chaux sur la Rc, pour $w = 11\%$	62
Figure VII.1.b)	Influence de la teneur en chaux sur la Rc, pour $w = 6\%$	63
Figure VII.2	Evolution de la Rc en fonction de l'âge des éprouvettes traitées à la chaux (pour $w = 11$ et 6%)	64
Figure VII.3	Evolution de l'indice portant CBR en fonction de l'âge des éprouvettes traitées à 2% de chaux, pour $w = 11\%$	66

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 :** Fuseau saharien de Beni Abbès .
- Annexe 2 :** Fuseau saharien de la transsaharienne .
- Annexe 3 :** Spécifications des tufs d'encroûtements de l'Algérie proposées par ALLOUL et STRUILLOU .
- Annexe 4 :** Spectre du sol naturel .
- Annexe 5 :** Moule de confection .
- Annexe 6 :** Caractéristiques des éprouvettes représentatives des essais.
- Annexe 7 :** Superposition des spectres des échantillons conservés .

LISTE DES SYMBOLS

CBR	<i>Californian Bearing Ratio</i> : Indice Portant Californien.
CPA	Ciment Portland Artificiel.
CRD	Centre de Recherche et Développement.
C1	Conservation à l'étuve avec dessiccation.
C2	Conservation à l'étuve sans dessiccation.
d	distance entre plans réticulaires.
ES	Equivalent de sable.
H	Hauteur pluviométrique moyenne.
Ip	Indice de plasticité.
I_{CBR}	Indice CBR.
LA	coefficient de dureté Los Angeles.
LTPC	Laboratoire Central des Travaux Publics.
LTPS	Laboratoire des Travaux Publics du Sud.
MEB	Microscope Electronique à Balayage.
n	nombre entier.
OPM	Optimum Proctor Modifié.
PF	Perte au feu.
PL	Poids lourds.
Rc	Résistance à la compression simple.
RN	Route Nationale.
SONATRO	Société Nationale des Grands Travaux Routiers.
TJMA	Trafic Journalier Moyen Annuel.
VB	Valeur au bleu.
w	la teneur en eau.
w_{OPM}	la teneur en eau à l'optimum Proctor modifié.
γ_{dOPM}	la densité sèche à l'optimum Proctor modifié.

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

- θ angle d'incidence.
- λ longueur d'onde.
- φ angle de frottement.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE

Partie 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1

PARTICULARITE DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE

I.1 INTRODUCTION.....	1
I.2 DIFFERENTS ASPECTS DU CONTEXTE SAHARIEN	1
I.2.1 Le sol saharien.....	1
I.2.2 Le climat	2
I.2.3 Le trafic.....	2
I.3 DEFINITION DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE.....	2
I.3.1 Domaine d'application.....	2
I.3.2 Principes de la technique	3
I.3.3 Critères de choix de matériaux pour couche de base.....	3
I.3.4 Matériaux pour couche de fondation.....	5
I.4 CONCLUSION.....	6

Chapitre 2

DEFINITION ET GEOLOGIE DES TUFES D'ENCROUTEMENTS

II.1 INTRODUCTION.....	7
II.2 PRECISION SUR LE MOT TUF	7
II.3 LES ENCROUTEMENTS CALCAIRES	8
II.3.1 Définition.....	8
II.3.2 Répartition dans le mode	8
II.3.3 Formation des encroûtements calcaires.....	9
II.3.4 Classification des encroûtements calcaires.....	13
II.3.5 Age des encroûtements calcaires	14
II.4 LES ENCROUTEMENTS GYPSEUX.....	14
II.4.1 Introduction.....	14
II.4.2 Propriétés chimiques et minéralogiques du gypse	15
II.4.2.1 Le gypse.....	15
II.4.2.2 L'anhydrite ($CaSO_4$).....	16
II.4.3 Géologie des encroûtements gypseux.....	17
II.4.3.1 Extension géographique des encroûtements gypseux.....	17
II.4.3.2 Origine du gypse.....	17
II.4.3.3 Formation des encroûtements gypseux.....	17
II.4.3.4 Les sables gypseux	18
II.5 LES ENCROUTEMENTS MIXTES	19
II.5.1 Introduction.....	19
II.5.2 Géologie des encroûtements mixtes.....	19
II.6 CONCLUSION.....	20

Chapitre 3

CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUE DES TUFES D'ENCROUITEMENTS

III.1 INTRODUCTION.....	21
III.2 LES TUFES CALCAIRES.....	21
III.2.1 Identification	21
III.2.1.1 Granulométrie.....	21
III.2.1.2 Essai Los Angeles	22
III.2.1.3 Teneur en calcaire et en gypse	22
III.2.1.4 Les limites d'Atterberg.....	23
III.2.1.5 Essai d'équivalent de sable	23
III.2.1.6 Essai au bleu de méthylène	24
III.2.2 Les essais de comportement.....	24
III.2.2.1 L'essai Proctor modifié.....	24
III.2.2.2 L'essai CBR	24
III.2.2.3 Essai de résistance à la compression simple	25
III.3 LES SABLES GYPSEUX	25
III.3.1 Identification	25
III.3.1.1 Granulométrie.....	25
III.3.1.2 Les limites d'Atterberg.....	25
III.3.1.3 La composition chimique	26
III.3.1.4 Essai au bleu.....	26
III.3.1.5 L'essai d'équivalent de sable	26
III.3.2 Essais de comportement.....	26
III.3.2.1 Essai Proctor.....	26
III.3.2.2 Essai CBR	26
III.3.2.3 Essai de compression simple.....	26
III.4 CRITERES DE SELECTION DES TUFES EN ASSISE DE CHAUSSEE.....	27
III.5 CONCLUSION	28

Chapitre 4

UTILISATION DES TUFES D'ENCROUITEMENTS EN CORPS DE CHAUSSEE

IV.1 INTRODUCTION.....	29
IV.2 MODE DE CONSTRUCTION DES ROUTES AU SAHARA	29
IV.2.1 Couche supérieure des terrassements.....	29
IV.2.2 Couche de fondation	29
IV.2.3 Couche de base.....	29
IV.2.4 Imprégnation	30
IV.2.5 Revêtement.....	30
IV.3 LES CHAUSSEES EN TUFES CALCAIRES	30
IV.3.1 Généralités	30
IV.3.2 Comportement des chaussées en tufs calcaires.....	30
IV.3.3 Performances des chaussées en tufs calcaires.....	31
IV.3.4 Précautions lors de la mise en œuvre	32
IV.4 LES CHAUSSEES EN SABLE GYPSEUX	32
IV.4.1 Historique de l'utilisation du sable gypseux	32

IV.4.2 Comportement des chaussées en sable gypseux	32
IV.4.2.1 Fissurations	33
IV.4.2.2 Gonflement.....	34
IV.4.2.3 Problèmes liés à la présence des chlorures	34
IV.4.2.4 Déformabilité mesurée in-situ.....	34
IV.4.3 Les sables gypseux sur chantier	35
IV.5 DURCISSEMENT DES TUFES COMPACTES.....	35
VI.5.1 Etudes en laboratoire.....	36
IV.6 CONCLUSION	37

Partie 2 : ETUDE EXPERIMENTALE

PLAN EXPERIMENTAL.....	38
------------------------	----

Chapitre 5

IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE ET MINERALOGIQUE

V.1 PRESENTATION DE L'ECHANTILLON	39
V.2 SITUATION ET NATURE DES TERRAINS DE LA REGION.....	39
V.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE	39
V.4 LIMITES D'ATTERBERG	40
V.5 QUALITE DES FINES	40
V.5.1 Essai au bleu.....	40
V.6 LES ESSAIS PROCTOR ET CBR.....	40
V.7 EVOLUTION GRANULOMETRIQUE.....	41
V.8 ESSAI DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE.....	42
V.9 ANALYSE MINERALOGIQUE.....	43
V.9.1 Analyse chimique sommaire	43
V.9.2 La diffraction des rayons X.....	44
V.10 CONCLUSION	45

Chapitre 6

AUTOSTABILISATION

VI.1 INTRODUCTION	46
VI.2 PLAN EXPERIMENTAL.....	46
VI.3 CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES.....	46
VI.4 ECRASEMENT DES EPROUVETTES	47
VI.5 RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	48
VI.5.1 Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression simple	48
VI.5.1.1 Conservation à l'étuve avec dessiccation.....	48
VI.5.1.2 Conservation à l'air libre.....	50
VI.5.1.3 Conservation à l'étuve sans dessiccation	52
VI.5.2 Influence de la durée de conservation sur la résistance à la compression simple.....	53
VI.5.2.1 Conservation avec dessiccation	54
VI.5.2.2 Conservation sans dessiccation.....	55
VI.5.3 Influence du mode de conservation sur la résistance à la compression simple	56
VI.5.4 Variation minéralogique	58
VI.6 CONCLUSION	59

Chapitre 7

STABILISATION A LA CHAUX

VII.1 INTRODUCTION	60
VII.2 PLAN EXPERIMENTAL	60
VII.3 IDENTIFICATION DE LA CHAUX	61
VII.4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	61
VII.4.1 Influence de la teneur en chaux sur la résistance à la compression simple	62
VII.4.2 Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression simple	63
VII.4.3 Evolution du CBR en fonction du temps.....	65
VII.5 CONCLUSION.....	66
RECOMMANDATIONS.....	68

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

الجمهورية الوطنية المتحدة - التتحيات
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le Sahara algérien couvre un peu plus de deux millions de kilomètres carrés. Les dessertes reliant les différentes régions sont donc parfois énormes. Les routes, avant 1950, avaient rarement dépassé les Hauts-Plateaux. Avec la découverte des premiers gisements du pétrole en 1955-1956, le Sahara a connu une grande extension des infrastructures routières. En trois ans, il a été construit plus de 1200 km auxquels s'ajoutaient, entre 1960 et 1962, 1000 km.

La réalisation de ces premières routes sahariennes avait imposé la résolution de grandes difficultés. En effet, l'uniformité des caractères géologiques et minéralogiques sur de vastes étendues où les terrains varient peu sur d'énormes distances, a dû nécessiter l'utilisation impérative des matériaux disponibles, jusque-là non employés dans le domaine des constructions routières. L'utilisation obligatoire des matériaux locaux dont les solutions de mise en œuvre s'écartaient des normes admises et compte tenu des conditions locales a abouti à la mise au point de technique particulière propre aux conditions locales, différente des techniques répandues au Nord du pays.

Aujourd'hui, La valorisation des matériaux locaux dans la géotechnique reste d'actualité; il s'agit de mieux maîtriser leur comportement dans diverses situations et leur mise en œuvre et d'arriver à une caractérisation (selon des paramètres déjà définis ou à définir) qui facilitera leur classification et leur utilisation par des ingénieurs et techniciens routiers. Beaucoup de laboratoires s'y attendent.

Les tufs d'encroûtements font partie des matériaux disponibles en grande quantité. Dans certaines régions relativement riches en granulats, ils sont utilisés comme matériaux de substitution pour économiser les ressources en matériaux nobles; dans d'autres ils représentent la seule ressource en matériaux routiers et sont utilisés dans les corps de chaussées. Certaines des routes réalisées avec ce matériau ont eu une bonne tenue alors que d'autres se sont dégradées.

Notre étude est définie à partir du thème « *Utilisation des matériaux locaux dans la géotechnique routière* ». Elle entre dans le cadre de l'accord programme de coopération franco-algérienne N° 99MDU443 établi entre le Laboratoire de Mécanique des Sols, Structure et Matériaux de l'ECParis et le Laboratoire Construction et Environnement de l'ENP (Alger).

Elle représente une contribution à une meilleure connaissance du comportement mécanique en laboratoire d'un tuf d'encroûtement avec une tentative de recherche des causes du phénomène de durcissement caractérisant les tufs d'encroûtements, phénomène à la base de leur utilisation routière.

L'échantillon d'épreuve est un tuf gypso-calcaire prélevé dans la région de Hassi Messaoud. Le travail consiste à étudier l'influence de l'environnement saharien (teneur en eau, température et mode de séchage) sur le durcissement du tuf. Un traitement à la chaux est suggéré pour les tufs les moins performants.

La thèse comprend deux grandes parties :

La première, représente une synthèse bibliographique répartie en quatre chapitres :

- Le chapitre 1 est consacré aux principes et spécificité de la technique routière au Sahara;
- Le chapitre 2 traite la formation géologique des tufs d'encroûtements sujet de la présente thèse;
- Dans le chapitre 3, nous donnons les valeurs des différentes caractéristiques géotechniques des tufs, ainsi que les critères de leur sélection en assises de chaussées ;
- Le chapitre 4, définit les performances, les dégradations ainsi que les dispositions constructives des chaussées construites en tufs d'encroûtements.

La deuxième partie de l'étude est le résultat d'un long travail qui s'est déroulée en grande partie au laboratoire de la SONATRO ; elle englobe trois chapitres, à savoir :

- Le chapitre 5, qui représente une identification géotechnique et minéralogique de l'échantillon du tuf étudié;
- Dans le chapitre 6 nous étudions l'influence de l'environnement saharien sur la prise des tufs d'encroûtements;
- Le chapitre 7 est une étude de stabilisation de notre tuf à la chaux aérienne.

Enfin nous proposons des recommandations qui nous semble utiles pour des éventuelles recherches futures portant sur les tufs d'encroûtements.

Partie 1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1

PARTICULARITE DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE

I.1 INTRODUCTION

La conception et la construction des chaussées en zones désertiques présentent une spécificité évidente liée à la nature du sol, au trafic et au climat.

Avant de présenter les principes de la technique routière saharienne et ses particularités, nous proposons un bref aperçu sur quelques aspects du contexte saharien.

I.2 DIFFERENTS ASPECTS DU CONTEXTE SAHARIEN

Le Sahara est un immense espace désertique, aride et peu peuplé, il couvre plus de 3/4 de la superficie du territoire algérien.

Cette zone désertique présente certains aspects liés à la nature du sol, au climat et au trafic, ces caractéristiques ont été mises à profit par les ingénieurs et les techniciens routiers.

I.2.1 Le sol saharien

La couverture de la zone saharienne est constituée dans sa quasi-totalité de matériaux du Quaternaire. On rencontre essentiellement des roches, des éboulis, des sables, des limons et des argiles [7].

a) Les roches

Elles sont anciennes ou récentes et composées le plus souvent de calcaires massifs de grès de tufs d'encroûtements calcaires, gypseux ou mixtes, etc.

b) Les éboulis

Sont des matériaux accumulés au pied des montagnes, dans les gorges et dans les oueds et formant les ergs. Les éboulis sont formés de fragments de roches ou de granulats de formes et de tailles variables. Leurs dimensions sont d'autant plus faibles qu'ils se trouvent éloignés des montagnes où ils sont formés.

c) Les sables

Les sables que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable.

d) Les limons

Ils constituent, en alternance avec les loëss, la couverture en couche mince la plus fréquente, dans les oueds.

e) Les argiles

Elles sont rencontrées essentiellement dans les dépressions et constituent très souvent le support des marécages, des sebkhas et des chotts.

I.2.2 Le climat

DUBIEF [2] propose une zonalité climatique basée sur la pluviométrie :

Zone I	: méditerranéenne humide	$H \geq 600 \text{ mm.}$
Zone II	: méditerranéenne subhumide	$350 \text{ mm} \leq H < 600 \text{ mm.}$
Zone III	: semi-aride ou steppique	$100 \text{ mm} \leq H < 350 \text{ mm.}$
Zone IV	: aride ou désertique	$H < 100 \text{ mm.}$

D'après cette classification, le Sahara est caractérisé par une pluviométrie moyenne annuelle inférieure à 100 mm, à la quelle s'ajoutent d'autres paramètres :

- Des températures très variables et élevées en été (entre 38 et 45°C [4]);
- Un écart thermique entre le jour et la nuit (12 à 15.4°C en été et de 9.6 à 15°C en hiver[26]);
- Une extrême sécheresse atmosphérique;
- Une fréquence des vents de sable;
- Une rareté et irrégularité des pluies.

Ces conditions climatiques du Sahara favorisent la bonne tenue des chaussées et permettent l'utilisation des matériaux locaux de diverses natures.

I.2.3 Le trafic

En général, le trafic sur les routes du sud est très faible relativement à celui des routes du nord, il est inférieur à 2000 v/j sur les principaux réseaux routiers au Sahara; néanmoins le trafic saharien possède la particularité d'être composé essentiellement de poids lourds en général supérieur à 40%, en raison de la faible urbanisation du Sahara [26].

I.3 DEFINITION DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE

Après la construction de plusieurs milliers de kilomètres au Sahara, plus de 2500 km de route réalisés entre 1956 (date de découverte des premiers gisements pétroliers) et 1963 (date de la tenue de la première rencontre sur les techniques routières sahariennes), une technique routière propre au Sahara a pris naissance et posséda dès lors, ses normes et sa particularité.

En 1965, lors du 1^{er} séminaire de Beni Abbès, les principes de la technique routière saharienne ont été justifiés et arrêtés. Depuis, cette technique a fait l'objet d'un certain nombre d'articles de synthèse, il y a eu également des études portant sur certains matériaux particuliers.

I.3.1 Domaine d'application

La principale innovation de la technique routière saharienne a été l'utilisation en couche de chaussées de matériaux fins, utilisation rendue possible par le climat et par le trafic relativement faible prévu pour les routes à construire.

Cette technique n'est donc applicable que :

- Sous un climat très sec (moyenne annuelle des pluies $< 100 \text{ mm}$) et dans les conditions telles que les risques d'imbibition des sols sous chaussées soient très réduits;
- Pour un trafic prévisible relativement faible.

I.3.2 Principes de la technique

Les idées de base de cette technique sont les suivantes :

- Les déflexions sous les pneus peuvent être grandes, mais doivent être essentiellement réversibles, car le trafic étant faible et le cumul des déformations permanentes n'est perceptible qu'après une longue période d'exploitation de la chaussée;
- La forme et l'état de la surface doivent faciliter l'écoulement des eaux pluviales afin de réduire les risques d'imbibition;
- Le problème des chotts et cuvettes doit être dissocié de la technique saharienne et considéré comme une exception.

Les principes qui en découlent sont :

- La couche de roulement doit être suffisamment souple pour plier sans rompre;
- Le matériau de la couche de base doit pouvoir supporter des déformations élastiques sans dommage;
- Le climat sec et la faible intensité du trafic favorisent l'utilisation des matériaux locaux même s'ils sont sensibles à l'eau, utilisation proscrite dans les régions humides notamment en couche de base;
- L'épaisseur de la couche de base peut être faible, car le sol support étant sec et possède un indice CBR immédiat généralement supérieur à 20;
- L'utilisation des matériaux fins sensibles à l'eau en couche de base exige un bon écoulement des eaux de pluies [13].

I.3.3 Critères de choix de matériaux pour couche de base

En technique routière saharienne, on distingue principalement deux types de matériaux pour couche de base :

- D'une part ceux qui doivent leur tenue à l'enclassement des différents éléments les un dans les autres et à l'angle de frottement important au contact grain sur grain;
- D'autre part ceux qui doivent leur tenue à la cohésion relativement élevée apportée par leurs éléments fins [6].

a) Matériaux à angle de frottement élevé

Ils sont appelés également : « *matériaux à ossatures* ». Ce sont des matériaux analogues aux matériaux dits : « *classiques* » utilisés dans les régions humides, ceux dont les courbes granulométriques doivent s'inscrire à l'intérieur des fuseaux-types de matériaux d'assises routiers.

En zone humide, outre la granularité, ces matériaux doivent remplir toutes les conditions pour obtenir un angle de frottement élevé après compactage, notamment :

- Une résistance suffisante aux chocs et à l'attrition;
- Des éléments de bonne forme : arrêtes vives, faces rugueuses;
- Un pourcentage de fines juste suffisant pour un bon compactage, etc.

Un tel matériau est aussi bon au Sahara; mais lorsqu'il s'agit de tout-venant naturel, qui remplit souvent les conditions de granularité et de résistance au choc, on se trouve presque toujours en présence de matériaux à grains plus ou moins arrondis et lisses.

C'est pour cette raison qu'au Sahara, on exige que les matériaux de ce type aient une certaine « cohésion ». C'est ainsi que par rapport à ceux utilisés dans les zones humides, le pourcentage de fines est plus élevé et la plasticité est plus forte.

Notons, que pour le fuseau de référence le plus utilisé pour les matériaux à ossature est : le fuseau dit « Saharien » ou « fuseau de Beni Abbès » (annexe 1).

Ce fuseau, qui est caractérisé en particulier par une « bosse de sable », a surtout été approprié aux matériaux d'encroûtements. Dans les régions où l'on ne rencontre pas de tels matériaux, il est préférable de se référer à un fuseau plus restrictif. (le fuseau de la Transsaharienne, par exemple. Annexe 2).

En résumé, les conditions demandées aux matériaux à ossature au Sahara, sont les suivantes [12] :

- La courbe granulométrique doit s'inscrire dans le fuseau choisi;
- Le coefficient Los Angeles doit être inférieur à 40 (ou à la rigueur être inférieur à 45) cette valeur du Los Angeles est liée aux conditions climatiques et à la classe du trafic;
- L'indice de plasticité doit être supérieur à 6 (on admet jusqu'à 10 ou 12 dans le nord du Sahara);
- Une résistance à la compression simple de 10 à 15 bars serait souhaitable.

b) Matériaux à « cohésion » élevée

Ces matériaux peuvent être divisés en deux grands groupes :

- D'une part ceux qui tirent leur cohésion de l'affinité réciproque des éléments pulvérulents de calcaire ou de gypse;
- D'autre part, ceux dont la cohésion est obtenue intégralement par l'agglomération des éléments argileux.

Cette cohésion peut être appréciée en laboratoire par l'essai de compression simple (FENZY[13]), effectué sur des éprouvettes compactées à la teneur en eau de l'OPM et séchées à l'étuve jusqu'à une teneur en eau voisine de zéro.

La résistance minimale exigée doit être obtenue pour une compacité de 97 à 98% de l'OPM (compacité demandée généralement sur chantier) en ce qui concerne la couche de base.

Cependant, si le matériau est difficile à compacter, on peut se référer à une compacité de 95% de l'OPM.

Cette résistance minimale avait d'abord été fixée empiriquement à 15, puis à 20 bars; mais FENZY [13] recommande une résistance de 25 bars pour plus de sécurité.

Dans le cas, de l'emploi des matériaux à fines argileuses dans le corps de chaussée, certains nombre de précautions doivent être prises, notamment en ce qui concerne la granularité :

Parmi ceux répondant au critère de la résistance à la compression simple, il est recommandé d'utiliser les matériaux graveleux ou grenus, ayant une bonne courbe granulométrique (étalée et concave)[12].

D'autre part, le pourcentage des fines (< 0.080 mm) est limité à 30% pour les matériaux fins, afin de faciliter leur humidification (homogénéisation de la teneur en eau de compactage) et compactage.

Résumons les conditions exigées pour l'emploi en couche de base des matériaux cohérents [12] :

- Résistance à la compression simple supérieure à 25 bars (pour une compacité de 97 ou de 98% de l'OPM);
- Teneur en fines $< 30\%$;
- Bonne granularité (cette condition a moins d'importance pour les matériaux d'encroûtements).

c) Matériaux intermédiaires

Il existe évidemment dans la nature tous les matériaux intermédiaires dont la cohésion et l'angle de frottement sont moyens.

L'expérience a montré qu'il fallait se méfier de ces matériaux qui n'entrent pas nettement dans l'une des catégories indiquées ci-dessus, et bien étudier leur cas avant de les accepter dans la couche de base.

I.3.4 Matériaux pour couche de fondation

Au niveau de la couche de fondation, la cohésion et la résistance aux chocs ont un peu moins d'importance. Les matériaux recherchés sont : peu plastiques et susceptibles de bien se comporter (critères de granularité et pourcentage des fines) [12].

Les matériaux utilisés pour la couche de fondation sont :

- Soit les mêmes matériaux choisis en couche de base, lorsque les gisements correspondants sont d'importance suffisante;
- Soit des matériaux qui tout en ne convenant pas à la couche de base, présentent des qualités suffisantes pour la couche de fondation.

I.4 CONCLUSION

La technique routière saharienne, ainsi définie par ses fondateurs, a permis d'équiper, en grand nombre, la vaste étendue désertique en routes et en aérodromes, dans des conditions technico-économiques convenables.

En outre, elle a permis de classer les matériaux des zones désertiques en trois familles à partir d'un fuseau discriminant (fuseau de Beni Abbès annexe 1), à savoir :

- **Famille I**, ce sont des matériaux à squelette purement frottant, se situant au-dessous du fuseau, non évolutifs et à fort angle de frottement ($\phi > 45^\circ$).
- **Famille II**, présente tous les matériaux dont la courbe granulométrique s'inscrit entièrement dans le fuseau, à condition qu'ils soient non évolutifs (restriction sur la valeur du 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.

C'est ainsi que, certains tronçons ont bien résistés au trafic, alors que d'autres se sont dégradés plus ou moins rapidement. Ceci a amené les ingénieurs à affiner cette technique par des travaux de recherche qui ont abouti à des propositions de spécifications par classe de matériaux, telles que :

- > Les spécifications de ALLOUL et STRUILLOU (1984) concernant les tufs d'encroûtements en Algérie [10] (annexe 3) ;
- > Les spécifications adoptées aux arènes granitiques [20] .

Chapitre 2

DEFINITION ET GEOLOGIE DES TUFES D'ENCROUTEMENTS

II.1 INTRODUCTION

Après la définition de la technique routière saharienne qui justifie l'emploi des matériaux locaux en corps de chaussée; nous aborderons dans ce chapitre la définition et la géologie d'une famille de matériaux sahariens qui ont fait leur preuve de bon comportement et qui sont, dès leur première utilisation routière, des matériaux économiques abondamment utilisés, mais ils n'ont pas encore livré tous leurs secrets en vue d'une utilisation optimale.

Avant d'entamer la géologie de ces formations, il nous paraît intéressant de commencer par la définition du mot : tuf.

II.2 PRECISION SUR LE MOT TUF

Le mot tuf du Latin *tofus* est défini de la façon suivante par le Dictionnaire HACHETTE encyclopédique illustré (1997) :

« Roche non homogène poreuse, souvent pulvérulente, soit d'origine sédimentaire (tuf calcaire), soit d'origine éruptive (tuf volcanique), agrégat qu'on trouve sous forme de strates grossières, souvent sous une mince couche de terre ».

Une définition plus élaborée est donnée par le géologue L.MORET (1962) [2] :

- « Les tufs volcaniques sont des produits de projections volcaniques, lapillis ou cendres, stratifiés par l'action de l'eau ».
- « Les tufs sédimentaires sont des incrustations irrégulières et spongieuses qui se produisent à l'émergence de sources calcaires et qui se renferment de nombreux moulages de plantes et de coquilles. Lorsque ces sources s'épanchent dans un bassin lacustre, le calcaire précipite en une fine poudre cristalline qui se stratifie, en couches régulières. La roche est alors plus compacte qu'un tuf et prend le nom de *travertin* ».

En Afrique du Nord le problème est plus complexe. Les formations appelées, dans le langage courant : *tufs* sont en vérité des encroûtements calcaires, gypseux ou mixtes, vraisemblablement sous l'influence du mot arabe *taffeza* articulé *teuf* en abrégé, qui désigne les grès friables quelque soit le ciment et peut-être aussi du mot berbère *tifkert* qui signifie : tartre, croûte [15].

Ces encroûtements n'ont pas de rapport avec les tufs volcaniques ni avec les tufs sédimentaires, mais ils s'en rapprochent, d'abord par leur composition minéralogique et origine continentale et aussi par ce que, dans certains cas, on observe le passage graduel des tufs, tel qu'ils sont définis par L.MORET, aux encroûtements [15].

Afin d'éviter les confusions possibles dues à l'utilisation abusive, même vague, du mot *tuf*, nous utilisons dans tout ce qui suit le mot *tuf* suivi de sa nature chimique qui peut-être : calcaire, gypseuse ou mixte, pour désigner les matériaux issus des encroûtements calcaires, gypseux ou mixtes.

II.3 LES ENCROUTEMENTS CALCAIRES

II.3.1 Définition

De nombreuses définitions ont été données aux encroûtements calcaires qui varient selon la spécialité de l'auteur (géologue, pédologue ou géotechnicien).

Parmi toutes les définitions proposées, on peut retenir celle donnée par A.J.GOUDIE [10] :

« La croûte calcaire est un matériau terrestre composé essentiellement, mais pas exclusivement de carbonates de calcium. Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus au moins grandes de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration ».

II.3.2 Répartition dans le monde

Les encroûtements calcaires se trouvent essentiellement dans les régions semi-arides et arides au relief relativement plat, dont l'inclinaison des terrains ne dépasse pas 0.25 %.

Ces conditions nécessaires à leur formation se rencontrent notamment dans les régions suivantes [5] :

En Amérique :

Se sont les hautes plaines des Etats-Unies allant du Texas à la Californie, celle du Mexique et celles de l'Argentine centrale.

En Afrique :

Ce sont les « Hamada », haut plateaux de l'Afrique du Nord, la plaine de Djefara et le bassin de Ben Gazi en Libye, les dépressions du Nord du Kenya, les steppes de la Tanzanie, les plateaux de la Somalie, les vallées de Botswana et d'Afrique du Sud, les zones sèches de Madagascar et du Mozambique, la Namibie et l'Angola.

Au Moyen-Orient :

On rencontre les encroûtements calcaires au Liban, en Syrie, en Jordanie dans les pays du Golfe Persique et en Inde dans les régions de Delhi et de New Delhi.

En Australie :

On trouve les encroûtements calcaires dans les plaines littorales.

En Europe :

Les encroûtements calcaires sont peu abondants sauf dans certaines régions méditerranéennes et notamment en Espagne.

La figure II.1, représente la carte des zones de climat désertique, aride et des régions où existent les encroûtements calcaires.

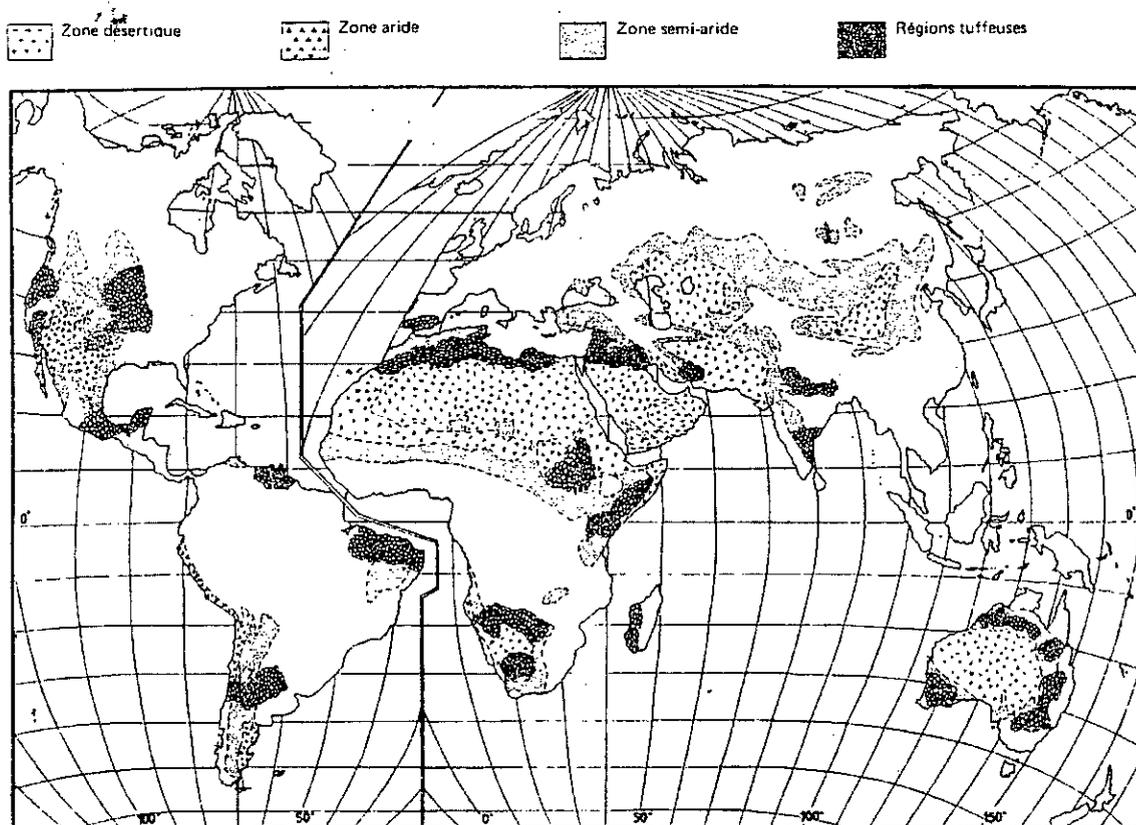


Figure II.1 - Répartition des encroûtements calcaires dans le monde[5].

II.3.3 Formation des encroûtements calcaires

La formation des encroûtements calcaires correspond à certaines conditions climatiques critiques. Pour que les sols s'encroûtent de manière appréciable, les précipitations doivent être capables de solubiliser des quantités importantes de carbonates, sans toutefois excéder un certain seuil au-delà duquel elles pourraient emporter la totalité ou la majeure partie de ces carbonates vers les bassins marins ou lacustres.

Ces conditions climatiques peuvent être illustrées par le climat qui règne dans les zones méditerranéennes subhumides et semi-arides [15].

En Algérie, d'après de DURAND (1959) [2], (figure II.2), les tufs à dominance calcaire couvrent approximativement une superficie de 300.000 km².

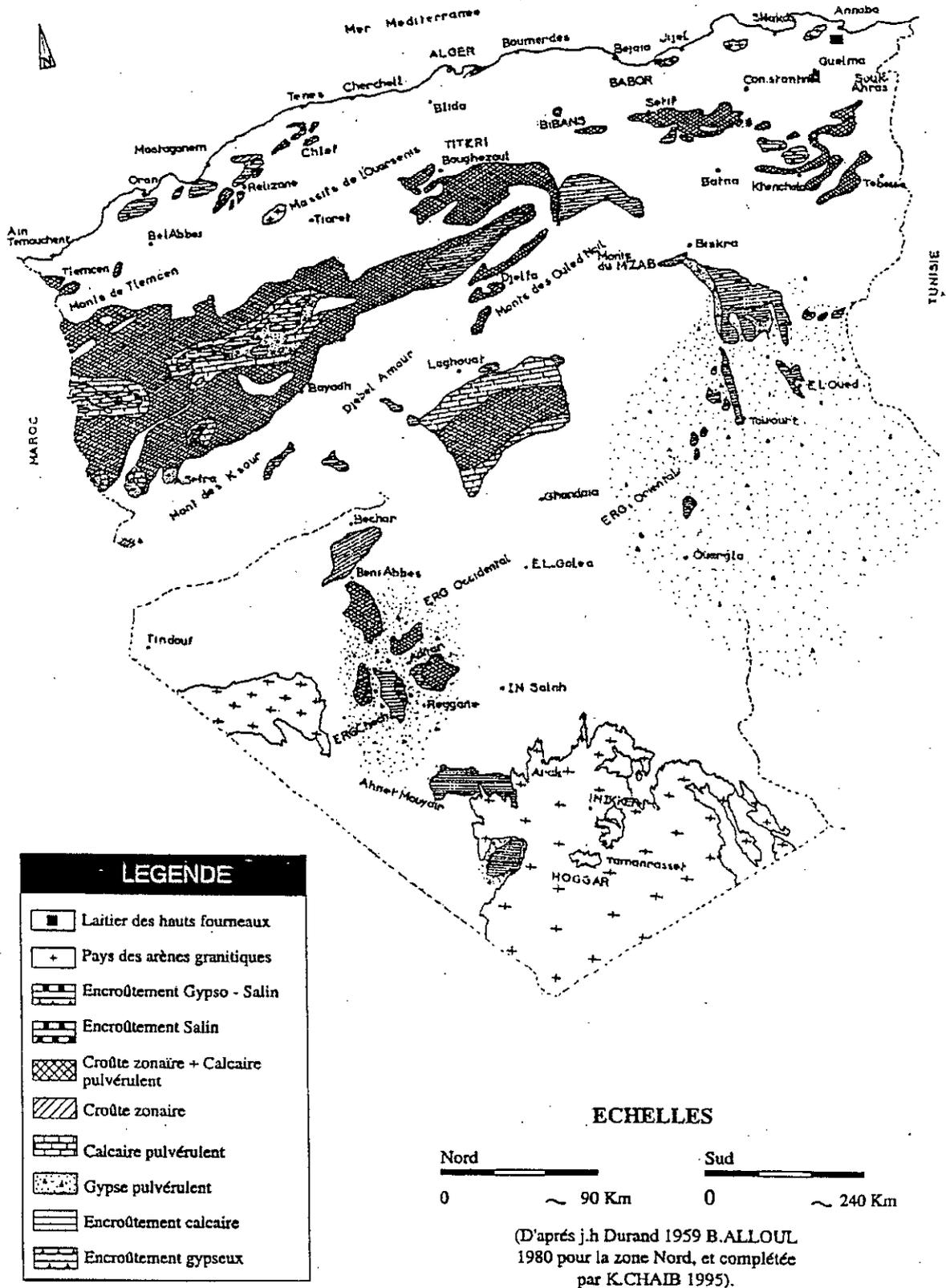


Figure II.2 - Carte des encroûtements calcaires[1].

Depuis près d'un siècle, la question de l'origine de ses formations ne cesse d'alimenter les controverses; différentes hypothèses furent émises, dont la plus plausible et celle qui recueille actuellement l'assentiment de la plupart des spécialistes est la théorie dite : « sédimentaire » et qui répond à trois questions [2] :

- D'où vient le calcaire ?
- Comment a-t-il été transporté ?
- Comment s'est-il redéposé et mis en place ?

a) Provenance et transport du calcaire

Le calcaire, qui contribue à la formation des encroûtements calcaires, est constitué essentiellement de carbonates de calcium $CaCO_3$ cristallisé sous forme de calcite à symétrie rhomboédrique.

Sa solubilité dans l'eau n'est généralement pas très élevée et dépend de plusieurs facteurs.

Ce calcaire provient de la solubilisation des massifs calcaires proches en hivers. Le transport se fait, soit sous forme de particules solides entraînées lors des précipitations, soit par solubilisation du carbonate de calcium dans l'eau chargée en dioxyde de carbone CO_2 . Cette eau produit un acide carbonique selon la relation chimique suivante :



L'acide carbonique ainsi formé donne lieu à la dissolution du calcaire :



Au total, on a l'équilibre chimique suivant :



La solubilité du carbonate de calcium $CaCO_3$ dans l'eau est d'autant plus forte que la teneur en dioxyde de carbone CO_2 est élevée et que la température est basse.

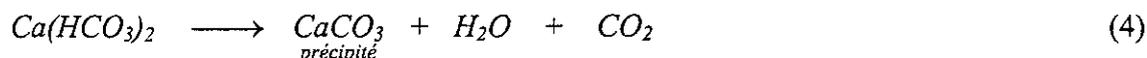
Il faut noter comme l'indique NETTERBERG (1969) [10] que la teneur en dioxyde de carbone CO_2 de l'eau du sol peut atteindre 1% et que le phénomène peut être accentué par la présence de micro-organismes ou de matières organiques.

b) Dépôt du calcaire

Les particules solides déposent par décantation ou évaporation. L'eau est d'autant plus chargée que la température est plus faible et que son mouvement est plus lent. Une fois arrivée dans une plaine ou un plateau, l'eau s'infiltré dans le sol.

Pendant la saison sèche, le niveau de la nappe commence à baisser sous l'effet de l'évaporation et surtout de la végétation. A ce moment on assiste au phénomène de capillarité du à la tension superficielle reliée au potentiel capillaire. Il en résulte une dépression qui provoque le dégagement du dioxyde de carbone CO_2 dissout et par conséquent le dépôt du calcaire [15].

D'après NETTERBERG (1969), quand le potentiel capillaire est entre 2 et 3 on a précipitation du calcaire selon la réaction suivante :



L'élévation de la température accélère la réaction sans lui être nécessaire, mais la dépression joue un rôle fondamental. Le processus de précipitation de la calcite est plus complexe que la simple évaporation du solvant; le liant calcaire prend beaucoup de temps pour durcir et c'est pourquoi les encroûtements calcaires ne peuvent se trouver dans les endroits soumis à un lessivage fréquent et dans les terrains dont les pentes sont importantes.

c) Evolution des encroûtements calcaires

Le calcaire se concentre dans un premier temps de manière discontinue sous forme d'amas friables et de nodules durs. Au fur et à mesure du dépôt, la teneur en carbonates du sol s'élève et la concentration devient continue et masque la couleur primitive du sol, à partir de ce stade se produisent ce que RUELLAN [10] appelle les phénomènes pédoliques qui progressivement transforment les différents horizons des sols. L'évolution finale est l'encroûtement mûr (figure II.3).

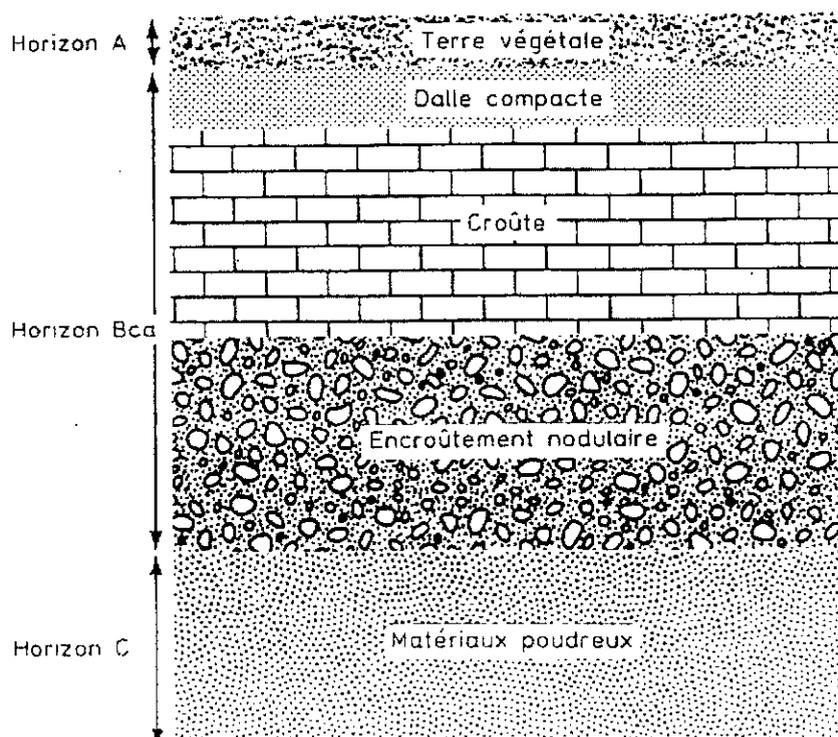


Figure II.3 – Encroûtement mûr [10].

Un sol sera passé par tous ces stades présentera un profil très différencié. On distinguera, du haut vers le bas, les horizons suivants :

Horizon A :

C'est la couche de terre végétale dont l'épaisseur peut atteindre quelques décimètres voire être inexistante en cas d'érosion, de couleur sombre.

Horizon B_{Ca} : (ou horizon d'accumulation)

C'est l'horizon de l'encroûtement proprement dit; son épaisseur peut varier de quelques décimètres à plusieurs mètres, le calcaire y est abondant (40 à 90%), la couleur est blanchâtre.

Il comprend le plus souvent :

- Une dalle compacte, dure à forte teneur en carbonates et dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de centimètres;
- La croûte constituée par une superposition de feuillets, de dureté plus faible que celle de la dalle, son épaisseur variable peut atteindre deux mètres. La différenciation entre croûte et dalle n'est pas toujours évidente;
- Une zone nodulaire; il s'agit de nodules calcaires durs pris dans une gangue calcaire plus ou moins pulvérulente.

C'est l'horizon B_{Ca} qui nous intéresse comme matériau routier, après décapage de la terre végétale et le ripage de la carapace (dalle ou/et croûte).

Horizon C :

C'est le matériau d'origine dans le quel on rencontre cependant, quelques nodules. L'enrichissement en calcaire est faible, de couleur blanchâtre.

II.3.4 Classification des encroûtements calcaires

La classification de RUELLAN (1970) [10] établie pour la géologie du Maghreb, semble avoir un caractère relativement universel, puisqu'elle est très voisine de celle de NETTERBEG établie à partir des études faites en Afrique du Sud, en Australie et au Texas. RUELLAN propose trois grandes catégories :

a) Distributions diffuses

La teneur en calcite est très faible. Le calcaire n'est pratiquement pas visible à l'œil nu.

b) Concentrations discontinues

La teneur en calcaire devient plus élevée (40 à 60%). Les concentrations de calcaire se présentent sous la forme de nodules durs de 1 à quelques cm³ ou sous forme d'amas friables qui s'écrasent facilement.

c) Concentrations continues

Lorsque la concentration en calcaire se poursuit (teneur en carbonate de calcium $CaCO_3$ supérieure à 60%) elle devient continue, on a alors affaire aux encroûtements calcaires proprement dit. C'est de ces formations que seront extraits les granulats routiers. On distingue selon la classification de RUELLAN :

❖ Les encroûtements non feuilletés :

- encroûtements massifs : d'aspect crayeux et de couleur homogène.
- encroûtements nodulaires : ce sont des nodules durs pris dans une gangue calcaire.

❖ Les encroûtements feuilletés :

Ce sont des concentrations continues; la teneur en calcaire diminue du sommet à la base. Les encroûtements feuilletés correspondent à la coupe proposée pour un encroûtement mûr (figure II.3).

II.3.5 Age des encroûtements calcaires

D'après A. RUELLAN [2] les encroûtements les plus jeunes ont 15 à 20.000 ans d'âge alors que les encroûtements murs où la dalle compacte est présente, ont quelques centaines de milliers d'années.

Ce sont donc des formations Quaternaires d'âge Villafranchien à l'actuel; cette période étant caractérisée par des successions de périodes pluviales et périodes sèches.

En Algérie d'après HORTA (1979) [2] : les encroûtements des zones à climat semi-aride sont puissants et comportent des croûtes plus au moins feuilletées et des dalles compactes très épaisses. Les encroûtements Salétiens sont très souvent développés. Les encroûtements qui ont occupé des dépressions, envahies plus tard par des chotts, ont été en partie gypsifiés.

II.4 LES ENCROUTEMENTS GYPSEUX

II.4.1 Introduction

Les encroûtements gypseux sont des formations analogues aux encroûtements calcaires. Ils sont très abondants dans les régions à climat aride où le gypse existe déjà dans les formations géologiques anciennes (Crétacé au Miopliocène)[2].

Ce minéral qui présente l'élément actif de la cimentation de ces formations, possède une dureté très faible : il peut être rayé à l'ongle; cette particularité pourrait paraître suffisante pour interdire l'utilisation du gypse comme matériau de chaussée.

Cependant, les chaussées construites en tufs gypseux ont été dans l'ensemble une réussite, grâce aux propriétés remarquables que possède le sulfate de calcium et qui permettent d'en faire un matériau de construction très apprécié.

II.4.2 Propriétés chimiques et minéralogiques du gypse

Le sulfate de calcium existe naturellement sous deux formes stables :

- Hydratée avec deux molécules d'eau par molécule de sulfate : c'est le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$);
- Anhydre, appelée anhydrite naturelle ($CaSO_4$).

Chacune de ces formes se présente sous de multiples aspects, liés à leurs conditions de formation et à leur pureté.

Entre ces deux états stables, il existe une phase transitoire instable, obtenue facilement de façon artificielle, ce que l'on appelle le semi-hydrate de calcium, à symétrie semi-exagonale[25].

II.4.2.1 Le gypse

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 (Italie, France, Inde) et même le Quaternaire (Ethiopie)[11].

a) Formes cristallines

Le gypse 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 macristallisées : 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, etc. [11].

b) Caractéristiques physico-chimiques

Elles sont les suivantes :

- Formule chimique : $CaSO_4 \cdot 2H_2O$;
- 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)
 - à 3°C : 1.81
 - à 20°C : 2.04
 - à 38°C : 2.1 (solubilité maximale)
 - à 100°C : 1.69

Cette solubilité dépend surtout des qualités d'autres sels dissous, chlorure de sodium $NaCl$ en particulier [11].

La solubilité du gypse impose des limites très strictes à l'utilisation des tufs gypseux dans les chaussées. Ce matériau n'est utilisable qu'en zones désertiques, sous un climat aride [15].

- Une autre propriété du gypse est la déshydratation : chauffé à la pression atmosphérique, le gypse commence à perdre son eau vers $80-90^\circ\text{C}$ et aux températures de $120-140^\circ\text{C}$ se transforme entièrement en semi-hydrate [8].

II.4.2.2 L'anhydrite ($CaSO_4$)

Comme le nom l'indique « *anhydre* », ce minéral ne contient pas d'eau à la différence du gypse.

L'anhydrite naturelle cristallise dans un système orthorhombique, en tablettes épaisses ou en prisme, de couleur blanche souvent avec reflet bleu, grisâtre, parfois rougeâtre; on rencontre des cristaux incolores ou limpides, sa dureté est de 3 à 3.5 (sur l'échelle de Mohs) et son poids spécifique est de 2.8 à 3.

L'anhydrite est formée, comme le gypse, par évaporation de l'eau de mer, mais elle peut également résulter d'une déshydratation lente du gypse sous l'effet de pressions importantes lors de plissements géologiques [11].

En présence d'eau et à la pression atmosphérique normale, l'anhydrite se transforme graduellement en gypse en augmentant fortement de volume (jusqu'à 30%) [12].

Au cas où la pression extérieure augmente, cette transformation devient plus difficile.

La transformation anhydrite-gypse s'opère selon la réaction suivante :



II.4.3 Géologie des encroûtements gypseux

II.4.3.1 Extension géographique des encroûtements gypseux

L'existence des encroûtements gypseux est liée à deux facteurs qui se complètent mutuellement :

- Un facteur géologique qui a permis leur formation par l'apport du gypse;
- Un facteur climatique qui a permis leur maintien pendant la période de Quaternaire.

Les encroûtements gypseux sont situés dans les zones climatiques arides, c'est la zone des chotts et souvent de grandes étendues dunaires, ils occupent une grande surface au sud et au sud-est de Biskra jusqu'en Tunisie (Les région de Ouargla, El Oued et Hassi Messaoud)(voir figureII.2).

II.4.3.2 Origine du gypse

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

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. Il peut être remobilisé localement par des infiltrations latérales et alimenter les nappes déjà plus au moins séléniteuses.

Un autre agent atmosphérique a permis avec l'eau la dissémination du gypse dans les roches sédimentaires, il s'agit du vent; il est fréquent d'après R.COQUE [2] de rencontrer de fins cristaux de gypse mélangés à des sables dunaires. A l'occasion ils peuvent former de véritables amas en bordures des sebkhas.

II.4.3.3 Formation des encroûtements gypseux

Dans la nature le gypse, comme nous l'avons déjà vu au § II.4.2.1, se dépose par évaporation de solutions concentrées ou saumures en milieu confiné (lagunes littorales, chotts et sebkhas), formant avec d'autres sels, les roches sédimentaires que l'on appelle « évaporites ».

On peut rencontrer ce type de sédiment en bordure des chotts et sebkhas de la zone aride, mais aussi des zones méditerranéennes semi-arides et subhumides [15].

Les encroûtements gypseux de la zone aride ont une autre origine, ils sont formés à différentes époques du Quaternaire par dépôt du gypse dans les sols à partir des nappes phréatiques séléniteuses où l'eau intervient par des mouvements verticaux.

Les infiltrations se produisent lors des pluies, les fortes chaleurs accompagnées de vents chauds engendrent une évaporation intense suivie par une remontée capillaire des eaux enrichies en sels.

La cristallisation du gypse se fait plus simplement que le calcaire par évaporation de l'eau. La continuité du phénomène est assurée par les fissurations de la partie superficielle de la croûte en période sèches. Cela provoque de nouvelles infiltrations des eaux de surface et la réalimentation de la nappe [2].

Les sols encroûtés par le gypse sont très souvent des sables éoliens, mais il peut s'agir aussi de sédiment lacustre. Les chotts actuels occupent des cuvettes bordées par des terrasses anciennes encroûtées par le gypse [15].

Le profil d'un sol encroûté par le gypse présente généralement trois horizons principaux (du haut en bas) [15] :

a) *L'horizon supérieur*

Appelé « *tirch* » en arabe, 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.

b) *L'encroûtement massif ou pierre à plâtre*

« *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.

L'encroûtement massif se forme au-dessus de la nappe phréatique par évaporation de la frange capillaire. Il est compact mais conserve une certaine porosité et peut parfois être traversé par des racines. C'est uniquement cet horizon qui a un intérêt en construction routière.

c) *L'horizon des roses des sables*

« *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.

Cet horizon ne convient pas comme matériau de construction en raison de la petite surface spécifique et de la faible dureté de ses cristaux macroscopiques.

II.4.3.4 Les sables gypseux

Les encroûtements tendres appelés « *sables gypseux* » sont les matériaux recherchés pour une utilisation en chaussée. Ils sont d'extraction facile et évoluent en sable au compactage. Pour ces commodités d'extraction et de mise en œuvre on élimine les encroûtements durs ou pierres à plâtre.

La friabilité des encroûtements tendres serait due :

- Soit à un manque de maturité de l'encroûtement. La proximité et la fluctuation de la nappe phréatique prouve que sa porosité n'est pas entièrement masquée par les cristallisations.
- Soit à un vieillissement de la croûte. La nappe phréatique étant très profonde, la régénération de l'encroûtement ne se fait plus et les infiltrations superficielles augmentent sa porosité et diminuent sa cohésion [2].

Les gisements de sable gypseux sont situés le plus souvent sur des surfaces topographiques anciennes. Ces surfaces sont pratiquement toujours encroûtées et surélevées par rapport aux dépressions actuelles où l'on ne rencontre généralement pas de sols valables pour la construction des chaussées (présence d'argiles et de sels). Dans certaines régions, la surface encroûtée a été recouverte par l'erg. Dans ce cas, les gisements sont à chercher dans les « *sahanes* » ou zones dégagées entre les dunes [15].

II.5 LES ENCROUTEMENTS MIXTES

II.5.1 Introduction

Les encroûtements mixtes sont des formations de tufs calcaires gypsifiés ou de tufs gypseux calcifiés, trouvés le plus souvent dans les zones climatiques subhumides, semi-arides et arides.

Les tufs gypso-calcaires et calcaire-gypseux qui en résultent sont déconseillés en zones subhumides et semi-arides à cause de la solubilisation du gypse; par contre ils sont utilisés dans les régions arides [19].

Le gypse se concentre, dans ces formations, sous une forme analogue aux encroûtements gypseux, mais accompagné en général d'une assez forte proportion de carbonate; citons ici l'exemple des plateaux tertiaires tels que ceux de la région de Hassi Messaoud où, sous une carapace de surface en calcaire dur, le sol gypseux calcaire remplit les intervalles de cailloux calcaires mi-durs et anguleux.

Cette couche forme ainsi un tuf gypso-calcaire, facile à extraire dans les zones où la dalle de surface est disloquée; il constitue un matériau routier très intéressant, qui a été utilisé pour la route Ouargla-Hassi Messaoud [14].

C'est ainsi que depuis janvier 1957, ce matériau s'est imposé au réseau routier de Hassi Messaoud, comme matériau de corps de chaussée. Les ingénieurs de l'époque ont fait ce choix vu la particularité du trafic envisagé, la disponibilité du matériau à la proximité des tracés, et les conditions spéciales du climat de cette région [18].

II.5.2 Géologie des encroûtements mixtes

Au-delà d'une certaine aridité, le développement des encroûtements calcaires est arrêté à la source, à cause de l'insuffisance des précipitations pour dissoudre et drainer le calcaire vers les nappes phréatiques; et inversement, lorsqu'on passe du climat désertique au climat semi-aride, le gypse devient instable dans les sols à cause de sa solubilité notable, les encroûtements gypseux sont relayés alors par les encroûtements calcaires.

Les oscillations climatiques du Quaternaire d'Afrique du Nord expliquent les superpositions d'accumulation du gypse et du calcaire dans certains sols.

Des encroûtements calcaires ont pu être partiellement gypsifiés, devenus friables, ils se débitent en : *sables gypso-calcaires*.

Ailleurs, des formations gypseuses ont pu être recouvertes de carapace calcaire; les gisements de ce type peuvent fournir des *graves gypso-calcaires*.

Ils sont bien connus dans les régions de Ghardaïa, Ouargla et Hassi Messaoud[15].

FENZY[16] a fait remarquer que les matériaux gypso-calcaires se regroupaient autour de deux pôles, l'un à prédominance sulfatée et l'autre à prédominance carbonatée, ce qui est tout à fait compréhensible si on prend en considération leur genèse.

II.6 CONCLUSION

Nous retiendrons que les tufs sont issus de trois types d'encroûtements :

- Les encroûtements calcaires, très répandus dans les zones à climats subhumide à semi-aride d'Algérie. Leur extraction fournit un matériau très riche en calcaire appelé : *Tuf calcaire*;
- Les encroûtements gypseux massifs ou tendres qui fournissent les tufs gypseux, ce sont des formations qui occupent les zones à climat aride. Ils se présentent sous forme de dalle de 1 à 2 m d'épaisseur;
- Les encroûtements jeunes ou très anciens sont faciles à l'extraction dont le résultat est un matériau, qui se débite en sable à la mise en œuvre en corps de chaussée, appelé : *Sable gypseux*;
- Les encroûtements mixtes, qui donnent les tufs gypso-calcaires ou calcaire-gypseux; ces matériaux se regroupaient au tour de deux pôles l'un sulfaté et l'autre carbonaté.

Chapitre 3

CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES TUYAUX D'ENCROUTEMENTS

III.1 INTRODUCTION

Une étude géologique, basée essentiellement sur la description morphologique des différents types d'encroûtements, peut nous renseigner, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, sur la formation des tufs d'encroûtements qui a un lien direct avec leurs propriétés marquantes comme matériaux routiers.

Néanmoins, une identification géotechnique à travers les essais de laboratoire s'avère nécessaire, pour une meilleure connaissance des caractéristiques géotechniques de ces matériaux.

III.2 LES TUF CALCAIRES

Les tufs calcaires constituent une ressource en matériaux particulièrement intéressante et économique pour de nombreux pays à climat aride ou semi-aride.

Ces matériaux ont, lorsqu'ils sont utilisés en assises de chaussées un comportement bien meilleur que ne laisseraient supposer leurs caractéristiques géotechniques, si on les compare aux spécifications des pays tempérés.

Pour ces raisons, les tufs calcaires ont été le sujet de nombreuses études et essais, aux laboratoires nationaux et étrangers.

Nous présentons dans ce chapitre les valeurs des essais géotechniques, tirées à partir de données concernant les pays suivants : Algérie, Tunisie, Maroc, Somalie, Afrique du Sud et l'Argentine.

III.2.1 Identification

L'identification géotechnique telle qu'elle est pratiquée actuellement dans les laboratoires routiers algériens s'effectue selon les normes admises en géotechnique classique, avec néanmoins certaines modifications qui méritent d'être signalées.

III.2.1.1 Granulométrie

Compte tenu des formes très variables sous lesquelles peuvent se présenter les encroûtements calcaires (pulvérulentes, nodulaires, croûtes), la granulométrie doit constituer un élément essentiel d'identification.

Considérant que les tufs calcaires sont des matériaux friables et fins, la granulométrie est réalisée sous eau selon la norme : NF P 18-560, avec toutefois une particularité : avant de procéder au tamisage, l'échantillon sera mis à détremper dans un bac d'eau pendant 12 à 24 heures [15]. Cette opération permet aux mottes de se désagréger afin d'arriver aux conditions les plus défavorables de friabilité.

III.2.1.2 Essai Los Angeles

Les tufs d'encroûtements les plus tendres et les plus friables s'écrasent facilement entre les doigts, ils ne sont donc pas susceptibles d'essais de dureté. Par contre, dans le cas de gisements feuilletés, les tufs calcaires issus de la croûte ou la dalle peuvent être beaucoup plus durs et résistants et ils peuvent être soumis aux essais traditionnels.

L'essai Los Angeles s'effectue, selon la norme : NF P 18-573, sur une prise d'essai de granularité A, constituée à partir de la fraction retenue à la passoire de 12.5 mm de l'essai d'analyse granulométrique, elle a été choisie de façon à tester la plus large gamme des différentes fractions granulométriques dont la dureté est variable [15].

Les éléments soumis à l'essai auront donc été obtenus par lavage.

Les coefficients Los Angeles mesurés sur les tufs d'encroûtements calcaires varient entre 30 (pour les dalles les plus compactes) et 70 à 80 (pour les croûtes les plus friables). Au-delà de ces valeurs, l'essai est sans intérêt [10].

Les résultats de cet essai sont pris en compte pour classer ces tufs en trois catégories [2] :

- Tufs à squelette : coefficient Los Angeles $< 35\%$;
- Tufs friables : $35\% \leq LA < 55\%$;
- Tufs pulvérulents : $LA \geq 55\%$.

Les tufs à squelette sont fournis par des encroûtements murs très durs; ces formations, les plus intéressantes théoriquement, sont en général évitées en pratique, car elles nécessitent un concassage pour obtenir des graves 0/20 mm classiques.

Les tufs friables sont les plus courants et les plus utilisés, car ils sont d'extraction facile et de mise en œuvre simple.

Les tufs pulvérulents sont des matériaux d'extraction facile mais de mise en œuvre difficile (très difficile à compacter lorsqu'il y a trop de fines) [2].

III.2.1.3 Teneur en calcaire et en gypse

Ces deux essais sont réalisés sur la fraction granulométrique inférieure à 1 mm.

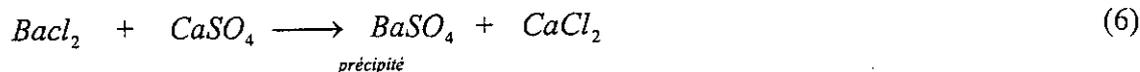
a) Détermination du taux de carbonates

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.

En règle générale, la teneur en carbonate $CaCO_3$ varie pour les tufs calcaires entre 50 et 95%. Cependant, certains tufs calcaires utilisés dans les couches de chaussées ont une teneur en carbonate inférieure à 50% (de 40 à 50%) [10].

b) Détermination du taux de sulfates soluble (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 $CaSO_4, 2H_2O$.

Ces deux essais sont systématiquement réalisés sur les matériaux sahariens et sont généralement un bon indicateur pour le choix des gisements. Un bon 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 [2].

III.2.1.4 Les limites d'Atterberg

C'est l'essai actuellement le plus souvent réalisé et le plus universel, sur les tufs d'encroûtements calcaires. Pour évaluer la pollution argileuse, on fait souvent référence à la valeur de l'indice de plasticité.

L'essai est réalisé selon la norme : NF P 94-051, sur la fraction inférieure à 0.4 mm, en utilisant pour ces matériaux la coupelle rugueuse.

Les valeurs trouvées varient dans la fourchette des inférieures à 5%, c'est-à-dire non mesurable, à 25% [10].

Pour les encroûtements mûrs, ces valeurs sont situées entre 8 et 15% [2]. Ceci est une indication intéressante qui explique le fait que les particules calcaires fines sont peu plastiques.

ALLOUL (1981) [2], donne une valeur moyenne de l'indice de plasticité I_p , pour les tufs calcaires et gypso-calcaires, de 13%.

En effet, les matériaux fortement calcaires présentent des indices de plasticité I_p plus faibles ($I_p = 6\%$ pour $CaCO_3 = 87\%$). Cette plasticité des tufs est 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 subhumides et semi-arides [2].

III.2.1.5 Essai d'équivalent de sable

L'essai est réalisé selon la norme : NF P 18-598, sur la fraction granulométrique passant au tamis de 5 mm. Les valeurs de l'équivalent de sable obtenues varient entre 10 et 60% [10].

Cet essai n'a ici qu'une signification de comparaison entre plusieurs échantillons; lorsqu'il est réalisé sur la totalité de la fraction 0/5 mm du matériau, la teneur en éléments inférieurs à 0.08 mm peut varier de 10 à 80%, ce qui influe considérablement sur la valeur de l'équivalent de sable ES et renseigne peu sur la qualité des fines [10].

III.2.1.6 Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu a pour but de déterminer l'activité globale de la fraction argileuse. Il est réalisé sur la fraction 0/2 mm selon la norme : NF P 18-592.

Les valeurs de bleu de méthylène obtenues sur les tufs calcaires sont comprises entre 0.2 et 1.5 [10]. (le résultat est exprimé en gamme de bleu de méthylène absorbé par 100 g de matériau). Ces valeurs dénotent de la surface spécifique offerte par les argiles, en considérant que les fines calcaires réagissent très peu.

L'essai au bleu peut donc, conduire à une analyse plus fine de l'argile contenue dans ces matériaux et pourrait se révéler un bon indicateur de la plasticité et de la réactivité des fines[2].

III.2.2 Les essais de comportement

Les essais fréquemment utilisés pour connaître le comportement des tufs sont :

- L'essai Proctor modifié;
- L'essai CBR;
- L'essai de résistance à la compression simple.

III.2.2.1 L'essai Proctor modifié

On utilise cet essai lorsque le matériau est destiné à être utilisé en couche de chaussée. L'essai est réalisé selon la norme : NF P 94-093.

Considérant le caractère très évolutif des tufs calcaires les plus tendres, on ne réutilise pas le même échantillon pour les différents points de teneur en eau.

Les différents auteurs ayant réalisé des essais de ce type s'accordent sur les constatations suivantes [10] :

- Les densités OPM optimales sont en général comprises entre 1.7 et 2 t/m³; les valeurs inférieures à 1.6 t/m³ dénotent d'une altération de l'encroûtement, et d'un matériau calcaire trop fin;
- Les teneurs en eau optimales sont très variables, mais en général élevées, et comprises entre 8 et 15% elles peuvent atteindre ou dépasser parfois 20%;
- Les densités les plus faibles correspondent aux teneurs en eau les plus élevées;
- Les courbes OPM sont relativement plates pour les tufs non plastiques ($I_p < 5$); la densité optimale est peu influencée par la variation de la teneur en eau;
- La présence d'argile ($I_p > 10$) conduit à des courbes pointues, la densité chute fortement lorsque l'on s'écarte de la teneur en eau optimale.

III.2.2.2 L'essai CBR

L'essai de poinçonnement CBR est souvent réalisé sur les tufs d'encroûtements, car son résultat est retenu dans les spécifications de nombreux pays.

L'essai est réalisé selon la norme : NF P 94-078, soit immédiatement après le compactage soit après quatre jours d'immersion.

Les résultats CBR immédiats sont très variables selon les caractéristiques du tuf étudié, l'indice CBR est d'autant plus élevé que le matériau comporte un squelette dur et que la courbe granulométrique est régulière. Les indices maxima sont les plus souvent atteints pour une teneur en eau légèrement inférieure à w_{OPM} .

Pour les tufs d'encroûtements calcaires utilisés en corps de chaussée, les valeurs de l'indice CBR varient entre 50 et 150 [10].

L'indice CBR après immersion chute plus ou moins par rapport à l'indice immédiat en fonction de la présence d'argile. Les valeurs de l'indice CBR après immersion sont en général compris entre 30 et 100 [10].

III.2.2.3 Essai de résistance à la compression simple

C'est un essai empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par FENZY (1957) [2], il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction < 5 mm. Le compactage à l'OPM est effectué à la presse et les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve à 60°C pendant 48h (éprouvettes de 5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur).

III.3 LES SABLES GYPSEUX

C'est à partir d'expériences empiriques menées sur les chantiers de réalisation, que les propriétés des sables gypseux ont été dégagées peu à peu.

Nous exposons dans ce paragraphe, essentiellement les résultats du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS), dont les ingénieurs ont beaucoup travaillé sur ces matériaux, en raison de leur abondance dans la région (Biskra, Ouargla, El Oued, etc.). Leur expérience a débuté depuis 1980 en exploitant les résultats des expériences antérieures effectuées par différents organismes algériens et étrangers depuis 1954.

III.3.1 Identification

III.3.1.1 Granulométrie

Elle est réalisée après imbibition du matériau pendant 24h. Cette opération risque de dissoudre une partie du gypse mais elle est nécessaire pour désagréger les mottes.

Les sables gypseux présentent une granularité d'un sable plus ou moins grossier, essentiellement inférieur à 5 mm.

III.3.1.2 Les limites d'Atterberg

L'indice de plasticité est généralement non mesurable [4]. Les indices de plasticité I_p des sables gypseux étudiés par ALLOUL [2], sont de l'ordre de 5%.

III.3.1.3 La composition chimique

Les analyses chimiques réalisées sur des échantillons de sable gypseux montrent la prédominance du gypse dans la constitution du matériau (de 20 à 90%) [21].

Les carbonates sont souvent présentes mais à faible pourcentage de 1 à 10%. Cette calcite cristallise en fines particules disséminées dans les encroûtements gypseux, ne se trouve jamais en granules ou nodules de la taille du centimètre ou du millimètre [2].

En plus de la teneur en sulfate et carbonate, le taux de chlorure sous forme de *Nacl* est déterminé. Leur présence est nocive et elle est très limitée dans les matériaux choisis en couches de chaussées (% *Nacl* < 0.5%) [15].

III.3.1.4 Essai au bleu

Cet essai a été peu appliqué aux sables gypseux, néanmoins, les essais réalisés par ALLOUL[2] indiquent des valeurs comprises entre 0.3 et 0.4, ces faibles valeurs sont expliquées par le fait que les particules de gypse même fines absorbent très peu de bleu alors que le sable siliceux est neutre; cependant, il existe une augmentation de la quantité de bleu absorbée en fonction de la teneur en gypse.

III.3.1.5 L'essai d'équivalent de sable

C'est un essai qui n'est pas significatif pour les sables gypseux car il ne distingue pas entre les fines argileuses et les fines sableuses.

III.3.2 Essais de comportement

III.3.2.1 Essai Proctor

L'essai Proctor est réalisé de la même manière que pour les tufs calcaires. Les caractéristiques Proctor obtenues sont les suivantes [21] :

- $7\% < w_{OPM} < 15\%$;
- $1.62 \text{ t/m}^3 < \gamma_{OPM} < 1.90 \text{ t/m}^3$.

III.3.2.2 Essai CBR

L'indice CBR à poinçonnement immédiat après compactage est assez élevé, jusqu'à 112% avec une moyenne de 40% [21], mais il reste faible par rapport aux tufs calcaires.

L'indice CBR après imbibition de 4 jours peut chuter jusqu'à 8%.

III.3.2.3 Essai de compression simple

Il est effectué de la même manière que pour les tufs calcaires. L'écrasement se fait à une teneur en eau finale de 2% à 0%, après une dessiccation des éprouvettes à l'air libre ou dans une étuve réglée à 60°C, afin d'éviter la déshydratation du gypse. Les valeurs obtenues varient, en général, entre 3 et 40 bars [21].

III.4 CRITERES DE SELECTION DES TUFS EN ASSISE DE CHAUSSEE

La plupart des pays qui utilisent de façon courante les tufs d'encroûtements ont établi des normes géotechniques ou ont en projet de telles normes à partir de l'expérience et des constatations faites sur chantiers.

Ces normes sont le plus souvent empiriques et elles ne couvrent jamais toute la gamme des emplois possibles de ces matériaux.

En Algérie des spécifications pour les tufs d'encroûtements ont été proposées par ALLOUL et STRUILLLOU en 1984 [10], où des seuils ont été imposés aux caractéristiques géotechniques fonction de l'usage prévu, de la zone climatique et du niveau de performance demandé (annexe 3).

Les caractéristiques géotechniques exigées peuvent être données par type d'encroûtements, à savoir :

- **Les tufs essentiellement calcaires**, selon leur formation, appartiendront soit à la famille II ou III du fuseau de Beni Abbès, ils peuvent être utilisés dans les zones climatiques II, III et IV. Les critères de sélection porteront donc sur :

- La granularité;
- Le coefficient Los Angeles LA;
- L'indice de plasticité IP;
- L'indice portant CBR;
- La teneur en carbonate CaCO_3 .

Dans le cas où ils sont évolutifs, on complétera ces tests par un test de la valeur de la résistance à la compression simple R_c .

- **Les sables gypseux** sont des matériaux fins appartenant à la famille III, ils ne peuvent être utilisés que dans la zone climatique IV, en raison de la solubilisation du gypse. Les critères de choix retenus porteront sur :

- La résistance à la compression simple R_c ;
- L'indice de plasticité IP;
- L'indice portant CBR;
- La teneur en carbonate et sulfate ($\text{CaCO}_3 + \text{CaSO}_4$);
- Le pourcentage des sels (par exemple le chlorure de sodium NaCl) contenu dans le matériau.

- **Les tufs mixtes** sont des matériaux appartenant aux familles II et III du fuseau de référence. Ils sont utilisés souvent en zone climatique IV, tandis que leur emploi dans les zones climatique II et III est conditionné par la quantité de gypse contenue dans le matériau, plus on remonte vers le nord moins la teneur en gypse sera tolérée. Les critères de sélection dépendront donc de cette teneur en gypse : si elle est inférieure à 5%, on appliquera les critères retenus pour les tufs essentiellement calcaires, dans le cas contraire, on appliquera ceux des sables gypseux.

III.5 CONCLUSION

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

Les sables gypseux sont des matériaux fins, qui s'éloignent des graves classiques par leurs granularité et prédominance du gypse, ce dernier est caractérisé par une certaine friabilité qui confère à ces matériaux des résistances appréciables dans un état de sécheresse.

Des critères de choix liés aux essais de laboratoire et aux études des formations géologiques en place ont été définis séparément pour les matériaux essentiellement calcaires et les matériaux essentiellement gypseux.

Une déduction logique a abouti à la définition des critères de choix et d'utilisation des matériaux où le gypse et la calcite se côtoient dans des proportions différentes.

Chapitre 4

UTILISATION DES TUES D'ENCROUTEMENTS EN CORPS DE CHAUSSEE

IV.1 INTRODUCTION

C'est le plus souvent sous forme de granulats non liés que les tufs d'encroûtements sont utilisés pour la construction des chaussées de moyen et faible trafic; le traitement des tufs est préconisé dans des cas particuliers (zones soumises à des infiltrations souterraines ou à des ruissellements fréquents, matériaux présentant une insuffisance de leurs caractéristiques par rapport aux spécifications retenues).

L'utilisation la plus courante actuellement est en assises de chaussée (couche de base et couche de fondation), d'autres usages sont fréquents : accotements, couche de forme, pistes agricoles, etc.

IV.2 MODE DE CONSTRUCTION DES ROUTES AU SAHARA

Les routes sahariennes comprennent en général les éléments suivants :

IV.2.1 Couche supérieure des terrassements

Les routes en zones désertiques sont souvent en remblai à faible hauteur, cette disposition facilite le drainage et modifie favorablement la teneur en eau d'équilibre sous chaussée, les déblais sont à éviter car ils favorisent l'ensablement des chaussées [9].

Il n'y a pas de sélection de matériaux pour l'exécution des terrassements à l'exception des matériaux trop fins et pulvérulents qui sont écartés. Ce sont généralement des tout-venant qui sont utilisés; cependant, dans les zones des dunes, le sable peut constituer le corps du remblai, mais sa mise en œuvre pose des problèmes particuliers : faible portance du sable, sa fluidité et difficulté de répannage des matériaux d'assise de chaussée.

Dans le cas du dernier problème, il n'est pas possible de scarifier et de mélanger les matériaux de la couche supérieure sans leur contamination avec le sable. Une couche de forme moins élaborée s'avère nécessaire avant la mise en œuvre de la couche de fondation.

Les couches supérieures des terrassements sont compactés à sec de manière à atteindre des densités de l'ordre de 90% de l'OPM [17].

Un choix judicieux des matériaux du remblai permet de réduire le corps de chaussée d'une simple couche de base d'environ 15 cm [9].

IV.2.2 Couche de fondation

Elle est mise en place sur la plate forme support de la chaussée (terrassements terminés), constituée des matériaux choisis, compactée avec humidification et exécutée sur toute la largeur de la plate forme.

IV.2.3 Couche de base

La couche de base est aussi compactée avec humidification et exécutée sur toute la plate forme. Lorsqu'elle est terminée elle a une largeur de 7.50 à 10.50 m suivant les projets, et

avec des élargissements sur certaines sections (passages submersibles, remblais de grandes hauteurs, etc.) [12].

IV.2.4 Imprégnation

Préalablement à la réalisation d'une couche de roulement les matériaux d'encroûtements notamment, doivent recevoir une couche d'imprégnation bitumineuse dont l'utilité est triple :

- Assurer l'accrochage de la couche de roulement sur un matériau souvent très fermé en surface;
- Servir éventuellement de couche de roulement provisoire;
- Protéger la couche de base des précipitations.

L'imprégnation est réalisée sur toute la largeur de la plate forme, le plus souvent au cut-back 0/1 et parfois au cut-back 10/15 [9].

IV.2.5 Revêtement

Actuellement le revêtement est réalisé sur une largeur de 7 m avec des élargissements sur certaines sections, car les anciennes routes revêtues sur une largeur moindre ont connu des dégradations prématurées malgré le faible trafic.

Selon l'intensité du trafic, la couche de roulement sera constituée par un enduit superficiel, un enrobé à froid, un enrobé à chaud ou un sable bitume. Toutefois, l'enrobé à froid est le plus souvent utilisé.

IV.3 LES CHAUSSEES EN TUFES CALCAIRES

IV.3.1 Généralités

Les tufs calcaires ont été utilisés en corps de chaussée depuis 1956 sur la RN 1 entre Laghouat et Ghardaïa. Ne connaissant pas très bien ces matériaux les ingénieurs ont pris la précaution d'utiliser en couche de base un macadam classique saupoudré de tufs. La route a bien tenu malgré un fort trafic.

Depuis les tufs bruts ont été utilisés en couche de base et la préférence a été donnée aux tufs à squelette qui se rapprochent le plus de la grave concassée.

IV.3.2 Comportement des chaussées en tufs calcaires

Les chaussées construites en tufs calcaires sont généralement bonnes, lorsque les critères d'utilisation de ces matériaux et le drainage sont respectés.

Un bon drainage évite l'apparition des dégradations : fissurations dues au retrait, vieillissement du tuf, dissolutions des fines calcaires.

En effet, durant la période humide, la teneur en eau d'équilibre sous chaussée en tuf calcaire n'est pas suffisamment faible (elle est proche de l'OPM de l'ordre de 10%), les dissolutions

peuvent devenir notables lorsqu'il existe des points préférentiels d'infiltrations des eaux de pluie dans la chaussée [15].

Ce cas a été observé sur deux routes : la RN6 au sud de Saïda et la RN1 au sud de Laghouat. Il s'agissait dans les deux cas d'une couche de base en tuf pulvérulent. En hiver sont apparues des zones poinçonnées par le trafic sur des sections soumises à des infiltrations. Ces dégradations sont en réalité des amorces de poches de dissolution [15].

Pour cela, l'accent a été mis très tôt sur les mesures de protection de ces assises contre les infiltrations des eaux de pluie.

La première de ces mesures est l'imperméabilisation de la surface de la chaussée. Les couches de roulement doivent être renouvelées avant les dégradations, ainsi que les accotements en tufs doivent être entretenus et même revêtus.

La deuxième mesure vise à accélérer le ruissellement et à empêcher la stagnation d'eau sur la chaussée, par un dévers de 3% de la surface de chaussée et de 4 à 5% des accotements, en alignement droit [15].

IV.3.3 Performances des chaussées en tufs calcaires

Pour illustrer cet aspect, nous citerons ci-dessous l'exemple de la RN6, qui permet de faire une idée des qualités de ce matériau lorsqu'il est correctement choisi et mis en œuvre.

Tableau IV.1 : Caractéristiques de la RN6 [26].

TJMA moyen	1500 v/j
% Poids lourds	40 à 50%
Année de construction	1963
Trafic supporté	6.3 millions véhicules
Déflexion (1991)	inférieur à 100/100 mm

Assise de chaussée : tuf d'épaisseur 25 à 40 cm.

Sol support : sable limoneux.

Couche de surface : enduit superficielle bicouche.

Matériau : tuf calcaire de bonne qualité.

- Courbe granulométrique contenue dans le fuseau « Beni Abbès »;
- Résistance à la compression simple variant de 20 à 30 bars à 95% de compacité OPM.

Après plus de 30 ans, cette route garde un niveau de service acceptable, les dégradations sont en général des fissurations et des ornières de faibles amplitudes à part quelques déformations relativement importantes au niveau des bas-fonds et de la sebkha, comme on l'a déjà cité dans l'exemple du paragraphe précédent.

IV.3.4 Précautions lors de la mise en œuvre

L'optimum Proctor modifié des tufs calcaires a lieu pour des teneurs en eau assez élevées dépassant 10%. Toutefois, la compacité varie très peu avec la teneur en eau.

Si la teneur en eau du matériau lors de l'arrosage dépasse la w_{opt} , le tuf calcaire forme très vite une boue difficile à compacter et les fines carbonatées risquent d'être évacuées avec l'excès d'eau. Pour éviter ce problème, il convient de mouiller le matériau à une teneur en eau de 2 à 3% plus faible que celle de l'OPM [15].

Une autre condition nécessaire lors de la mise en œuvre des tufs calcaires est un compactage mécanique, en procédant d'un seul coup, car si on essaie de rattraper des flaches en ajoutant du tuf, celui-ci n'adhère pas à la couche sous-jacente, c'est le phénomène de feuilletage. Pour y parvenir, il faut tout d'abord mouiller et scarifier la couche inférieure avant de mettre la couche supérieure [15].

IV.4 LES CHAUSSEES EN SABLE GYPSEUX

IV.4.1 Historique de l'utilisation du sable gypseux

C'est à partir d'expériences empiriques menées sur les chantiers de réalisation, que les propriétés des sables gypseux ont été dégagées peu à peu.

La première utilisation fût un chantier en 1953 près d'El Oued.

Au début, les ingénieurs routiers appliquèrent directement la technique routière classique en utilisant la croûte gypseuse de surface mélangée au sable gypseux sous-jacent.

Après humidification et compactage, l'ensemble se soudait pour former une croûte très dure. Cette utilisation a donné de bons résultats pour des routes peu circulées, elle a été par la suite généralisée pour la construction d'itinéraires supportant un trafic plus important (Biskra-Touggourt et Biskra-El Oued).

A ce moment, les ingénieurs s'aperçurent que l'importance de la croûte de surface était trop faible et que le sable gypseux donne à lui seul les performances constatées.

Après la réussite de ces deux routes, l'utilisation de ce matériau a été généralisée et on commença dès lors, à chercher des gisements de sables gypseux assez épais.

IV.4.2 Comportement des chaussées en sable gypseux

Les chaussées construites en sables gypseux sont moins bonnes que celles construites en tufs calcaires; néanmoins, les anciennes routes en sable gypseux témoignent favorablement à l'avantage de ce matériau.

Cependant, il existe certaines dégradations, mais elles ne mettent pas en cause les bonnes performances de ces chaussées.

Il faut souligner le fait que les sables gypseux sont l'unique matériau disponible sur de très vastes régions du Sahara; certes, il est d'un choix et d'une utilisation difficile, mais on ne peut pas le substituer par des graves naturelles ou concassées qui n'existent pas à des distances raisonnables.

IV.4.2.1 Fissurations

Au bout de quelque temps après la construction des chaussées en sable gypseux, il se forme 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) [15], 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.

L'auteur a donc lié l'apparition des fissures, qu'il a appelés fissures de retrait hygroscopiques, à la présence du gypse dans la couche de base; pour éviter ces fissures, il a proposé l'utilisation d'un béton bitumineux très souple, résistant et imperméable.

ALLOUL (1981) [2], a expliqué la cause des fissurations de ces chaussées durant leur durée de vie, 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).

En effet, il a été observé et cela d'une façon a peu près générale, que les couches de bases gypseuses se réimbibaient dès que protégées par une couche de surface imperméable; cette réimbibition est due probablement [22] :

- Aux remontées capillaires;
- Aux condensations sous revêtement provoquées par les intenses variations de températures sahariennes;
- A l'hygroscopie du gypse;
- A des infiltrations superficielles.

Cependant, cette réimbibition n'est d'ailleurs pas très grave, en ce sens qu'elle ne réduit pas d'une façon importante la portance de la chaussée; mais elle réduit beaucoup plus la résistance au cisaillement du sable gypseux; aussi des glissements horizontaux se produisent-il par endroit, sous le revêtement, sous l'effet des coups de freins ou de l'effort de traction des roues motrices des camions [22].

Il faudrait donc maintenir le corps de chaussée dans un état sec. ALLOUL [2], propose une imprégnation au cut-back à la base de la couche de fondation pour éviter les remontées capillaires.

IV.4.2.2 Gonflement

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.

IV.4.2.3 Problèmes liés à la présence des chlorures

Un autre type de dégradation des chaussées typiques 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. Il y a lieu donc, de limiter la teneur en chlorures des matériaux utilisés, une valeur de 0.5% est recommandée [15].

Le chlorure de sodium *NaCl* peut être contenu dans le matériau du corps de chaussée ou dans l'eau de compactage ou encore infiltré des nappes salines souterraines. Lorsqu'il n'est pas possible d'arrêter l'alimentation en sels dissous d'une chaussée, il est préférable d'utiliser les graves à faibles proportions de fines au lieu des sables gypseux fins, car les cristaux de l'halite ne sont pas contenus dans les pores de grandes dimensions.

IV.4.2.4 Déformabilité mesurée in-situ

Les mesures de déflexions effectuées à la plaque ou au défléctographe sur des chaussées en sable gypseux ont montré que malgré une imbibition partielle supprimant la prise du gypse, ces chaussées ne sont pas très déformables [4].

Des mesures de déflexions sont présentées ci-dessous [1], effectuées en 1984 et 1992 sur la RN16 (El Oued-Tougourt) construite en 1964 et la RN48 construite entre 1954 et 1955; ces deux routes ont été choisies car elles ne subissaient à aucun renforcement important.

Déflexions mesurées en 1984

96% des déflexions mesurées sur la RN16 sont inférieures à 50/100 mm et ce qui reste dépassent légèrement cette barre; pour la RN48, 59% des dégradations en axe sont inférieures à 50/100 mm et 91% sont inférieures à 100/100 mm.

Déflexions mesurées en 1992

La déflexion sur la RN16 n'a pas évolué; pour le cas de la RN48 la déflexion est passée à 75/100 mm.

Il s'avère ainsi que pour décider de renforcer une telle route on ne peut pas considérer la déflexion comme seul indicateur d'état puisqu'on est loin de la déflexion admise (200/100 mm pour les chaussées souples sous un faible trafic 750 à 1500 v/j) d'après le guide d'auscultation LCPC [4]. On peut conclure donc que, les routes en sables gypseux avec un état avancé de dégradations présentent une faible déformabilité.

IV.4.3 Les sables gypseux sur chantier

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, Touggouft, etc. Elle est de l'ordre de : $96 \pm 2\%$ [21].

Les mesures des teneurs en eau d'équilibre sous chaussées revêtues sur les mêmes régions ont donné des valeurs de l'ordre de : $4.6 \pm 1\%$ [21].

La mise en œuvre des sables gypseux nécessite un arrosage adéquat avec des eaux peu chargées en sels (l'halite surtout). Le malaxage et le répardage doit se faire en une seule fois pour éviter le feuilletage.

Un autre problème est signalé lors de l'imprégnation au cut-back, avant la couche de roulement, c'est le phénomène du « *marc de café* » : l'imprégnation prend la couleur brune et manque de cohésion, c'est le résultat d'une affinité superficielle très forte des hydrocarbures vis-à-vis de l'halite [15].

IV.5 DURCISSEMENT DES TUFES COMPACTES

Les tufs d'encroûtements acquièrent, après compactage puis dessiccation prolongée, une forte cohésion, ce durcissement est appelé par NETTERBERG en 1975 : autostabilisation [10]. Toutefois cette cohésion du tuf compacté ne doit pas être considérée comme une stabilisation permanente du matériau, car elle baisse considérablement quand le degré de saturation augmente et disparaît quasi totalement par saturation totale.

Les constatations faites sur chantiers dans tous les pays utilisant ce genre de matériau sont les suivantes [10] :

- Après compactage et séchage, les couches d'encroûtements durcissent. C'est dans la partie supérieure de la couche que le phénomène est le plus important;
- Sous réserve que la couche soit protégée de l'eau (couche de roulement étanche et drainage efficace), ce durcissement se conserve, voire s'accroît dans le temps;
- Le durcissement disparaît si, faute des dispositions constructives nécessaires, la couche de tuf voit sa teneur en eau fortement augmenter;
- Le durcissement est très inégal selon le gisement utilisé;
- L'importance de ce durcissement favorise le bon comportement dans le temps et sous le trafic des chaussées réalisées.

C'est ainsi que l'évolution des caractéristiques mécaniques avec l'âge des tufs compactés laisse penser à l'existence d'une prise, évidemment pas comme celle des liants tels que le ciment, la chaux, le plâtre, etc. où se produisent des liaisons rigides, souvent irréversibles et durables.

Ce phénomène de prise a été attribué par les premiers ingénieurs qui ont utilisé ces matériaux, à une dissolution partielle du calcaire et/ou du gypse dans l'eau de compactage, puis sa recristallisation lorsque l'eau s'évapore [22].

D'autres travaux de recherches ont été réalisés dans ce domaine, et les opinions parfois, sont très différentes. Nous présentons ci-après deux études menées au laboratoire, tentent d'expliquer ce phénomène.

VI.5.1 Etudes en laboratoire

Les expériences menées par BEN DHIA (1983) [10], permettent de vérifier la plupart des constatations faites sur chantiers.

Des éprouvettes de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur, ont été confectionnées par vibro-compression à la teneur en eau et densité OPM pour deux tufs :

- Tuf d'El Bibane 75% de $CaCO_3$;
- Tuf de Khnis 60% de $CaCO_3$.

Les éprouvettes ont été conservées selon trois modes de conservation :

- En étui étanche (à une teneur en eau constante et sous une température de 20°C);
- A l'air libre;
- A l'étuve ventilée à 40°C.

La résistance à la compression simple a été mesurée à : 1, 7, 28, 60, 180 et 360 jours.

L'auteur a abouti aux résultats suivants (figure IV.1) :

- Il y a peu ou pas d'évolution de la résistance lorsque la teneur en eau est constante (pour une température de 20°C);
- Le durcissement des éprouvettes conduit à une augmentation importante de la résistance;
- La température accélère le phénomène, mais à long terme on tend vers une même résistance finale, quelle que soit la température de conservation (cas des températures étudiées par l'auteur).

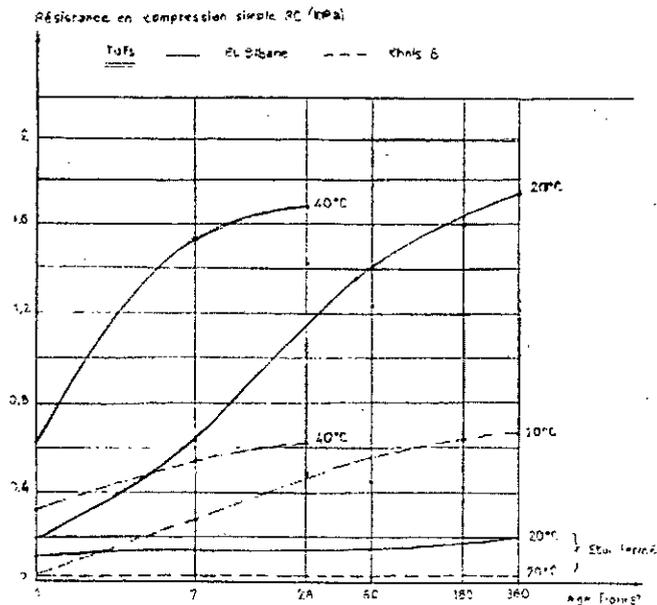


Figure IV.1 – Evolution de la résistance à la compression simple dans le temps pour deux tufs, à différents modes de conservation [10].

Dans le but de mieux simuler le phénomène tel qu'il se passe dans une chaussée, l'auteur a fait soumettre des éprouvettes immergées à leur base, à une température en surface pendant une journée.

Les éprouvettes soumises à l'essai ont été sciées et les parties inférieures et supérieures ont été analysées au microscope électronique à balayage (MEB). Les photos prises au microscope montrent que les zones de dissolutions sont apparues à la base des éprouvettes et que dans la partie supérieure il y a eu dépôt et recristallisation de calcite.

D'après cette étude, l'auteur explique le durcissement des chaussées en tufs calcaires par la dissolution partielle du carbonate sous l'action de l'eau et du CO_2 et par sa recristallisation après dessiccation.

ALLOUL (1981) [2], sur des tufs différents et un autre type d'éprouvettes a fait les mêmes constatations. Il a montré en plus que les éprouvettes durcies après conservation à $55^\circ C$ étaient détruites par l'immersion dans l'eau en moins de 2 heures.

A partir d'analyses au MEB et au diffraction X, l'auteur estime qu'il n'y a pas eu apparition de nouvelles formes de cristallisations au sein des tufs calcaires ou encore des sables gypseux. Il conclut donc que le durcissement constaté est dû uniquement :

- A l'arrangement des grains au séchage, pour les tufs calcaires;
- Aux qualités physiques du gypse (angularité, friabilité et finesse), pour les sables gypseux.

L'auteur justifie ses arguments par la disparition du phénomène de durcissement dès que la teneur en eau augmente.

IV.6 CONCLUSION

Le bon comportement des chaussées construites en tufs d'encroûtements est obtenu, malgré des caractéristiques géotechniques qui s'écartent des spécifications usuelles des pays tempérés, grâce à une forte cohésion après compactage puis dessiccation prolongée; phénomène qui se conserve, voire s'accroît dans le temps. Toutefois, ce durcissement du tuf compacté par dessiccation ne doit pas être considéré comme une stabilisation permanente du matériau car la forte cohésion ainsi obtenue baisse considérablement quand le degré de saturation augmente et disparaît quasi totalement par saturation totale.

Pour l'utilisation de ces matériaux il sera donc important de conserver, voire d'améliorer la valeur de cette cohésion.

Partie 2

ETUDE EXPERIMENTALE

PLAN EXPERIMENTAL

L'un des soucis des laboratoires nationaux, est d'établir une approche scientifique en vue d'une meilleure sélection des tufs d'encroûtements et d'une bonne compréhension de leur comportement en service. C'est dans cet objectif que notre travail expérimental s'inscrit.

L'étude expérimentale s'articule sur trois parties :

- > Identification géotechnique et minéralogique du matériau;
- > Etude de l'influence de l'environnement saharien (teneur en eau, température et mode de séchage) sur le durcissement des tufs d'encroûtements;
- > Proposition de traitement par stabilisation du tuf à la chaux aérienne.

Chapitre 5

IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE ET MINERALOGIQUE

V.1 PRESENTATION DE L'ECHANTILLON

Notre matériau provient des plateaux de tuf de Hassi Messaoud à 80 km environ d'IRARA, ce gîte de tuf a fait l'objet d'une prospection visant à choisir les matériaux d'assise de chaussée, dans le cadre de la réalisation de la route déviant la base de vie 24 février de SONATRACH, étude menée par le laboratoire central de la SONATRO.

V.2 SITUATION ET NATURE DES TERRAINS DE LA REGION

La région de Hassi Messaoud se trouve en bordure du grand erg oriental et présente un terrain particulièrement accidenté, constitué d'une succession de plateaux pierreux et de dépressions sableuses d'une dénivellation de l'ordre de 10 à 15 m. Certaines parties des dépressions sont occupées par des dunes de sable.

D'une manière générale, la région de Hassi Messaoud est abondante en matériaux qui, stabilisés mécaniquement, donnent des chaussées très résistantes, mais leur point faible est toujours le manque de cohésion.

V.3 ANALYSE GRANULOMETRIQUE

La courbe granulométrique de notre tuf est continue, étalée et s'inscrit dans le fuseau de Beni Abbès, comme nous le montre la figure V.1, avec néanmoins un excès de sable.

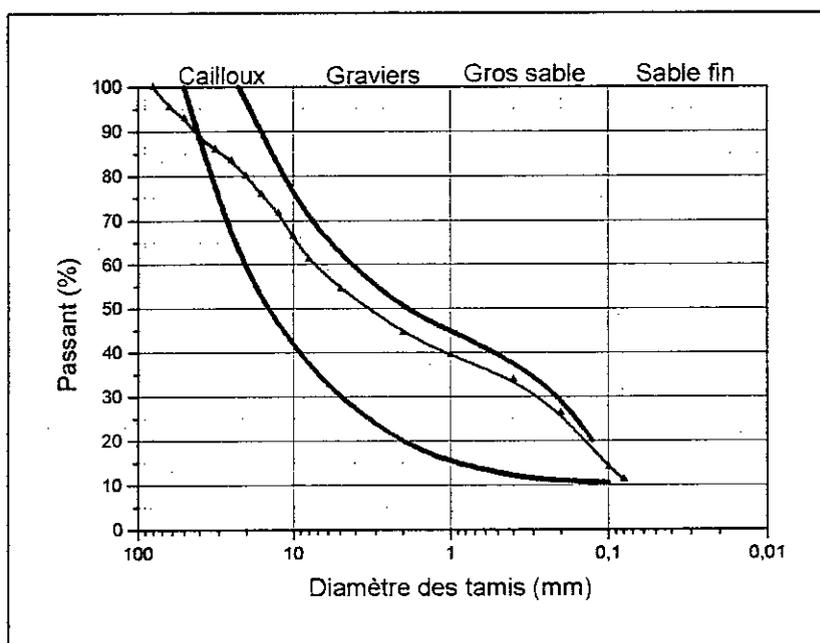


Figure V.1 - Courbe granulométrique.

Nous constatons aussi que la quantité des fines est faible, de l'ordre de 14% (pour les éléments dont le diamètre est inférieur à 0,1 mm).

V.4 LIMITES D'ATTERBERG

Les limites d'Atterberg sont indéterminées, car l'échantillon est très sableux, il ne présente aucune cohésion en contact avec l'eau, ce qui montre que l'argile n'existe pas ou elle est présente avec une faible quantité.

V.5 QUALITE DES FINES

Ce sont surtout les fines argileuses qui posent des problèmes pour les matériaux. Leur influence est généralement caractérisée par les essais d'équivalent de sable et valeur de bleu de méthylène.

La valeur de l'équivalent de sable ES de notre échantillon est de : 24%, ce résultat laisserait penser à l'existence d'un pourcentage assez important d'argile alors qu'il n'en est rien ce tuf ne contient presque pas d'argile. Ce sont donc les fines gypseuses et calcaires qui ont causé la faiblesse de la valeur de l'équivalent de sable ES.

L'essai d'équivalent de sable n'est pas significatif pour les tufs, il faudrait plutôt étudier l'activité des fines, ce qui est justement le but de l'essai suivant.

V.5.1 Essai au bleu

La valeur au bleu obtenue est de : $VB = 0.3$

Si nous adoptons la classification, ci-dessous [10], retenue pour les sables aux tufs d'encroûtements, nous trouvons que notre échantillon est peu pollué.

$VB < 0.2$	matériau propre;
$0.2 < VB < 0.5$	matériau légèrement pollué;
$0.5 < VB < 1$	matériau pollué;
$VB > 1$	matériau très pollué.

V.6 LES ESSAIS PROCTOR ET CBR

La courbe Proctor est aplatie (figure V.2), ce qui signifie que la densité sèche du matériau est peu sensible à la variation de la teneur en eau, nous aurons donc un tuf facile à compacter.

Les résultats Proctor et CBR obtenus sont les suivants :

Tableau V.1 : Caractéristiques Proctor et CBR.

W_{OPM} (%)	γ_{dOPM} (t/m^3)	I_{CBR} imbibé (%)	I_{CBR} immédiat (%)
11	1.756	41	64

En vertu du tableau V.1 on constate que l'indice CBR reste important même après imbibition, à cause de la faible proportion d'argile contenue dans le matériau.

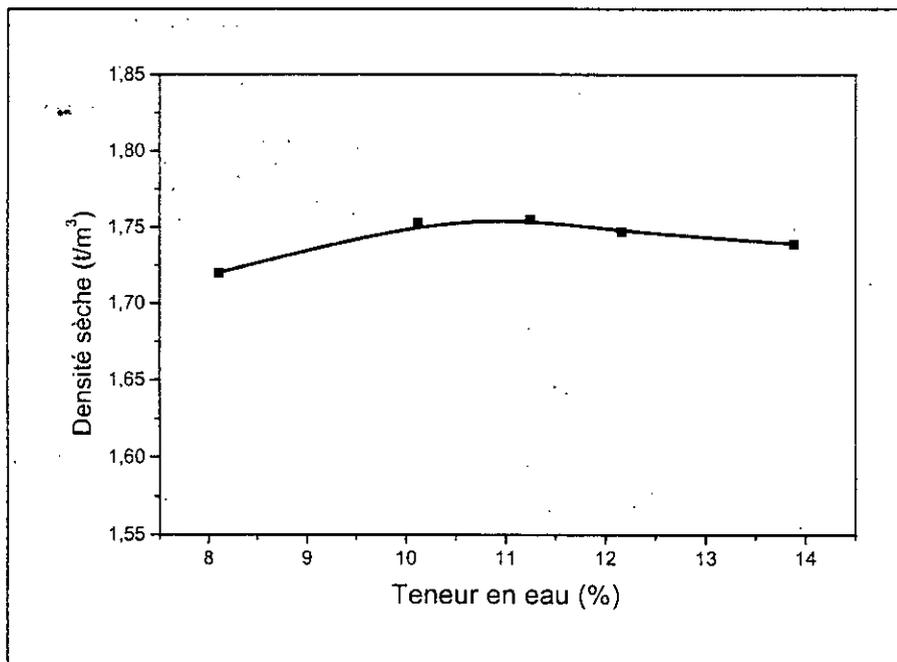


Figure V.2 – Courbe Proctor.

V.7 EVOLUTION GRANULOMETRIQUE

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 V.3.

Nous remarquons que :

- L'évolution granulométrique a lieu dans les fractions du gravier et du gros sable; tandis que la quantité des fines est restée pratiquement constante;
- La courbe granulométrique après compactage passe au-dessus du fuseau, ce qui montre encore la friabilité des tufs.

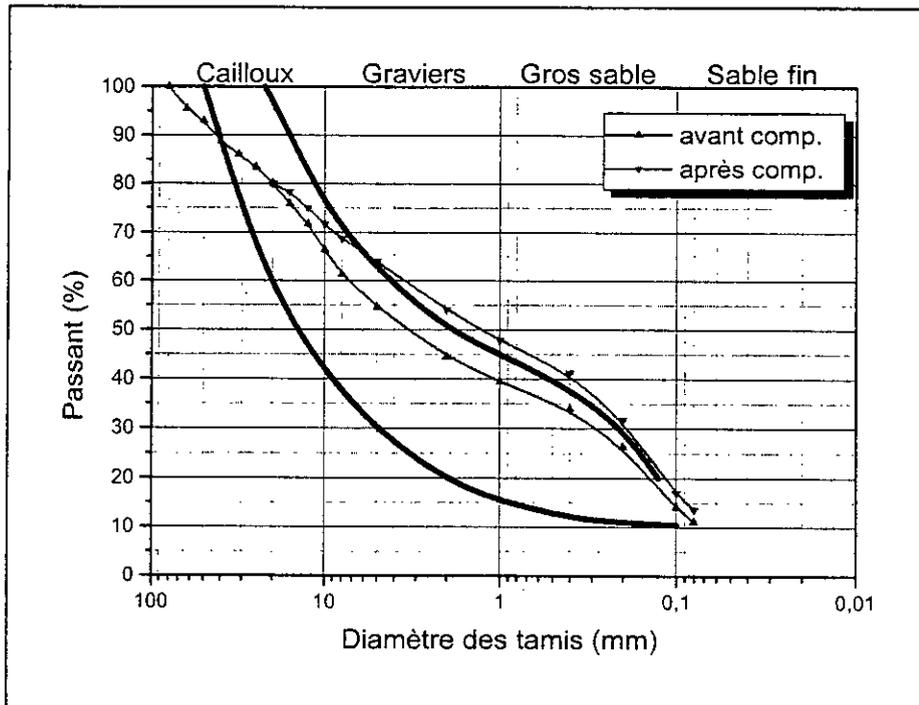


Figure V.3 – Courbe granulométrique après compactage.

V.8 ESSAI DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE

La résistance à la compression simple dépend fortement de la compacité de l'échantillon d'où la nécessité d'étudier la relation entre la résistance et la compacité.

Dans cet objectif, nous avons confectionné une série d'éprouvettes compactées à la teneur en eau optimale à différentes compacités.

La courbe de la figure V.4 montre une relation linéaire entre la R_c et la compacité sous forme de :

$$R_c(\text{bars}) = 1.752 \text{ Compacité } (\%) - 162.6 \quad (7)$$

Avec une résistance à 98 % de compacité égale à : 9.10 bars.

D'après la relation (7), lorsque la compacité passe de 95 à 98 %, la résistance évolue presque du simple au double, ce résultat montre clairement la sensibilité de ce matériau à la compacité.

On peut conclure qu'il faut pousser le compactage de la couche exécutée pour en tirer le maximum de performance.

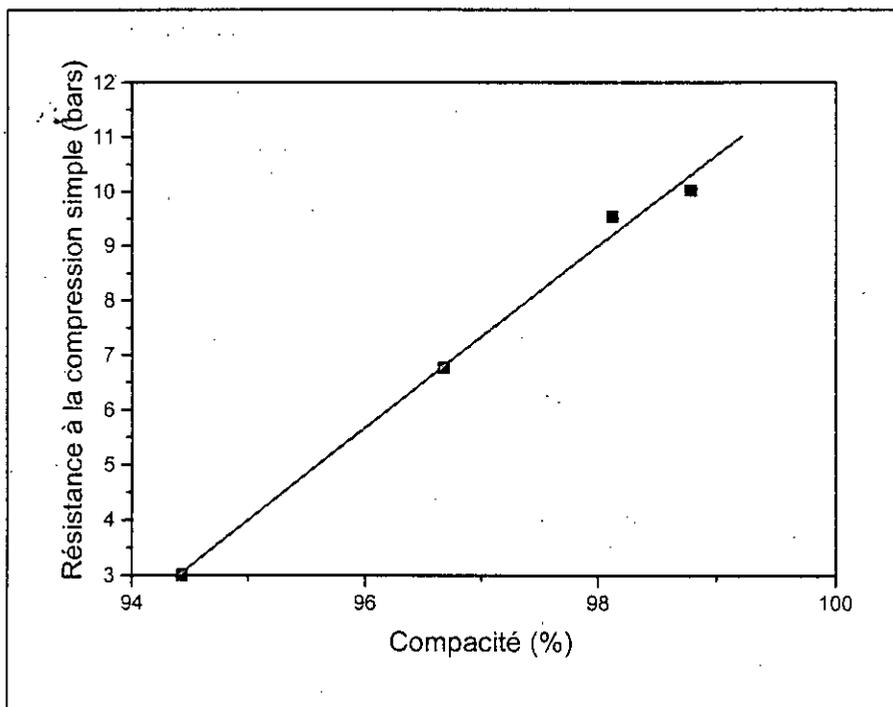


Figure V.4 – Influence de la compacité sur la Rc.

V.9 ANALYSE MINERALOGIQUE

Les techniques d'investigation en analyse minéralogique ont pour but l'identification et le dosage des différents minéraux constituant une roche ou un matériau donné. Pour les tufs d'encroûtements, de composition minéralogique simple par rapport à d'autres matériaux, nous avons utilisé deux techniques :

- L'analyse chimique sommaire;
- La diffraction des rayons X.

V.9.1 Analyse chimique sommaire

Les essais ont été réalisés au LCTP; les résultats sont récapitulés sur le tableau suivant :

Tableau V.2 : Analyse chimique sommaire.

Insolubles(%)	Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ (%)	Sulfates (%)	NaCl (%)	Carbonates (%)	PF (%)	CO ₂ (%)	Eau de constitution (%)
26.70	1.75	53.19	0.23	16.66	19.70	7.33	12.37

Cette analyse montre que notre tuf est de nature chimique gypso-calcaire, avec un pourcentage de sulfates et carbonates de l'ordre de 70 %.

V.9.2 La diffraction des rayons X

La diffraction des rayons X, comme celle de la lumière, est fondée sur le principe d'interaction entre un rayonnement de longueur d'onde appropriée et un cristal supposé constitué par un empilement périodique et tridimensionnel d'atomes.

La diffraction des rayons X est régie par la loi de Bragg :

$$2 d \sin\theta = n \lambda \quad (8)$$

où d : distance entre plans réticulaires.
θ : angle d'incidence.
λ : longueur d'onde.
n : nombre entier.

Dans le cas particulier des poudres, l'enregistrement du spectre se fait par photographie ou par compteur de photons pour donner le diagramme de Debye et Scherrer (annexe 4).

Cette technique est de plus en plus utilisée pour l'étude de la composition minéralogique des matériaux utilisés dans la construction routière.

D'après le spectre de Debye et Scherrer et par la loi de Bragg, on détermine la distance interréticulaire correspondant à chaque raie et par la suite les différentes espèces minérales de l'échantillon analysé.

Quand un corps est mal cristallisé les raies s'élargissent et se perdent, aussi il est impossible de détecter la présence de produit à l'état amorphe.

La diffraction des rayons X permet aussi d'apprécier le degré de cristallisation d'un minéral à partir de la netteté de ses raies [6].

Dans notre cas, nous avons effectué des analyses qualitatives au niveau du Centre de Recherche et Développement (CRD), service minéralogique (SONATRACH).

Le résultat (voir annexe 4) montre l'existence essentielle de trois minéraux, à savoir :

- Le gypse;
- La calcite;
- Le quartz.

Ces minéraux sont bien cristallisés, tandis que les feldspaths et l'illite sont présents mais mal cristallisés.

D'après cette étude nous constatons que :

- Les sulfates de ce tuf se présentent sous une seule forme : le gypse;
- Les carbonates, elles aussi sous forme de : calcite.

V.10 CONCLUSION

Les essais d'identification géotechnique et minéralogique ont pour but de situer les matériaux routiers par rapport aux spécifications et normes retenues pour leur emploi en corps de chaussée, pour une éventuelle sélection.

Dans cette optique, nous avons réalisé ces essais qui nous ont permis de dégager les constatations suivantes :

- La courbe granulométrique est continue, étalée et s'inscrit dans le fuseau de Beni Abbès et le compactage est peu sensible à la teneur en eau;
- L'échantillon contient peu de fines, notamment peu d'argiles;
- Notre tuf est de nature chimique gypso-calcaire, les sulfates sont présents sous forme de gypse et les carbonates sous forme de calcite, l'utilisation de ce tuf est alors limitée en zone climatique IV;
- Le matériau évolue après compactage et la courbe granulométrique passe au-dessus du fuseau, d'où la nécessité de vérifier le critère de la résistance à la compression simple;

La résistance à la compression simple à 98 % de compacité, qui est de 9.10 bars, est jugée faible par rapport aux spécifications proposées aux tufs d'encroûtements (voir annexe 3).

Vu cette déficience en résistance, un traitement de notre échantillon s'avère nécessaire afin de permettre, éventuellement, son emploi en assise de chaussée.

Nous proposons au chapitre 7 une stabilisation, mais avant d'entamer le traitement il nous a semblé intéressant d'examiner la capacité du tuf à se stabiliser par lui-même sans aucun traitement, appelée autostabilisation par certains auteurs.

Chapitre 6

AUTOSTABILISATION

VI.1 INTRODUCTION

Nous avons déjà évoqué au chapitre 4, la propriété particulière des tufs d'encroûtements de durcir en vieillissant au cours du temps sans traitement, propriété constatée au sein des corps de chaussées après humidification, compactage et séchage.

Dans cette partie d'étude, nous essayons de voir l'effet de quelques paramètres de l'environnement saharien, sur l'évolution de la résistance à la compression simple d'un tuf gypso-calcaire, en procédant par différents modes de conservation.

VI.2 PLAN EXPERIMENTAL

Nous rappelons que le matériau d'épreuve est un tuf gypso-calcaire dont les caractéristiques Proctor sont les suivantes :

- $w_{OPM} = 11\%$;
- $\gamma_{d_{OPM}} = 1.756 \text{ t/m}^3$.

L'étude expérimentale est conduite dans trois directions :

- L'évolution de la résistance à la compression simple avec l'état hydrique;
- L'évolution de la résistance à la compression simple avec l'âge des éprouvettes ;
- Variation, s'il y a lieu, de la structure minéralogique.

Nous avons adopté la méthodologie la plus courante pour reproduire en laboratoire le durcissement constaté sur chantier qui consiste à fabriquer des éprouvettes de tufs compactées et à mesurer l'évolution de leur résistance en compression simple dans le temps, selon divers modes de conservation.

Pour cela, nous avons utilisé deux températures de séchage :

- La température ambiante (20°C environ);
- La température de 40°C, qui se rapproche des températures du Sud.

Afin d'économiser la quantité du matériau utilisé dans l'étude, vu le grand nombre d'éprouvettes à réaliser dans un cadre d'étude comparative, nous avons conçu un moule équivalent au moule standard sol-ciment, à dimensions réduites pour obtenir des éprouvettes de 2.2 cm de diamètre et de 4.4 cm de hauteur. Ce moule a été réalisé au Département de Mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique (voir annexe 5).

VI.3 CONFECTION ET CONSERVATION DES EPROUVETTES

L'objectif de la confection est de trouver une méthode permettant de réaliser des éprouvettes homogènes ayant un comportement aussi proche que possible du comportement du matériau en place.

Le choix d'une méthode de confection dépend d'une part, des équipements disponibles et d'autre part, de l'objectif et la précision attendue des essais à effectuer, ainsi que le type de matériau.

Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de reconstitution d'éprouvettes par compactage statique dans le moule cité ci-dessus.

Les éprouvettes ont été confectionnées, avec les éléments dont le diamètre des grains est inférieur à 2 mm, à une compacité proche de l'OPM et à différentes teneurs en eau :

3; 6; 8; 11 et 13 %

Les éprouvettes ont été réalisées en trois séries :

- Celles conservées à 40°C à l'étuve avec dessiccation;
- Celles conservées à l'air libre, à une température ambiante de 20°C environ;
- Celles conservées à l'étuve à 40°C et à teneur en eau constante, dans du plastique de congélation (en polypropylène) qui peut supporter sans s'altérer des températures de l'ordre de 120°C.

Les durées de conservations varient entre 1 et 28 jours.

VI.4 ECRASEMENT DES EPROUVETTES

Une fois le temps de conservation est atteint, on écrase les éprouvettes à l'aide d'une presse CBR, en appliquant un chargement à vitesse constante de 0.5 mm/mn et on prend les lectures chaque 15 secondes.

Les résultats seront portés sur un graphe contrainte-déformation d'où on tire la charge maximale.

VI.5 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chaque point de la présente étude représente 2 à 3 éprouvettes réalisées dans les mêmes conditions d'essais (annexe 6).

VI.5.1 Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression simple

VI.5.1.1 Conservation à l'étuve avec dessiccation

Le tableau ci-après résume les résultats obtenus.

Tableau VI.1 : Résistance en compression simple en fonction de la teneur en eau, à différentes durées de conservation (conservation à l'étuve avec dessiccation).

Durée de conservation (jours)									
1		4		7		14		28	
W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)
3.17	3.21	3.32	3.76	3.23	4.08	2.86	4.00	3.34	4.32
6.04	4.36	6.16	4.72	6.59	5.04	5.72	5.13	6.86	6.16
7.87	4.75	7.97	5.10	8.27	5.73	7.35	6.01	8.74	6.96
10.67	5.34	10.59	5.70	10.57	6.27	10.15	6.99	11.23	7.70
12.50	5.00	12.96	5.16	13.10	5.41	12.34	6.32	13.00	6.20

Nous constatons que, la valeur de la résistance à la compression simple est maximale pour les teneurs en eau de confection proches de la teneur en eau OPM. Cela est dû à une densification de l'éprouvette après évaporation de l'eau de confection.

Notons aussi, d'après la figure VI.1, que les courbes présentent des pics plus accentués pour les éprouvettes conservées à plus de 7 jours. Le temps de conservation améliore mieux la résistance pour les teneurs en eau voisines de l'OPM.

Les faibles teneurs en eau correspondent aux faibles résistances quelle que soit la durée de conservation, et aux teneurs en eau supérieures à w_{OPM} une chute importante de résistance est observée.

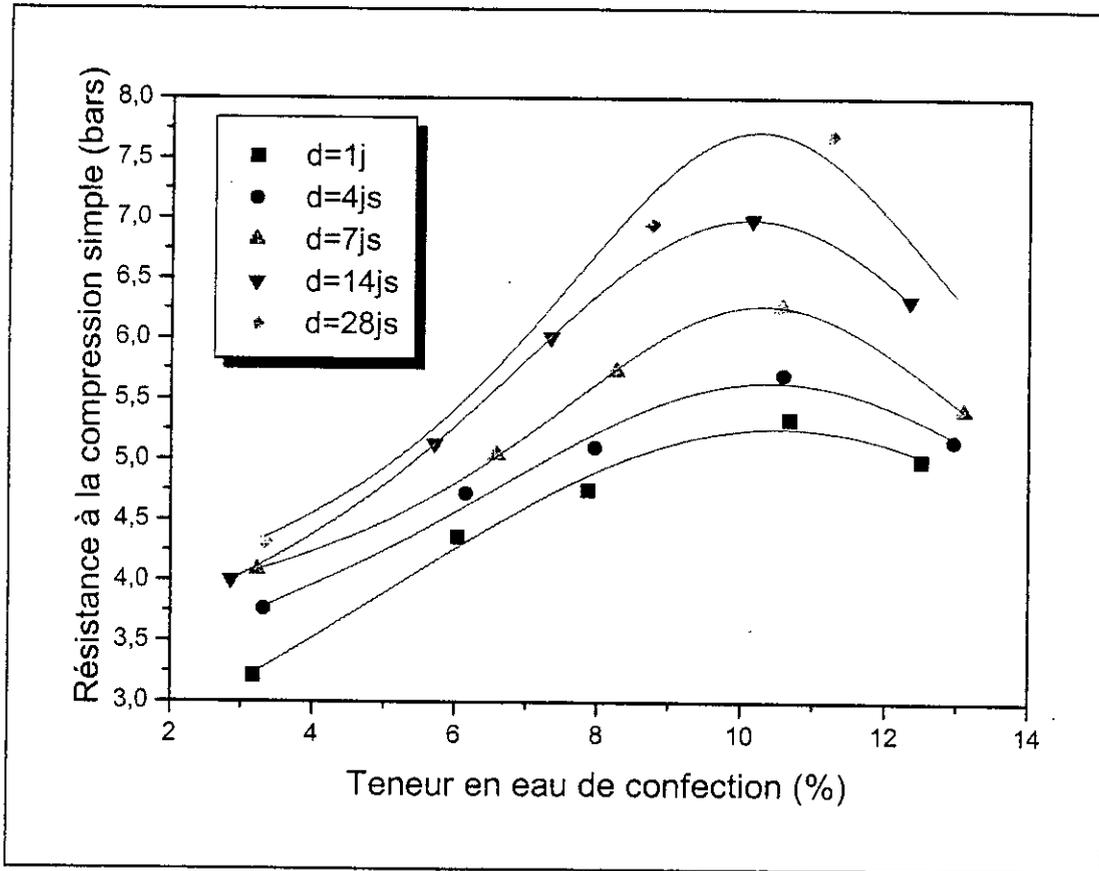


Figure VI.1 – Influence de la teneur en eau sur la Rc, à différentes durées de conservation (conservation à l'étuve avec dessiccation).

VI.5.1.2 Conservation à l'air libre

Le tableau ci-après regroupe les résultats des essais.

Tableau VI.2 : Résistance en compression simple en fonction de la teneur en eau, à différentes durées de conservation (conservation à l'air libre).

Durée de conservation (jours)									
1		4		7		14		28	
W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)
3.17	3.32	3.32	3.56	3.23	4.02	2.86	3.95	2.94	4.3
6.04	4.36	6.16	4.58	6.59	5.44	5.72	5.13	6.14	5.88
7.87	4.83	7.94	5.00	8.27	5.94	7.35	6.16	8.16	6.90
10.67	5.11	10.59	5.60	10.57	6.37	10.15	7.08	10.64	7.61
12.5	5.07	12.96	5.10	13.10	5.34	12.34	6.56	12.64	6.68

Nous constatons d'après la figure VI.2 que, l'allure générale des courbes est similaire à celle des courbes du cas de conservation à l'étuve avec dessiccation, elles sont presque superposables.

Nous pouvons conclure que, la température n'améliore pas la résistance Rc, elle devait peut être l'accélérer, d'après les résultats de BEN DHIA [6] évoqués au chapitre 4, mais l'effet de dessiccation étant rapide dans le cas de nos éprouvettes (vu leurs dimensions), ce qui a fait que cet aspect n'apparaît pas dans notre étude.

Dans la suite de l'étude nous ne considérerons plus la conservation à l'air libre.

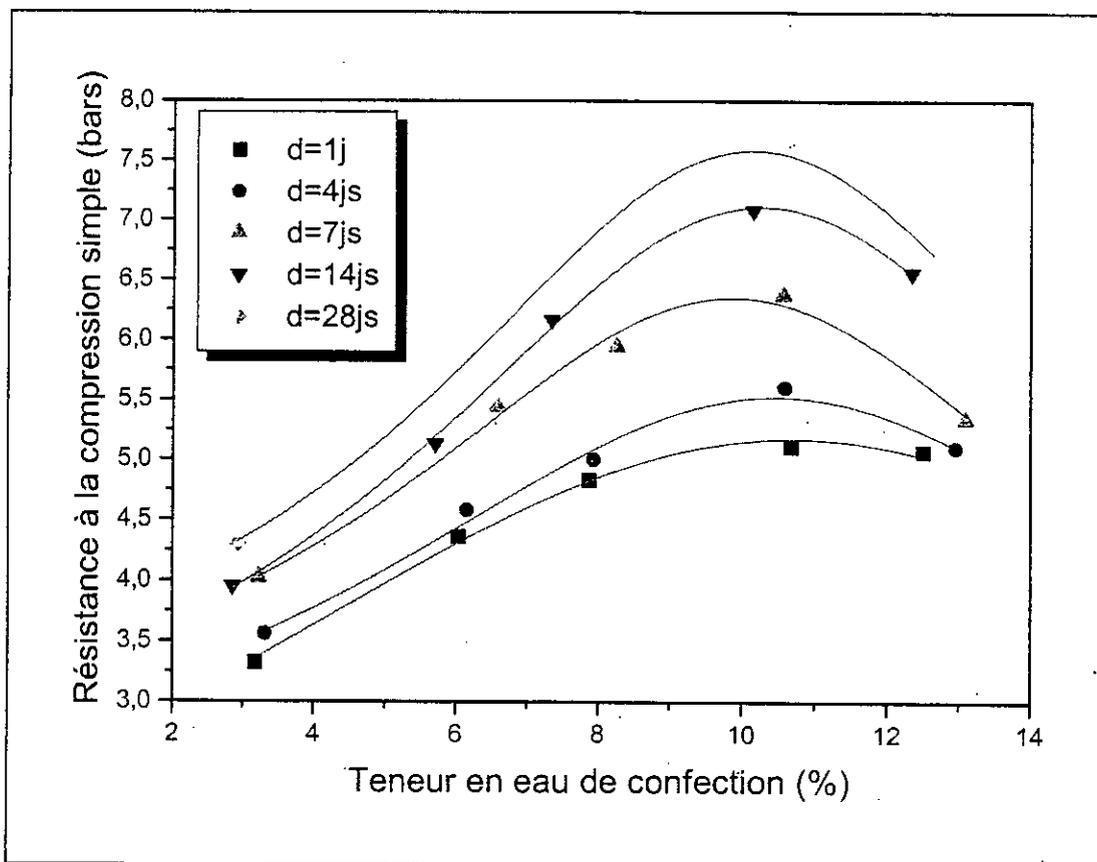


Figure VI.2 – Influence de la teneur en eau sur la Rc, à différentes durées de conservation (conservation à l'air libre).

VI.5.1.3 Conservation à l'étuve sans dessiccation

Les résultats sont portés sur le tableau VI.3.

Tableau VI.3: Résistance en compression simple en fonction de la teneur en eau, à différentes durées de conservation (conservation à l'étuve sans dessiccation).

Durée de conservation (jours)									
1		4		7		14		28	
W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)	W (%)	Rc (bars)
2.95	2.14	3.07	2.45	2.96	3.00	2.89	3.08	2.32	3.24
5.51	1.25	5.92	1.53	5.77	1.59	6.07	1.73	4.86	2.22
7.68	0.54	7.64	0.94	8.59	0.91	8.10	1.01	7.02	1.20
11.07	0.15	10.71	0.45	10.60	0.39	11.13	0.31	9.50	0.68
12.47	0.08	13.45	0.06	12.63	0.12	12.79	0.17	11.66	0.26

La dépendance de la teneur en eau apparaît très marquée, quelle que soit la durée de conservation : la Rc chute, lorsque la teneur en eau augmente.

Les courbes obtenues sont toutes sous forme de décadence exponentielle (figure VI.3).

Une chute considérable de la résistance est observée lorsque la teneur en eau passe de 3 à 8 %, au-delà de cette valeur elle devient moins importante et la Rc tend à se stabiliser.

Ainsi, lorsque la teneur en eau varie entre 3 et 8 %, cette chute est de :

- 73 % à 1 jour de conservation;
- 67 % à 14 jours de conservation.

Une durée prolongée de conservation réduit la chute de résistance.

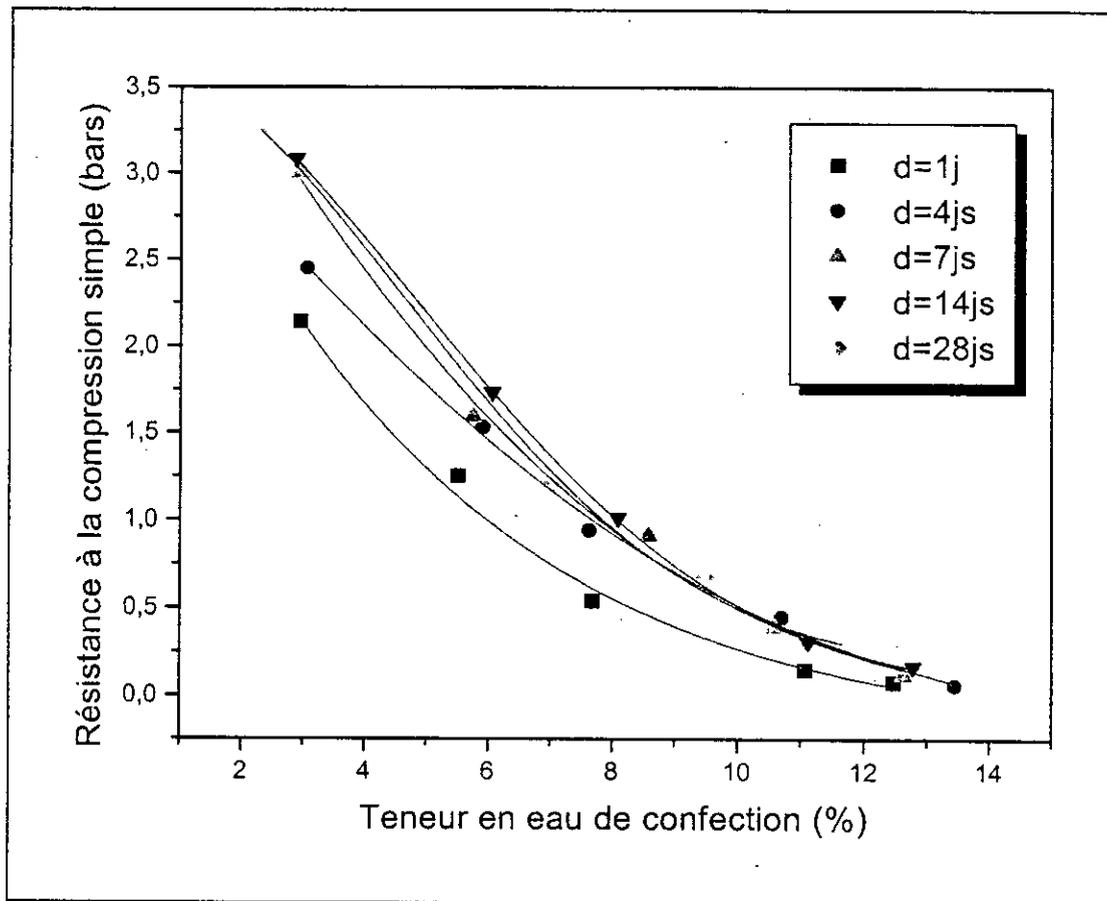


Figure VI.3 – Influence de la teneur en eau sur la R_c , à différentes durées de conservation (conservation à l'étuve sans dessiccation).

La figure VI.3 montre également, que les courbes dont la durée de conservation est supérieure ou égale à 7 jours se confondent pour donner une seule forme.

VI.5.2 Influence de la durée de conservation sur la résistance à la compression simple

A partir des graphes expérimentaux (R_c en fonction de la teneur en eau) nous avons tracé des graphes déduits qui représentent la variation de la R_c en fonction de l'âge des éprouvettes, à différentes teneurs en eau et selon différents modes de conservation.

VI.5.2.1 Conservation avec dessiccation

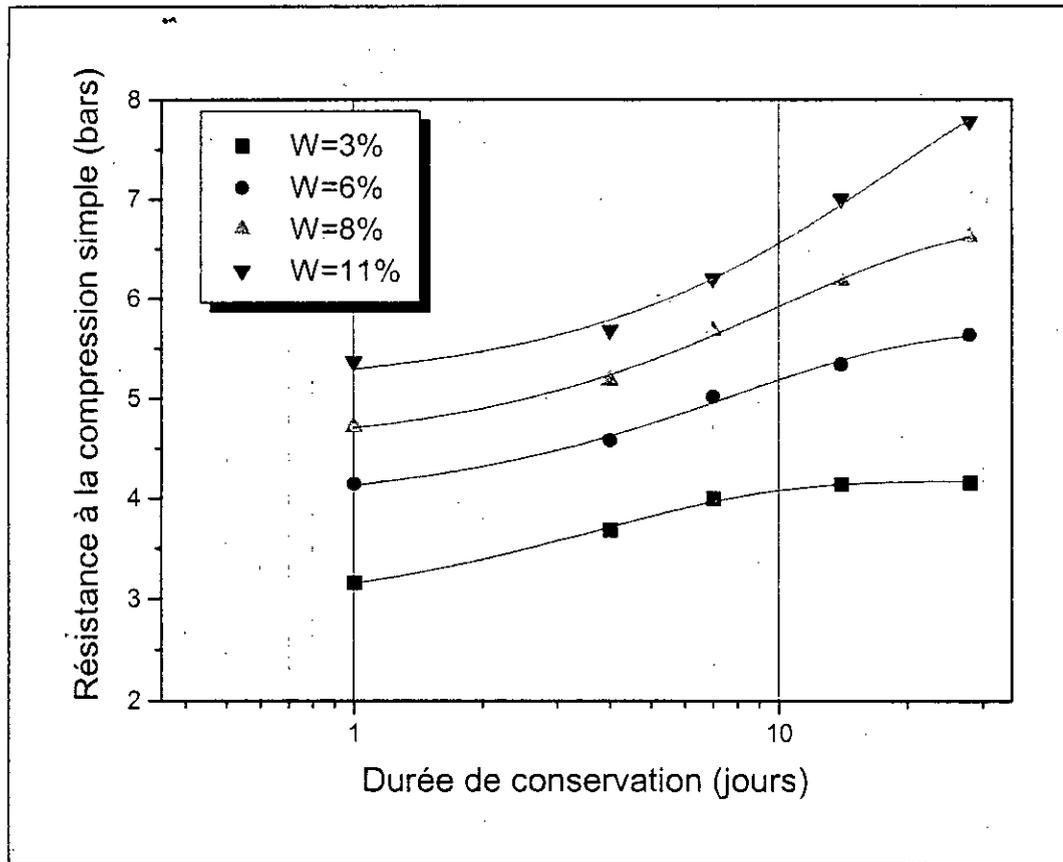


Figure VI.4 – Influence de la durée de conservation sur la R_c , à différentes teneurs en eau (conservation avec dessiccation).

D'après la figure VI.4 nous constatons que, la durée de conservation a une incidence très remarquable sur l'évolution de la résistance à la compression simple. Elle est très importante quand la teneur en eau est proche de la teneur en eau OPM (11 %). Par contre, elle reste faible à une teneur en eau de 3 %, où la résistance tend à se stabiliser à partir du 7^{ème} jour.

Ainsi, quand la durée de conservation varie entre 7 et 28 jours, l'augmentation de la R_c est de :

- 25 % pour $w = 11 %$;
- 12 % pour $w = 6 %$;
- 4 %, seulement, pour $w = 3 %$.

Il est à noter, cependant que l'augmentation de la résistance à la compression simple après 1 jour de conservation, ne peut être attribuée, seulement, à une dessiccation du matériau, étant donné que ce dernier a perdu toute son eau après 1 jour de confection.

VI.5.2.2 Conservation sans dessiccation

Nous remarquons que l'ensemble des résistances reste faible par rapport au cas de dessiccation, quelle que soit la durée de conservation (figure VI.5).

Une évolution de la résistance plus au moins faible est constatée pour les teneurs en eau de 3 et 6% dans une durée de conservation comprise entre 1 et 7 jours. Alors que pour les autres teneurs en eau, il n'y a pas, ou très peu, d'évolution de résistance.

Au-delà du 7^{ème} jour, toutes les courbes tendent vers une asymptote horizontale. Il y a donc stabilisation de la résistance.

Notons, lorsque la durée de conservation varie entre 4 et 7 jours, l'évolution de la Rc est de :

- 19 % pour $w = 3 \%$;
- 6 % pour $w = 6 \%$;
- 2 % pour $w = 11 \%$.

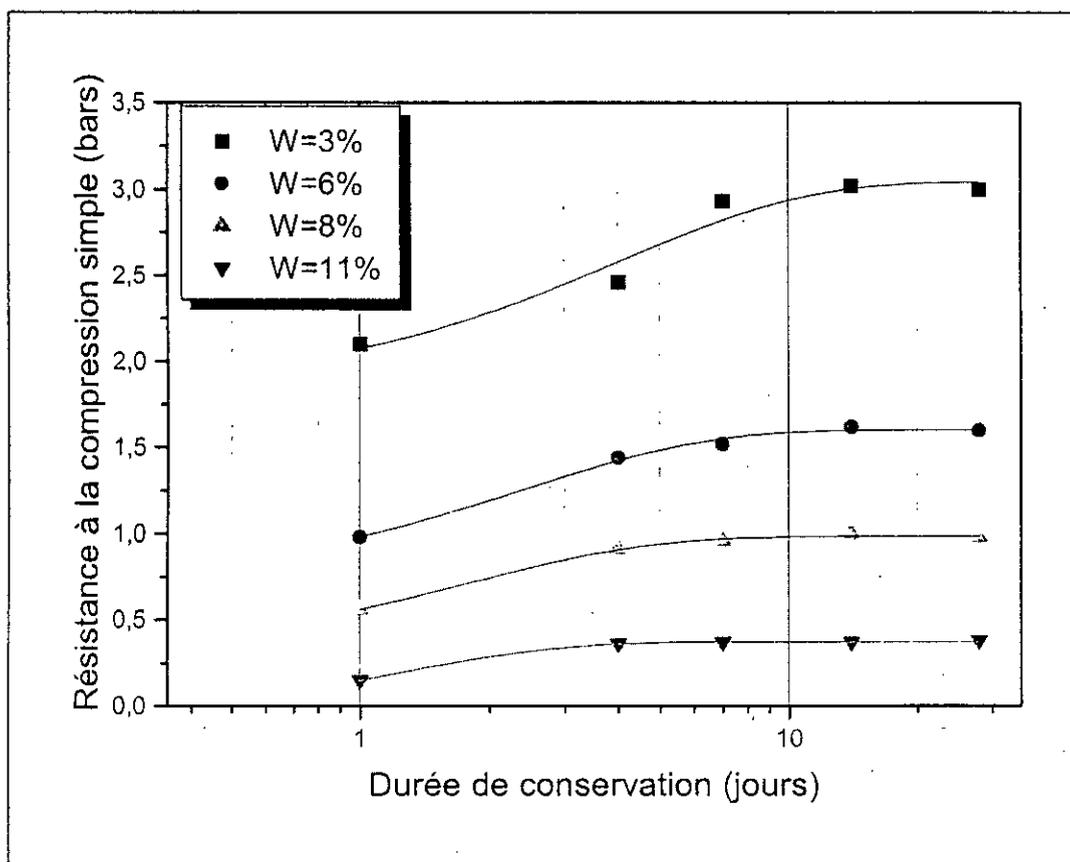


Figure VI.5 – Influence de la durée de conservation sur la Rc, à différentes teneurs en eau (conservation sans dessiccation).

VI.5.3 Influence du mode de conservation sur la résistance à la compression simple

Afin de mieux comprendre l'effet du mode de conservation sur la R_c , nous avons comparé les graphes des deux modes de conservation :

- Conservation à l'étuve avec dessiccation, que nous avons notée C1;
- Conservation à l'étuve sans dessiccation, notée C2.

Pour les teneurs en eau suivantes : 3; 6; 8 et 11 %.

Les figures VI.6 montrent, l'incidence importante du mode de conservation sur la R_c ; effectivement, lorsque les éprouvettes sont séchées elles présentent les meilleures résistances mécaniques par rapport aux éprouvettes humides.

Cette évolution de la résistance apparaît considérable pour les teneurs en eau proches de la w_{OPM} et moins importante pour les faibles teneurs en eau.

Ainsi, à 28 jours la R_c est multipliée par :

- 20, pour $w = 11\%$;
- 7, pour $w = 8\%$;
- 3, pour $w = 6\%$.

Tandis que pour une teneur en eau de 3%, l'augmentation en résistance, à 28 jours, est de : 39%.

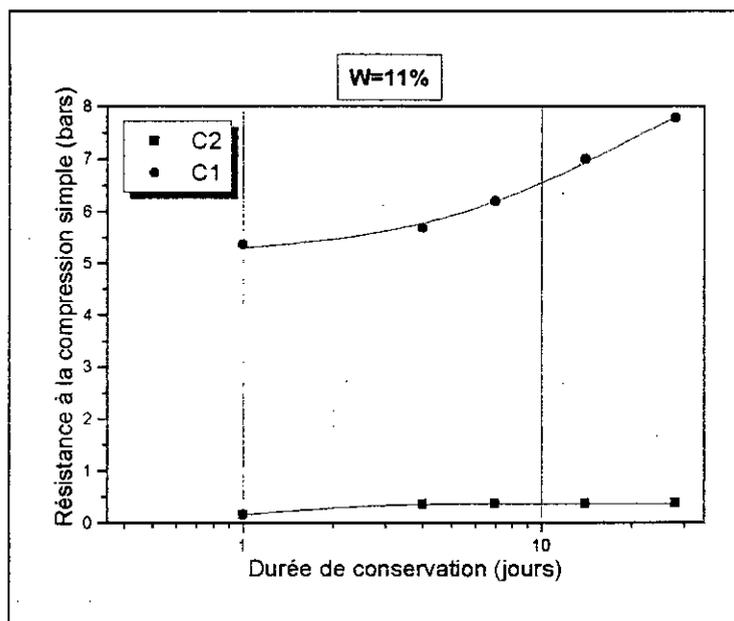


Figure VI.6.a – Evolution de la R_c en fonction du mode de conservation, pour $w = 11\%$.

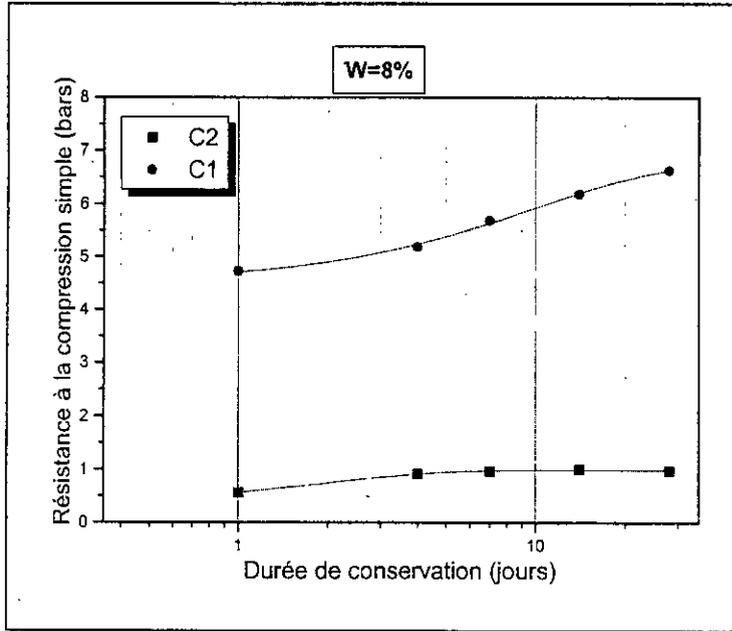


Figure VI.6.b – Evolution de la Rc en fonction du mode de conservation, pour w = 8%.

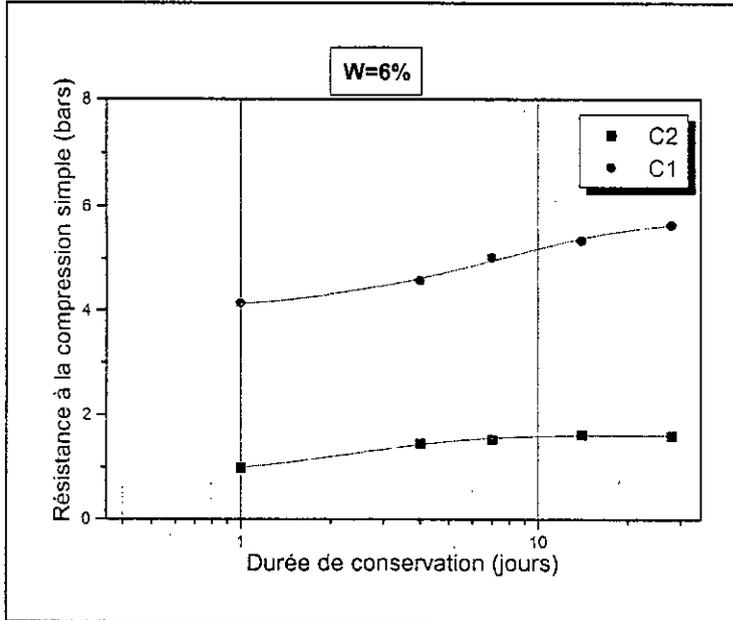


Figure VI.6.c – Evolution de la Rc en fonction du mode de conservation, pour w = 6%.

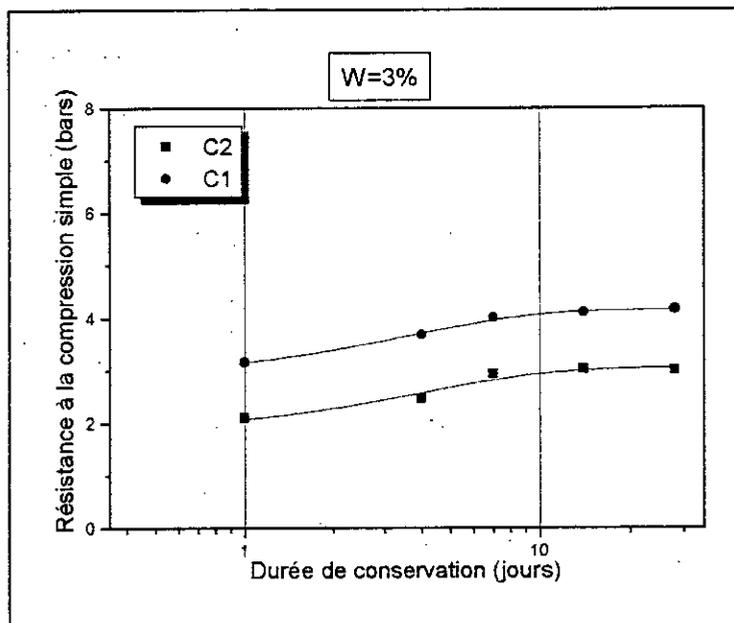


Figure VI.6.d – Evolution de la Rc en fonction du mode de conservation, pour $w = 3\%$.

VI.5.4 Variation minéralogique

Dans le cas de conservation sans dessiccation, vu au §VI.5.2.2, nous avons constaté que la résistance n'a pas évolué pour les éprouvettes humides, dont les teneurs en eau sont proches de la w_{OPM} ; cependant une légère évolution est observée aux faibles teneurs en eau.

Afin de comprendre ce comportement, nous avons effectué des analyses par diffraction des rayons X pour voir s'il y a apparition de nouvelles formes cristallines.

Pour cela, nous avons confectionné deux séries d'éprouvettes compactées à la densité OPM à deux teneurs en eau, représentant les deux cas de comportement constatés, à savoir : 4 et 9%.

Les éprouvettes sont conservées à l'étuve à 40°C dans des étuis fermés à différentes durées. Les analyses ont été faites juste après le décoffrage des éprouvettes conservées, elles ont donné les spectres portés sur l'annexe 7.

En comparant les différents spectres, nous constatons qu'il n'y a pas eu de changement dans la composition minéralogique, nous retrouvons, après conservation à différentes teneurs en eau et durées, les mêmes constituants que ceux du matériau naturel.

VI.6 CONCLUSION

Dans cette partie d'étude, nous nous sommes intéressés à l'effet de la teneur en eau sur l'évolution de la résistance à la compression simple dans le temps selon différents modes de conservation. Ces paramètres reflètent, en quelques sortes, l'environnement que subit le tuf une fois mis en place en corps de chaussée.

Les principaux résultats à retenir dans cette partie sont les suivants :

- Pour le cas de la conservation avec dessiccation, l'évolution de la résistance en fonction du temps est très marquée pour les teneurs en eau de confection proches de la w_{OPM} ; tandis qu'elle est moins importante pour les faibles teneurs en eau de confection. La prise des tufs d'encroûtements se développe mieux en milieu humide;
- La température de séchage n'améliore pas la valeur limite de la résistance;
- Pour les éprouvettes conservées à teneur en eau constante, une évolution de la résistance est observée aux faibles teneurs en eau, cette évolution est très faible si non nulle pour les teneurs en eau qui se rapprochent de la w_{OPM} ;
- L'analyse par diffraction des rayons X effectuée sur des éprouvettes conservées à l'étuve sans dessiccation, à différentes durées et teneurs en eau, a montré clairement que la composition minéralogique n'a subi aucune modification durant la conservation.

Chapitre 7

STABILISATION A LA CHAUX

VII.1 INTRODUCTION

La stabilisation, en tant que traitement, a pour objectif de rendre un matériau utilisable en améliorant ses caractéristiques rhéologiques, physico-chimiques, mécaniques et sa durabilité.

La stabilisation des sols aux liants hydrauliques est une technique ancienne, les Chinois ont en effet construit leur « *Grande muraille* » de 6000 km de long en ajoutant au sol de la chaux et du blanc d'œuf. Elle s'est essentiellement développée, au début de XX^{ème} siècle en technique routière et a connu une intensification pendant la seconde guerre mondiale [3].

La stabilisation à la chaux est conçue généralement pour les sols fins, limoneux ou argileux afin d'améliorer leur portance au cours du chantier en période pluviale. Dans notre étude, nous avons opté pour l'utilisation de la chaux aérienne comme liant stabilisant et non pas le ciment, pour son intérêt économique qu'elle présente d'une part, et d'autre part pour éviter la formation des sels de Conclot expansifs qui apparaîtront une fois que le ciment CPA est mélangé avec un sol gypseux.

Notre objectif est donc, l'amélioration des caractéristiques mécaniques de notre tuf gypso-calcaire, traduite par l'évolution de la résistance à la compression simple, pour une éventuelle utilisation en assise de chaussée.

VII.2 PLAN EXPERIMENTAL

Cette étude expérimentale est fondée sur l'observation de la stabilisation effectuée, en faisant varier deux facteurs susceptibles d'agir sur la stabilisation, à savoir : l'humidité et la concentration en chaux.

La chaux utilisée est une chaux aérienne calcique éteinte ($CaOH_2$), dont les caractéristiques sont présentées au paragraphe suivant; les dosages sont choisis dans un domaine économique réaliste, ils sont de : 2 et 4 %.

Compte tenu, des variations importantes des teneurs en eau qui peuvent être rencontrées sur chantiers, il nous a semblé utile au plan pratique de travailler avec deux teneurs en eau, qui sont de : 11 et 6 %.

Ces teneurs en eau représentent respectivement :

- La teneur en eau à l'OPM;
- La teneur en eau, prévisible, finale établie dans la couche traitée après malaxage.

En effet, il s'est avéré que le traitement sur le chantier étant souvent réalisé dans des conditions atmosphériques évaporantes, la réduction de la teneur en eau constatée est souvent très importante par rapport à celle provoquée par la seule incorporation de la chaux.

Dans ces conditions, des pertes d'eau atteignant 4 à 6% sont souvent constatées sur les chantiers, cet assèchement, qui se produit principalement durant le malaxage nécessite un arrosage complémentaire pour le compenser [24].

Nous avons gardé les caractéristiques à l'OPM du tuf non traité, défaut de matériau nécessaire à cette étude. Les éprouvettes seront donc compactées statiquement puis conservées à l'étuve à 40°C avec dessiccation afin de se rapprocher des conditions climatiques au Sahara.

Ainsi, les essais effectués au cours de cette partie d'étude sont :

- Résistance à la compression simple (sur les petites et grandes éprouvettes);
- Essai CBR.

VII.3 IDENTIFICATION DE LA CHAUX

Les critères d'efficacité de la chaux sont de deux catégories : granulométrique et chimique. Ils sont choisis pour faciliter la dispersion de la chaux dans le sol grâce à la granularité, et pour une réaction intense grâce à la granularité, à la réactivité (pour le cas de la chaux vive) et à la teneur en chaux libre [23].

Le tableau VII.1 résume les résultats de l'analyse chimique de la chaux utilisée.

Tableau VII.1 : Caractéristiques chimiques.

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Cr ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	PF (%)
1.76	0.64	0.30	69.46	0.28	0.43	0.10	0.03	26.84

Les caractéristiques physiques sont comme suit :

Masse volumique apparente : 0.504 t/m³

Refus sur le tamis de 0.63 mm : 0.00 %

Refus sur le tamis de 0.100 mm : 23.00 %

VII.4 RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Dans cette partie d'étude nous avons utilisé le moule conçu pour l'étude d'autostabilisation, pour les raisons déjà évoquées au chapitre 6.

Chaque point expérimental représente 2 à 4 éprouvettes confectionnées dans les mêmes conditions d'essais.

VII.4.1 Influence de la teneur en chaux sur la résistance à la compression simple

Les résultats des essais sont portés sur le tableau VII.2.

Tableau VII.2 : Variation de la R_c en fonction du temps, à différents dosages en chaux et teneurs en eau.

Durée de conservation (jours)	Résistance à la compression simple (bars)			
	% Chaux = 2		% Chaux = 4	
	W = 11 %	W = 6 %	W = 11 %	W = 6 %
1	5.62	9.41	8.91	13.61
7	6.10	9.71	9.12	14.35
14	4.02	11.00	9.78	15.61
28	4.46	12.12	11.08	16.68
60	8.48	12.81	11.56	17.32

L'influence du dosage en chaux sur la résistance à la compression simple, pour les deux teneurs en eau, est présentée sur les figures VII.1.

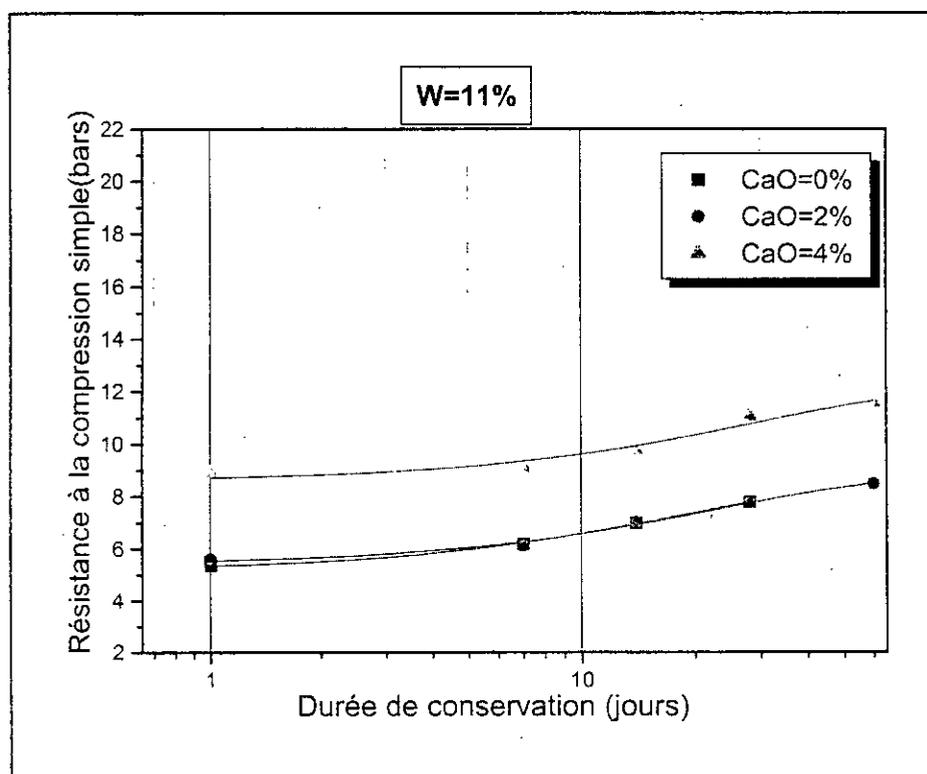


Figure VII.1.a- Influence de la teneur en chaux sur la R_c , pour $w = 11\%$.

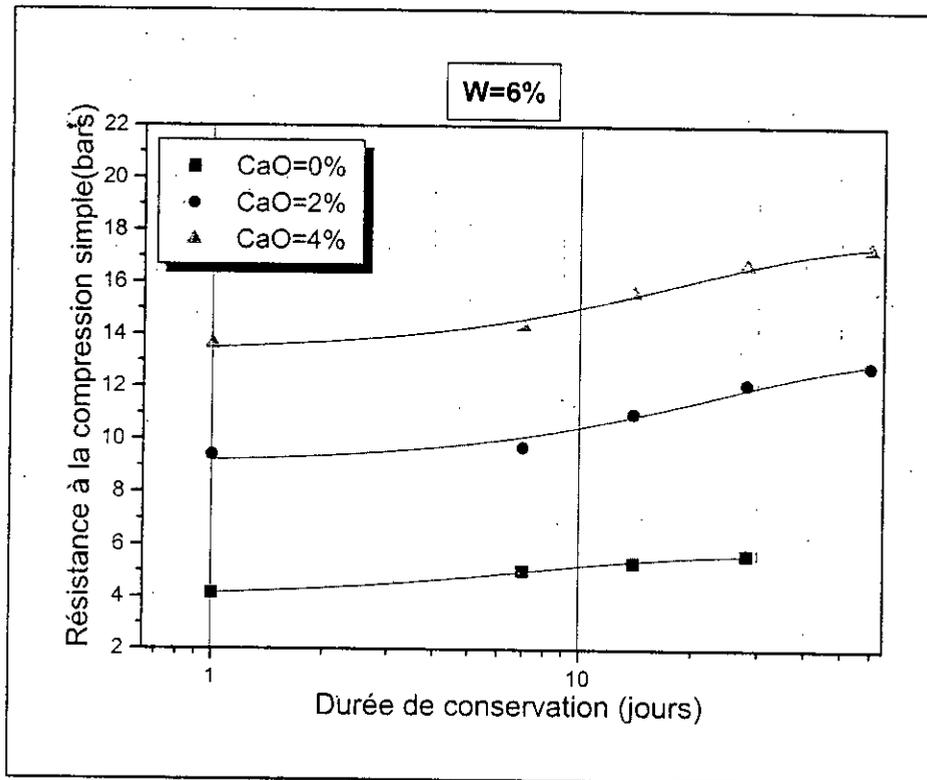


Figure VII.1.b - Influence de la teneur en chaux sur la Rc, pour $w = 6\%$.

Les graphes de la figure VII.1 montrent que, l'augmentation du dosage en chaux accélère l'évolution de la résistance.

Nous constatons en effet que, pour une teneur en eau de 6 %, un dosage en chaux de 2 % seulement porte une amélioration très marquée sur la Rc par rapport au cas non traité.

Ainsi, à 28 jours la Rc est multipliée par :

- 2, pour 2 % de chaux;
- 3, pour 4 % de chaux.

Cependant, cette évolution est moins importante pour la teneur en eau de 11 %, un dosage en chaux de 2 % ne porte pas d'amélioration sur la valeur de la Rc, c'est à 4 % de chaux qu'une évolution de résistance de : 42 % est observée.

VII.4.2 Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression simple

L'influence des deux facteurs (dosage en chaux et teneur en eau) sur la stabilisation apparaît globalement lorsqu'on compare les diagrammes exprimant directement les variations de la résistance à la compression simple en fonction du temps, à différents dosages en chaux et teneurs en eau (figureVII.2).

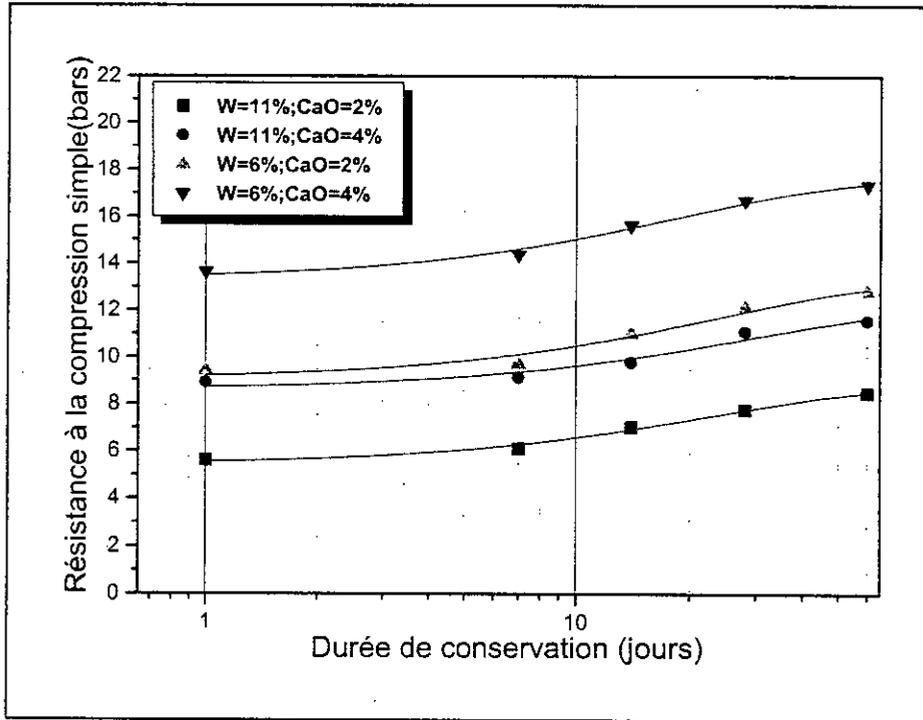


Figure VII.2 – Evolution de la Rc en fonction de l’âge des éprouvettes traitées à la chaux, pour w = 11 et 6 %.

La figure ci-dessus montre l’influence de la teneur en eau sur l’évolution de la Rc. Elle est plus marquée pour 6 % d’eau qu’à 11 %.

Nous remarquons aussi qu’à 2 % de chaux la valeur de la résistance à la compression simple à 6 % d’eau est supérieure à celle de 11 % d’eau et 4 % de chaux. Ce qui implique, a priori, qu’on obtient une amélioration de résistance en faisant à la fois une économie de chaux et d’eau.

Pour confirmer cette évolution, nous avons confectionné deux séries d’éprouvettes standards (D = 5 cm, H = 10 cm) compactées et conservées dans les mêmes conditions que les précédentes à 2 % de chaux et pour 11 et 6 % d’eau.

Les résultats sont portés sur le tableau suivant :

Tableau VII.3 : Résistances à la compression simple sur des éprouvettes standards traitées à 2 % de chaux.

Durée de conservation (jours)	Résistance à la compression simple (bars)	
	W = 11 %	W = 6 %
7	10.10	15.54
28	12.73	19.00

A partir des résultats du tableau précédent, nous constatons que pour un dosage en chaux de 2% et à une teneur en eau de 6 % nous obtenons une valeur de la résistance à la compression simple à 28 jours de :

$R_c (28 \text{ js}) = 19 \text{ bars} > 15 \text{ bars}$ (limite minimale exigée pour une couche de fondation selon les spécifications de l'annexe 3).

Cela permet de proposer l'utilisation de notre tuf en couche de fondation.

Enfin, nous pouvons dire que pour des dosages économiques d'eau et de chaux, nous pourrions améliorer la résistance de notre tuf, qui a été jugée, avant traitement, insuffisante même pour une couche de fondation.

Cette stabilisation nous semble d'un grand intérêt économique pour une région saharienne où l'eau fait souvent défaut.

VII.4.3 Evolution du CBR en fonction du temps

Dans un but de voir l'évolution de l'indice portant CBR du matériau traité en fonction du temps et de la comparer avec celle de la résistance à la compression simple, nous avons réalisé des éprouvettes CBR à 2 % de chaux et 11% d'eau, que nous les avons conservées à l'étuve à 40°C, selon différentes durées.

Le tableau VII.4 résume les résultats.

Tableau VII.4 : Valeurs de l'indice CBR à différentes durées de conservation, à 2 % de chaux.

Durées(js)	1	7	14	28	60
CBR(%)	84.20	122	151.80	160.80	165.10

le graphe de la figure VII.3 nous montre, que l'évolution de l'indice portant CBR est très rapide entre 1 et 28 jours, l'indice portant passe pratiquement du simple au double.

En comparant cette évolution à celle de la résistance à la compression simple (figure VII.1.a pour une teneur en chaux de 2%), sous les mêmes conditions (dosage en chaux et teneur en eau), nous trouvons que les deux essais ne suivent pas la même allure d'évolution; la relation $R_c = f(\text{CBR})$ n'est pas linéaire.

Nous pensons que cette question mérite d'être traitée avec plus de détails dans des études plus approfondies.

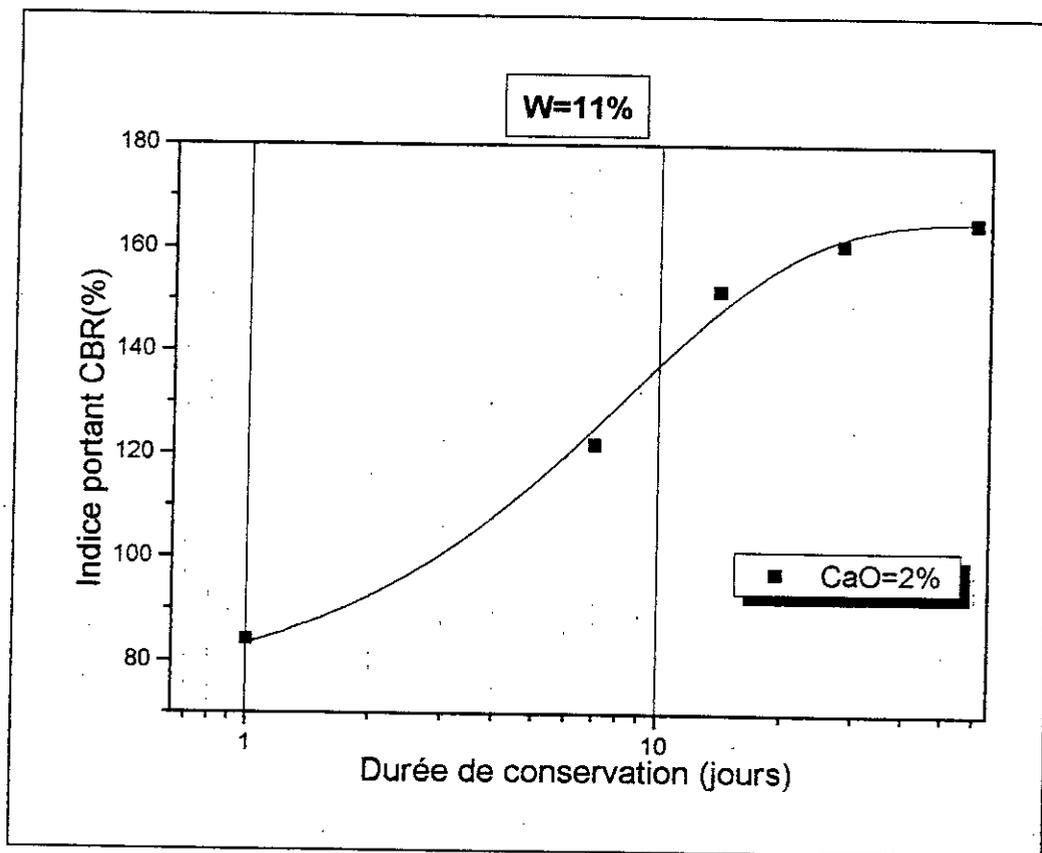


Figure VII.3 – Evolution de l'indice CBR en fonction du temps, pour $w = 11\%$.

VII.5 CONCLUSION

Cette partie d'étude a permis de voir l'influence de la stabilité à la chaux sur l'évolution de la résistance à la compression simple d'un tuf gypso-calcaire.

La procédure utilisée nous a permis de suivre le comportement du tuf stabilisé en fonction du dosage en chaux et de la teneur en eau.

Les principaux résultats obtenus dans cette partie sont les suivants :

- Le dosage en chaux influe directement et positivement sur la résistance à la compression simple du tuf traité (surtout à 6 % d'eau), ainsi que la durée de conservation favorise l'amélioration de cette résistance;
- Le rôle de la teneur en eau de confection est très important, à 6 % d'eau notre tuf présente des performances mécaniques meilleures qu'à 11%;

- La relation liant la résistance à la compression simple R_c et l'indice portant CBR n'est pas linéaire;
- Sous réserve des recherches plus avancées sur le comportement du mélange tuf gypsocalcaire-chaux à long terme en laboratoire et sur des planches d'essais, les performances mécaniques obtenues permettent d'envisager l'utilisation de notre matériau en couche de fondation des chaussées à faible trafic dans la zone climatique IV, à des dosages de chaux et d'eau économiques.

RECOMMANDATIONS

L'importance des tufs d'encroûtements n'est plus à démontrer, cependant des études restent à faire pour mieux comprendre le comportement de ces matériaux avec ou sans stabilisation afin de mieux les valoriser. dans ce qui suit, nous proposons quelques recommandations pour des études futures.

- > Etablissement des spécifications justifiées et acceptées par la plupart des pays utilisateurs de ces matériaux (concernant la classification des tufs d'encroûtements, les caractéristiques à prendre et les niveaux des exigences) ;
- > Etude minéralogique plus approfondie du phénomène de durcissement des tufs d'encroûtements et des moyens pour le rendre irréversible;
- > Etude de comportement du mélange tuf gypsocalcaire-chaux à long terme et en fatigue, étude qui nous paraît plus adaptée à son utilisation en assises de chaussée;
- > Réalisation des planches d'essais construites avec le mélange tuf-chaux, destinées à préciser les conditions de compactage, les conditions pratiques d'humidification et l'influence du malaxage sur la facilité du compactage du tuf traité. Les solutions tirées de ces planches expérimentales pouvant avoir des conséquences importantes sur les méthodes et les moyens de chantier, ainsi que sur l'efficacité du traitement dans les conditions naturelles de mise en service à long terme.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les tufs d'encroûtements sont de plus en plus utilisés en construction routière, avec des résultats meilleurs que ne laissent prévoir leurs caractéristiques mécaniques comparées aux critères usuels qui président à l'emploi des matériaux de chaussée. C'est ainsi que l'on peut observer des routes construites depuis plus de trente ans, qui se comportent très bien malgré que le trafic qu'elles supportent soit déjà supérieur à celui pour lequel elles avaient été dimensionnées.

En raison de l'abondance dans notre pays des tufs d'encroûtements, les ingénieurs routiers ont essayé de tirer le meilleur parti de ceux-ci. Les efforts déployés vont dans le sens d'une optimisation de l'emploi dans les techniques routières de ces matériaux et la rationalisation des critères de jugement.

De plus, certains matériaux d'encroûtements se trouvant aux abords du tracé routier ne répondent pas toujours aux spécifications adoptées pour ces matériaux. Cela a orienté les études de recherches sur la valorisation des tufs d'encroûtements non sélectionnés pour améliorer leurs performances et les rendre compatibles avec les exigences des réseaux routiers modernes.

Dans notre étude, nous avons essayé d'aborder ces aspects dans les limites de temps et de moyens qui nous ont été disponibles. L'étude de l'influence de la teneur en eau sur la prise des tufs nous a montré que le compactage des couches des chaussées construites en tufs doit se faire à des teneurs en eau très proches de l'OPM, même si l'allure de la courbe Proctor permet l'utilisation d'une fourchette plus large.

Elle indique aussi, que le maintien d'une faible teneur en eau en corps de chaussée ne nuit pas au durcissement des couches; au contraire, elle pourrait être un facteur suscitant une certaine résistance. Il faudrait veiller à conserver l'équilibre hydrique sous chaussée et combattre tout séjour prolongé d'eaux de pluies sur la chaussée ou leur infiltration, au moyen des dispositifs constructives adéquates.

Le traitement à la chaux aérienne de notre échantillon, a montré son efficacité sur l'amélioration de la résistance à la compression simple et l'indice portant CBR; à des dosages économiques de chaux et d'eau, nous pouvons stabiliser notre tuf pour une utilisation en corps de chaussée à faible trafic dans la zone climatique IV, sous réserve de recherches plus poussées sur le comportement du mélange tuf gypsocalcaire-chaux à long terme et en fatigue en laboratoire et sur des planches d'essais « in-situ ».

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **ABDOU L.** (1997), « *Application du TCR pour l'étude du comportement des sables gypseux* », Projet de fin d'étude de l'Ecole Nationale des Travaux Publics, juillet.

[2] **ALLOUL B.** (1981), « *Etude géologique et géotechnique des tufs calcaires et gypseux d'Algérie en vue de leur valorisation routière* », Thèse de docteur 3^{ème} cycle de l'Université de Paris VI, juillet 1981.

[3] **AZZOUZ L., BOUCHICHA M., M. KHENFER M.** (1997), « *Stabilisation physico-chimique d'un sol sableux* », A.J.O.T, International publication, Série A, Vol. 13, N° 1, pp.47-53.

[4] **BASLIMANE B.** (1994), « *Etude en laboratoire du comportement des sables gypseux* », II^{ème} séminaire : Les techniques routières sahariennes, Beni Abbès.

[5] **BEN DHIA M.H.** (1983), « *Les encroûtements calcaires en Tunisie et dans le monde* », Bull. de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 126, juil-aout, pp. 5-14.

[6] **BEN DHIA M.H.** (1983), « *Les tufs et encroûtements calcaires dans la construction routière* », Thèse de docteur de 3^{ème} cycle de l'université de Paris VI, oct.

[7] **BEN DHIA M.H.** (1998), « *Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière* », Bull. de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 213, jan-fev., pp.33-42.

[8] **BETEKHTINE A.** (1968), « *Manuel de minéralogie descriptive* », Ed. MIR, MOSCOU.

[9] **BOULARAK M.** (1989), « *Mode de construction et contrôle des routes sahariennes* », Rencontre Maghrébine sur les techniques routières, Tunis, 20-23 nov.

[10] **COLOMBIER G.** (1988), « *Tufs et encroûtements calcaires : Utilisations routières. Synthèse* », ISTED.

[11] **DALIGAND D.** (1996), « *Plâtre* », Technique de l'ingénieur, Doc. C, Matériaux.

[12] **DOMEC M.** (1980), « *Construction des chaussées au Sahara* », Rapport technique du Laboratoire Central des Travaux Publics, Alger, sep. 1980.

[13] **FENZY E.** (1966), « *Particularité de la technique routière au Sahara* », Revue générale des routes et aérodromes, 411, pp. 57-71.

[14] **FUMET P.** (1959), « *Chaussées en sable gypseux et en sables stabilisés chimiquement* », Revue générale des routes et aérodromes, Numéro spécial « Sahara », 329, pp. 169-178.

[15] de O.S. HORTA J.C. (1979), « *Les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux en géotechnique routière* », Service des pub. du laboratoire de M.D.S., Base SONATRACH, Blida, Algérie.

[16] de O.S.HORTA J.C. (1980), « *Calcrete, gypcrete and soil classification in Algeria* », *Engineering Geology*, 15, pp. 15-52.

[17] INAL A. (1980), « *Route en milieu désertique* », IV^{ème} Conférence routière Africaine, Nairobi, 20-25 jan.

[18] KYVELLOS G. (1959), « *Infrastructure saharienne* », *Revue générale des routes et aérodromes*, Numéro spécial « Sahara », 329, pp. 221-223.

[19] LEKOUAGHET A., GHARNAOUT D., AIT ALI A. (1989), « *Utilisation des tufs et des arènes granitiques en technique routière saharienne* », Rencontre maghrébine sur les techniques routières, Tunis, 20-23 nov.

[20] LEKOUAGHET A. (1993), « *Choix des matériaux pour couche de base pour le Hoggar* », *Revue ALGERIE Equipement de l'Ecole Nationale des Travaux Publics*, 09, pp.15-17.

[21] LTP Sud (1989), « *Utilisation des matériaux locaux en technique routière : Les sables gypseux* », Rencontre Maghrébine sur les techniques routières, Tunis, 20-23 nov.

[22] PELTIER R. (1959), « *Le rôle du laboratoire dans la technique routière saharienne* », *Revue générale des routes et aérodromes*, Numéro spécial « Sahara », 329, pp. 165-168.

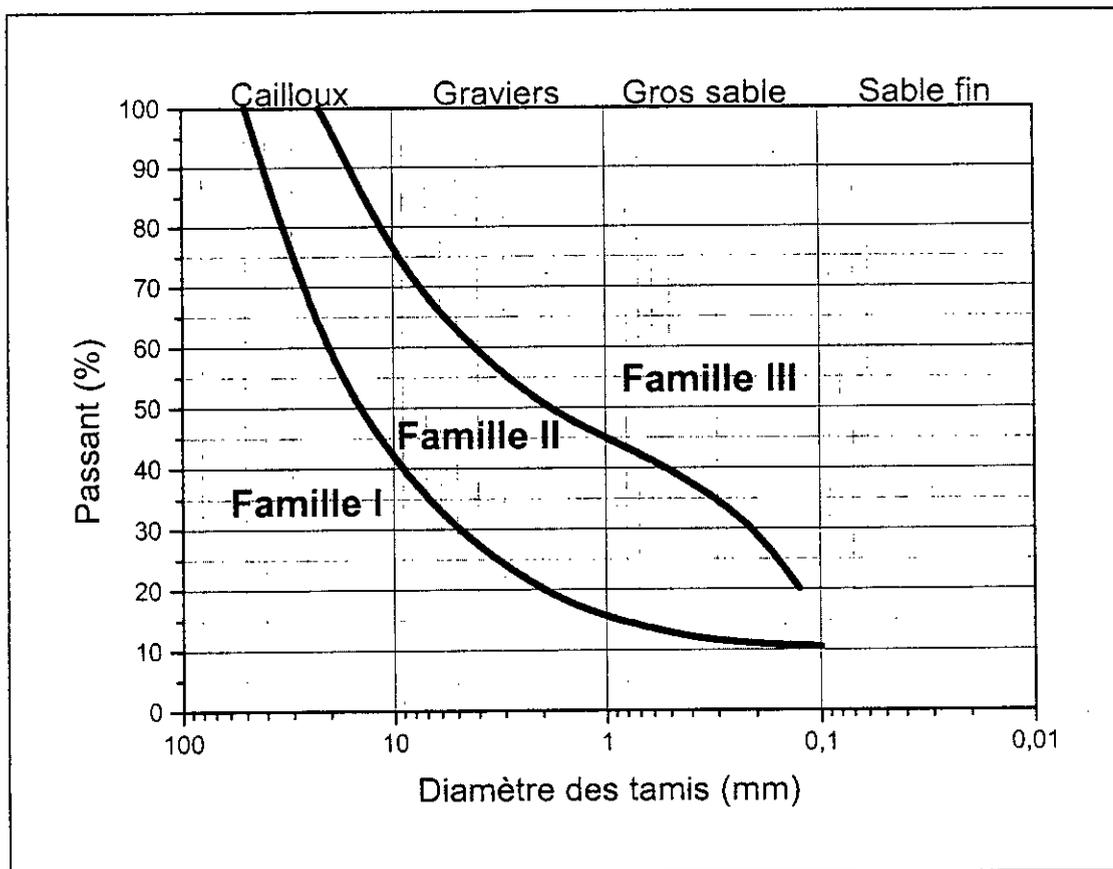
[23] SETRA-LCPC (1972), « *Recommandation pour traitement en place des sols fins à la chaux* », août 1972.

[24] SETRA-LCPC (2000), « *Guide technique : Traitement des sols à la chaux et /ou aux liants hydrauliques* », jan. 2000.

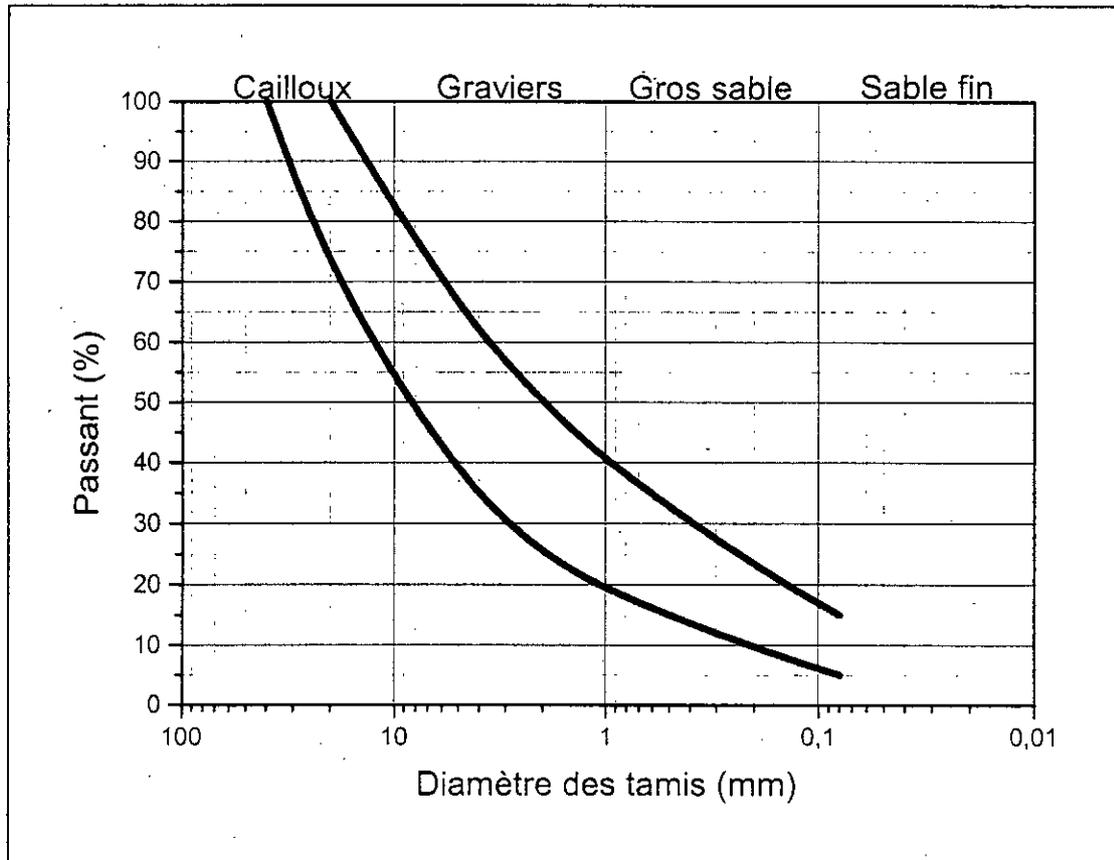
[25] SYNDICAT NATIONAL DES INDUSTRIES DU PLATRE (1982), « *Le plâtre : physico-chimie* », Ed. Eyrolles.

[26] TOUATI TLIBA M.B. (1994), « *Particularité de dimensionnement des chaussées dans le contexte saharien* », II^{ème} séminaire : Les techniques routières sahariennes, Beni Abbès.

ANNEXES



Annexe 1 – Fuseau saharien de Beni Abbès .



Annexe 2 – Fuseau granulométrique de la transsaharienne.

		Poids lourds/jour					
		< 130	130 300	300 600	600 1200	> 1200	
Zone II sub- humide H = 350 à 600 mm de pluie par an avec bon drainage exigé	Z < 80µ max.	BF	30	30	30	30	30
	Z' > 4 mm min.	BF	30	30	30	30	30
	Z > 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. sur < 0,4 mm	BF	10	10	10	10	10
	CBR _e à 4j d'immersion min.	BF	40	70	80	90	100
	Z CaCO ₃ min. sur < 1 mm	B	70	70	70	⊗	⊗
F		60	60	60	60	60	
Z CaSO ₄ max. sur < 1 mm	BF	tr	tr	tr	tr	tr	
Zone III semi- aride H = 100 à 350 mm de pluie par an sans exigence de bon drainage	Z < 80µ max.	BF	30	30	30	30	30
	Z' > 4 mm min.	BF	30	30	30	30	30
	Z > 12,5 mm min.	BF	10	10	10	10	10
	L.A. max. sur > 12,5 mm sec	B	100	100	55	35	⊗
		F	100	100	100	100	35
	IP max. sur < 0,4 mm	BF	13	13	13	13	13
	CBR _e à 4j d'immersion min.	BF	40	70	80	90	100
	Z CaCO ₃ min. sur < 1 mm	B	70	70	70	70	⊗
F		60	60	60	60	60	
Z CaSO ₄ max. sur < 1 mm	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 mm ; (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
	IPmax sur < 0,4 mm	BF	16	16	16	16	16
	CBR _e à 4j d'immersion min.	BF	30	60	70	80	90
	Z (CaCO ₃ +CaSO ₄) min. sur < 1 mm	B	70	70	70	⊗	⊗
		F	60	60	60	60	60
Z NaCl max. sur < 1 mm	BF	3	3	3	3	3	

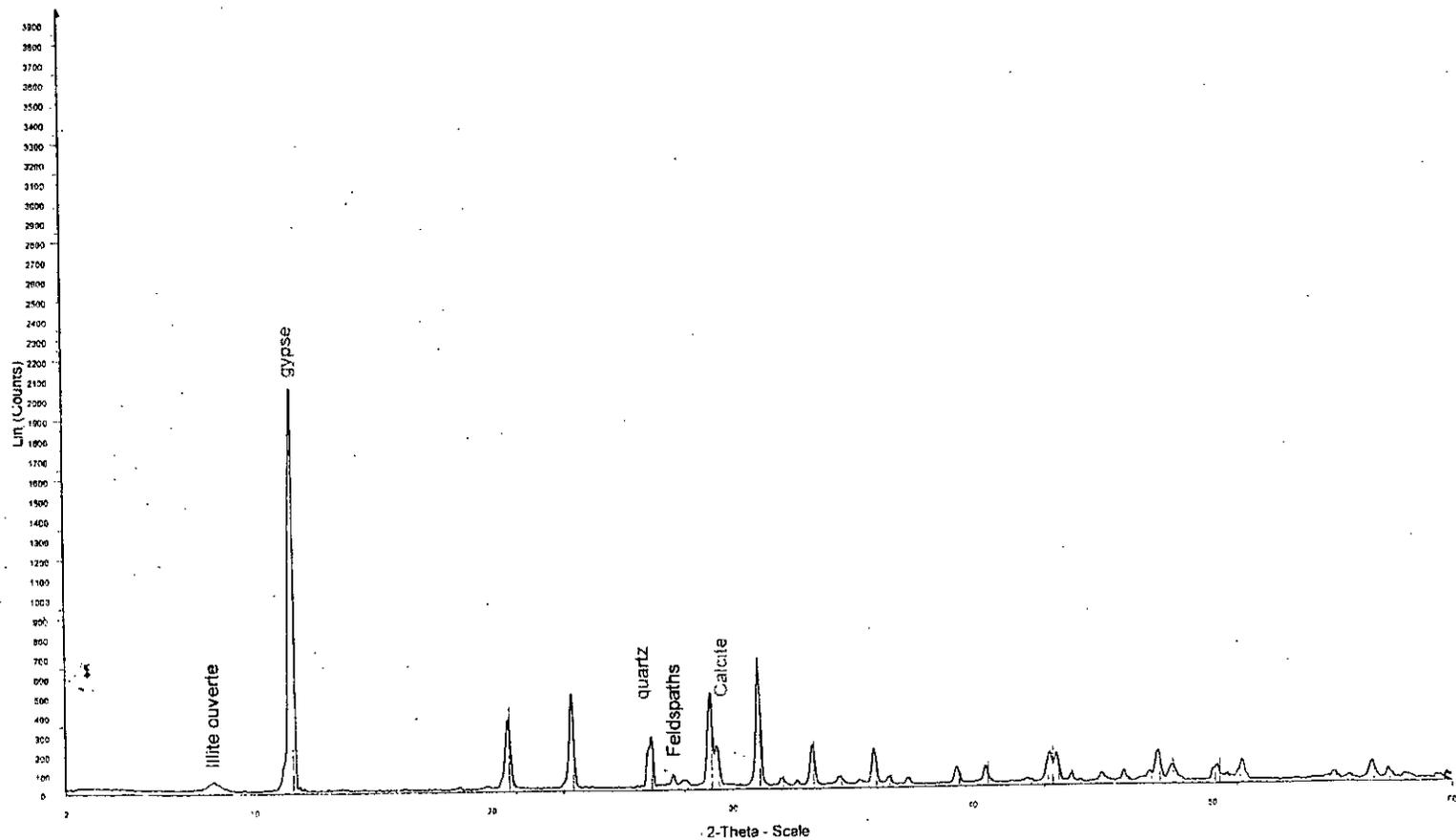
Légende: Caractéristiques à viser, si possible, en Algérie pour le choix des tufs d'encroûtements, suivant la zone climatique et le trafic prévu.
 ⊗ tufs d'encroûtements déconseillés; B: pour couche de base; F: pour couche de fondation; tr: traces; Rc (en MPa): compression simple sur cylindres (5 x 10cm) séchés 48h à 55°C; IP: Indice de Plasticité; granulométrie sous eau après 48h dans l'eau; compactage CBR à 55 coups/couche à WOPM puis 4j d'immersion; L.A. (%): Los Angeles sur granulométrie A.

Annexe 3 – Spécifications de ALLOUL et STRUILLOU pour les tufs d'encroûtements d'Algérie.

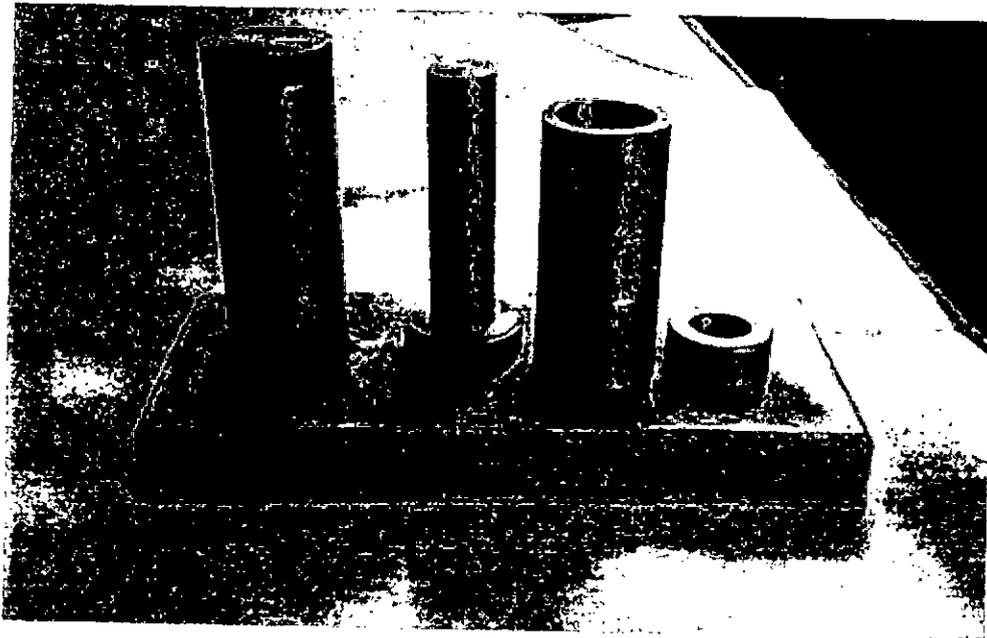
SiH • CRD • SCE RAYONS X • BELKADI

Sol gypsocalcaire HMD

AMRA0 SOL GYPSOCALCAIRE HMD D5MEAS - Program:LD70.DQL D5MEAS - Program:LD70.DQL - File: Amra0.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 0.50 s - Temp: 25 °C
Operations: Fourier 9.614 x 1 | Aberrant 1 | Import
33-0311 (*) - Gypsum, syn - CaSO4·2H2O - Y: 11.96 % - d x by: 1.0000 - WL: 1.5406 - 0 - I/c: PDF n.a. - I/c: User n.a. - S-Q n.a.
46-1045 (*) - Quartz, syn - SiO2 - Y: 7.31 % - d x by: 1.0000 - WL: 1.5406 - 0 - I/c: PDF n.a. - I/c: User n.a. - S-Q n.a.
05-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO3 - Y: 5.37 % - d x by: 1.0000 - WL: 1.5406 - 0 - I/c: PDF n.a. - I/c: User n.a. - S-Q n.a.



Annexe 4 – Spectre du sol naturel :



Annexe 5 – Moule de confection .

Tableau A : Caractéristiques des éprouvettes non traitées.

Code de l'épr.	Cons.	Durée(js)	West(%)	Wconf(%)	Wcons(%)	Ph0(g)	Pf(g)	Ps(g)	H0(cm)	Comp(%)	Rc(bars)
000805084A	C1	1	3	3,17	0,27	31,62	30,73	30,65	4,636	99,04	3,21
010519153A	C2	1	3	2,95	2,92	32,38	32,37	31,45	4,708	100	2,14
000805085A	C3	1	3	3,17	0,31	31,6	30,72	30,63	4,638	98,94	3,32
000805087A	C1	1	6	6,04	0,25	32,6	30,82	30,74	4,67	98,65	4,36
010519154A	C2	1	6	5,51	5,45	33,3	33,28	31,58	4,75	99,6	1,25
000805088A	C3	1	6	6,04	0,28	32,54	30,77	30,69	4,638	99,13	4,36
000731080A	C1	1	8	7,87	0,17	32,96	30,6	30,57	4,68	97,86	4,75
010519155A	C2	1	8	7,68	7,62	33,81	33,79	31,4	4,665	98,72	0,54
000731081A	C3	1	8	7,87	0,18	32,95	30,6	30,55	4,662	98,17	4,83
000731074A	C1	1	11	10,67	0,11	33,85	30,61	30,59	4,644	98,68	5,34
010519156A	C2	1	11	11,07	1,01	34,69	34,67	31,23	4,74	98,7	0,15
000731075A	C3	1	11	10,67	0,51	33,87	30,76	30,6	4,65	98,58	5,11
000731077A	C1	1	13	12,5	0,46	34,57	30,87	30,73	4,666	98,66	5
010519157A	C2	1	13	12,47	12,41	34,79	34,77	30,95	4,74	97,82	0,08
000731078A	C3	1	13	12,5	0,51	34,63	30,94	30,78	4,68	98,53	5,07
000722068A	C1	4	3	3,32	0,1	31,48	30,5	30,47	4,65	98,16	3,76
010512144A	C2	4	3	3,07	2,98	32,35	32,32	31,41	4,685	100	2,45
000722069A	C3	4	3	3,32	0,03	31,45	30,45	30,44	4,6	99,13	3,56
000722071A	C1	4	6	6,16	0,24	32,3	30,5	30,42	4,7	96,96	4,72
010512145A	C2	4	6	5,92	5,79	33,45	33,41	31,58	4,76	99,39	1,53
000722072A	C3	4	6	6,16	0,35	32,36	30,59	30,48	4,67	97,78	4,58
000719065A	C1	4	8	7,97	0,27	32,98	30,46	30,54	4,67	97,97	5,1
010512146A	C2	4	8	7,64	7,5	33,83	33,79	31,43	4,745	99,23	0,94
000719066A	C3	4	8	7,94	0,25	33	30,65	30,57	4,642	98,66	5
000719059A	C1	4	11	10,59	0,12	34,77	31,48	31,44	4,714	99,91	5,7
010512147A	C2	4	11	10,71	10,61	34,53	34,5	31,19	4,755	98,27	0,45
000719060A	C3	4	11	10,59	0,17	33,95	30,75	30,7	4,686	98,15	5,6
000719062A	C1	4	13	12,96	0,11	34,21	30,32	30,28	4,68	96,93	5,16
010505131A	C2	4	13	13,45	13,45	35	35	30,85	4,68	98,75	0,06
000719063A	C3	4	13	12,96	0,41	34,2	30,4	30,28	4,668	97,18	5,1
000718053A	C1	7	3	3,23	0,13	31,65	30,7	30,66	4,6	99,85	4,08
010429117A	C2	7	3	2,96	2,77	32,14	32,08	31,22	4,665	100	3
000718054A	C3	7	3	3,23	0,32	31,58	30,69	30,59	4,6	99,62	4,02
000718056A	C1	7	6	6,59	0,29	33,02	31,07	30,98	4,63	100	5,04
010514149A	C2	7	6	5,77	5,61	33,16	33,11	31,35	4,75	98,87	1,59
000718057A	C3	7	6	6,59	0,42	32,85	30,95	30,82	4,638	99,55	5,44
000717050A	C1	7	8	8,27	0,53	33,02	30,66	30,5	4,65	98,26	5,73
010514150A	C2	7	8	8,59	8,43	33,83	33,78	31,15	4,74	98,45	0,91
000717051A	C3	7	8	8,27	0,8	33,05	30,77	30,52	4,664	98,03	5,94
000717044A	C1	7	11	10,57	0,15	33,67	30,5	30,42	4,634	98,34	6,27
010514151A	C2	7	11	10,6	10,41	34,79	34,73	31,51	4,78	98,75	0,39
000717045A	C3	7	11	10,57	0,3	34,02	30,86	30,77	4,636	99,43	6,37
000717047A	C1	7	13	13,1	0,47	34,47	30,62	30,48	4,676	97,65	5,41
010514152A	C2	7	13	12,63	12,4	34,76	34,69	30,86	4,78	96,72	0,12
000717048A	C3	7	13	13,1	0,72	34,25	30,5	30,28	4,664	97,26	5,34

Code de l'épr.	Cons.	Durée(js)	West(%)	Wconf(%)	Wcons(%)	Ph0(g)	Pf(g)	Ps(g)	H0(cm)	Comp(%)	Rc(bars)
000716038A	C1	14	3	2,86	0,17	31,41	30,59	30,54	4,608	99,29	4
010428112A	C2	14	3	2,89	2,66	31,94	31,87	31,04	4,722	98,48	3,08
000716039A	C3	14	3	2,86	0,31	31,43	30,65	30,56	4,62	99,09	3,95
000716041A	C1	14	6	5,72	0,1	32,36	30,6	30,6	4,64	98,83	5,13
010428113A	C2	14	6	6,07	5,64	33,17	33,02	31,4	4,703	100	1,73
000716042A	C3	14	6	5,72	0,22	32,3	30,62	30,55	4,628	98,89	5,13
000715035A	C1	14	8	7,35	0,21	32,92	30,73	30,67	4,64	99,02	6,01
010428114A	C2	14	8	8,1	7,62	33,7	33,55	31,3	4,72	99,37	1,01
000715036A	C3	14	8	7,35	0,36	33,02	30,87	30,76	4,65	99,1	6,16
000715029A	C1	14	11	10,15	0,21	34,26	31,17	31,1	4,68	99,55	6,99
010428115A	C2	14	11	11,13	10,63	34,81	34,67	31,32	4,73	99,2	0,31
000715030A	C3	14	11	10,15	0,39	35,24	32,12	31,99	4,73	100	7,08
000715032A	C1	14	13	12,34	0,17	33,97	30,29	30,24	4,648	97,47	6,32
010428116A	C2	14	13	12,79	12,4	34,88	34,76	31,03	4,7	98,91	0,17
000715033A	C3	14	13	12,34	0,11	33,79	30,11	30,08	4,61	97,75	6,56
000710011A	C1	28	3	3,34	0,11	31,38	30,4	30,36	4,654	97,73	4,32
010124098A	C2	28	3	2,32	1,67	31,53	31,33	30,81	4,73	97,58	3,24
010508138A	C3	28	3	2,94	0,35	32,25	31,44	31,33	4,712	99,6	4,3
000710014A	C1	28	6	6,86	0,55	32,36	30,45	30,28	4,692	96,68	6,16
010424100A	C2	28	6	4,86	4,28	32,84	32,66	31,32	4,712	99,58	2,22
010508139A	C3	28	6	6,14	0,38	33,57	31,75	31,63	4,76	99,6	5,88
000712026A	C1	28	8	8,74	0,4	33,13	30,59	30,47	4,668	97,79	6,96
010424102A	C2	28	8	7,02	6,41	33,15	32,96	30,97	4,72	98,3	1,2
010508140A	C3	28	8	8,16	0,66	33,9	31,55	31,34	4,73	99,27	6,9
000711023A	C1	28	11	11,23	0,2	33,77	30,42	30,36	4,7	96,77	7,7
010424104A	C2	28	11	9,5	8,55	34,42	34,12	31,43	4,748	99,17	0,68
010508141A	C3	28	11	10,64	0,07	34,34	31,06	31,04	4,71	98,71	7,61
000709005A	C1	28	13	13	0,06	34,07	30,17	30,5	4,69	96,31	6,2
010424105A	C2	28	13	11,66	10,81	34,29	34,03	30,71	4,715	97,57	0,26
010508142A	C3	28	13	12,64	0,67	34,88	31,17	30,96	4,745	97,74	6,68

- West** : teneur en eau estimative de confection.
Wconf : teneur en eau de confection.
Wcons : teneur en eau après conservation.
C1 : conservation à l'étuve à 40°C avec dessiccation.
C2 : conservation à l'étuve à 40°C sans dessiccation.
C3 : conservation à l'air libre.
Ph0 : poids humide de l'éprouvette après confection.
Pf : poids de l'éprouvette après conservation.
P0 : poids sec.
Comp : compacité de l'éprouvette.
Rc : résistance à la compression simple.

Tableau B : Caractéristiques des éprouvettes traitées à la chaux.

Code de l'épr.	Cons.	Durée(js)	Chaux(%)	West(%)	Ph0(g)	Pf(g)	Ps(g)	H0(cm)	Comp(%)	Rc(bars)
010714034B	C1	1	2	11	35,03	31,72	31,56	4,7	100,6	5,62
010713046B	C1	1	2	6	33,58	31,78	31,68	4,715	100,6	9,41
010714040B	C1	1	4	11	34,96	31,73	31,49	4,715	100	8,91
010714043B	C1	1	4	6	33,53	31,7	31,63	4,7	100,8	13,61
010711029B	C1	7	2	11	35,01	31,81	31,54	4,708	100,4	6,1
010711031B	C1	7	2	6	33,55	31,81	31,65	4,704	10,8	9,71
010711033B	C1	7	4	11	35,06	31,9	31,58	4,705	100,5	9,12
010711034B	C1	7	4	6	33,62	31,89	31,72	4,715	100,8	14,35
010709021B	C1	14	2	11	35,06	31,84	31,58	4,7	1000,6	4,02
010709023B	C1	14	2	6	33,59	31,87	31,69	4,712	100,7	11
010709025B	C1	14	4	11	35,11	31,96	31,63	4,708	100,6	9,78
010709027B	C1	14	4	6	33,45	31,96	31,56	4,71	100,4	15,61
010708012B	C1	28	2	11	35,07	31,96	31,59	4,69	100,9	4,46
010708015B	C1	28	2	6	33,59	31,94	31,69	4,722	100,5	12,12
010708017B	C1	28	4	11	35,06	32,07	31,58	4,7	100,6	11,08
010708019B	C1	28	4	6	33,55	32,07	31,65	4,7	100,9	16,68
010704004B	C1	60	2	11	34,97	31,83	31,5	4,675	100,9	8,48
010704006B	C1	60	2	6	33,6	32,01	31,7	4,705	100,9	12,81
010704008B	C1	60	4	11	35,01	32,02	31,54	4,69	100,7	11,56
010704010B	C1	60	4	6	33,52	31,97	31,62	4,702	100,7	17,32

SH * CRD * SCE RAYONS X * BELKADI

Eprouvettes à différentes durées de conservation

AMRA0 SOL GYPSOCALCAIRE HMD D5MEAS - Program:LD70.D

Operations: Fourier 9.814 x 1 | Aberrant 1 | Import

AMRA1 EPR.1 C2W4% IMMEDIAT D5MEAS - Program:LD70.DQL

Operations: Y Scale Add -51 | Fourier 11.084 x 1 | Y Scale Add 220 | I

AMRA2 EPR.2 C2W9% IMMEDIAT D5MEAS - Program:LD70.DQL

Operations: Y Scale Add 153 | Y Scale Add -220 | Fourier 8.838 x 1 | Y

AMRA3 EPR.C2 W4% 4 JOURS D5MEAS - Program:LD70.DQL

Operations: Y Scale Add -85 | Fourier 16.553 x 1 | Y Scale Add 593 | I

AMRA4 EPR.C2 W9% 4 JOURS D5MEAS - Program:LD70.DQL

Operations: Y Scale Add 186 | Y Scale Add -356 | Fourier 16.235 x 1 |

AMRA5 EPR.C2 W4% 7 JOURS D5MEAS - Program:LD70.DQL

Operations: Y Scale Add -288 | Fourier 13.989 x 1 | Aberrant 1 | Y Scal

AMRA6 EPR.C2 W9% DURÉE 14 JOU D5MEAS - Program:LD70.D

Operations: Y Scale Add 85 | Y Scale Add 119 | Smooth 0.150 | Y Scal

AMRA7 C2W4% DURÉE DE 28 JOURS D5MEAS - Program:LD70

Operations: Y Scale Add 119 | Y Scale Add 51 | Y Scale Add 797 | Sm

AMRA8 C2W9% DURÉE DE 28 JOURS D5MEAS - Program LD70

Operations: Y Scale Add 254 | Y Scale Add 119 | Smooth 0.150 | Y Sca

33-0311 (*) - Gypsum, syn - CaSO4 2H2O - Y: 11.58 % - d x by: 1.000

105-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO3 - Y: 5.20 % - d x by: 1.0000 - WL: 1

146-1045 (*) - Quartz, syn - SiO2 - Y: 7.08 % - d x by: 1.0000 - WL: 1.5

