

Université Mohamed khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et d'Hydraulique
Référence :...../ 2018

جامعة محمد خيضر - بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع:...../ 2018



Mémoire de Master

Spécialité : Travaux publics

Option : VOA

Thème :

**Technique d'amélioration de Tout Venant de Reg à
la région saharienne**

Etudiant:

Abdelmalek Chanay

Encadreurs:

Prof.Sadok Benmebarek

Promotion: Juin 2018

Remerciements

Je remercie infiniment mon dieu qui m'a donné le courage pour accomplir ce travail avec notre Professeur Sadok Benmebarek d'avoir accepté d'être rapporteurs de la thèse.

Je n'oublie pas mes parents pour leur contribution, leur soutien, leurs encouragements et leur patience toute au long de mon parcours scolaire et universitaire sans eux je ne serais pas là aujourd'hui.

Mes remerciements s'adressent également, au membre du jury qu'ont bien voulu accepté de juger ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude et remerciements à tous les enseignants de l'institut de Génie Civil de l'Université de Biskra qui ont été pour beaucoup dans mon cursus.

Ce travail a été préparé au laboratoire LTPSud, je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ma formation.

Résumé

De très nombreux problèmes géotechniques font intervenir les chaussées en zones sahariennes sous l'action des conditions climatiques extrêmes et un trafic routier intense de poids lourds, les principaux entre eux sont la fissuration des couches de roulements et la fatigue des couches de bases et de fondations dans la durée de vie qui n'est pas valable dans plusieurs cas. Ce travail s'inscrit dans un cadre général visant la valorisation des matériaux locaux Tout Venant de Reg (TVR) avec matériau auxiliaire disponible de la région de Bordj Badji Mokhtar BBM -Algérie, en vue de leur utilisation en technique routière. Le TVR à améliorer dans la présente étude provient d'emprunt désigné au les coordonnées GPS $21^{\circ} 23' 59.0''$ E, $00^{\circ} 56' 03.3''$ N dans la région BBM -Alger. L'objectif est de tester les possibilités d'amélioration des caractéristiques de ce TVR par une technique adaptée adéquate et économique permettant de le valoriser. Après une analyse des données disponibles aux laboratoires, une étude expérimentale basée sur les critères de compactage, de portance et de résistance à la compression à différentes âges sera menée dans le but de rechercher la composition optimale du mélange.

Mots- clés: amélioration ; technique de traitement; TVR; sol ; liant hydraulique ; ciment ; saharienne ; BBM ;

ملخص

الكثير من المشاكل الجيوتقنية التي تصيب الطرق الصحراوية ناجمة عن التعرض للعوامل المناخية القاسية ولشدة كثافة المرور العربات ثقيلة الوزن ، من ابرز هذه المشاكل تشققات طبقة السير ونهاء صلاحية طبقة الاساس والقاعدة قبل المدة المرجوة. هذا العمل يدخل في اطار تثمين المواد المحلية (تربة الرق غير معالج) لاستعمالها في الطرق بطريقة تقنية, باستخدام مواد مساعدة, وسنتطرق لدراسة لتربة المخصصة لإنشاء الطرق المتواجد برج باجي مختار عند المصدر ذو الأحداثيات ($21^{\circ} 23'$ $59.0''$ شرق $03.3''$ $56^{\circ} 00'$ شمال) لبرج باجي مختار-الجزائر . هذه الدراسة تهدف للأختبار امكانية تحسين التربة باستخدام احدى هاته التقنيات بحيث تكون مضبوطة ومناسبة واقتصادية تعطي قيمة حسنة لتربة المحلية. وسيتم ذلك بعد تحليل المعطيات المتوفرة بالمخبر وبعد الدراسة متمخضة عن التجارب مبنية على معايير الرص, الأجهاد, مقاومة الضغط خلال ازمة مختلفة بهدف معرفة افضل خطة لتربة مع المادة المساعدة

الكلمات المفتاحية: تحسين, الطرق, تقنية المعالجة, الرق, التربة, الأسمت, الصحراوية, برج باجي مختار

Sommaire

Introduction générale	6
Chapitre I : Synthèse bibliographie	8
1. INTRODUCTION	8
2. HISTOIRE DE TRAITEMENT DE SOL AU LIANT HYDRAULIQUE.....	8
3. ROUTE SAHARIEN	9
3.1. Climat.....	9
3.2. Hydrogéologie.....	11
3.3 Histoire de développement de technique des routes sahariennes.....	11
3.4. Chaussées	12
4. CHOIX DE LIANT HYDRAULIQUE.....	13
4.1 Les ciments.....	14
4.2 Liant hydraulique routier.....	15
5. DOMAINE DES SOLS TRAITES AUX LIANTS HYDRAULIQUES	17
6. MATERIAUX ET TECHNIQUES LOCALES	18
7. GENERALITE SUR LE SOL	19
7.1 Principales ressources de matériaux locaux dans le Sud algérien.....	19
7.2 Synthèse des spécifications géotechniques existantes	20
7.3. Tout Venant	21
8. NOTIONS GENERALES DU TRAITEMENT DES SOLS (GTR 92).....	23
8.1. Le sol.....	23
9. ASPECT EXPERIMENTAUX DES SOLS TRAITES AU CIMENT	27
9.1. Provenance de matériau.....	27
9.2 Liant hydraulique	27
9.3 Mode opératoire	27
9.4 Mode opératoire suivant les normes [NF P 94-100, NF P 94-093].....	28
9.5 Les essais	30
9.6 Sensibilité à l'eau	33
10. DES OPERATIONS DE TRAITEMENT AU LIANT HYDRAULIQUE.....	34

10.2 Opération de stabilité en Tamanrasset avec de liant spéciale	34
10.3 Traitement en place de déviation de Plombières-les (Vosges)	35
10.4 A Ozans, traitement en place au liant hydraulique et à la chaux	35
10.5 TerDOUEST de France	37
Chapitre II Etude d'amélioration de Tout Venant de Reg à la région sahariennes	41
1. INDORUCUTION	41
1.2 Climatologie de la région d'Adrar	42
1.3 Contexte géologie de BBM ' Tanzerouft'	43
2. OBJECTIFS DU TRAITEMENT.....	44
2.2. Performances à rechercher	44
3. L'ETUDE DE RECONNAISSANCE ET DE QUALIFICATION DE MATERIAU ...	45
3.2. Classification de Tout Venant de Reg de BBM	45
3.3. Paramètres caractérisant la nature de TVR	50
3.4. Paramètres caractérisant le comportement	51
4. L'IDENTIFICATION DU PRODUIT DE TRAITEMENT.....	52
5. L'ETUDE DE FORMULATION	52
5.1. Modes opératoires et résultats expérimentaux	53
5.2. Sensibilité à l'eau	59
Chapitre III Action et technique de traitement.....	61
1. CONTEXTE TUF-CIMENT	61
1.1 Principes d'action des liants hydrauliques	61
1.2 Influence de temps de maniabilité sur la résistance de matériau traité	65
2. AVANTAGES DE LA TECHNIQUE DE TRAITEMENT	65
2.1 Avantages techniques	65
2.2 Avantages économiques	66
2.3 Avantages écologiques et environnementaux	66
3. LES TECHNIQUES ET MATERIEL D'EXECUTION.....	66
3.1 La préparation initiale du sol.....	67
3.2 La fabrication du mélange.....	67
3.3 L'ajustement de l'état hydrique du mélange, le cas échéant.....	67

3.5	Le réglage.....	68
3.6	Le compactage.....	68
3.7	La protection superficielle.....	68
4.	MATERIELS DE TRAITEMENT DES SOLS	68
4.1.	Matériels de stockage des produits de traitement	69
4.2.	Matériels d'épandage	70
4.3.	Matériels de préparation des sols.....	70
4.4.	Matériels de malaxage des sols en place	71
4.5.	Matériels d'arrosage.....	71
4.6.	Centrales de fabrication.....	72
4.7.	Matériels de compactage	72
4.8.	Matériels de réglage et de protection superficielle.....	72
5.	QUELQUE PROCEDURE D'ASSURANCE DE QUALITE.....	72
6.	CONCLUSION	73
	Conclusion générale.....	74

Liste des figures

Figure I- 1: Variation de la température au cours d'une journée en milieu pré-saharien	10
Figure I- 2: Vitesse du vent provoquant le transport des sols en fonction de la taille des particules	11
Figure I- 3: Ensemble de moulage utilisé pour la confection des éprouvettes	29
Figure I- 4: confection des éprouvettes suivant les normes	30
Figure I- 5: la résistance à la compression simple de 4% de ciment à différents âges	31
Figure I- 6: la résistance à la compression diamétrale de 4% de ciment à différents âges	32
Figure I- 7: Evolution des indices CBR en fonction du pourcentage de ciment	33
Figure I- 8: Epandage et le malaxage	34
Figure I- 9: Evolution comparée (a) des résistances à la compression simple (Rc en MPa)	38
Figure I- 10: Etude de la performance en compression simple	39
Figure I- 11: Chantier expérimental de Héricourt (70) avec l'utilisation des argiles A3/A4	40
Figure I- 12: Vue du remblai expérimental (mai 2015) cinq ans après sa construction	40
Figure II- 1 : l'emprunt de Tout Venant de Reg de traitement	42
Figure II- 2 : reg tanzerouft et leurs marges	44
Figure II- 3 : classification selon GTR et la Norme NF P 11-300	46
Figure II- 4 : Tout Venant de Reg de traitement	47
Figure II- 5 : Courbes granulométriques des deux matériaux utilisés par rapport au fuseau de Beni-..	47
Figure II- 6 : Essai bleu de méthylène	51
Figure II- 7 : Evaluation de la densité sèche maximale en fonction du dosage de ciment	54
Figure II- 8 : Evaluation de la teneur en eau optimale en fonction du dosage de ciment	54
Figure II- 9 : Représente les éprouvettes de sable de Tout Venant de Reg	55
Figure II- 10 : Photo d'essai la compression simple de sable de Tout Venant de Reg	56
Figure II- 11 : représente l'évaluation de la résistance à la compression simple	56
Figure II- 12 : Evaluation de la résistance à la compression simple de 7 jours et 28 jours	57
Figure II- 13 : Variation de la résistance à la compression diamétrale	58
Figure II- 14 : Evolution des indices CBR en fonction du pourcentage de l'ajout de ciment	59
Figure II- 15 : Résistance à la compression simple à 28 jours et 3 jours d'immersion	59
Figure II- 16 : les éprouvettes après 3 jours d'immersion	60
Figure II- 17 : les éprouvettes après 3 jours d'immersion et après 3 heures en hors d'eau	60
Figure III- 1 : Hydrates calciques développés par réaction pouzzolanique à partir d'argiles	62
Figure III- 2 : Microstructure d'un sable traité au ciment puis compacté	63
Figure III- 3 : dessin microstructure d'argile traité au ciment et à la chaux ;	63
Figure III- 4 : Représente l'influence du temps de la maniabilité sur la résistance	65
Figure III- 5 : malaxage en centrale	67
Figure III- 6 : Epandeur/ tombereau articulé à gauche et pulvi-mixeur à droite	69
Figure III- 7 : les engins d'épandage	70
Figure III- 8 : engins d'élimination de l'élément blocaille	71

Liste des Tableaux

Tableau I- 1: la comparaison entre le ciment et le liant hydraulique routier	16
Tableau I- 2: Les dosages en fonction la nature des matériaux	17
Tableau II- 1 : Etablir les caractéristiques important de Tout venant de reg de BBM.....	49
Tableau II- 2 : Résultats de l'analyse chimique	50

Introduction générale

La conception, la construction, la qualité et la durée de vie d'infrastructure routier, ceux facteurs ont joué un rôle important dans le développement des pays, notamment l'apprentissage des nouveautés de science et de technologie donner des solutions pertinentes. A l'époque l'engineering d'infrastructure a été traversé un grand parcours pour plus confort, plus sécurité et bon usage et aussi économique. Dans ce siècle XXI, on peut dire que beaucoup de pays à la concurrence d'exploitation de tous les matériaux disponibles qu'on pense inintéressant tel les déchets de construction et de démolition; ces sont faisables à l'aide de la maîtrise des comportements des microstructures des matériaux (les déformations, sollicitation, déplacement, transformation, les réactions chimiques, thermodynamique.....).

La valorisation des matériaux locaux en géotechnique routière reste un thème d'actualité ; il s'agit de mieux maîtriser leur comportement et leur mise en œuvre. La mise en place de la technique routière saharienne fût le résultat de plusieurs années d'expériences en milieu désertique ; Aujourd'hui le défi est d'adapter cette technique aux nouvelles réalités, d'établir des critères de classification des matériaux sahariens afin de faciliter leur utilisation pour les projecteurs (choix de matériaux selon les possibilités offertes sur le terrain, les techniques de réalisation, le dimensionnement de la chaussée...).

L'exposé portera sur la possibilité d'utilisation la technique de traitement au liant hydraulique de Tout Venant de Reg (TVR) à la région de Bordj Badj Mokhtar (BBM) ; il est décomposé des trois chapitres des contenus suivants :

Le premier chapitre effectuera une recherche bibliographique sur les techniques d'amélioration de TVR dans les régions sahariennes

Le deuxième chapitre présente une étude superficielle montrant la possibilité d'amélioration de TVR de la région de la wilaya déléguée BBM de wilaya Adrar à l'aide d'un traitement au liant hydraulique, on aura vu :

- ▶ Analyser les données et les résultats disponibles aux laboratoires
- ▶ Faire des essais d'identification au laboratoire du TVR de la carrière BBM
- ▶ Etablir une formulation d'amélioration adéquate
- ▶ Faire des essais en laboratoire de matériau amélioré
- ▶ Evaluer le matériau amélioré

En dernier chapitre, on aura vu un aperçu sur les microstructures de TVR-ciment puis

évaluer les techniques des traitements utilisables et les matériels actuels.

En fin et sous la lumière des résultats d'exposés le long du manuscrit, on a posé un point de vue d'utilisation de technique de traitement et l'exploitation de matériaux locaux, si on a prendra une solution traiter des problèmes des structure routier reçu en désert d'Algérie.

En pratique après l'accord de traitement de TVR techniquement, il faut faire une étude économique estimative, puis compléter l'étude de traitement de TVR.

Problématique et diagnostique : Tout venant de Reg ou oued, c'est le matériau principal d'infrastructure de la région de Bordj Badji Mokhtar de trajet plus de 800 km de Reggane à Timiaouine de frontière comprendre une reg très vaste qui s'appelle reg Tanezrouft (couvre plus de 120 000 km²). Ce reg est constitué de sable gravelé jaunâtre peu consolidé qui définir le Tout Venant de Reg.

La diagnostique des routes réalisées en TVR montre que ce matériau en couche de base sous l'enduit superficiel n'est pas résisté le trafic existence et dont la durée de vie très cout, A effet, il faut renforcer le corps de chaussée, soit changer la de base en TVR par couche de base en GNT, soit revêtu en béton bituminé (BB) ; ce sujet la possibilité d'amélioré le TVR à l'aide d'utile de traitement au liant hydraulique sans prendre les derniers solution

Chapitre I : Synthèse bibliographie

1. INTRODUCTION

Cette chapitre présente une étude bibliographie de sujet de mémoire pour assembler des prévus généralisés sur les déférentes phases axer dans le technique de traitement de sol à la région saharien (étude d'un cas). Il aura introduit par suivre l'histoire de traitement dans le mande et dans notre pays d'Algérie. Enfin des quelques déférentes notions dont des relations de traitement au liant hydraulique, l'utilisation des matériaux locaux, spécification d'étude géotechnique routière saharienne et le paramètre de sol vis à vis le traitement.

2. HISTOIRE DE TRAITEMENT DE SOL AU LIANT HYDRAULIQUE

L'utilisation de traitement de sol aux liants hydrauliques, et plus particulièrement aux ciments est connue depuis plus de soixante-dix ans. Elle a été pratiquée notamment aux U.S.A. puis en Grande-Bretagne et en Allemagne sous le nom de sol-ciment plusieurs années avant de faire son apparition en France. (1)

En France les premiers travaux ont été publiés vers 1960 ; La technique de la stabilisation des sols par la chaux et/ou le ciment est vulgarisée en 1980. Il s'agit en particulier du GTR (Guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme), dont la première édition date de 1992, et surtout du GTS (Guide technique pour le traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme) publié en 2000, sans oublier son complément pour les assises de chaussées publié en 2007. (2) Mais après la consultation d'Extrait de la Conférence faite le 30 avril 1954 à la Semaine de Documentation organisée à l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Jean BOUTIN expliquer avec précision des techniques de traitement. (3)

La stabilisation à l'aide de liants hydrauliques (ciment, chaux, laitier granulé, etc.) a montré jusqu'à présent ses limites surtout en notre pays. Les résultats obtenus n'ont généralement pas été à la hauteur des attentes (Domec et Alloul, 1980 ; Ben Dhia 1983 ; Ben Dhia et al., 1984 ; Colombier, 1988; CEBTP, 1991; et les réchercheur Algérien comme Azzouz, 1997 ; Boukkezi, 1997 ; Chiheb, 2001; Hachichi et al., 2001 ; Goual et al., 2008).

Il a été signalé dans la littérature de très rares exemples de traitement des sols au ciment en Algérie. Il s'agit de la RN 8 entre Sidi Aissa et Ain Hadjel et de CW 77 qui relie Ksar Chellala

à la RN 40. Vingt ans après la construction de ces chaussées, Il semble que ce traitement ait donné de bons résultats, peu ou pas de détériorations. (4) et (5)

3. ROUTE SAHARIEN

3.1. Climat

On connaît dans le monde trois niveaux d'aridité: semi-aride, aride et extrêmement aride. Le dernier est celui du Sahara.

- **L'aridité** est un aspect du climat mondial dépendant de particularités bien établies de la circulation atmosphérique générale. C'est un régime quasi stable et qui ne peut être modifié d'une manière significative à l'échelle d'une vie humaine. On estime qu'une variation climatique périodique ou apériodique importante, due aux changements de l'intufation, a besoin d'une durée de 10 000 ans à un million d'années pour produire des effets durables.

À notre époque, le climat saharien a des **températures** très hautes le jour et faibles la nuit. La variation de la température au cours d'une journée a une valeur courante de l'ordre de 50 °C et peut atteindre parfois 70 °C. La figure I-1 présente l'évolution journalière des températures à la surface du sol, près de la surface du sol et dans l'air à Djebel Dissa dans le Sud tunisien au cours d'une journée d'un mois de juin (Floret et Pontanier, 1982). Les forts gradients thermiques sont à l'origine de l'altération superficielle des roches et des matériaux, qui provoque leur fragmentation et la désagrégation.

- **Les vents** sont souvent violents et permettent l'accélération de la désagrégation et le transport de ses produits. Ils provoquent ainsi « l'érosion », connue aussi sous l'appellation d'« érosion éolienne ». Le nombre de jours de vent de sable varie de 2 à 7 j/mois. Les vents les plus forts ont lieu au début du printemps (durant les mois de mars et avril). La période la plus calme se situe aux mois d'octobre et novembre. Les vents, selon leur vitesse, peuvent mettre en mouvement et transporter les sols. La figure I-2 montre la vitesse de transport de certains matériaux en fonction du diamètre des particules. Les particules les plus sensibles au déplacement par le vent sont celles ayant un diamètre de 0,08 à 0,2 mm. Les particules les plus grosses sont lourdes et donc plus résistantes au mouvement et les plus fines présentent une certaine cohésion qui freine leur déplacement.

- **La pluviosité** dans le Sahara est faible, voire nulle durant plusieurs années. Quand les précipitations ont lieu, elles sont violentes, courtes et orageuses. La moyenne annuelle des précipitations est inférieure à 50 mm, avec d'importantes variations. Les oueds et cours d'eau, quand ils existent, sont très larges et peu profonds. Les eaux sont rares et de qualité variable. Les eaux superficielles sont très peu fréquentes à cause des faibles précipitations. Elles se présentent parfois sous forme de sebkha ou chott, avec une salinité élevée le plus souvent.

- **Les eaux douces** doivent être recherchées dans les nappes profondes, à plus de 500 m sous le niveau du sol. Pour les nappes plus profondes, que l'on rencontre vers 2 000 m et plus, les eaux sont chaudes et sortent à la surface du sol à des températures voisines de 70 °C (6)

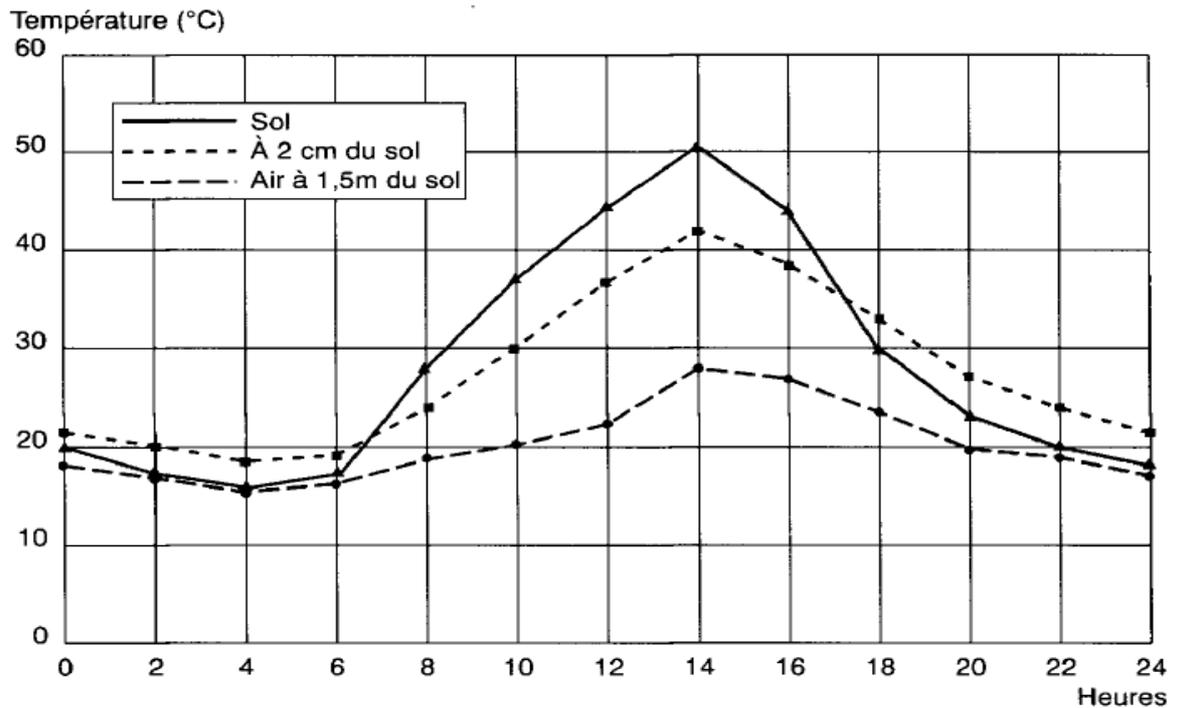


Figure I- 1: Variation de la température au cours d'une journée en milieu pré-saharien (Floret et Pontanier, 1982).

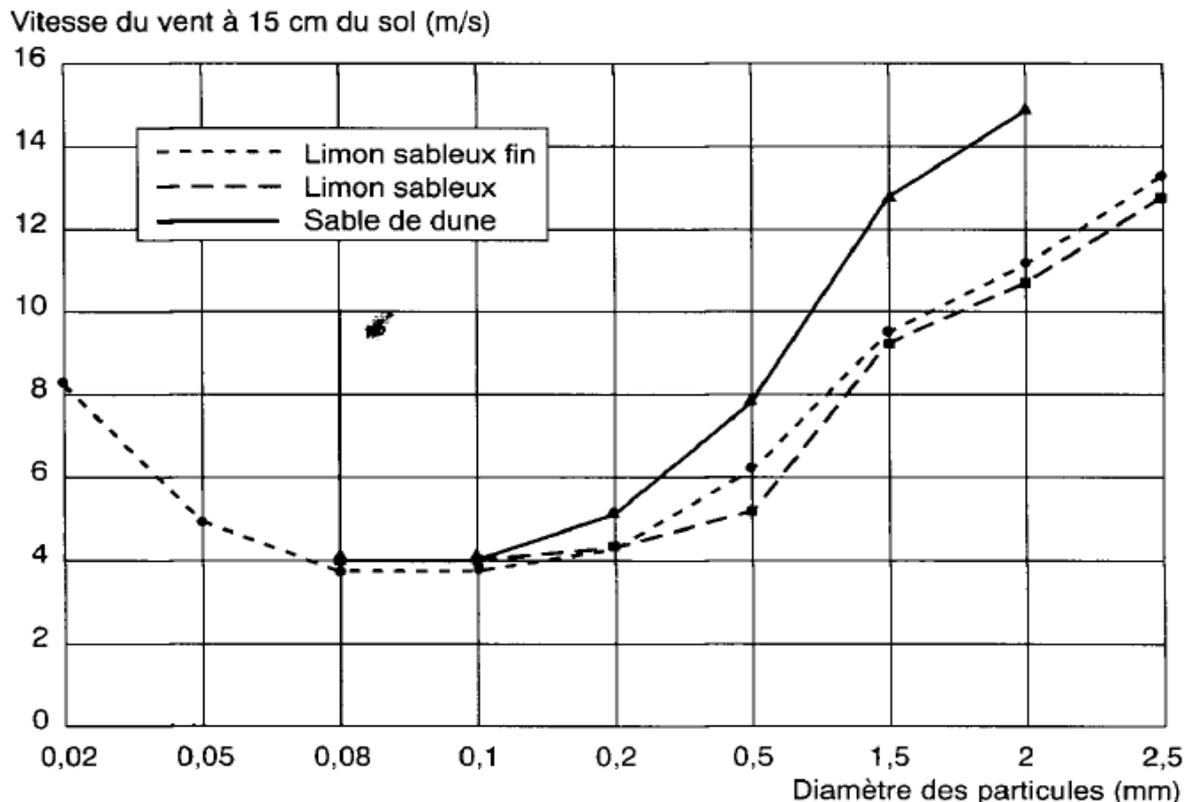


Figure I- 2: Vitesse du vent provoquant le transport des sols en fonction de la taille des particules (Chakroun, 1989).

3.2. Hydrogéologie

Du point de vue hydrologique, on distingue deux zones :

- La partie secondaire et tertiaire constituant le Nord du Sahara et renfermant diverses nappes souterraines dont l'une «Albienne» est particulièrement abondante et étendue.
- La partie primaire constituant l'extrême Sud où les seules ressources disponibles sont constituées par des nappes d'enferflux des oueds importants. (7)

3.3 Histoire de développement de technique des routes sahariennes

Dès 1953, le Directeur des Travaux Publics d'Algérie, **M.Saigot**, avait pu obtenir l'autorisation de lancer un important programme de construction de routes, intéressant les deux grands axes oriental et occidental, qui prolongeaient respectivement les R.N. 6 et 3 existantes de Bouktoub à Colomb-Béchar (442 kms) et de Biskra à Touggourt (227 kms), avec embranchement jusqu'à El Oued (147 kms). Ce programme, qui portait donc sur un peu plus de 800 kms de routes nouvelles, vient d'être entièrement achevé. Il avait pour objet de relier à l'ancien réseau routier de la zone nord la région industrielle et le centre militaire de Colomb-Béchar, ainsi que les riches oasis très peuplées de l'Oued Rhir et du Souf, dont la population dépasse 150.000 habitants. L'exécution de ce programme a permis, **en 1954 et**

1955, la mise au point d'une technique parfaitement adaptée au problème difficile de la construction de routes en pays désertique. Entre temps, les recherches pétrolières poursuivaient dans le Sahara, et les découvertes faites à Berga (gaz), à 60 kms au sud-ouest d'In Salah, en 1954, à Edjelé à la fin de 1955, à Hassi Messaoud en juillet 1956 et à Hassi R'mel (gaz), à 50 kms au nord-ouest de Ghardaia, en décembre 1956, conduisirent à amplifier l'effort de construction des routes sur les deux axes central et oriental. (8)

3.4. Chaussées

Les pionniers de la construction des routes sahariennes ont codifié, sur la base d'essais d'identification (origine, nature chimique, granulométrie, Los Angeles, propreté..) les matériaux dont le comportement a été jugé satisfaisant sur chantier. Plus de 2.000 km de route en zone saharienne ont été réalisés entre 1956 et 1962. En 1965, une technique (TRS) a pris corps lors du premier congrès de la route qui s'est déroulé à Beni-Abbès (Fenzy 1966). La principale innovation étant l'utilisation en corps de chaussée de matériaux fins. Le principe d'une assise unique est retenu; son épaisseur varie entre 15 cm et 30 cm. Elle est réalisée, à chaque fois lorsque c'est possible avec un matériau identique soumis à des normes strictes (TRS). Lorsque les matériaux performants ne sont pas disponibles en quantité suffisante, les 10 cm inférieurs - jouant le rôle de couche de fondation - sont alors réalisés avec un matériau ayant des caractéristiques moins bonnes. La couche de fondation est mise en place sur la plate-forme support de la chaussée (terrassements terminés) par compactage avec humidification et est exécutée sur toute la largeur de la plateforme. La couche de base est 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, avec des élargissements sur certaines sections-passages submersibles, remblais de grande hauteur, etc. (Domec, 1980) ; (Morsli et al. 2002).

Selon la bibliographie consultée (Fenzy 1970) ; (Mersout 1994) ; (Larabi 1998) ; Les routes sahariennes réalisées en tufs d'encroûtements se sont comportées remarquablement bien sur toute la période qui devait être leur durée de vie et pour un nombre d'essieux dépassant largement les 10^6 poids lourds : on ne distingue pratiquement pas de déformations importantes; les principales Les chaussées sahariennes périssent par un endommagement progressif conduisant à la rupture par fatigue du matériau (matériau fin résistant grâce à sa cohésion et non à son squelette granulaire) et non par accumulation des déformations permanentes (le tuf support étant caractérisé par une portance (CBR) satisfaisante.

4. CHOIX DE LIANT HYDRAULIQUE

Si la mise au point de liants spécifiques a été entreprise lors de différentes recherches (ex. métakaolin, procédé Novosol, etc.), le ciment Portland composé (classe CEMII) et les liants hydrauliques routiers (LHR) restent les principaux liants utilisés pour le traitement des sols [Sheffield et al. 1987 ; Conner et Hoeffners 1998 ; Malviya et Chaudhary 2006].

D'autres constituants viennent s'ajouter ou se substituer : laitier de hauts-fourneaux, scories, cendres volantes ou silicates remplacent partiellement (5 à 20%) ou totalement le clinker d'un ciment Portland CEMI [Loest et Wilk 1998 ; Voirin et al. 2001 ; Harris et al. 2004 ; Malviya et Chaudhary 2006 ; Azzouz 2006 ; Degrez 2008]. Les ciments courants (classes CEMI à V) ont été utilisés en traitement de sol majoritairement jusqu'aux années 1980. Leurs caractéristiques sont définies par la norme NF EN 197-1. Par la suite, ils ont été progressivement remplacés par les LHR, plus appropriés aux conditions et aux exigences de mise en oeuvre des matériaux de partie supérieure de terrassement (PST), de remblais et de couches de forme [Cimbéton 2004 ; Rossi et al. 2007]. Il peut en effet être envisagé d'optimiser leur composition pour les adapter à un type de sol particulier ou à des conditions de mise en oeuvre spécifiques (période de l'année, conditions climatiques, contraintes d'organisation de chantier, etc.). La composition, les spécifications et les critères de conformité des LHR sont régis par la norme NF P15-108. Une recherche permanente et des études ciblées sont menées par les industriels pour améliorer encore la spécificité de ces produits.

Le choix du liant est toujours délicat, car il repose sur la prise en considération de plusieurs facteurs aussi différents que deux considérations guident a priori ce choix. La première est la prédiction, par l'expérience antérieure et par les tests sur échantillons de sol, des états hydriques que le sol va présenter et de la consistance qu'il aura. L'humidité maximale à laquelle on peut s'attendre influe beaucoup sur le choix du type de traitement (simple ou double).

Le deuxième facteur déterminant est d'ordre économique. Il s'agit de minimiser la distance de transport du liant. D'autant plus que les LHR ont été mis au point pour convenir au mieux avec les matériaux locaux.

Les liants hydrauliques sont des produits qui, en présence d'eau, s'hydratent en donnant naissance à des espèces cristallines insolubles et résistantes qui agglomèrent les éléments granulaires du sol. Ce phénomène, dénommé couramment « prise hydraulique », confère au sol une cohésion permanente dont l'importance dépend :

- ▶ de la nature du matériau,
- ▶ du type de liant,
- ▶ de la quantité introduite,
- ▶ de la compacité atteinte à la mise en œuvre,
- ▶ de la température du milieu et de l'âge du mélange.

Les liants hydrauliques sont des mélanges comportant, en proportion éminemment variables suivant les produits :

- ▶ des matériaux hydrauliques faisant prise en présence d'eau : clinker Portland, cendres, volantes sulfocalciques de charbon, etc.,
- ▶ des matériaux pouzzolaniques faisant prise en présence d'eau à pH élevé (> 12) : laitiers de hauts-fourneaux, cendres volantes silico-alumineuses, pouzzolanes naturelles,
- ▶ si nécessaire, un ou plusieurs activants dont le rôle principal est l'élévation du pH du milieu pour déclencher la prise hydraulique des matériaux pouzzolaniques,
- ▶ différents ajouts éventuels destinés à leur conférer des propriétés spécifiques (sur la cinétique de prise, par exemple).

Les liants hydrauliques concernés par la technique du traitement des sols sont respectivement les ciments et les liants spéciaux routiers (LSR).

4.1 Les ciments

En fonction de leur composition, les ciments courants sont subdivisés en cinq types : CEM I (Ciments Portland) ; CEM II (Ciment Portland composé) ; CEM III (ciment de haut fourneau) ;

CEM IV (ciment pouzzolanique) ; CEM V (ciment composé).

Les caractéristiques des ciments courants sont définies dans la norme NF P 15-301 (révisée en 1994) et leurs valeurs sont certifiées (l'AFNOR constituant l'organisme certificateur). Cette norme propose une classification des différents ciments établie, d'une part, selon leur composition et, d'autre part, selon leurs performances mécaniques.

Depuis le 1er avril 2002, les ciments courants doivent être conformes à la norme NF EN 197-1 et font l'objet d'un double marquage CE et NF sur les sacs ou sur les documents d'accompagnement pour le vrac.

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance (32,5 – 42,5 – 52,5) définies par la valeur minimale de la résistance du ciment à 28 jours en MPa (selon NF EN 196-1). Pour

chacune de ces classes, deux désignations sont établies en fonction de leur résistance à court terme (2 jours et 7 jours) : N pour une prise normale et R pour une prise rapide.

Dans l'application au traitement des sols seuls les « ciments courants », au sens des normes précitées, sont utilisés. Il est probable, toutefois, que d'autres ciments (ciment à maçonner, ciment naturel, chaux hydrauliques naturelle et artificielle, etc.) soient techniquement également utilisables, mais les conditions économiques dans lesquelles ils sont fabriqués n'ont pas encore permis d'envisager leur emploi à une échelle significative.

L'utilisation de ciments apporte donc une garantie notable sur leurs propriétés et leur homogénéité.

Les ciments sont constitués généralement d'une proportion plus ou moins importante de clinker Portland (appellation courante : clinker) et de différents autres constituants.

Le clinker est obtenu par cuisson, aux environs de 1 450 °C, d'un mélange dénommé « cru » composé d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argile. Au cours de la cuisson, le cru est tout d'abord déshydraté (jusqu'à 550 °C), puis décarbonaté (de 550 à 900 °C) et enfin clinkerisé (de 900 jusqu'à 1450 °C). Au terme de la clinkérisation qui a produit une fusion partielle du cru, ce dernier est transformé en silico-aluminates et ferro-aluminates de calcium anhydre, facilement solubles dans l'eau.

Après refroidissement, et ajout des éventuels constituants d'apport, le mélange est finement broyé et homogénéisé (D_{max} des grains inférieur à 0,08 mm, surface spécifique « Blaine » comprise entre 2 800 et 5 000 cm²/g). Le produit final est composé de constituants qui, en présence d'eau, se dissolvent quasi instantanément avec formation de précipités de gel de silicates et de ferro-aluminates de calcium. Ce gel s'hydrate progressivement et se transforme en espèces cristallines rigides, résistantes, insolubles et stables, qui agglomèrent les éléments grenus du sol. Les constituants ajoutés au clinker au moment du broyage sont notamment : des laitiers de hauts-fourneaux, des pouzzolanes, des cendres volantes des centrales thermiques fonctionnant au charbon, des fumées de silice etc, ainsi qu'une proportion de l'ordre de 3 % de gypse destiné à régulariser la cinétique de la prise hydraulique.

4.2 Liant hydraulique routier

Des liants spéciaux routiers (LSR / LHR) ont été étudiés et mis au point depuis plusieurs années pour le traitement des sols en place ou en centrale et pour la fabrication de matériaux d'assises de chaussées.

Ces avis techniques se limitent, toutefois, à garantir que le LSR concerné présente, pour un type de sol et une nature d'ouvrage donnés, un comportement satisfaisant, mais toute

extrapolation à d'autres paramètres de chantier comporte une part de risque qu'il convient d'évaluer pour chaque nouveau chantier.

Les principes d'action des LSR ne sont pas fondamentalement différents de ceux des ciments car on y retrouve, mais en proportion différentes, les mêmes constituants et donc des phénomènes de prise hydraulique de même nature, mais le plus souvent avec des cinétiques spécifiques.

Les LSR peuvent présenter certains avantages et notamment :

- ▶ leur coût de fabrication plus faible, car leur composition est en forte proportion à base de constituants ne nécessitant pas de cuisson spécifique (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes, etc.) ;
- ▶ leur possibilité de mieux s'adapter à un cas de chantier particulier. En effet, leur fabrication pouvant être gérée de manière plus souple que celle des ciments, il peut être envisagé, si les enjeux du projet le justifient, de fabriquer un produit optimisé à un sol particulier et ayant une cinétique de prise ajustée à l'époque des travaux et/ou aux contraintes d'organisation du chantier.

Tableau I- 1: la comparaison entre le ciment et le liant hydraulique routier

	Ciment	Liant hydraulique
Norme	NF EN 197-1	NF P 15-108 (en projet : EN 13282)
Nom	CEM	HBR
Type	I à V (Portland pur ... composé)	
Classes RC	32,5 – 42,5 – 52,5 MPa (28 jours)	10-20 Mpa
À court terme (sur pâte pure)	Rc (2 ou 7 jours) : R (rapide) – N (normale) – L (lente)	Délai de prise «courant» (< 180 mn) – «rapide» (< 45 mn)
Délai de maniabilité (à 20° sur mélanges)	Environ 2 à 3h	Environ 4 à 6 h
	Clinker (65 à 100 %) pour CEM I & II - Clinker (5 à 65 %) pour CEM III & V	Laitiers HF- clinker –chaux
Constituants principaux	Calcaire – laitiers HF – CV – pouzzolane – schistes calcinés	Calcaire – laitiers LD – CV – pouzzolane – schistes calcinés ...

Exemple de liant hydraulique

Liant hydraulique routier à délai de maniabilité élevé 'ROLAC® 445 LC' ; Les dosages à respecter varient en fonction du type d'application, de la nature et de la qualité des matériaux

à traiter.

Tableau I- 2: Les dosages en fonction la nature des matériaux

Traitement de sol	Dosages
>Remblai	2 à 5
>Rases/parties supérieures des terressements (PST)	2 à 5
>Couche de forme	4 à 7
>Assises de chaussées	6 à 8
Traitement de graves 0/20	3 à 4
Traitement de sable	4 à 7

5. DOMAINE DES SOLS TRAITÉS AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Tout d'abord il est essentiel de ne pas assimiler les sols ciment aux bétons maigres. Les principales différences tiennent moins aux dosages en ciment qui peuvent être du même ordre dans les deux cas puisqu'on réalise des bétons maigres à partir de 8-10 % de ciment alors qu'on peut doser à plus de 10 % certains sols ciment qu'à la nature des matériaux utilisés et au comportement de l'assise sous le trafic. La fabrication du béton maigre exige l'emploi des granulats classiques du béton alors que la préparation d'un sol ciment se fait à partir d'un sol c'est-à-dire d'un mélange d'éléments de toutes dimensions. D'autre part, une assise de béton est une assise rigide dont la résistance mécanique se calcule par les formules de la résistance des matériaux. On dit qu'elle produit « un effet de dalle ». Si elle se fissure, sa résistance mécanique devient sensiblement plus faible ou même nulle. Une assise de sol ciment est au contraire un élément de chaussée souple. Elle ne possède pas d'effet de dalle ou tout au moins n'en tient-on que peu ou pas du tout compte dans le calcul de la chaussée, mais en contrepartie elle peut se fissurer par suite du retrait. Sans que sa portance et son comportement ultérieurs en soient sensiblement affectés. La fissuration est même presque constante dans les assises de sols ciment, mais elle se produit sous forme de micro fissuration qui donne à l'assise de la souplesse sans altérer sa portance. Quant à la distinction entre sols ciment et sols améliorés aux ciments ou aux liants hydrauliques, elle est floue et ne présente pas un intérêt majeur. Dans les normes anglaises des sols ciment on exige, pour des éprouvettes normalisées, une résistance à sept jours à la compression simple comprise entre 12,5 et 25 kg/cm². Cette prescription impose des dosages de liants généralement supérieurs à 6 %, souvent de l'ordre de 10 % et plus. Dans les sols simplement « améliorés au ciment », on cherche surtout à obtenir la résistance dans le temps des qualités routières d'une assise. Les résistances à la compression qui sont demandées à une couche de chaussée dépendent de son

emplacement dans le corps de la chaussée. On est plus exigeant pour une couche de base que pour une couche de fondation ou à fortiori pour une couche de forme. Dans l'ensemble, les dosages sont compris entre 3 % et même 2 % pour d'excellentes graves traitées en centrale et 7 %. De toute façon, le traitement au ciment, même à ces faibles teneurs, améliore sensiblement la résistance à la compression du sol, indépendamment des qualités très importantes, nouvelles et durables, qu'il confère à ce sol. Dans la suite de cet exposé, l'expression sol ciment sera employée dans son sens général le plus large de sol traité aux liants hydrauliques.

6. MATERIAUX ET TECHNIQUES LOCALES

Il existe de nombreuses raisons de s'intéresser aux matériaux locaux parmi lesquelles :

- ▶ L'existence de très grandes formations de matériaux particuliers qui sont à l'échelle d'un continent : les latérites, les touts venant et les encroûtements calcaires, les sables, les granulats de Reg. Ils sont parfois d'excellente qualité, voire même la providence de l'ingénieur routier car il est beaucoup plus facile par exemple de construire et d'entretenir une route non revêtue avec un graveleux latéritique qu'avec une grave propre de rivière ou une grave concassée. Ils ont parfois des performances plus faibles mais les conditions locales (les climats secs, les faibles trafics par exemple autorisent bien souvent des tolérances assez larges).
- ▶ Il n'est pas usuel d'importer du matériau de viabilité même si l'on peut citer. Lors de constructions, on utilisera au mieux ce qui existe sur l'itinéraire car les coûts de chaussée imposent de réduire les distances de transport.

Mais utiliser les matériaux locaux, élargir les spécifications, réduire les distances de transport, en un mot optimiser les coûts. C'est donc plus dans la solution que dans l'objectif que réside l'originalité.

Faire appel à des matériaux locaux ou à des techniques locales, ce n'est pas seulement choisir la solution la plus économique d'une alternative ; c'est parfois aussi la seule façon de construire la route d'où le développement de techniques originales et parfois surprenantes, dans des pays dépourvus de granulats : enrobés de coquillage, sable stabilisé au lignosulfite, toute en briques encore que cette technique soit également utilisée en Europe (on rapporte que la brique ayant trois dimensions inégales, elle est adaptée au dimensionnement de trois classes de trafic à condition de choisir judicieusement la face posée au sol !). IL est également important d'avoir présent à l'esprit que la rareté ou le prix du matériau peut parfois conduire à une conclusion inverse et justifier économiquement l'importation de techniques de pointe comme cela est le cas pour les géotextiles sous enduit en Colombie, par exemple (solution

plus économique que celle qui consiste à réempier la route en terre avant l'enduisage) .

La main d'œuvre est abondante bien souvent et toujours bon marché. Ceci a donné lieu à des recherches de méthodes de construction à main d'oeuvre intensive et également à des modes de production des granulats.

C'est une lapalissade de dire qu'il n'y a pas de spécifications pour les matériaux hors spécification.

Il faut donc faire des expériences et les suivre pour en tirer parti. La construction de la route Tahoua Arlit (Niger) en est un exemple. Le projet avait mis en évidence une carence en matériaux usuels sur environ 250 km d'un tracé long de 650 km, exceptée la présence de roches massives permettant la production de concassé.

La comparaison du prix des matériaux en place, transport neutralisé, et l'importance prépondérante du corps de chaussée dans le coût de l'ouvrage conduisait à éliminer concassés et distances de transport prohibitives d'où l'obligation de rechercher des solutions reposant sur l'utilisation de matériaux hors spécification, qui dérogeaient par leurs petites dimensions, leur fragilité ou leur sensibilité à l'eau.

Ces matériaux ont été mis en œuvre et leur comportement a été suivi pendant trente ans.

Certains n'ont pas été à la hauteur des espérances mais d'autres se sont révélés valables et ces conclusions ont été immédiatement mises à profit lors de la réalisation de l'itinéraire Agadez Zinder, qui présentait des caractéristiques semblables à celles du premier projet. Cet exemple montre l'intérêt d'organiser le suivi du comportement des routes et des techniques.

Les grosses termitières sont très dures. Certains se sont donc demandé comment les termites avaient pu transformer le sol meuble ou tendre en ce matériau si dur. D'où l'idée de recueillir le suc salivaire du termite bâtisseur, de l'analyser et d'essayer de le reproduire par voie industrielle, pour créer un produit de stabilisation des sols : ouverture sur des travaux de recherche.

Recherche et innovation dans le domaine routier, Le SERI est le service des Etudes et des Recherches Internationales, de même qu'il existe un projet national sur ce sujet, le projet PORT.E de la DAEI (projet national d'optimisation des routes économiques). (9)

7. GENERALITE SUR LE SOL

7.1 Principales ressources de matériaux locaux dans le Sud algérien

La construction de routes dans le Sahara pose des problèmes de matériaux. On n'y trouve aucun de ceux traditionnellement utilisés en d'autres régions (tout venants naturels, matériaux pierreux...).

Lors de la prospection, les matériaux affleurant en surface sont d'une extrême hétérogénéité et les gisements exploitables de faible épaisseur (20 à 100 cm). Il est donc illusoire d'obtenir des gisements importants et exploitables à des distances de transport économiques.

L'uniformité de l'aspect de surface du matériau local saharien dissimule une grande variété de matériaux ; on distingue :

- ▶ des encroûtements calcaires,
- ▶ des encroûtements gypso-calcaires,
- ▶ du tout-venant de plateaux (reg),
- ▶ du tout-venant de buttes et pentes,
- ▶ des arènes granitiques,
- ▶ des sables,
- ▶ des argiles. (7) et (10)

Dans la région de BBM, le matériau le plus utilisé et le plus disponible ce le tout venant d'oued ou de reg

7.2 Synthèse des spécifications géotechniques existantes

L'abondance du matériau local, a conduit de nombreux pays à l'utiliser de façon courante et donc à établir des normes et des spécifications géotechniques à partir de l'expérience et des constatations faites sur chantiers. De nombreux pays disposent de règles pour utilisation des sols. En Algérie, ils sont classés en trois catégories par ordre de friabilité croissante, à savoir : (Carlos et De Os Horta, 1979)

• **Les matériaux à squelette (L.A. < 35%), sont des matériaux qui seront retenus en premier lieu car ils se rapprochent le plus des graves classiques de concassage (TVR dans cette classe).**

• Les tufs friables ($35\% > \text{L.A.} > 55\%$), sont les plus courants et les plus utilisés. ils ont une extraction facile et une mise en oeuvre simple ;

• Les matériaux pulvérulents ($\text{L.A.} > 55\%$), sont des matériaux d'extraction facile mais de mise en oeuvre difficile.

La teneur en carbonate de calcium était limitée à 70%, les matériaux recommandés en couche de chaussées étaient des matériaux à squelette. Actuellement on prend en compte les critères de portance CBR ainsi que des indications sur l'indice de plasticité et la granulométrie.

Les règles et les spécifications sont d'ailleurs différentes selon les pays utilisateurs. Pour un même objectif les spécifications peuvent être différentes par le type de caractéristiques retenues et par le niveau des exigences. On trouvera plusieurs exemples de spécifications utilisés ou proposés actuellement dans certains pays (Colombier, 1988) :

Les trois spécifications, algériennes, citées sont différentes dans l'approche et la plus récente ne semble pas être un aboutissement logique des plus anciennes :

- ▶ On ne retrouve pas le fuseau de spécification de Béni – Abbés.
- ▶ Les sables gypseux sont définis par des fuseaux propres.
- ▶ La notion de matériaux à cohésion et de matériaux à angle de frottement n'y apparaît plus.
- ▶ La cohésion, paramètre mis en exergue par les fondateurs de la TRS, n'est retenue que pour les sables gypseux avec un seuil revu à la baisse.

Les pourcentages de carbonates et de sulfates ne sont pas introduits de la même manière par Alloul et le CTPP, alors que ce pourcentage n'apparaît pas explicitement dans la TRS. Par ailleurs, les paramètres d'appréciation et de jugement des autres pays utilisateurs sont différents.

Pour ce qui est des caractéristiques communes à tous les pays suscités, une comparaison possible cependant on constate que pour un même objectif (climat, trafic et utilisation) les spécifications sont différentes par le niveau d'exigence. Pour l'établissement de spécifications communes et acceptables par la plupart des pays utilisateurs de matériau, il serait souhaitable d'introduire la notion de zone climatique proposée par Struillou et Alloul, vu la sensibilité de ce matériau à l'eau, en plus de la considération de niveau du trafic qui n'est pas pris en compte par les spécifications tunisiennes.

Entre autre les spécifications devront élargir l'utilisation du matériau et non pas se limiter seulement en couche d'assises de chaussées (couche de base et fondation) en considérant les accotements, les couches de forme et les assises de route non revêtues ou protégées par un enduit superficiel.

Concernant les exigences, les seuils imposés semblent assez bien cernés pour l'indice de plasticité et pour l'indice CBR après immersion. L'influence de la teneur en carbonate de calcium, la valeur du bleu ainsi que le minimum de résistance en compression simple après 4 jours de conservation à 55 °C, serait à prendre en compte par l'ensemble des pays et nécessite des études communes et des constatations sur chantier pour fixer ces seuils (Colombier, 1988).

7.3. Tout Venant

Le tout venant c'est-à-dire non trié, (wikipedia)

7.3.1. Tout-venant de Reg de Tanzerouft

Définition : Ce sont des matériaux naturels d'extraction facile, situés dans les lits de reg et dont les éléments constitutifs peuvent être de nature pétrographique variable dans le même gisement. Ils sont généralement de forme roulés à légèrement sub-anguleux. Le tableau ci-après regroupe les principales caractéristiques observées.

GRANULOMETRIE	PROPRETE	DURETE
- tout-venant continu O/D - D max de 20 à 80 mm - pourcentage de fines (0,080mm) : 10 à 24%	- IP>16 : grave argileuse -pour les matériaux d'origine d'érosion des squelettes en slice	-LA<45 squelette roulé

Utilisation : Ces matériaux meubles conviennent parfaitement à la réalisation de remblai et de couche de roulement dans certaines conditions. (Selon des données de LTPS, voire en annexe)

7.3.1. Tout-venant roulé d'oued

Définition : Ce sont des matériaux naturels d'extraction facile, situés dans les lits d'oueds et dont les éléments constitutifs peuvent être de nature pétrographique variable dans le même gisement. Ils sont généralement de forme roulés à légèrement sub-anguleux. Le tableau ci-après regroupe les principales caractéristiques observées.

GRANULOMETRIE	PROPRETE	DURETE
- tout-venant continu O/D - D max de 100 à 200 mm - Passant à 31,5 mm varie de 25 à 80% - pourcentage de fines(0,080mm) : 4 à 20%	-ES > 30 et IP < 6 : grave sableuse -ES de 20 à 30 : grave limoneuse argileuse - IP>12 : grave argileuse -pour les matériaux d'origine schisteuse procéder au délitage pour estimer la propreté	-LA<45, squelette stable, les plus fréquents -LA> 45 matériaux évolutif, assez rare

Utilisation : Ces matériaux meubles conviennent parfaitement à la réalisation de remblai et de couche de roulement dans certaines conditions. (11)

7.3.2. Tout-venant villafranchien :

Définition : Ce sont des matériaux naturels de dépôt d'âge villafranchien. Ils sont situés dans la plaine de Gharb principalement. Les matériaux sont roulés et d'origine diverses, ce qui conduit à rencontrer des gisements très hétérogènes.

Le tableau ci-après regroupe les principales caractéristiques observées.

GRANULOMETRIE	PROPRETE	DURETE
-tout-venant continu à bosse sableuse -Dmax de 80 à 120 mm -pourcentage de fines variable de 5 à 20 %	-très variable 0 < IP < 25 à 30	-très variable LA de 20 à 45

Utilisation : Ces matériaux meubles peuvent avoir les mêmes utilisations que les T.V. d'oued cependant leur utilisation en couche de roulement peut faire l'objet de réserves. (11)

8. NOTIONS GÉNÉRALES DU TRAITEMENT DES SOLS (GTR 92 et (12))

Nécessaires à la compréhension et à la maîtrise de la technique du traitement des sols dans ses applications à la réalisation des remblais et des couches de forme.

Elles concernent :

- ▶ les propriétés des sols significatifs vis-à-vis de leur traitement et celles des différents produits de traitement pouvant être envisagés ainsi que les divers phénomènes régissant leurs interactions,
- ▶ la méthodologie générale des études géotechniques et économiques à entreprendre pour définir les choix des produits de traitement et les dosages en vue de réaliser la nature d'ouvrage envisagée,
- ▶ quelques éléments généraux sur les aspects matériels et techniques d'exécution, ainsi que sur l'assurance de la qualité de ce type de travaux.

La recherche de la meilleure adéquation (technique et économique) entre produits de traitement et matériaux à traiter, pour une application donnée (remblai, couche de forme, assise de chaussée), implique de caractériser ces matériaux à partir de paramètres significatifs vis-à-vis des phénomènes intervenant dans la technique du traitement des sols.

8.1. Le sol

Les paramètres d'identification des sols considérés actuellement comme représentatifs vis-à-vis du traitement sont les suivants.

8.1.1. Paramètres caractérisant la nature des sols

a. La granularité

La granularité déterminée par l'analyse granulométrique (NF P 94-056 et NF P 94-057) et plus particulièrement :

- ▶ la valeur du D_{max} (dimension des plus gros éléments présents dans le sol). Cette caractéristique régit, en particulier, les possibilités pratiques de réaliser le mélange du sol avec le produit de traitement ;

- ▶ le tamisat à 0,08 mm (ou teneur en fines). Cette caractéristique qui exprime la finesse du matériau oriente en grande partie le choix du produit de traitement ;
- ▶ Le coefficient d'uniformité $C_u = D_{60}/D_{10}$. Cette caractéristique fournit, dans le cas des matériaux granulaires, une information qualitative sur les valeurs des dosages qui seront nécessaires pour atteindre le niveau de résistance visé. En effet, toutes choses égales par ailleurs, plus ce coefficient est faible, c'est-à-dire plus la granularité du matériau est homométrique, plus faible sera la masse volumique apparente pouvant être atteinte et donc plus importante devra être la quantité de produit de traitement à prévoir pour atteindre le niveau de performance visé (ou plus l'apport d'un correcteur granulaire sera justifié).

b. L'argilosité

Cette caractéristique intervient, en premier lieu, dans le type d'application pouvant être envisagée (remblai ou couche de forme) et dans le choix du produit de traitement. Dans une moindre mesure, les conditions de réalisation du mélange dépendent également de ce paramètre. En première approche, on peut considérer que plus l'argilosité est élevée, plus la chaux s'impose de préférence aux liants hydrauliques. L'argilosité s'exprime par l'une ou l'autre des deux grandeurs suivantes :

- ▶ l'indice de plasticité (I_p), mesuré suivant la norme NF P 94-051. Pour être correctement interprété, cet indice doit, de plus, être précisé par la valeur du tamisat à 0,08 mm (ou 0,4 mm) du sol
- ▶ la valeur au bleu de méthylène du sol (VBS), mesurée suivant la norme NF P 94-068

c. Les teneurs en constituants chimiques particuliers

Des constituants chimiques particuliers peuvent être présents dans certains sols : matières organiques, phosphates, nitrates, chlorures, sulfates, sulfures, etc. Leurs effets sur le déroulement de la prise hydraulique sont variables :

- ▶ les matières organiques. Suivant leur proportion dans le sol, elles consomment « en priorité » une quantité plus ou moins importante de produit de traitement pour neutraliser l'acidité du milieu, quantité qui est alors perdue pour le développement des réactions de cimentation ;
- ▶ les phosphates et les nitrates. Leur action est complexe. On retiendra que le plus souvent ils sont inhibiteurs ou pour le moins retardateurs de la prise hydraulique. Leur présence dans les sols est relativement rare et résulte principalement des épandages intensifs d'engrais chimiques ;

- ▶ les chlorures. Ils ont, en général, une action d'accélérateur de prise et de durcissement avec simultanément possibilité de gonflement par création de chloro-aluminates (dans le cas où ce sont les aluminates qui ont été formés en majorité). Une étude de la cinétique de prise est nécessaire pour décider de l'abandon éventuel de la technique ;
- ▶ les sulfates et les sulfures. Ce sont les constituants qui présentent la plus forte probabilité de présence dans les sols (sous forme de gypse ou de pyrites) et dans les matériaux de démolition (sous forme de plâtrats). Par expérience, ce sont eux qui s'avèrent les plus néfastes, car leur action peut déjà être très dommageable pour des teneurs de l'ordre de 1 %. En début de prise, ces constituants ont un rôle généralement bénéfique de régulateur de prise, mais, si l'alimentation en sulfates ou sulfures et en eau est suffisante, leur action se poursuit par la formation d'ettringite, espèce cristalline très gonflante pouvant entraîner la destruction de la prise hydraulique. Un prétraitement à la chaux réalisé largement (plusieurs semaines voire plusieurs mois) avant le traitement principal peut alors être une solution au problème en provoquant la formation de l'ettringite avant la mise en oeuvre définitive du mélange, si l'on peut considérer qu'aucune alimentation en ions SO_3 ne se produira plus par la suite.

La revanche, la mesure PH du sol peut être envisagée de manière assez, systématique étant donné la simplicité de sa détermination. La connaissance de ce paramètre est intéressante principalement pour évaluer la présence d'acides humiques et éventuellement, pour conforter les regroupements des sols en familles opérés au stade des études de qualification des sols.

8.1.2 Paramètres caractérisant l'état des sols

Il s'agit principalement de caractériser l'état hydrique et, pour certains d'entre eux, leur état de compacité en place.

a. L'état hydrique

Il intervient pour :

- ▶ le choix du ou des produits de traitement et des dosages à introduire dans le sol,
- ▶ le bon déroulement des réactions de prise et de durcissement,
- ▶ les conditions de mise en oeuvre : épandage, malaxage, compactage, arrosage éventuel.

Il s'exprime par l'une ou l'autre des grandeurs suivantes:

- ▶ le rapport W_{nat}/W_{OPN} , mesuré suivant les normes NF P 94-050 et NF P 94-093. Ce paramètre est le mieux adapté pour caractériser les états hydriques « moyen », « sec » et « très sec » ;
- ▶ l'indice portant immédiat (IPI) du sol à sa teneur en eau naturelle, mesuré suivant la norme NF P 94-078. C'est le paramètre le mieux adapté pour caractériser les états hydriques « humide » et « très humide » ;
- ▶ l'indice de consistance (I_c). Le paramètre

$$I_c = \frac{W_L - W_{nat}}{W_L - W_p}$$

Situe la teneur en eau naturelle du sol (W_{nat}) par rapport à ses limites d'Atterberg mesurées suivant les normes NF P 94-050 et NF P 94-051. Il est bien adaptée pour caractériser l'ensemble des états hydriques des sols, mais son interprétation est limitée aux sols ayant une fraction inférieure ou égale à 0,08 mm supérieure à 35 % et un indice de plasticité supérieur à 12 (NF P 11-300).

b. L'état de compacité en place

La connaissance de cette caractéristique est intéressante pour certains sols car elle est en relation étroite avec leur fragmentabilité. Elle apporte donc une information sur les conditions pratiques d'exécution du malaxage.

L'état de compacité en place se détermine par l'essai « mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de roche déshydratée », défini par la norme NF P 94-064.

8.1.3. Paramètres caractérisant le comportement

Il s'agit de paramètres visant principalement à mieux prévoir les conditions pratiques de malaxage. Essai d'abrasivité de la fraction grenue.

a. La fragmentabilité des éléments grossiers (supérieurs à 50 millimètres)

Cette caractéristique devrait permettre d'appréhender la limite de réalisation pratique du malaxage avec des outils animés (pulvérisateurs de sols principalement). Elle se détermine sur la fraction blocailleuse ($50/D_{max}$) du sol par « l'essai de fragmentabilité » applicable aux matériaux rocheux évolutifs, défini par la norme NF P 94-066, mais le calage des seuils est encore à préciser.

b. L'abrasivité de la fraction grenue (supérieure à 0,08 millimètres)

Cette caractéristique est responsable de l'usure plus ou moins rapide des outils de malaxage. La connaissance de la nature pétrographique de la roche mère dont est issu le sol à traiter

constitue une première indication, mais l'expérience a montré qu'elle est souvent insuffisante et quelquefois même non significative

9. ASPECT EXPERIMENTAUX DES SOLS TRAITES AU CIMENT

Dans cette phase on fait la comparaison des deux mémoire approchés au notre mémoire, ces ouvrage sont traité le tuf calcaire qui presque de même caractéristique de TVR, la déférent entre eux dans les squelettes (le tuf de agrégats provient de concassage de la roche calcaire, le TVR de agrégats de gravier roulé formulé naturellement).

Afin de rechercher la composition optimale du mélange, des essais de compactage et de portance ont été effectués sur les différents mélanges. Des essais de compression simple à différents âges ont été réalisés sur des éprouvettes compactées à l'optimum Proctor modifié (OPM) de chaque mélange.

9.1. Provenance de matériau

Le matériau le plus utilisé ce le tuf d'encroûtement calcaire ; Idriss Goual a fait l'essai sur le tuf de la région de Laghouat extrait d'une carrière située approximativement à 4 km au nord-ouest du centre-ville de Laghouat. Par contre Achour Yacine appartiennent le matériau de déférente carrière de la région Sétif « Gite d'Ain Trick, Gite de Khalfoun et Gite de Mezloug)

9.2 Liant hydraulique

Le ciment est le liant disponible et connu dans l'Algérie, malgré le difficile d'utilisation et coûteuse en vue économique. Idriss Goual et Achour Yacine sont utilisés un seul type de ciment. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II /A 42.5 NA 442

9.3 Mode opératoire

a. Dosage en liant

Achour Yacine a étudié des caractéristiques mécaniques réalisées pour les dosages en liants suivants : 3%, 4%, 5%, ces dosages sont les plus couramment utilisés dans le traitement des mélanges et graves traités (NF EN 14227-1 et NF P 98-116), mais Idriss Goual a utilisé deux dosages 4%, 8%

b. La conservation en déférente âgé

Idriss Goual a utilisé eux séries d'éprouvettes préparées dans les mêmes conditions que les éprouvettes non traitées. Une série d'éprouvettes a été testée après 0, 1, 3, 7, 14 et 28 j, et une autre série a été conservée à l'air libre pendant 28 j puis immergée dans l'eau pendant 1, 3 et 7 jours

Achour Yacine a fait les essais de la résistance à la compression simple à 3 heures, 2jours, 7 jours, 14jours et 28 jours une autre série a été conservée à 20°C dans de étui en carton bien scellé.

c. La préparation

Idriss Goual a réalisés les essais sur des échantillons confectionnés avec des éléments dont de diamètre est inférieur à 5mm et compactés à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale de l'essai Proctor modifié. Le mélange Tuf + liant composé de (100 – x%) Tuf et x% liant a été préparé selon les conditions de l'optimum Proctor modifié (w_{opt} et γ_{dmax}) de chaque mélange manuellement. On ajoute la proportion massique du liant correspondant à x % (x = 3%, 5% et 7%) de poids sec du Tuf et on mélange manuellement jusqu'à avoir une couleur homogène. On ajoute une quantité d'eau représentant w_{opt} de poids sec du mélange Tuf + x% liant. Le malaxage est fait en plusieurs fois par criblage dans un tamis de 5 mm de diamètre dans le but d'avoir un mélange homogène et d'éviter la formation des grumeaux. Le mélange Tuf + x% liant humide est soumis par la suite à un compactage statique à double piston, selon la norme NF P 98-230-2, dans un moule de diamètre 50 mm, avec des élancements de 1 et 2. Par contre Achour Yacine a été étudié en laboratoire a été réalisée avec les formules Tuf avec 3%, 4%, 5% de ciment (en pourcentages du poids sec de tuf). L'éprouvette ayant un élancement de 2. Le matériau séché à l'étuve à 105°C a une granularité 0/10 mm. Il est imbibé à une teneur en eau égale à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié exécuté sur la fraction 0/10 mm.

9.4 Mode opératoire suivant les normes [NF P 94-100, NF P 94-093]

a. Confection des éprouvettes

Les modalités du mélange : nature et état hydrique du matériau, le produits de traitement et le dosage, sont choisies en fonction des données particulières du chantier.

Les modalités d'un mélange étant choisies :

- éliminer par tamisage, le cas échéant, les éléments dépassant 5 mm (ou éventuellement 6,3 mm) ;
- fabriquer le mélange manuellement ou de préférence à l'aide du malaxeur mécanique et observer entre l'introduction du produit de traitement et le compactage (statique ou dame proctor) les délais indiqués (l'exception du délai de conservation qui est ramené à 15 min maximum). La qualité de l'homogénéité est appréciée visuellement (observation de l'uniformité et de la stabilisation de la teinte et de la granularité de la mouture). La quantité de mélange à préparer doit être largement suffisante pour permettre la réalisation de l'essai proprement dit et celle du «point Proctor Normal» correspondant aux valeurs de teneur en eau et de dosage(s) retenues (éventuellement le moule Proctor $\Phi_{int} = 101,5$ mm. Pour un mélange donné, ces quantités ne doivent pas être inférieures à 4,5 kg lorsque le moule Proctor est utilisé et à 7 kg

lorsque c'est le moule CBR qui est utilisé ; on peut déterminer la valeur de la masse volumique apparente humide $\rho_{h,PN}$ du mélange

b. Éprouvettes destinées à la mesure du niveau de résistance

Mouler, à l'aide de la presse de confection trois éprouvettes : ($d = h = 5 \text{ cm}$).

Les caractéristiques de moulage des éprouvettes sont :

— teneur en eau = teneur en eau du mélange ;

— masse volumique humide = 96 % $\rho_{h,PN}$;

Le démoulage de chaque éprouvette est réalisé immédiatement après confection. Elles sont moulées dans un étui tel que présenté à la figure I-3 et maintenues dans cet étui durant la conservation.

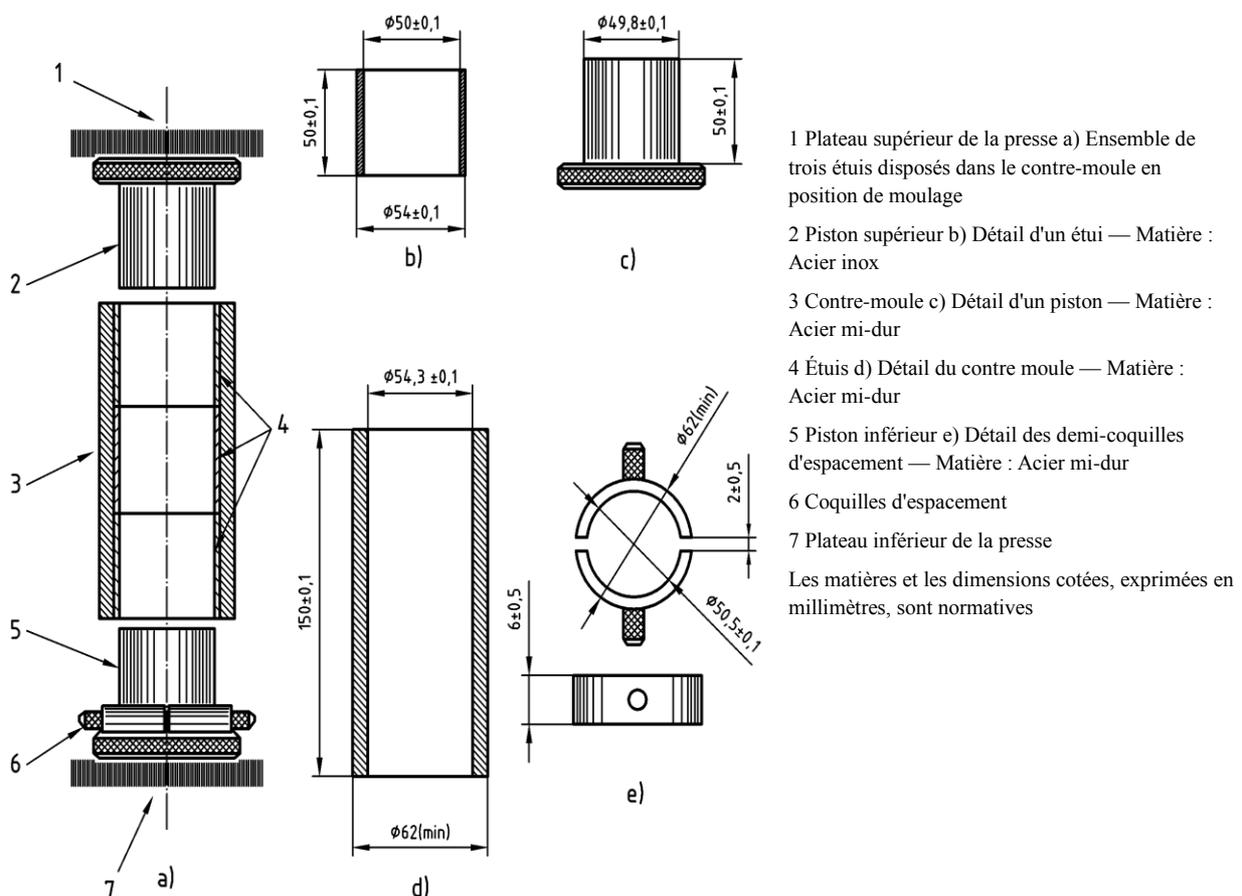


Figure I- 3: Ensemble de moulage utilisé pour la confection des éprouvettes

Selon la norme [NF P 98-114-3] le matériau comporte une fraction granulaire supérieure à 20 mm, utilisé les éprouvette de demension suivant: 10 cm x10 cm et 10 cm 20 cm ou 16 cm × 16 cm et 16 cm × 32 cm et utilisé le compactage vibro-compression



Figure I- 4: confection des éprouvettes suivant les normes

b. Conservation des éprouvettes

Dans le cas d'un traitement avec un ciment, conserver les éprouvettes $4 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$ à $20 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ et à plus de 90 % de degré hygrométrique puis les immerger entièrement $7 \text{ j} \pm 4 \text{ h}$ dans de l'eau maintenue $40 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$.

c. Détermination de la résistance en compression diamétrale.

La mesure de ce paramètre est réalisée sur les éprouvettes conservées en étui. Sa valeur est la moyenne des valeurs mesurées sur trois éprouvettes de la manière suivante :

- après observation des délais et des modalités de conservation, les trois éprouvettes conservées dans leur étui sont sorties du bain thermostaté et extraites de leur étui ;
- elles sont alors écrasées en compression diamétrale conformément au processus décrit dans la norme NF P 98-232-3 et on note la valeur de la résistance à la rupture.

9.5 Les essais

a. Essai Proctor

L'essai Proctor a pour but de déterminer pour un compactage normalisé d'une intensité donnée la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Cet essai a été effectué selon la norme (NF P 94-093). Les résultats des essais de compactage et de portance réalisés sur les différentes formulations montrent que l'ajout du ciment décale les coordonnées de l'optimum

Proctor (teneur en eau optimale W_{opm} et densité sèche maximale γ_{dopm}), en augmentant la densité sèche maximale et en réduisant la teneur en eau optimale. On observe une similitude entre le comportement des mélanges et le comportement d'un matériau compacté à différentes énergies généralement constaté dans la littérature (Holtz & Kovacs, 1996). Tout se passe comme si on compactait le tuf sans ajout à des énergies de plus en plus élevées. Ce phénomène peut trouver une explication dans la réduction du taux de fines et leur remplacement par des particules qui, de part leur forme et leur taille, facilitent le déplacement des particules du matériau de base (tuf) en les orientant de façon à former une structure plus dense.

b. Essai de résistance à la compression simple

L'effet de l'ajout du liant sur la résistance à la compression simple du Tuf-ciment, pour différentes durée de conservation. On constate que le traitement conduit à une augmentation significative de la résistance à la compression simple. Ces augmentations, sont fonction de la durée de conservation, du type de liant et du pourcentage de liant. Avec un pourcentage de 4% de ciment, ils sont obtenu les graphes qui définit en (Figure I-5)

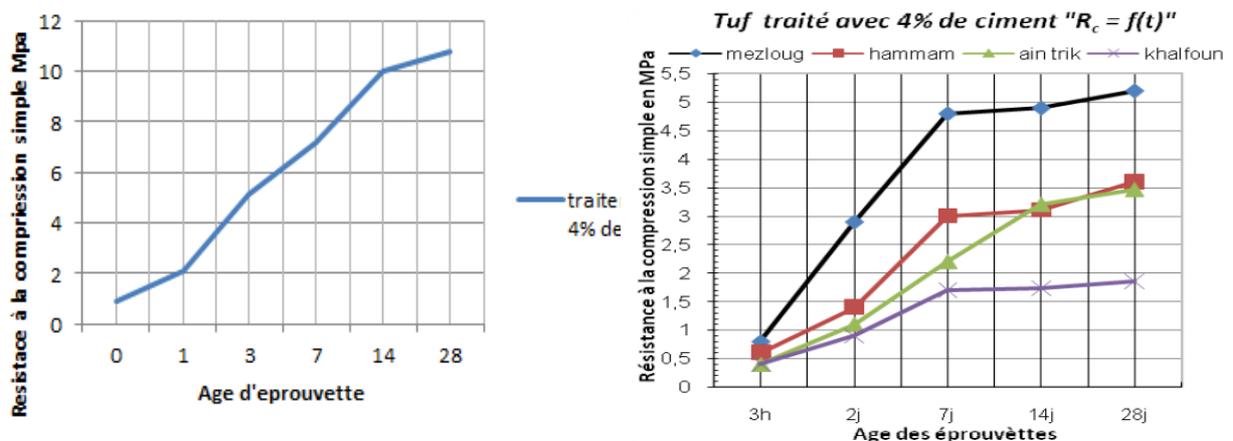


Figure I- 5: la résistance à la compression simple de 4% de ciment à déferent âge

c. Résistance à la traction " R_{tb} "

L'effet de l'ajout de ciment sur la résistance à la Traction par fendage R_{tb} du Tuf –ciment est présenté dans le figure I-6 les mêmes constatations peuvent être faites, ils sont constaté que le traitement conduit à une augmentation significative de la résistance à la traction. Pour une teneur de 4% de ciment, les éprouvettes conservées à 28 jours présentent une résistance à la

traction de l'ordre de 0.5 MPa [Tuf mezloug], soit plus de cinq fois celle du matériau non traité.

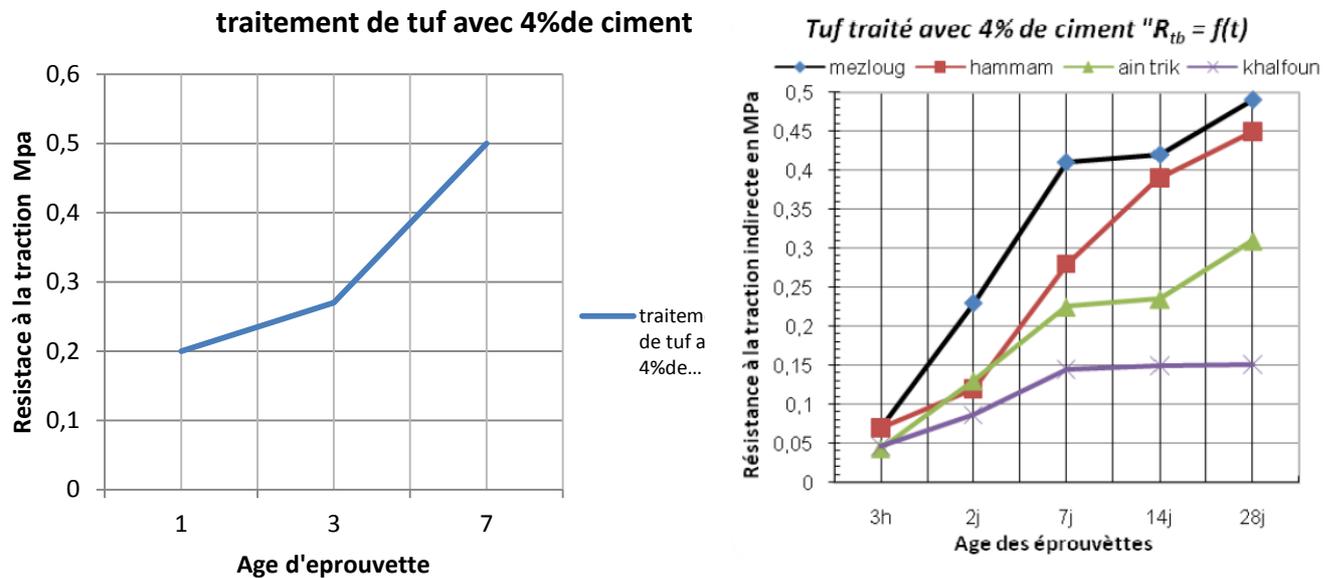


Figure I- 6: la résistance à la compression diamétrale de 4% de ciment à déférent âge

d. Essai CBR

La figure I-7 présente l'effet du traitement sur la portance immédiate. On observe que les indices CBR augmentent avec la teneur en liant dans le cas immédiat. Pour le traitement au ciment nous remarquons que les portances immédiates sont augmentées presque double la valeur initiale ; les deux graphes presque similaire c'est-à-dire les mêmes résultats.

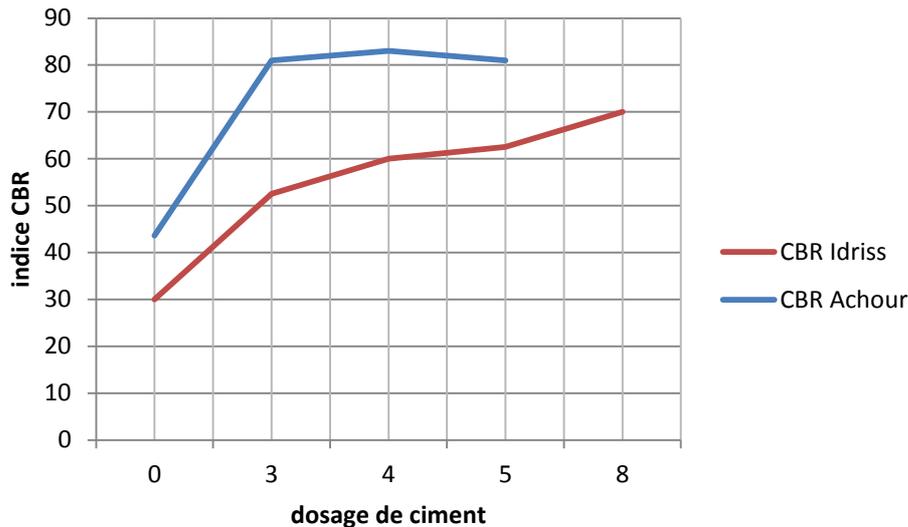


Figure I- 7: Evolution des indices CBR en fonction du pourcentage de ciment

9.6 Sensibilité à l'eau

Les essais d'immersion de tuf non traité ont montré qu'une forte augmentation de la teneur en eau détruit totalement la cohésion due au séchage de ce type de matériau. Pour pallier de ce problème de non stabilité du matériau en milieu saturé un traitement aux liants hydrauliques s'avère nécessaire. Après traitement, deux familles d'essais ont été réalisées; la première famille concerne des essais Proctor modifiés et des essais de portance immédiate et après 4 jours d'imbibition. La seconde famille concerne des essais de résistance à la compression simple réalisés sur des éprouvettes compactées à l'OPM. Pour chaque teneur en ciment, Afin d'étudier l'effet de la forte augmentation du degré de saturation, une deuxième série d'éprouvettes confectionnées dans les conditions de l'essai de compression simple, ont été plongées dans l'eau après 28 j de durcissement.

[Achour Yacine] faire un autre essai, il est immergé les éprouvettes humide sur trois échantillons de Mezloug, Hammam Ouled Yeless et Ain Trick é sans attient 28Jours, il est observé que ils ont gardé la forme de l'état initial avec une destruction partielle des parois des éprouvettes c-à-d que l'intérieur des éprouvette reste stable malgré l'immersion total dans l'eau.

Pour le cas de gite de Khalfoun, les parois au contact de l'eau se détruisent instantanément. L'intérieur des éprouvettes se détruit au fur et à mesure que l'eau y pénètre. Il est remarqué que toutes les éprouvettes se détruisent au bout de 4h et 30 min au plus (tuf de Khalfoun + 5% de ciment)

10. DES OPERATIONS DE TRAITEMENT AU LIANT HYDRAULIQUE

Les opérations de traitement de sol fin, surtout le traitement en place est très difficile, par comparaison avec notre traitement de sujet, parce qu'il est convenit plusieurs exigences et besoin de grand d'expériences (identification le sol, l'étude de traitement, estimation le délai de réalisation avant la fin de temps de pris,). A l'époque plusieurs pays métrisent cet utile, on va voir quelques opérations concernant le traitement au liant hydraulique :

10.2 Opération de stabilité en Tamanrasset avec de liant spéciale

L'opération de stabilité en Tamanrasset à Algérie publié par Paving news ' *Publication Caterpillar destinée au marché mondial de la route* ', malgré cette opération est flou, mais il est important pour un démarrage d'application de traitement en zone désertique. L'infrastructure existante avait donc grand besoin d'une remise en état. Le coût de cette opération étant un facteur-clé, il a été décidé de procéder à la stabilisation de la chaussée en place. Dans cette logique, la société de construction routière Chebli & Tellawi Corp., titulaire du chantier, a choisi d'utiliser une recycleuse malaxeuse RM500 Cat®. Le projet consiste à stabiliser les

50 km (31 miles) de route de liaison au moyen de la RM500, sur une largeur moyenne de 9 m (30') et à une profondeur de 20 cm (7.9"). Il suppose également l'utilisation d'un liant spécial pour consolider la route menant aux installations pétrolières.



Figure I- 8: Epannage et le malaxage

Les premiers travaux ont démarré en février. Avant que la RM500 puisse travailler, des opérations préliminaires doivent être effectuées.

La première est le nivellement très grossier du tracé, à l'aide d'un boteur. Cette opération consiste surtout à enlever les grosses pierres que les poids lourds et les variations de températures ont remontées en surface. Le boteur enlève aussi de gros bloc d'argile fragmentée. Un camion-citerne arrose ensuite la surface grossièrement réglée. La RM500 effectue alors une passe de stabilisation. Pour cela, la recycleuse malaxeuse est précédée d'un camion contenant le liant, un tuyau reliant les deux véhicules. L'émulsion est mélangée dans

la chambre de malaxage de la RM500. La nature du liant : Un mélange de calcium et de lignine, un polymère complexe extrait de la pâte à papier. La lignine est écologique car il s'agit d'une fibre naturelle provenant des arbres et des plantes.

Ce liant d'origine organique se révèle être bien compatible avec le matériau argileux de la route existante. De fait, il contribue à rendre l'argile plus élastique, en empêchant l'effritement, et facilite le compactage. L'opération s'achève par le passage d'une niveleuse qui effectue le nivellement de finition, suivie par d'un compacteur monocylindre.

Pour ce projet, le respect des délais s'avère primordial. Toute baisse de productivité sur le chantier aurait coûté du temps et de l'argent, impactant directement les installations pétrolières. Aussi, une fois commencé, le chantier devait être achevé dans les plus brefs délais. Les conditions climatiques augmentaient elles aussi le stress. Les travaux ont donc été lancés en février, avec des températures moyennes comprises entre 7,5 et 20,6° C (46-69° F), le défi était d'avancer suffisamment pour éviter la vague de chaleur attendue dès le printemps. Autre défi, et non des moindres, les opérateurs n'avaient encore jamais travaillé avec une recycleuse (12)

10.3 Traitement en place de déviation de Plombières-les (Vosges)

Cette la dernière section de la RN 57 – reliant le Luxembourg à la Suisse – va passer en 2 x 2 voies. Après décapage de la terre naturelle, déblaiement puis remblaiement, le grès des Vosges a été concassé en 0/20 sur site. “Le concassage de ce matériau rocheux, naturellement gélif, et son traitement avec un dosage à 5 % de ciment, le rendent parfaitement adapté à la réalisation de cette route située à une altitude de 600 m. Dans le cas présent, le ciment est plus performant qu'un liant hydraulique routier, avec un délai de maniabilité plus court”

Pour un tronçon donné, nous disposions de deux heures pour réaliser l'épandage du ciment sur la première couche de 35 cm d'épaisseur de matériau concassé déjà en place, le malaxage à la Wirtgen 2500, le compactage et la reprise des stocks intermédiaires pour préparer la seconde couche. Une fois la première couche totalement terminée, la seconde est réalisée en une seule passe de 35 cm d'épaisseur en continu. La structure de chaussée associe ensuite sable-ciment, grave-bitume et béton bitumeux semi-grenu.

Liant utilisé : 3 300 tonnes de ciment CEM II/B 32,5 R CE NF (13)

10.4 A Ozans, traitement en place au liant hydraulique et à la chaux

L'Ozans est actuellement l'une des plus grandes ZAC à viser la certification HQE Aménagement. D'où notamment le traitement en place, à la chaux et au liant hydraulique routier (LHR), des matériaux mis à nu par les terrassements des voies primaires et secondaires la desservant, totalisant près de 22 000 m².

Projet phare de la Communauté d'agglomération castelroussine (CAC), la future ZAC d'Ozans (Indre) est appelée à devenir un parc d'activités économiques d'exception.

Par sa taille (508 hectares), ce parc figurera parmi les plus grands existant aujourd'hui en France. La proximité de trois autoroutes, dont l'A20, de la ligne ferroviaire Paris- Toulouse et d'un aéroport international, sont quelques-uns de ses atouts. Ozans est aussi la première zone de la région Centre engagée dans une démarche de certification Haute Qualité Environnementale (HQE) – Aménagement et l'une des premières au niveau national.

Cette nouvelle zone d'activités est réalisée en plusieurs phases d'aménagement qui s'échelonnent jusqu'en 2018. À terme, elle devrait accueillir des entreprises axées sur des activités tertiaires, logistiques et industrielles dans le domaine des éco-technologies.

Sur ce chantier, il s'agit d'un sol bien adapté à un traitement à la chaux et au liant hydraulique routier.

À partir d'échantillons prélevés sur le site, le laboratoire externe TP Concept de Blois a déterminé les bons dosages en chaux (1%) et en liant nécessaires (7%). Avant de procéder au traitement en place des matériaux mis à nu par les terrassements, l'entreprise Setec (groupe Roger Martin SA), mandataire et pilote du groupement avec Eurovia, s'est chargée des opérations de déblaiement / remblaiement et de sa mise à la cote. Le traitement commence par la voirie principale, depuis le giratoire, et la périphérie de la zone, où la circulation de poids lourds est rapidement prévue. L'opération s'achèvera par les voies secondaires. Les zones correspondant aux futurs giratoires, pattes d'oies, etc. sont également traitées.

Le traitement s'effectue sur une largeur de 7,80 à 8 mètres de large (pour la voie proprement dite et ses abords) et de 7 mètres pour les voies secondaires. La première étape consiste à faire passer un atelier de broyage pour qu'aucun élément de sol ne dépasse les 60 mm de diamètre. Ensuite, la chaux est épanchée et le sol est malaxé sur 40 cm d'épaisseur avec un apport d'eau contrôlé. Puis, l'épandage du liant hydraulique routier, l'arrosage et le malaxage du sol sur 40 cm ont lieu dans la foulée. Il s'agit d'un liant hydraulique routier

LV-TS 03, produit à Créchy dans l'Allier et composé de clinker, calcaire, gypse et fillers. La richesse en clinker de ce liant hydraulique routier nous a permis d'atteindre assez rapidement les performances visées, en adoptant un dosage dans la norme et dans un délai de maniabilité suffisant. Pour plus d'efficacité, des camions de notre transporteur SATM, filiale de Vicat, étaient dédiés à ce chantier pour livrer les 1 100 tonnes nécessaires. Les chauffeurs connaissent bien le trajet, l'accès au site, sa configuration et la zone à livrer, ce qui évite de perdre un temps précieux. D'autant plus précieux qu'il y a trois heures de route depuis notre site de production et que le chantier démarre vers 7/8 heures. Efficacité qui a permis à Setec

de réaliser un traitement portant sur une superficie d'environ 22 000 m² en 12 jours seulement. Le dosage en eau a été déterminé par le laboratoire TP Concept et confirmé par celui de Setec, basé à Diors. À cela se sont ajoutées des mesures régulières sur le chantier pour l'adapter ponctuellement afin d'optimiser les performances du traitement. Le réglage à la niveleuse a été suivi d'un compactage en deux temps. Un cloutage par gravillons 10/20 et l'application d'un enduit monocouche 6/10 viennent ensuite protéger la surface réalisée.

Présent en permanence sur ce chantier, un technicien du laboratoire de Setec a procédé à diverses mesures et contrôles, dont notamment des carottages sur 40 cm de profondeur en fin de chantier et des essais à la plaque. Les résultats obtenus sont très satisfaisants puisque la déflexion mesurée est inférieure à 50/100 de mm, alors que la valeur maximale admise était de 60/100 de mm » (14)

10.5 TerDOUEST de France

En France, la profession a lancé un ambitieux programme de recherche intitulé TerDOUEST (Terrassement Durable - Ouvrages en Sols traités). Ce programme, soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR), s'est déroulé de 2008 à 2012. Piloté par l'IFSTTAR, il a réuni plusieurs partenaires (maîtres d'ouvrage, maîtres d'oeuvre, universitaires, organismes techniques, entreprises, producteurs de liants) qui ont travaillé selon les quatre axes suivants :

- ▶ Processus physico-chimiques et comportement géotechnique des sols traités
- ▶ Evolution dans le temps des sols traités - Durabilité
- ▶ Réalisation d'un ouvrage expérimental de référence
- ▶ Méthodes et outils d'analyses économiques & environnementales des projets

Les résultats de ce travail ont été présentés lors d'un séminaire de restitution qui s'est déroulé du 18 au 19 juin 2013 à l'Ecole des Ponts ParisTech.

L'ambition du présent rapport est de mettre à disposition de la profession, dans l'attente de la révision du GTS, les nouveautés et les principaux enseignements de TerDOUEST

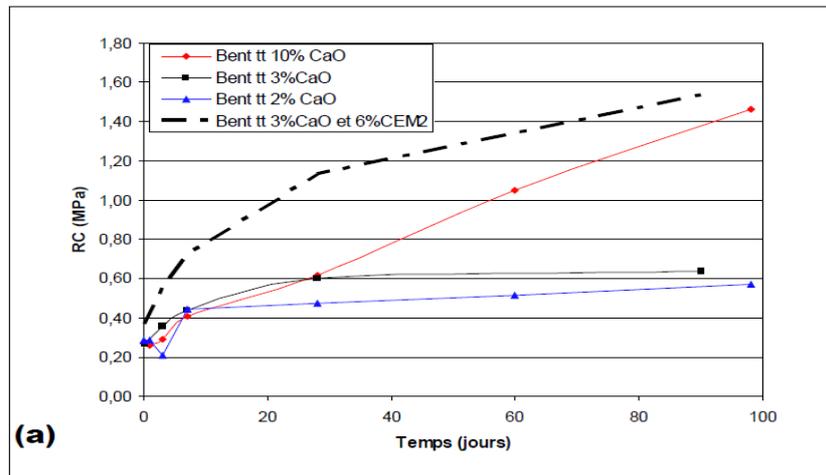


Figure I- 9: Evolution comparée (a) des résistances à la compression simple (Rc en MPa) pour des traitements à la chaux et traitement chaux-ciment

Principales performances obtenues à Héricourt

Dans les conditions de réalisation du remblai expérimental d'Héricourt, les résultats suivants ont été obtenus:

- ▶ Mouture : une mouture 0/50 est obtenue dès le premier passage de pulvimixeur puis
- ▶ 0/31,5 mm après deux ou trois passes de pulvimixeur ; la mouture ne s'améliore plus au-delà de trois passages
- ▶ Profondeur de malaxage : réglage sur une plateforme de bonne portance d'une couche foisonnée d'argile de 0,50 m d'épaisseur
- ▶ Consignes de compactage pour un objectif remblai : 8 passes de compacteur vibrant pied dameur (VP5) à 3 km/h pour une couche de 0,30 mètre d'épaisseur
- ▶ Délais de maturation : le délai maximal entre le malaxage et le compactage n'a pas excédé 4 heures ;
- ▶ Ordre de grandeur des portances obtenues : à court terme (8 heures après le compactage) les valeurs EDYN2 sont supérieures à 50 MPa sur l'arase traitée
- ▶ Masses volumiques sèches : valeurs supérieures à 95% de la référence OPN ($\rho_d > 1,37$ t/m³)
- ▶ Valeurs des teneurs en eau mesurées en cours de chantier sur les différentes couches (numérotées R1 à R11) ; la référence OPN est indiquée par un trait rouge

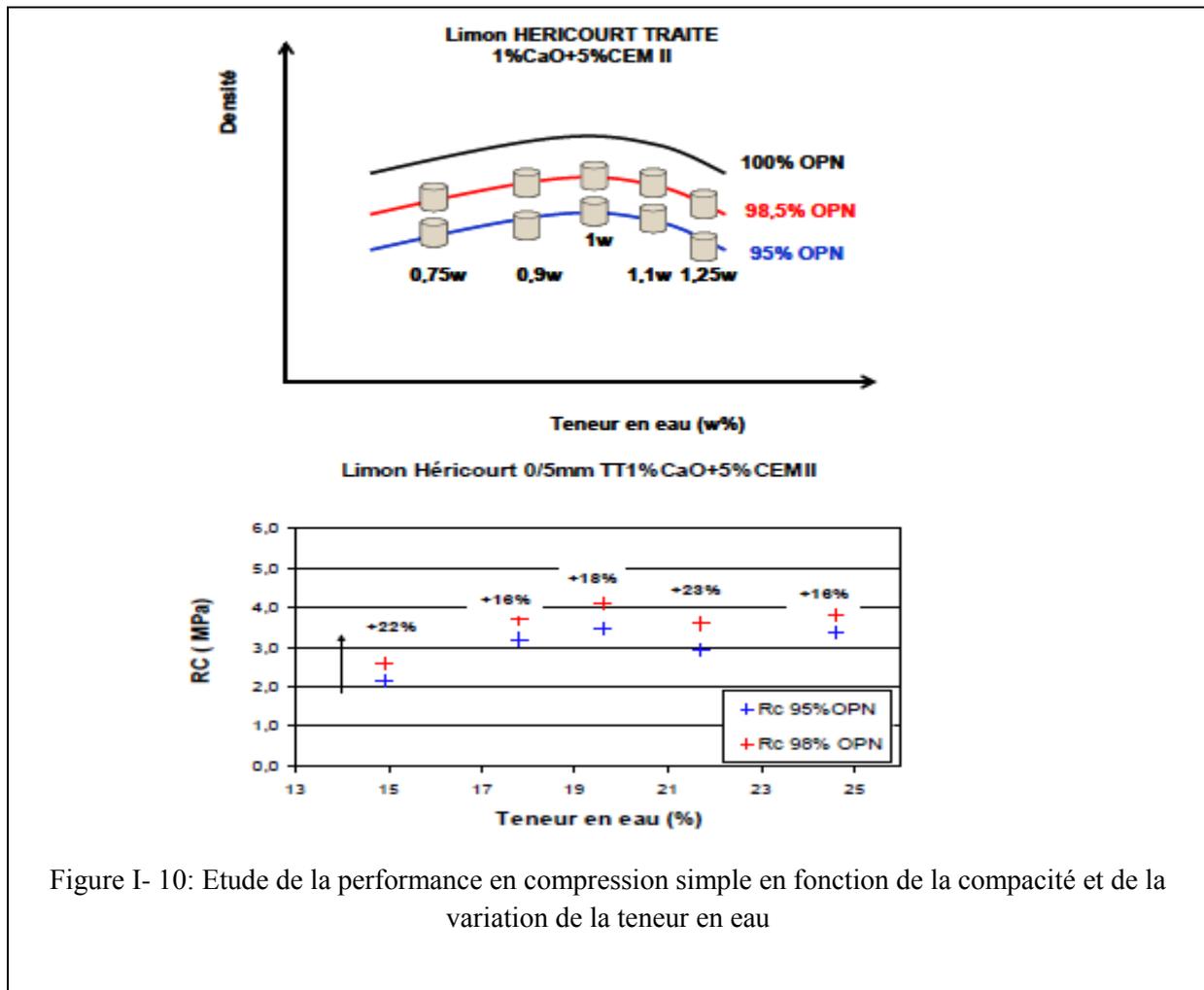


Figure I- 10: Etude de la performance en compression simple en fonction de la compacité et de la variation de la teneur en eau

La teneur en eau : des teneurs en eau trop faibles (Figure I-10), inférieures à 0,9 Wopm, font diminuer les performances mécaniques. Une augmentation de l'énergie de compactage se traduisant par une augmentation de la compacité permet de compenser partiellement ceci.

Le projet TerDOUEST permet donc d'ouvrir la voie au réemploi des matériaux argileux très plastiques, classés A4 selon la norme NF P11-300, qui ont les particularités suivantes :

- ▶ Ce sont des argiles ou des argiles marneuses avec un IP > 40 ou une VBS > 8
- ▶ Ce sont des sols très cohérents et très peu perméables
- ▶ Ils changent de teneur en eau lentement mais avec d'importants retraits ou gonflements
- ▶ Ils ont un angle de frottement très faible, et une cohésion susceptible de chuter fortement avec l'humidification du matériau

Les études réalisées dans TerDOUEST confirment que le traitement de ces matériaux, en fonction du liant utilisé et de son dosage :

- ▶ Permet de réduire l'IP et la VBS, en liaison avec la floculation argileuse par la chaux

- ▶ Déplace la limite de retrait et diminue l'amplitude de retrait / gonflement
- ▶ Augmente la cohésion et légèrement l'angle de frottement

Le remblai expérimental d'Héricourt, réalisé et ausculté pendant et après le projet TerDOUEST, conclut au bon comportement des argiles plastiques avec les préconisations suivantes :

- ▶ Identification du matériau et étude de traitement spécifique
- ▶ Mise en oeuvre limitée sur remblai de faible hauteur (< 5 mètres)
- ▶ Traitement systématique du remblai : traitement à la chaux et/ou traitement chaux/ciment. Le point de fixation de la chaux (norme ASTM D6276-99a) renseigne sur le dosage minimal en chaux à retenir
- ▶ L'état hydrique « sec » est à proscrire ; ajustement après traitement de la teneur en eau pour viser l'état hydrique « moyen »
- ▶ Utilisation d'une surface de bonne portance pour faciliter l'opération de traitement
- ▶ Malaxage au pulvimixeur avec un objectif de mouture de 0/40 à 0/50 mm
- ▶ Compactage avec un compacteur à pieds dameurs (2)



Figure I- 11: Chantier expérimental de Héricourt (70) avec l'utilisation des argiles A3/A4 traitées en remblai, avant traitement ; malaxage ; compactage en remblai ; vue finale



Figure I- 12: Vue du remblai expérimental (mai 2015) cinq ans après sa construction

Chapitre II Etude d'amélioration de Tout Venant de Reg à la région sahariennes (Etude d'un cas)

1. INDORUCUTION

La décision de procéder à un traitement des sols au plus souvent une incidence importante sur l'économie du chantier, étant donné les quantités de matériaux entrant en jeu, les coûts des produits et des opérations de traitement. Cet aspect impose des études géotechniques et économiques détaillées pour reconnaître la nature, l'état, la localisation et les quantités des différentes formations nécessitant un traitement, et pour comparer les coûts des solutions alternatives.

En généralement le matériau qui peut dire comme un tout venant de reg dans la région BBM, c'est un matériau sélectionnée des caractéristiques compatible des squelettes roulé, il est difficile modifiée leur granulométrie ; A l'époque à l'aide d'utile de traitement, on peut trouver une solution durable et économique au l'utilisation routier ; On a utilisé de technique qu'est incorporé de matériaux locaux avec un additive, quel que soit ciment ou liant hydraulique. En notre sujet, on optimisé le matériau locaux à l'aide d'utile de traitement au ciment, et évaluer l'utilisation ce technique comme un technique applicable et favorable.

Dans ce chapitre constituent les connaissances de base nécessaires et à l'utilisation de la technique du traitement des TVR dans ses applications à la réalisation des remblais. Elles concernent :

- ▶ les caractéristiques significatives vis-à-vis de leur traitement et les divers phénomènes régissant leurs interactions,
- ▶ quelque partie important des études géotechniques à entreprendre pour définir les choix des produits de traitement et les dosages en vue de réaliser la nature d'ouvrage envisagée,
- ▶ quelques éléments généraux sur les aspects matériels et techniques d'exécution.

La présente étude provient des carrières d'emprunt désigné au les coordonnées GPS 21° 23' 59.0'' E, 00° 56' 03.3'' N dans la région BBM -Alger.



Figure II- 1 : l'emprunt de Tout Venant de Reg de traitement

1.2 Climatologie de la région d'Adrar

Adrar a un climat désertique chaud (Classification de Köppen BWh) typique de la zone saharienne hyper-aride, c'est-à-dire du cœur du Sahara, avec un été torride, très long et un hiver court, tempéré chaud. Le climat, hyper-aride, est celui d'un désert absolu, puisque la moyenne annuelle des précipitations atteint à peine 14 - 15 mm, tombant essentiellement en automne ou au printemps. À des occasions exceptionnelles, des orages violents peuvent se produire à cause de masses d'air plus frais venant du nord qui rencontre les masses d'air brûlant venues directement du désert surchauffé pendant la journée. Les températures moyennes maximales sont de 46 - 48 °C en juillet (le mois le plus chaud) mais tournent plutôt autour de 50 °C entre juin et septembre, ce qui fait d'Adrar une des villes les plus chaudes du monde. Le nombre moyen de jours où le mercure dépasse la barre des 40 °C est de l'ordre de 130 jours par an. Les températures restent élevées en hiver mais seulement la journée car dans les étendues désertiques, il n'y a rien pour retenir la chaleur et températures minimales moyennes avoisinent 7 °C. Le ciel est clair, le soleil omniprésent, le beau temps perpétuel. L'irradiation solaire figure parmi les plus élevées au monde et la durée moyenne de l'insolation est environ de 3 978 heures par an³. Le rapport en pourcentage entre la durée du jour et la durée d'ensoleillement annuelle y est dépassé 90 %. La température moyenne journalière annuelle est de 26-27 °C à Adrar. L'humidité relative est exceptionnellement faible toute l'année avec une moyenne annuelle d'environ 24 %, et particulièrement en saison chaude

où le degré hygrométrique de l'air descend souvent en dessous de 5 %.

1.3 Contexte géologie de BBM ' Tanzerouft'

Bordj Baj Mokhtar de la commune de Adrar est situé en grand désert, s'appelle Désert Tanezrouft concernant Reg Tanezrouft, c'est un nom touareg, "Désert de le Désert "(Monod, 1937), couvre plus de 120 000 km² dans le sud de l'Algérie et à la frontière zone du Mali. Ce plateau de 350 m de haut se situe entre les bords de l'Ahnet Tassilis et du Hoggar. Les massifs précambriens à l'Est, le Knachich escarpements et l'Erg Chech au sud-ouest et à l'ouest, et les escarpements de Tazouikert et le Terticherine-A't el Khaoua Ergs au sud (Fig II-1). Il est plat, non végétalisé et reçoit moins de Pluviométrie annuelle moyenne de 5 mm (Dubief, 1963, Leroux, 1983).

Les roches crétacées sous-jacentes devenir plus épais d'Ouest en Est et les aquifères profonds ne peuvent pas recadrer ni permettre la possibilité pour les puits peu profonds, En revanche, les marges du Tanezrouft sont marqué d'un système de wadis saisonniers liés à drainage de l'Eglab et de l'Erg Chech, à la au nord-ouest, et du Hoggar, à l'Est. Le long de ce dernier, inselbergs cristallins surgissent à 800-1200m d'altitude; quelques puits ou de l'eau rocheuse trous (gueltas) sont situés au pied des escarpements (à Ziza, Ouallen, Tin Senasset ...) et contractée permet caravaning vers les marchés de l'Aoulef. Le la zone orientale a été observée par Conrad (1969), Camps (1968) et Gabriel (1984) tandis que les rapports sur la partie centrale et les marges occidentales sont par Monod (1936), le capitaine Ricatte (1960) et Fabre (1985-1987 avec EREM. Dans le Reg Tanezrouft lui-même, vaste paléosols existent 2-3 cm en dessous du sable grossier et gravier de la reg superficielle, Ils ont 10-20 cm d'épaisseur et sont de couleur similaire, manque de consolidation, l'érosion, l'altération et la position stratigraphique. Ils parfois (pour par exemple à l'ouest de la marque de sentier de 300 km ou à 24 ° 30'N / 0 ° 30'W) recouvrent un rouge mal consolidé sables, à partir d'affleurements le long et en dessous Erg Ine Sakane, au sud de Tazouikert. Celles-ci paléosols impliquent la présence d'un graminæous couvrir régionalement ou localement (on ne le connaîtra pas jusqu'à ce qu'une étude spécifique soit possible Reg Tanezrouft) et des précipitations sur l'actuel plateau. (15)

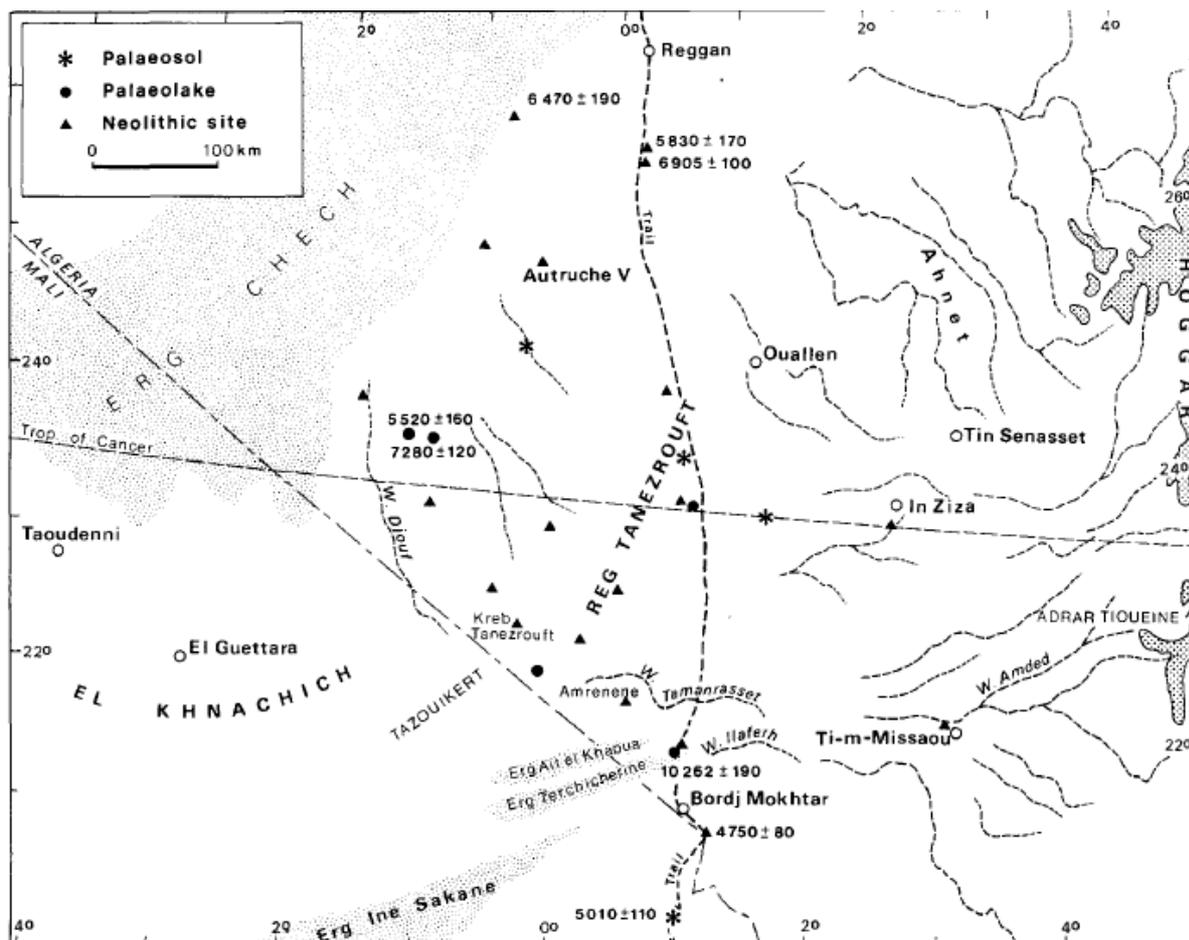


Figure II- 2 : reg tanzerouft et leurs marges

2. OBJECTIFS DU TRAITEMENT

L'objectif est alors d'obtenir, par le traitement, une rigidification plus ou moins élevée, du matériau traité, afin de lui conférer les caractéristiques mécaniques pouvant être prises en compte dans la conception de l'ouvrage.

Le comportement de ces chaussées sous trafic a été globalement satisfaisant. Pour un trafic élevé avec les poids lourds actuels et conditions climatiques agressives n'est pas attendue une durée de vie suffisamment par rapport le coût de réalisation. Il est cependant possible de procéder à l'amélioration des caractéristiques mécaniques de ces TVR par adjonction de liants hydraulique.

Pour évaluer l'utilisation de traitement dans la région de BBM, on a établi une étude prendre des grandeurs économique et géotechnique, comparer des grandeurs des caractéristiques de matériau traité et non traité et monter l'influence du utile de traitement.

2.2. Performances à rechercher

Le matériau concernant à l'étude est un tout venant d'oued à l'utilisation routier, des

squelettes de D max n'est dépassé pas 40 mm généralement et des caractéristique présenté ultérieurement dans le tableau; Dans l'absence des squelettes, la cohésion entre les agrégats est soumis une grand sollicitation; Cette effet accélérée la fatigue et dégradé le matériau dans bref délais ; le traitement au ciment ou liant hydraulique augmente sa cohésion et attendu la durée de vie.

Elles dépendent de l'application considérée et des particularités du projet et, pour cette raison, doivent dans toute la mesure du possible être déterminées par une étude spécifique. En l'absence d'une telle étude, on pourra toutefois s'inspirer des valeurs proposées.

3. L'ETUDE DE RECONNAISSANCE ET DE QUALIFICATION DE MATERIAU

Elle a pour objet de délimiter le zonage des différentes formations de sols nécessitant un traitement pour être utilisés dans les remblais. La distinction entre ces formations doit toutefois pouvoir être réalisée lors de l'exécution.

La région de Tanzerouft est très riche de tout venant de reg, en des couches superficielles épais, ce matériaux en long de trace de la route reliant Regagne à BBM, ce le matériau principale pour les construction routier, utiliser en couche de fondation ou couche de base ;

3.2. Classification de Tout Venant de Reg de BBM

a) Selon GTR 92

L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Le **GTR 92** (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 1992) et la norme qui en découle **NF- P 11-300** (septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Après voir

Le tableau 3.1 a et le figure II-5, on peut dire que notre matériau soit dans le classe B₅

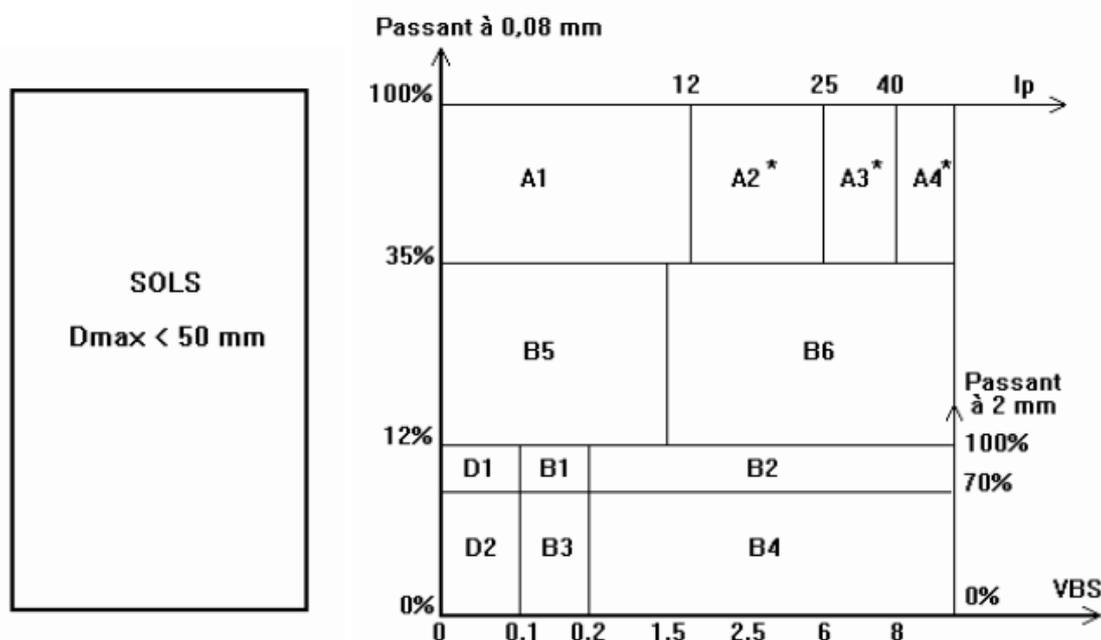


Figure II- 3 : classification selon GTR et la Norme NF P 11-300

b) Selon classification des matériaux (Larabi, 1998)

Il est établi que l’environnement désertique permet l’utilisation, en corps de chaussée, d’une large gamme de matériaux : depuis les graves caillouteuses jusqu’aux matériaux fins en passant par ceux dont la courbe granulométrique est tout entière à l’intérieur d’un fuseau discriminant de type

AASHO –voir Figure1. Fuseau discriminant de Béni-Abbes- Les matériaux sont alors classés en trois familles selon leur granularité. La Figure II-4 montre que les courbes granulométriques de matériau étudiés se situent inclue partiellement dans le fuseau de Beni-Abbés. Il appartient donc à la famille des matériaux qui rapproche de gravier non traité (famille II), et il n’est pas très éloigné de la Famille III ; ces définie comme suivant :

Famille II : les matériaux dont la courbe granulométrique est tout entière à l’intérieur du fuseau

(zone II du graphique) ; Ces matériaux doivent leur tenue à l’enchâssement des différents éléments et à l’angle de frottement important dû au contact grain sur grain ; on les appelle matériaux à angle de frottement élevé. Ce sont des matériaux à ossature, analogues à ceux dits classiques utilisés en zone humide pour lesquels il est toutefois toléré quelques faibles écarts grâce à la sécheresse (pourcentage de fines plus élevé). Ce type de matériaux doit assurer une certaine cohésion tout en évitant une lubrification du squelette.

Famille III : ceux dont la courbe granulométrique se trouve au-dessus du fuseau entièrement

ou partiellement (zone III du graphique). Matériaux à matrice d'éléments fins, le squelette est inexistant ou noyé dans les éléments fins. Ces matériaux sont caractérisés par:

- ▶ leur nature minéralogique (taux de carbonates, sulfates, chlorures et insolubles) ;
- ▶ leur résistance à la compression simple ;
- ▶ leur susceptibilité à l'humidité (gonflement, retrait chute de résistance).

Les seuils imposés à ces paramètres dépendent du niveau de service pour lequel ils seront sollicités (couche de fondation, couche de base, nature et intensité du trafic). (7)



Figure II- 4 : Tout Venant de Reg de traitement



Comparation avec fuseau du Beni Abaès

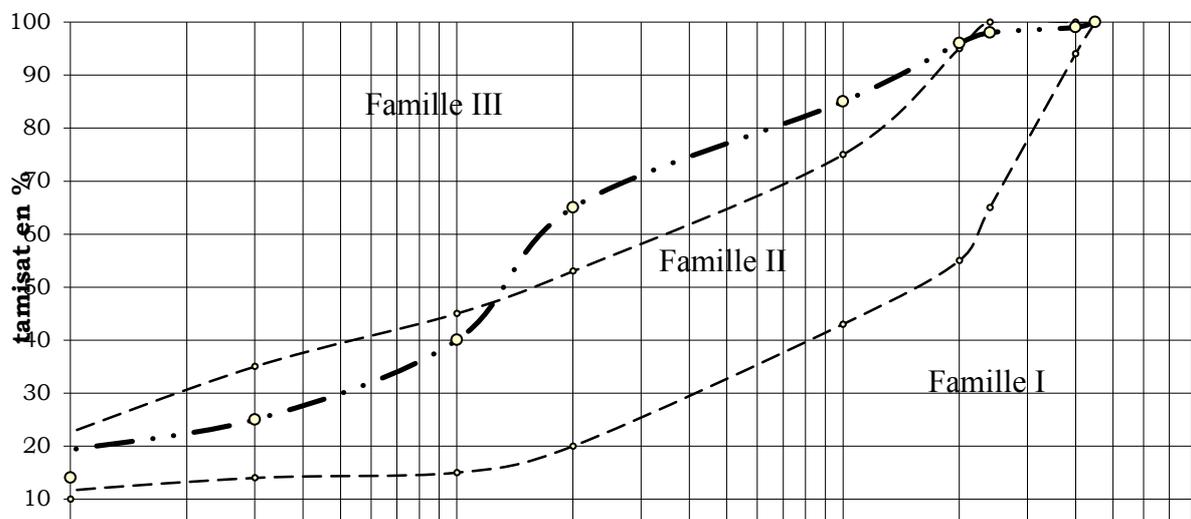


Figure II- 5 : Courbes granulométriques des deux matériaux utilisés par rapport au fuseau de Beni-Abbès (Fenzy, 1966)

Pour l'utilisation de TVR, il faut satisfaire les conditions minimales selon les spécifications des chaussées sahariennes suivant:

1) Matériau à angle de frottement élevé :

- Granulométrie pratiquement dans le fuseau Beni-Abbès.
- Indice de plasticité supérieur à 6 (on admet jusqu'à 10 et 12).
- Un coefficient LA (pour la classe 10/50) inférieur à 40 %, à la rigueur inférieur à 45 % (selon le trafic).
- Un taux de carbonate (CaCO_3) supérieur à 20 %.

2) Matériau à cohésion élevée :

- La courbe granulométrique au-dessus.
- Granulométrie : le taux des fines ($< 0.08\text{mm}$) est inférieur à 30 %.
- Granulométrie : ($< 2\text{mm}$) inférieur à 65 % ou 75%.
- Indice de plasticité inférieur à 16 %
- Un taux de carbonate (CaCO_3) supérieur à 30 %.
- Résistance à la compression simple > 25 bars. (Destiner à la couche de base ; cette condition est largement satisfite). (7)

Les essais d'identification géotechnique, pratiqués dans les laboratoires routiers algériens, s'effectuent selon les normes françaises. Les particules de TVR présentent un diamètre maximum (D_{max}) de 40 mm très solide ($\text{LA} < 25\%$) avec une fraction sableuse (< 2 mm) de l'ordre de 55%, et de 18% de fines d'argile peu plastique ($\text{IP} = 10$). Les résultats de l'analyse chimique sommaire, donnés par le Tableau II-2, montrent que les deux matériaux étudiés sont constitués principalement du 86% (généralement silice) avec des quantités de 8- 6 % de carbonate

c) Exigence de la couche de base de Wirtgen

Les mélanges granulaires jusqu' à 31,5 ou 45 mm de grosseur de grain se prêtent à la réalisation de couches de base liées aux liants hydrauliques. La fraction granulaire supérieure à la plus grande taille de grain ne soit pas être supérieure a 10 %m et la fraction granulaire $\leq 0,063$ mm ne doit pas dépasser 15 %m. En outre, la fraction granulaire ≤ 2 mm doit être comprise entre 16 et 45 %m et la granulométrie parmi la plus grande taille de grain (22,4 mm ou 31,5 mm) doit être inférieure a 90 %m. La quantité de liant ne doit pas être inférieure de **3,0 %m** par rapport au mélange granulaire sec. La quantité de liant doit être déterminée par interpolation.

La quantité de liant doit être choisie de façon à ce que la résistance à la compression moyenne de trois éprouvettes apparentées (diamètre = 150 mm, hauteur = 125 mm) soit, lors de l'essai initial,

- > Sous les couches en enrobe 7,0 N/mm² et
- > Sous les couches en béton $\geq 15,0$ N/mm². (16) (16)

Minéraux	
Analyse granulométrique : NF P 94-056 et 057	
0/D	0/40
< 2 mm (%)	55
< 80 μ m (%)	18
Limites d'Atterberg : NF P 94-051	
Limite de liquidité : w _L (%)	31
Limite de plasticité : w _P (%)	21
Indice de plasticité : I _p (%)	10
Valeur du bleu, VB : NF P 94-068	
Valeur du bleu : VB (0/D)	1.65
Equivalent de sable : NFP 18-598	
Equivalent de sable : ES(%)	50
Compactage et portance : NF P 94-093 et 078	
Teneur en eau optimale : w _{OPM} (%)	6.5
Densité sèche maximale : d _{OPM} / w	2.12
Indice C.B.R. immédiat: I CBR I (%)	74
Indice C.B.R. après immersion : ICBR (4j imbibé) (%)	
Essai Los Angeles : NF P 18-573	
Coefficient de Los Angeles : LA (%)	< 25

Tableau II- 1 : Etablir les caractéristiques important de Tout venant de reg de BBM

<u>Minéraux</u>	ECH 02	ECH 02
Insolubles (%)	86	84
NaOH (%)	-	-
CaCO ₃ (%)	06	08
NaCl (%)	-	-
SO ₃ (%)	00	00
Autres (%)		

Tableau II- 2 : Résultats de l'analyse chimique.

La recherche de la meilleure adéquation (technique et économique) entre produits de traitement et matériaux à traiter, pour une application donnée remblai, implique de caractériser ces matériaux à partir de paramètres significatifs vis-à-vis des phénomènes intervenant dans la technique du traitement de tout venant de reg

3.3. Paramètres caractérisant la nature de TVR

a. La granularité

La granularité déterminée par l'analyse granulométrique (norme NF P 94-056 et NF P 94-057) et plus particulièrement :

- ▶ la valeur du $D_{max}=40$ mm. Cette caractéristique régit, en particulier, les possibilités pratiques de réaliser le mélange du sol avec le produit de traitement ;
- ▶ le tamisat à 0,08 mm =18%. Cette caractéristique qui exprime la finesse du matériau oriente en grande partie le choix du produit de traitement ;
- ▶ la courbe de granulométrique de tout venant d'oued est bien étalé et uniforme sans craindre

b. L'argilosité

Cette caractéristique intervient, en premier lieu, dans le type d'application pouvant être envisagée de remblai dans le choix du produit de traitement. Dans une moindre mesure, les conditions de réalisation du mélange dépendent également de ce paramètre. En première approche, on peut considérer que plus l'argilosité est élevée, plus la chaux s'impose de préférence aux liants hydrauliques. L'argilosité s'exprime par l'une ou l'autre des deux grandeurs suivantes :

► l'indice de plasticité $I_p=10$ mesuré suivant la norme NF P 94-051. Pour être correctement interprété, cet indice doit, de plus, être précisé par la valeur du tamisat à 0,08 mm (ou 0,4 mm) du sol

► la valeur au bleu de méthylène du sol $VBS=1.65$, mesurée suivant la norme NF P 94-068.

c. Les teneurs en constituants chimiques particuliers

Aucune constituants chimiques particuliers peuvent être présents dans ce Tout Venant de Reg, avec prendre précaution de trouve des gisements de contient de sulfates ou les chlorures, leurs d'effets suivant :

- les chlorures. Ils ont, en général, une action d'accélérateur de prise et de durcissement avec simultanément possibilité de gonflement par création de chloro-aluminates (dans le cas où ce sont les aluminates qui ont été formés en majorité).
- les sulfates et les sulfures. Ce sont les constituants qui présentent la plus forte probabilité de présence dans les sols (sous forme de gypse ou de pyrites) et dans les matériaux de démolition (sous forme de plâtrats). Par expérience, ce sont eux qui s'avèrent les plus néfastes, car leur action peut déjà être très dommageable pour des teneurs de l'ordre de 1 %. En début de prise, ces constituants ont un rôle généralement bénéfique de régulateur de prise, mais, si l'alimentation en sulfates ou sulfures et en eau est suffisante, leur action se poursuit par la formation d'ettringite, espèce cristalline très gonflante pouvant entraîner la destruction de la prise hydraulique.

3.4. Paramètres caractérisant le comportement

Il s'agit de paramètres visant principalement à mieux prévoir les conditions pratiques de malaxage.

Essai d'abrasivité de la fraction grenue.

a. La fragmentabilité des éléments grossiers (supérieurs à 50 millimètres)

Cette caractéristique devrait permettre d'appréhender la limite de réalisation pratique du malaxage avec des outils animés (pulvérisateurs de sols principalement). Les éléments grossiers ne sont pas dépassé 40 cm, donc cette n'est pas concernant à l'étude



Figure II- 6 : Essai bleu de méthylène

b. L'abrasivité de la fraction grenue (supérieure à 0,08 millimètres)

Cette caractéristique est responsable de l'usure plus ou moins rapide des outils de malaxage. La connaissance de la nature pétrographique de la roche mère dont est issu le sol à traiter constitue une première indication. Le tout venant d'oued est constitué des grains de forme a facilité la maniabilité de mélange, donc cette caractéristique n'est pas une grande caractéristique significative.

4. L'IDENTIFICATION DU PRODUIT DE TRAITEMENT

Toute étude de formulation réalisée pour définir la solution de base soumise à l'appel d'offres doit se faire avec un produit de traitement identifié selon les caractéristiques prises en compte dans les normes ou les avis techniques en vigueur.

Pour l'objectif de traitement, on recherche sur un liant qui amplifie la résistance à la compression et à la traction, pour obtenir un Tout Venant de Reg de cohésion permanente dont l'importance adéquate.

Le liant hydraulique routier est plus développé que l'utilisation en construction routier, par rapport au ciment, à cause de son avantage économique et technique. Le choix de ciment se fait au préalable, rien à voir avec leur avantage.

On a obtenu le ciment de la cimenterie Sidi Moussa d'Adrar de ensachage, il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II /A 42.5 NA 442 à la norme NF P 15-301.

L'étude des caractéristiques mécaniques a été réalisée pour les dosages en liants de 3%, 5% et ajouté le dosage 7%, pour la comparaison (en générale le dosage de ciment dans l'intervalle [2-6])

, la phase d'élaboration du projet où ils sont habituellement engagés

5. L'ETUDE DE FORMULATION

Elle a pour objet d'établir, généralement sous forme d'abaques, les règles régissant les dosages à appliquer à un Tout Venant de Reg, L'indice partant immédiat (IPI) du sol à sa teneur en eau naturelle est le paramètre qui, au stade des études, est souvent le mieux adapté pour déterminer le dosage du produit de traitement à introduire dans le Tout Venant de Reg.

L'état hydraté dans zone désertique, il y a une importance parce que les matériaux sont presque secs avec l'évaporation qui est très rapide, sauf dans les endroits au passage d'oued.

La méthodologie de l'étude de formulation consiste à humidifier la fraction 0/20 mm des échantillons, constitués au cours de l'étude de qualification, à trois teneurs en eau (on retient

autant que possible les valeurs extrêmes de la plage des états hydriques prévisibles pour la période d'exécution et la moyenne des valeurs mesurées lors des reconnaissances). Les échantillons ainsi préparés sont mélangés à des dosages croissants de produit de traitement (au moins trois dosages par teneur en eau) choisis dans un domaine économique réaliste.

Chaque mélange est ensuite compacté selon les conditions opératoires définies dans la norme NF P 94-093 et on détermine la valeur de l'IPI de chacun d'eux conformément à la norme NF P 94-078.

5.1. Modes opératoires et résultats expérimentaux

Afin de rechercher la composition optimale du mélange, des essais de compactage et de portance ont été effectués sur les différents mélanges. Des essais de compression simple à différents âges ont été réalisés sur des éprouvettes compactées à l'optimum Proctor modifié (OPM) de chaque mélange.

Pour chaque mélange, on fait un essai de proctor pour trouver la densité sèche maximale et la teneur en eau optimum.

5.1.1 Essai Proctor

L'essai Proctor a pour but de déterminer pour un compactage normalisé d'une intensité donnée la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale. Cet essai a été effectué selon la norme (NF P 94-093).

L'effet du traitement au ciment sur les caractéristiques de compactage à savoir la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale est représenté dans le tableau sous dessous. Les résultats Figure II-7, B montrent que l'ajout du ciment décale légèrement la densité sèche maximale et augmente la teneur en eau optimum, si on prend la teneur en eau $W_{opm} + 1$ comme, il est définie dans la norme NF P 98 114-3, on a resté dans l'intervalle [6.5-7.5].

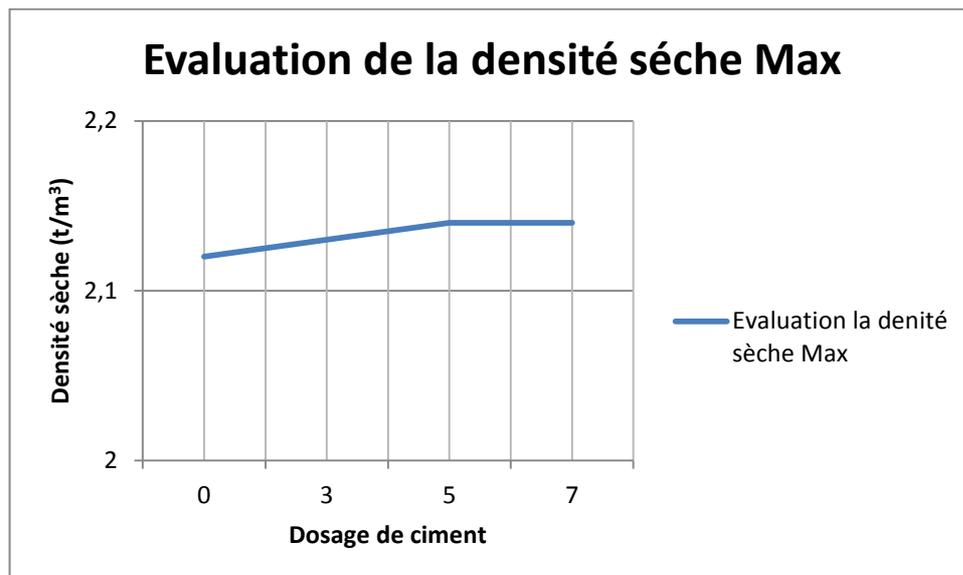


Figure II- 7 : Evaluation de la densité sèche maximale en fonction le dosage de ciment

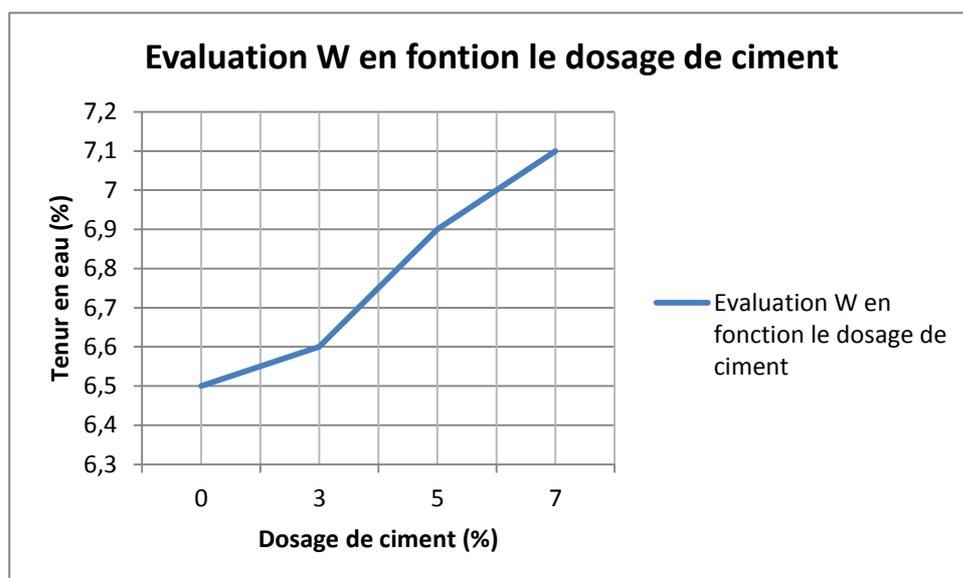


Figure II- 8 : Evaluation de la teneur en eau optimale en fonction le dosage de ciment

5.1.2. Préparation des échantillons

- éliminer par tamisage, le cas échéant, les éléments dépassant 5 mm ;
- fabriquer le mélange manuellement et observer entre l'introduction du produit de traitement et le compactage statique les délais indiqués (n'est dépassé pas 15 min maximum). La qualité de l'homogénéité est appréciée visuellement.

a. Confection les éprouvettes

Mouler, à l'aide de la presse de confection trois éprouvettes : (d =5 cm et h= 10 cm).

Les caractéristiques de moulage des éprouvettes sont :

- teneur en eau = teneur en eau du mélange ramné au l'essai proctor modifié;

— masse volumique humide = 98 % γ_{opm} ;

Le démoulage de chaque éprouvette est réalisé immédiatement après confection. Elles sont moulées dans sans un étui pendant la durée de conservation.

b. Conservation des éprouvettes

Dans le cas d'un traitement avec un ciment, conservé un série des éprouvettes à déférente âge (7 et 28 jour) dans à l'air libre, et immergée un autre série dans l'eau pendant 3 jours après 28 jour de conservation (17)

NB : La conservation dans l'étui est bien représenté l'éprouvette en pratique, comme la respectons les conditions climatique normalisé est évité les micros fissure d'éprouvette qui chuter les résistances



Figure II- 9 : Réprésenet les éprouvettes de sable de Tout Venant de Reg

5.1.3 Essai de résistance à la compression simple

Les essais de compression simple ont été réalisés à l'âge 7 et 28 jours. En effet, chaque éprouvette est soumise à un effort de compression appliqué parallèlement à l'axe du cylindre à l'aide d'un piston à une vitesse constante 1,27 mm/min jusqu'à la rupture. L'évolution de la résistance à la compression simple en fonction de l'âge des différents mélanges est présentée sur la Figure II-10.



Figure II- 10 : Photo d'essai la compression simple de sable de Tout Venant de Reg

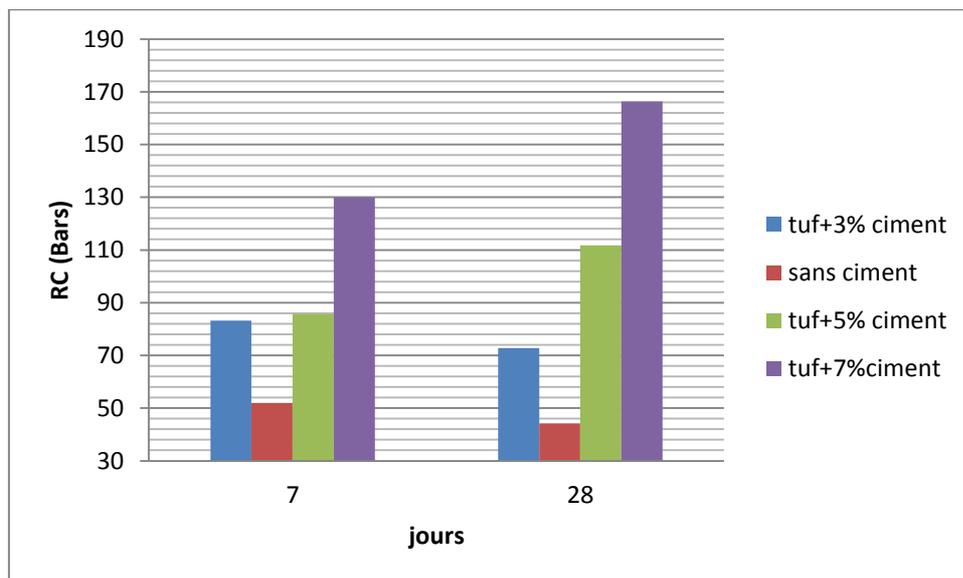


Figure II- 11 : représente l'évaluation de résistance à la compression simple de chaque dosage de ciment de 7 jours et 28 jours

Les résultats maintiennent l'amélioration significative de la résistance de Tout Venant de Reg à la compression simple, malgré le pourcentage faible de l'additive de ciment pour différents âges. A titre indicatif, on remarque à 28 j de 5% de ciment que ce mélange acquiert une résistance à la compression simple maximale de l'ordre de 11 MPa correspondant à un gain de plus 50% par rapport au Tout Venant de Reg sans ciment, ces mêmes résultats qui ont été obtenus par [Doual. Idriss, Achour Yacine]

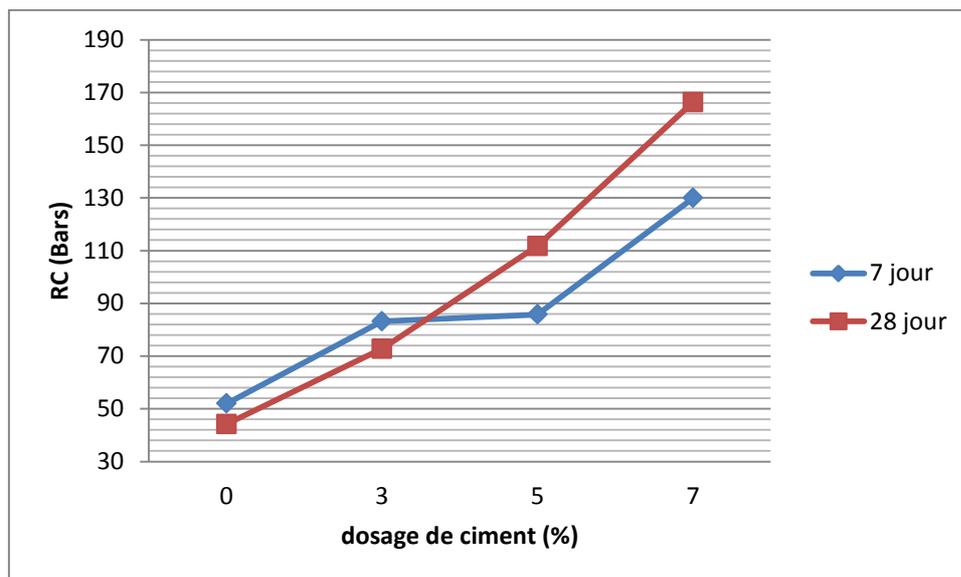


Figure II- 12 : Evaluation de resistance à la compression simple de 7jours et 28 jours en fonction le dosage de ciment

Le Figure II-12 C démontre que le TVR sans traité est lâche sous l'effet de condition climatique désertique (séchage, changement de température,...) ; même de mélangé de TVR avec de 3% de ciment, le résultat d'écrasement d'éprouvette en compression simple de 28 jours est donné un résultat inférieur celui trouve en 7 jours.

Le traitement au ciment a donné le nouveau matériau quelque des caractéristiques mécaniques de ciment au TVR ; on a bien observé que les caractéristiques mécaniques de mélange de 5% et 7% de ciment additive a été changé rational (au contraire le TVR non traité après 28jours la résistance à la compression est augment). Donc on peut dire que le durcissement de ciment après 28 jours a remplacé la faiblesse de la cohésion de TVR, qui on recherche comme un objective

5.1.4 Résistance en compression diamétrale (traction indirecte).

La mesure de ce paramètre est réalisée sur les éprouvettes conservées. Sa valeur est la moyenne des valeurs mesurées sur trois éprouvettes de la manière suivante :

- après observation des délais et des modalités de conservation ;
- elles sont alors écrasées en compression diamétrale conformément au processus décrit dans la norme NF P 98-232-3 et on note la valeur de la résistance à la rupture.

L'effet de l'ajout de ciment sur la résistance à la Traction R_{tb} du TVR –ciment. Les mêmes constatations peuvent être faites, on constate que le traitement conduit à une augmentation

significative de la résistance à la traction. Pour une teneur de 7 % de ciment, les éprouvettes conservées à 28 jours présentent une résistance à la traction de l'ordre de 1,3 MPa, soit plus de deux fois celle du matériau non traité.

La résistance est déterminée à partir de la force appliquée par la presse au moment de la rupture de l'échantillon (F_r en N) en utilisant la formule suivante :

$$R_{it} = 2 F_r / \pi h \varnothing$$

Avec R_{it} en MPa, la résistance à la traction indirecte de l'éprouvette de mélange traité aux liants hydrauliques

F_r en N, l'effort maximal supporté par l'éprouvette

h en mm, la longueur de l'éprouvette

\varnothing en mm, le diamètre de l'éprouvette

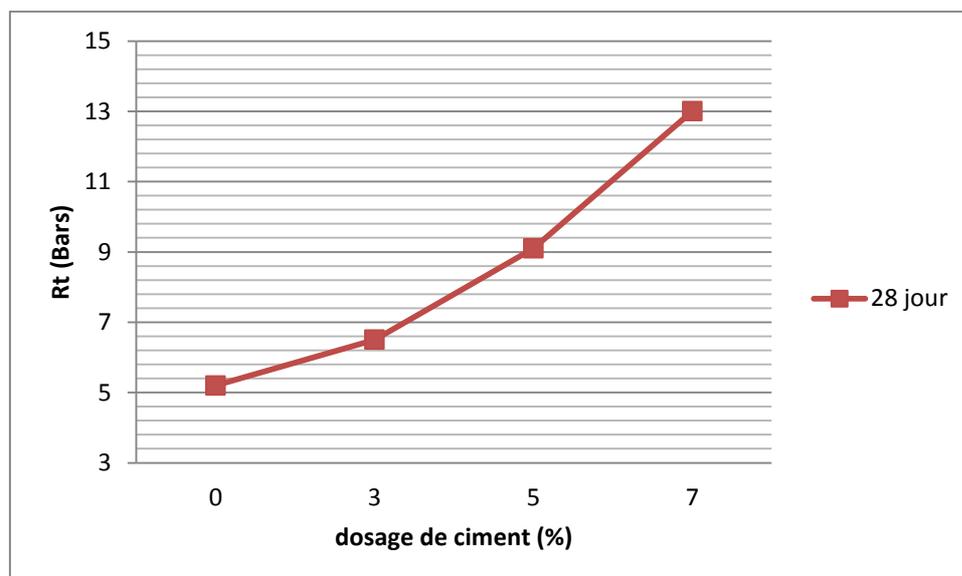


Figure II- 13 : Variation de la résistance à la compression diamétrale en fonction du pourcentage de ciment à 28 jours de conservation

5.1.5 . Essai CBR

Sur la base des normes françaises, l'indice CBR est utilisé pour estimer l'épaisseur d'un corps de chaussée. On le détermine immédiatement après le compactage selon la norme NFP 94-078. On montre que la portance immédiate croît continuellement dans la plage des teneurs en ciment (0-7%), se traduisant par une augmentation de l'indice portant immédiat de plus 50%, alors que l'indice portant baisse tout en gardant des valeurs supérieures à celles du TVR sans ajout dans la plage des teneurs en ciment testées.

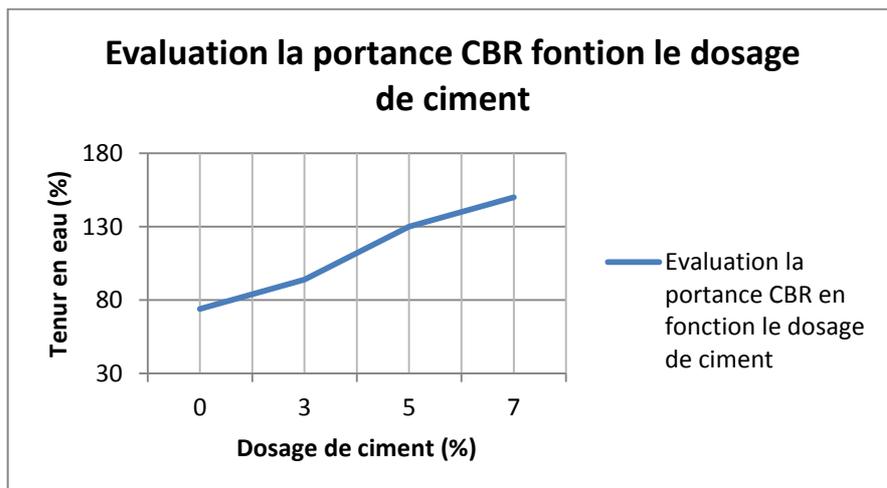


Figure II- 14 : Evolution des indices CBR en fonction du pourcentage de l'ajout de ciment

5.2. Sensibilité à l'eau

Les essais d'immersion montrés qu'une forte augmentation de la teneur en eau détruit totalement la cohésion due au séchage de ce type de matériau. Pour pallier de ce problème de non stabilité du matériau en milieu saturé un traitement aux liants hydrauliques s'avère nécessaire. Les éprouvettes de mélange optimal de TVR traité avec 3%, 5% et 7% de ciment Portland après 4 jours d'immersion dans l'eau, est détruit selon le dosage de ciment additionné ; l'éprouvette de TVR sans ciment est détruit totalement, mais l'éprouvette de 7% de ciment est restée de bon état, même leur résistance à bien conservée (la Figure II-16 représente un baissment légère de la résistance à la compression simple de mélange de 7% ciment)

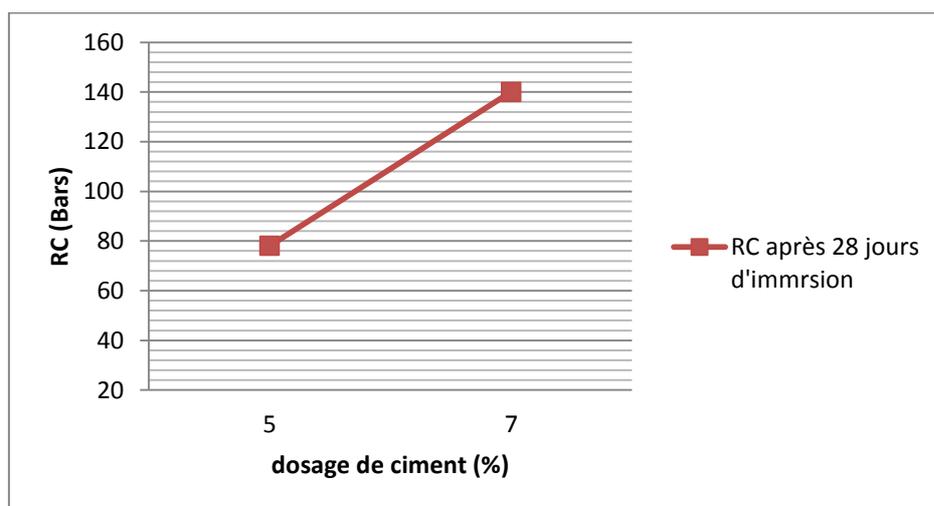


Figure II- 15 : Résistance à la compression simple à prés 28 jours et 3 jours d'immersion en fonction le dosage de ciment

➔ Figure II- 16 : les épreuves après 3 jours d'immersion



➔ Figure II- 17 : les épreuves après 3 jours d'immersion et après 3 heures en hors d'eau



Plus le traitement au ciment est éliminée partiellement la sensibilité de TVR à l'eau, le ciment accéléré le séchéat de TVR (la couche supérieure le TVR traité au ciment joué le roule d'étanchéité du corps de chaussée), voire la figure II-18

6. CONCLUSION :

Le traitement de TVR de BBM au ciment de 3% globale est satisfaisant largement les exigences minimales de la couche de base à la région saharienne

Chapitre III Action et technique de traitement

1. CONTEXTE TVR-CIMENT

Cette synthèse est d'abord destinée à rappeler les principales caractéristiques chimiques, à court et à long termes, d'une pâte de ciment et par extension des matériaux cimentaires (mortier et béton). En effet, les processus se déroulant au sein d'un matériau traité au liant hydraulique sont considérés comme étant identiques à ceux qui se déroulent au sein d'une matrice cimentaire.

Ces phénomènes sont ensuite rapportés à l'échelle d'un sol traité. Les quantités et les proportions des hydrates sont différentes, les valeurs de pH, les concentrations en calcium des sols et la porosité des sols traités compactés sont plus faibles, *etc.*

Sont alors développées les modifications des caractéristiques structurales et mécaniques des sols générées par l'utilisation d'agents chimiques et par des conditions de compactage contrôlées.

Enfin, afin de fixer les paramètres géotechniques d'une étude physique et mécanique des sols traités, leur mode de réutilisation est défini. En effet, du type de valorisation envisagé découle une stratégie d'étude dont le déroulement est explicitement abordé.

1.1 Principes d'action des liants hydrauliques

On peut distinguer également des actions immédiates et des actions à long terme, mais, avec ces produits, ce sont principalement les modifications à moyen et long terme qui sont recherchées.

1.1.1. Actions immédiates

L'action immédiate du ciment est limitée. Cependant lors de l'utilisation d'un liant hydraulique comportant une forte proportion de chaux, la floculation des argiles peut se produire. Plus généralement, les liants hydrauliques sont considérés comme des correcteurs granulométriques améliorant les caractéristiques du sol lors du compactage et de l'essai de portance immédiat.

a. Modifications de l'état hydrique

Les actions immédiates portent principalement sur l'état hydrique du sol qui subit un

assèchement du fait de l'ajout d'une certaine quantité de matière sèche et, dans une moindre mesure, de la perte d'eau consommée dans l'hydratation du liant. Cet assèchement qui selon les dosages appliqués, reste théoriquement de l'ordre de 0,3 à 0,5 % de teneur en eau par pourcent de liant, ne prend cependant pas en compte, l'évaporation plus ou moins importante pouvant se produire au cours du malaxage sur le chantier.

b. Modifications des caractéristiques de la fraction argileuse du sol

Avec certains liants spéciaux routiers comportant une forte proportion de chaux (vive ou éteinte), il faut également inclure dans les modifications immédiates la floculation des minéraux argileux, comme cela a été décrit pour la chaux (mais sans être ni aussi rapide, ni aussi intense).

1.1.2. Actions à moyen et long terme

L'objectif de la stabilisation d'un sol aux liants hydrauliques est de former rapidement les hydrates calciques. Dans le cas du ciment, il est admis qu'après 28 jours la quasi-totalité du ciment a réagi, c'est-à-dire que les caractéristiques sont presque définitives. Cet écart provient du fait que lors du traitement au ciment, les minéraux aux propriétés liantes se développent directement à partir du ciment. Des C-S-H se forment à partir de l'alite (C₃S) et de la bélite (C₂S). L'hydratation de l'alite et de la bélite mais aussi des aluminates calciques provoque la libération d'un excès de chaux qui donne de la portlandite. L'aluminate calcique permet la formation de différentes phases dont des aluminates calciques hydratés (C₄AH₁₃ et C₃AH₆), de l'ettringite et du monosulfoaluminate en se combinant avec le soufre.

Dans le cas des bétons et des graves/sables traités au ciment, le ciment forme une coque enrobant le granulat (Figure III-1). (18)

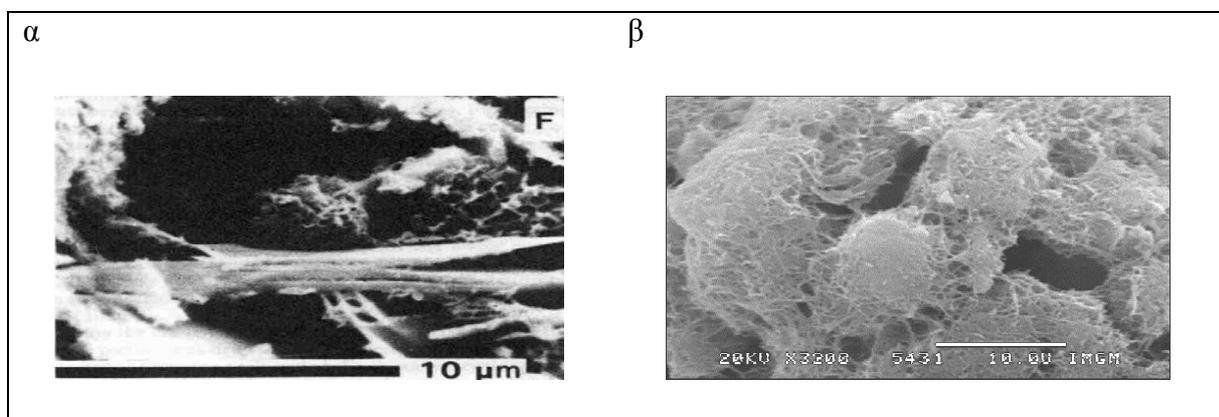


Figure III- 1 : Hydrates calciques développés par réaction pouzzolanique à partir d'argiles (α) et du quartz (β) (18)

(α) C-S-H « réticulés » et C-S-A-H « aplati » se développant à la surface des particules d'argiles

(β) C-S-H de structure fibreuse (réticulée) formant une couche adhérente à la surface des grains de quartz. (18)



Figure III- 2 : Microstructure d'un sable traité au ciment puis compacté
Le ciment forme une coque enrobant chaque grain de sable. La coque moule la topographie de chaque grain et assure leur liaison. (18)

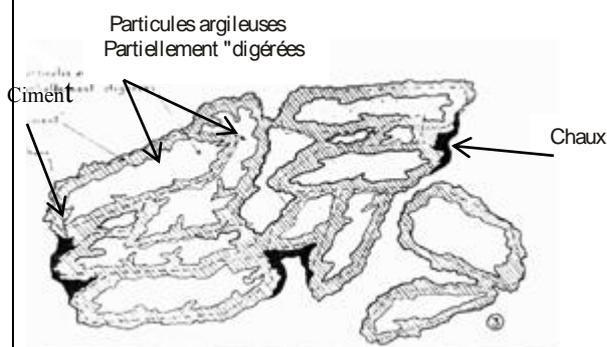


Figure III- 3 : dessin microstructure d'argile traitée au ciment et à la chaux ; le ciment forme une coque enrobant (18)

Elles résultent de la prise hydraulique qui confère aux matériaux traités une résistance en traction qui devient alors prédominante dans leur comportement. La valeur de cette résistance peut être choisie dans un domaine extrêmement large en fonction principalement du liant hydraulique et du dosage retenus.

On peut considérer, en simplifiant, que la prise hydraulique se développe en trois étapes.

La durée de chacune d'elles dépend de la nature du liant et de la température du mélange.

- **La première étape** est celle du démarrage de la prise (également dénommée : phase dormante). Elle correspond au temps nécessaire à la mise en solution et à la précipitation

sous forme de gel des silico-ferro-aluminates de calcium dans l'eau libre du sol. Ce temps qui correspond au « délai de maniabilité » peut varier entre 2 et 24, voire 48 h après fabrication du mélange. Ce délai est très important dans les opérations de traitement de sols, car il fixe la durée possible des opérations de mise en oeuvre.

- **La deuxième étape** correspond au développement de la cristallisation du gel et donc de la rigidification du mélange provoquant la prise hydraulique proprement dite. Elle s'étend de quelques jours pour les liants à forte proportion de clinker (ciments de type CPA-CEM I, par exemple) à quelques semaines pour les liants à prise lente comme certains liants spéciaux routiers.
- **Enfin**, une fois la prise terminée, c'est-à-dire après formation de la quasi-totalité des ferro-silico-aluminates hydratés, il y a une période dite de durcissement qui correspond à la **troisième étape** durant laquelle on observe une poursuite de la croissance des résistances mécaniques, sa durée peut s'échelonner, toujours suivant la nature des liants et pour les climats tempérés, entre quelques semaines et plusieurs mois.

En traitement de sol, les durées de prise et de durcissement interviennent pour évaluer, d'une part, le temps au bout duquel il est possible de solliciter mécaniquement le matériau traité (notamment la possibilité d'être circulé par les engins de chantier) et, d'autre part, les délais d'étude nécessaires pour caractériser les résistances pouvant être escomptées à long terme avec la formule du mélange retenue.

On peut considérer, comme pour la prise d'origine pouzzolanique, que la prise des liants hydrauliques s'interrompt dès que la température du mélange descend en dessous de 5 C, toutefois, étant donné que, pour la plupart de ces liants, la cinétique de prise est beaucoup plus rapide, les sujétions pratiques d'origine climatique sont évidemment moins contraignantes que dans le cas de la chaux. Il convient, néanmoins, de prendre cet aspect en considération, notamment lorsqu'il s'agit d'évaluer la résistance du sol traité à l'âge correspondant à l'apparition probable du gel sur un chantier donné.

La particularité essentielle des liants hydrauliques étant, comme indiqué plus haut, de pouvoir, en jouant sur le liant et le dosage, fabriquer des matériaux dont le niveau de performances (défini généralement par une résistance en traction et un module) correspond au dimensionnement retenu pour l'ouvrage envisagé, il faut tout d'abord rechercher le type de liant adapté à la nature du sol à traiter et aux sujétions de mise en oeuvre du chantier et, ensuite, déterminer la valeur du dosage de ce liant à mélanger avec le sol.

Quant aux liants spécifiques routiers, les connaissances actuelles ne sont pas encore suffisantes pour considérer l'adaptation d'un liant à un type de sol donné acquise a priori. Avec ces produits, une étude spécifique de confirmation est donc, en principe, toujours nécessaire.

1.2 Influence de temps de maniabilité sur la résistance de matériau traité

On a fait petite essai pour évaluer Influence de temps de maniabilité sur la résistance de matériau traité, puis confirmer la norme qui dite que la fabrication du mélange manuellement et observer entre l'introduction du produit de traitement et le compactage statique les délais indiqués n'est dépasse pas 15 min maximum.

On a préparé des éprouvette de deux mélange (1) et (2) ; à chaque serie , on a marqué le fin de temps de fabrication d'éprouevette. Après 7jours , on a soumis les éprouvettes à la compression simple ; les résultats obtunu sont présentés dans la figure

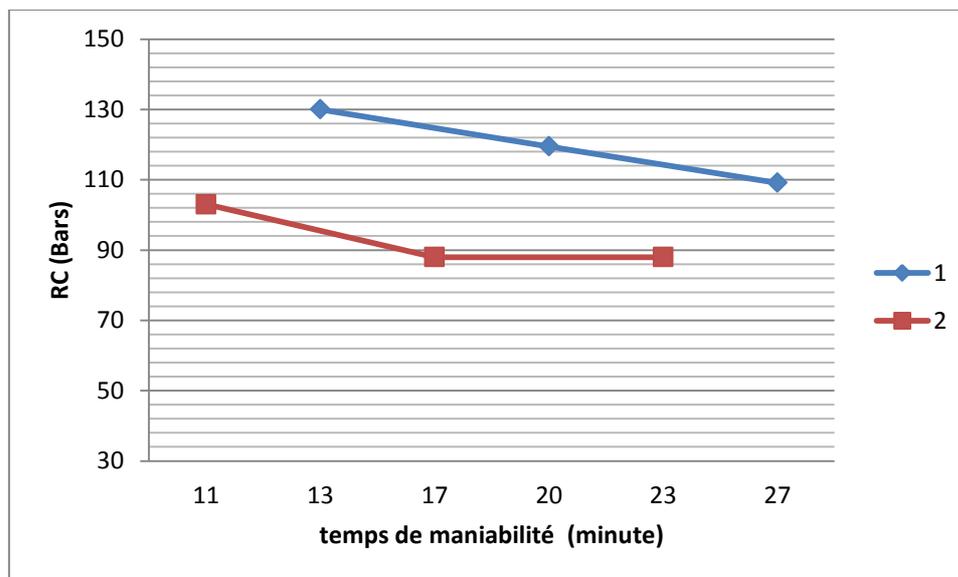


Figure III- 4 : Représente l'influence du temps de la maniabilité sur la résistance

2. AVANTAGES DE LA TECHNIQUE DE TRAITEMENT

Le traitement des tufs au ciment est une technique qui offre trois types d'avantages : techniques, économiques, écologiques et environnementaux.

2.1 Avantages techniques

Le traitement des tufs au ciment permet la réalisation en remblais et en couches de forme, d'une couche traitée homogène, durable et stable, présentant des caractéristiques mécaniques comparables à celles d'une grave-ciment ou grave hydraulique. En outre, cette technique assure une bonne répartition des charges sur le support, grâce à la rigidité de la nouvelle

structure. Enfin, le traitement des tufs est une technique possédant une facilité d'adaptation aux contraintes d'exploitation.

2.2 Avantages économiques

La réutilisation des matériaux en place est un facteur d'économie important puisqu'il réduit au minimum les déblais issus du décaissement, la mise en décharge, l'apport de granulats et le coût de leur transport. L'absence de transport de granulats ou des déblais en décharge contribue à la préservation du réseau routier situé au voisinage du chantier. Enfin, le traitement des tufs est une technique très économique, notamment du fait de la durée plus courte des travaux par rapport à une solution avec décaissement.

2.3 Avantages écologiques et environnementaux

Cette technique permet une importante économie d'énergie globale, par la réduction des matériaux à transporter, des matériaux à mettre en décharge et donc une diminution de impacts indirects, des gênes à l'usager et aux riverains. La réutilisation des matériaux en place limite l'exploitation des gisements de granulats (carrières, ballastières), ressources naturelles non renouvelables, ce qui contribue à préserver l'environnement. (19)

3. LES TECHNIQUES ET MATERIEL D'EXECUTION

Le traitement des sols en remblai nécessite l'utilisation de matériels spécifiques comme des silos de stockage, des épandeurs à doseur volumétrique asservis à la vitesse d'avancement, des engins de malaxage constitués principalement par des charrues à disques ou à socs.

La technique d'exécution habituelle est celle du traitement "en place". Elle consiste à épandre le produit de traitement, dans le déblai ou sur le remblai, puis à le malaxer avec le sol.

Des modalités de mélange différentes peuvent, cependant, se révéler plus pertinentes avec des matériaux particuliers tels que les craies ou le matériau blocailleux.

Pour cette tâche, l'assurance de la qualité vise principalement à optimiser la consommation de produits de traitement. Cet aspect doit être pris en compte, tout d'abord, dans la formulation des stipulations, de manière à établir une répartition équitable des conséquences financières résultant des aléas portant sur les quantités de matériaux à traiter et de produit de traitement à utiliser. Ensuite, durant la phase d'exécution, différentes actions d'assurance de la qualité sont à réaliser afin de vérifier, d'une part, la conformité des ateliers de traitement avec les engagements pris et, d'autre part, le respect des modalités assurant l'optimisation de la consommation du produit de traitement recherchée.

La réalisation des couches en sols traités au liants hydrauliques requiert l'exécution de différentes opérations élémentaires qui doivent être exécutées selon un ordonnancement

précis et, pour certaines des entres-elles, en un temps n'excédant pas le délai de maniabilité du mélange. Une certaine partie seulement de ces opérations élémentaires est à exécuter dans tous les cas de chantier, ce sont :

- ▶ La fabrication du mélange (en place ou en centrale)
- ▶ Le pré réglage
- ▶ Le compactage partiel
- ▶ Le réglage final
- ▶ Le compactage final
- ▶ L'application d'une protection superficielle



Figure III- 5 : malaxage en centrale (16)

3.1 La préparation initiale du sol.

Elle a pour objet l'homogénéisation des caractéristiques de nature et d'état hydrique du sol pour les mettre en concordance avec les valeurs considérées dans l'étude du matériau traité.

Les techniques et le coût de cette opération sont souvent difficiles à définir avec précision au stade de l'étude du projet.

3.2 La fabrication du mélange.

Dans le cas de la fabrication en place, cette opération comprend:

- ▶ L'épandage du produit de traitement ;
- ▶ Le malaxage de ce produit avec le sol ;

3.3 L'ajustement de l'état hydrique du mélange, le cas échéant.

Le mélange ne peut être fabriqué dans une centrale que pour des sols dont l'écoulement dans les organes de dosage se fait correctement. Ce qui n'est possible qu'avec des sols non argileux ou des sols moyennement argileux prétraités à la chaux.

En centrale, la formulation, le malaxage et l'épaisseur sont beaucoup mieux maîtrisés. Mais le transport des matériaux engendre une augmentation du trafic poids lourds sur la voirie locale. Elle est donc plutôt réservée aux grands chantiers où la mise en place d'une centrale mobile peut se faire sur le site même.

Le traitement en place peut poser des problèmes environnementaux mais reste d'un coût souvent inférieur au traitement en centrale. Il est aussi plus souple d'utilisation.

3.5 Le réglage.

Pour garantir la conformité de l'épaisseur de la couche traitée à la valeur prise en compte dans le dimensionnement de la structure, il est impératif que le réglage soit obtenu par rabotage, sur toute la surface de la couche, d'une certaine épaisseur de sol traité. Ceci nécessite d'effectuer le réglage en deux séquences avec un préréglage à une cote qui permet après compactage d'assurer une surépaisseur pour permettre le réglage final.

3.6 Le compactage.

Il a pour objet l'obtention de valeurs de compacité, notamment en fond de couche, conformes à celles prises en compte dans l'étude du dimensionnement de la structure. Il doit se faire également en deux séquences séparées par l'opération de réglage fin.

3.7 La protection superficielle

Elle a pour objet de maîtriser l'évaporation du sol traité et /ou de le protéger de l'imbibition durant la prise hydraulique. Elle a également souvent un rôle de protection vis-à-vis des émissions de poussières et des agressions du trafic de chantier.

4. MATERIELS DE TRAITEMENT DES SOLS

Suivant les chantiers, les travaux de traitement des sols peuvent nécessiter des ateliers comprenant tout ou partie des matériels suivants :

- ▶ matériels de stockage des produits de traitement ;
- ▶ matériels d'épandage ;
- ▶ matériels de préparation des sols ;
- ▶ matériels de malaxage des sols en place ;
- ▶ matériels d'arrosage ;
- ▶ centrales de fabrication ;
- ▶ matériels de compactage ;
- ▶ matériels de réglage et de protection superficielle ;



Figure III- 6 : Epandeuse/ tombereau articulé à gauche et pulvi-mixeur à droite

4.1. Matériels de stockage des produits de traitement

Dans la pratique française actuelle, les produits de traitement utilisés se présentent quasi exclusivement sous forme pulvérulente et sont livrés en vrac. Exceptionnellement, l'utilisation de chaux ou de ciment, conditionné en sacs de 40 ou 50 kg palettisés, peut être envisagée dans le cas de petits chantiers (inférieurs à 2 000 m², en général). Leur stockage doit alors être réalisé à l'abri des eaux pluviales et de ruissellement.

Dans les autres cas, le stockage, dans des silos, des produits de traitement livrés en vrac s'impose pour les deux raisons suivantes :

- ▶ nécessité de disposer d'une réserve suffisante de produit de traitement pour absorber les aléas normaux d'approvisionnement du chantier,
- ▶ laisser aux produits de traitement, très souvent livrés chauds, un temps de repos permettant leur refroidissement et la neutralisation des charges d'électricité statique, conditions nécessaires à un écoulement stable (non fusant) permettant la réalisation d'un épandage précis.

La terminologie relative aux matériels et dispositifs de stockage est définie dans la norme NF P 98-711.

Les aspects à considérer dans le choix et l'organisation du stockage des produits de traitement sont :

- ▶ La capacité de stockage
- ▶ La qualité de conservation des produits stockés

► La mobilité : Cet aspect concerne surtout le traitement en place réalisé sur des chantiers linéaires (routes, voies ferrées, etc.), pour lesquels il est impératif de réduire les distances de remplissage des épandeurs.

► Le choix et l'aménagement de la zone de stockage

4.2. Matériels d'épandage

Le traitement en place des sols se fait quasiment toujours à l'aide d'épandeurs alimentés avec des produits livrés en vrac. L'épandage « au sac » sur des plates-formes préalablement quadrillées, pour délimiter la surface correspondant à la masse de produit contenue dans un sac, est néanmoins acceptable au plan technique, mais ne peut s'envisager économiquement que sur des petits chantiers de géométrie complexe.

La terminologie relative aux matériels et dispositifs d'épandage est définie dans la norme N F P 98-712.



Figure III- 7 : les engins d'épandage

4.3. Matériels de préparation des sols

Certains sols ou matériaux rocheux peuvent nécessiter une préparation avant de procéder à leur traitement, principalement pour les applications autres que la réutilisation en remblai de sols trop humides. Celle-ci peut nécessiter tout ou partie des opérations suivantes.

- Une décohésion du matériau en place
- L'élimination des éléments blocailloux
- Une homogénéisation de la nature des matériaux du gisement
- Une humidification pour changer d'état hydrique



Figure III- 8 : engins d'élimination de l'élément blocaille

4.4. Matériels de malaxage des sols en place

Ils sont constitués principalement par deux familles d'engins :

- ▶ les malaxeurs à outils fixes, représentés par les charrues et, éventuellement, les engins à lame (niveleuses, boteurs équipés de lames traditionnelles ou de lames spécialement conçues pour cet usage, etc.) ;
- ▶ les malaxeurs à outils animés, représentés par les pulvérisateurs de sols (dénommés pulvixers dans le passé) et les bêches mécaniques et, dans une certaine mesure, les décapeuses élévatrices (ou auto-chargeuses).

La terminologie relative aux matériels et dispositifs de malaxage est définie dans la norme NF P 98-712

4.5. Matériels d'arrosage

Ces matériels ne sont concernés que par les applications du traitement autres que la réutilisation en remblai des sols trop humides, mais, pour ces applications, leur action est souvent déterminante pour le succès de la technique. Ils sont constitués par des engins de conception très variable, souvent issus du machinisme agricole ou fabriqués dans les ateliers des entreprises, mais qui, le plus souvent, ne permettent pas de réaliser la maîtrise des ajustements de l'état hydrique avec la précision souhaitable (ou du moins cohérente avec celle déjà atteinte par les épandeurs et les pulvérisateurs de sols).

La conception de ces engins doit être améliorée, en particulier sur les points suivants

- ▶ la maîtrise précise des quantités d'eau épandues,
- ▶ la suppression du ruissellement par la réalisation d'une scarification superficielle avant arrosage et/ou la conception des dispositifs d'aspersion adaptés.

Par ailleurs, il faut insister sur la nécessité, pour chaque chantier, de vérifier l'ajustement des moyens d'arrosage aux besoins prévisibles, car l'expérience a montré que l'importance de cette opération n'était souvent pas comprise et qu'elle avait tendance à être négligée du fait des lourdes contraintes de chantier qu'elle impose.

4.6. Centrales de fabrication

Ces matériels sont généralement ceux utilisés pour la fabrication des assises traitées aux liants hydrauliques, équipés, si le matériau contient une fraction fine significative, de certains dispositifs facilitant l'écoulement des matériaux dans les trémies de chargement.

4.7. Matériels de compactage

Pour la construction des corps de remblais, les modalités de compactage des sols traités sont définies dans les tableaux du GTR.

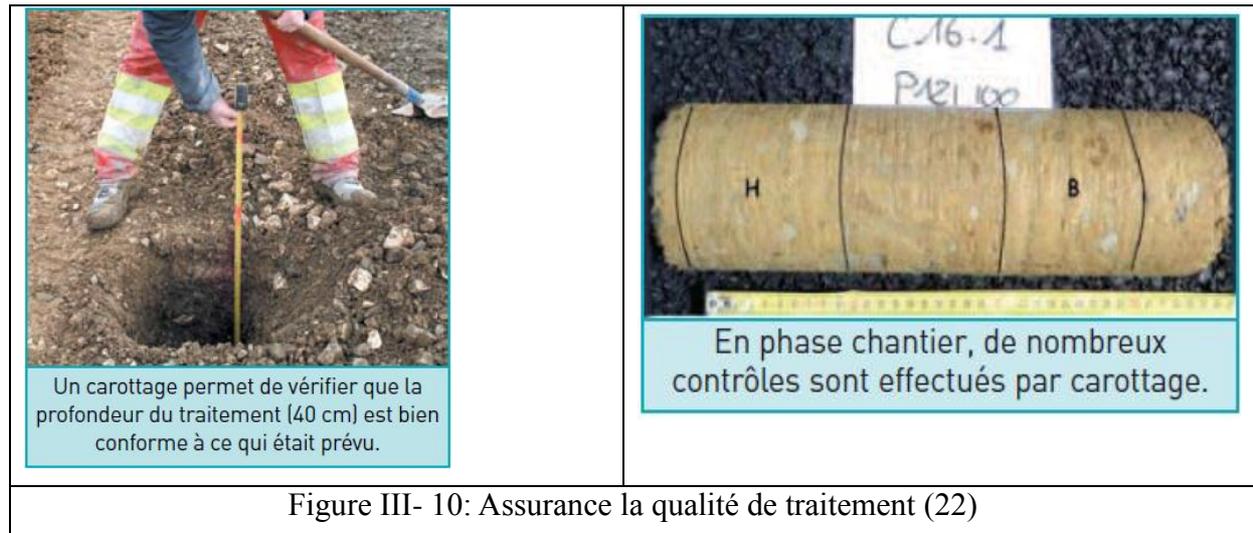
Pour les autres applications des sols traités, et en particulier les couches de forme, les valeurs données dans le GTR peuvent, suivant les particularités des chantiers, être complétées par des exigences supplémentaires précisées.

4.8. Matériels de réglage et de protection superficielle

Ces matériels sont spécifiques à l'application du traitement à la réalisation des couches de forme et, éventuellement, au traitement des arases de terrassement. (20) (21)

5. QUELQUE PROCEDURE D'ASSURANCE DE QUALITE

La Figure III- 9 représenté deux photos , un photo gauche représenté le contrôle d'épaisseur par carottage comme le contrôle de terrassement courant et un photo droite représente le carottage, mais avec le conservation suivant la norme (le matériau traité est possède des caractéristique de matériau naturelle et les caractéristique de béton ou mortier; le norme pour apprécier les résultats, conditionner la conservation en étui et dans endroit de 20°C, presque le même température de conservation de béton) (22)



6. Conclusion :

Le traitement de sol au ciment besoin de grande qualification et expérience ; il est très difficile respecter le taux de maniabilité (2 heures), pour cela les investitures développer des engins de traitement, et fabrique le liant hydraulique qui de taux de maniabilité atteindre 7 heures, mais l'utilisation de ciment et de centrale est valable pour le démarrage au planches d'essai

Conclusion générale

L'utilisation des matériaux locaux est donnée des nouvelles sources et des valeurs économiques important qui n'est pas abouti sans métrise les technique de traitement, le dernier est développé les techniques de réalisation d'infrastructure et le domaine de génie civil généralement. A savoir les marches des pays réussie au traitement de déférentes classe de sol en absence de TVR ou tuf; il est poussé d'engagé de plusieurs recherches profonds pour maitriser cette technique (de plus de 70 ans d'expérience de USA à ce jour). En pratique l'utilisation de ciment est très démode, actuellement remplacé par le liant hydraulique qui plus économique au ciment. Actuellement les recherches vont commencer vers l'amélioration de liant hydraulique et les technique de traitement, en parallèle commence développer les procédures d'assurance de qualité spéciale au traitement, et les matériels de la réalisation de traitement.

L'étude de la reconnaissance et de qualification de matériau à l'aide des données et les résultats disponible au laboratoire (LTPS) de Tableau II- 3 montre que TVR de BBM a été valable au traitement de liant hydraulique. TVR de classe B₅ selon le GTR après des essais identification conformant.

L'étude de la formulation de traitement au liant hydraulique de dosage de (3%, 5% et 7%) de ciment de poids de sable de TVR (passant de tamis 5mm) donne un évolution significative ; Il est donne un bon résultat à l'aide de traitement au ciment ; on a obtenu 11 MPa à la compression simple avec de 5% de ciment correspondant à un gain 6 bars en plus la résistance propre et garantie (la résistance est augmenté après 7 jours)

Après voire le dosage adéquat qui attient les comportement convenable au exigence de la couche de base en milieu désertique, on trouve que matériau amélioré au ciment de dosage de 3%_m (masse de TVR brut) données de valeurs de R_c et R_t suffit largement ces exigences

Après la comparaison des comportements mécanique de TVR traité aux exigences de milieu. De plus le matériau traité peut utiliser en couche de base selon les exigences de matériau traite au liant hydraulique d'Allemande

A similaire la réalisation de projet routier, La planche d'essai est obligatoire pour voir la rentabilité de traitement et adapter le mode d'exécution, tel l'utilisation le centrale pour faire le traitement, mais les matériel actuel est important en cette technique

Bibliographie

1. *TRAITEMENT DES SOLS AUX LIANTS HYDRAULIQUES*. **CROISÉ, R.** 1964, REVUE FORESTIÈRE FRANÇAISE.
2. **IDRRIM**. *Propositions de compléments au guide Traitement des Sols*. s.l. : 2015, 2015.
3. *ÉVOLUTION DES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DES ROUTES*. **BOUTIN, Jean.** 1954, Extrait de la Conférence .
4. *amélioration des propriétés mécaniques des tufs calcaires de la région de Sétif par traitement aux liants hydrauliques dans un environnement humide*. **Yacine, Achour.** Mémoire de Magister Géologie.
5. *Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat: Application en construction routière* . **Doual, Idriss.** 2012, Thèse de doctorat.
6. *Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien*. **DHIA, Mohamed Habib BEN.** 1998, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 213 .
7. *Conception et réalisation des chaussées en milieu désertique*. **Morsli Mérièm, Ameraoul Zoubida, Bali Abdelrahim, Fleureau Jean-Marie.** 2002, Journée Nationale GG .
8. *Construction de Routes en Algérie et au Sahara*. **SACM.** 1958, BULLETIN DU P.CM.
9. *Routes dans des régions en développement* . **AUTRET, Paul.** 1989, livre, p55.
10. *PROSPECTION DES MATERIAUX SAHARIENS*. **KETTAB Ratiba, MORSLI Meriem, BALI Abderrahi, FLEUREAU Jean Marie.** 2002, JNGG .
11. *TYPOLOGIE DES ROUTES ET CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX*. **CPSedit.ma.** s.l. : EXTRAIT DU GUIDE D'AMENAGEMENT DES POINTS DURS.
12. *Stabilisation dans le Sahra*. **CATRPILLAR.** s.l. : Publication Caterpillar destinée au marché mondial de la route, 2010.
13. *Un traitement de sol en place au ciment pour la déviation de Plombières-les-Bains (Vosges)*. **Route.** s.l. : Routes N°100, 2007.
14. *À Ozans, un traitement en place à la chaux et au liant hydraulique routier sur un chantier HQE*. **Route.** s.l. : Routes N°125, 2013.
15. *First evidence for Holocene rainfall in the Tanezrouft hyperdesert and its margins*. **N. Petit-Maire a, D. Commelin a, J. Fabre b et M. Fontugne .** s.l. : Elsevier, 1990.
16. *Traitement des sols aux liants hydrauliques Application à la réalisation des couches de base* . **Wirtgen.** 2016.
17. *Effet de traitement en ciment sur les propriétés géotechniques d'un mélange de tuf et de sable calcaire* . **Idriss Goual, Mohamed Kamel Gueddouda, Mohamed Sayah Goual, Said Taibi.** 2014, 3ème Séminaire International Innovation et Valorisation en Génie Civil et Matériaux de Construction.
18. *SOLS TRAITES À LA CHAUX ET AUX LIANTS HYDRAULIQUE*. **CABANE, Nicolas.** 2004, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université.
19. *Guide Les liants hydrauliques pour la valorisation des matériaux en place*. **CIMbéton.** 2012.
20. *Guide Traitement des matériaux technique d'ingénieur C 5 362 I*. **Pierre ROSSI, Ludovic GAVOIS, Guy RAOUL.** 2008, Editions T.I.
21. *GTR remblais et couches de forme*. **LCPC, SERA.** 2000.
22. *A41 : traitement des sols au liant hydraulique routier en pleine montagne*. **Route.** s.l. : Routes N°106 , 2008.

ANNEXE

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE MODE OPÉRATOIRE

Structure:.....”
 Dossier n° :.....”
 Échantillon :... TVR sans ciment.....”
 Température de séchage :.....”
 Lieu de travail :.....”
 Nature du matériau :.....”
 Temps de séchage:.....”
 Date :.....”
 Opérateur :.....”
 Équipements utilisés :.....”
 N° D'inventaire :.....”
 γ_d max :.....”
 W_{opt} :.....”

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
98	2,15	405,81	30,84	436,65
/	/	/	/	/

N° d'éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC Moyenne (bars)
1-07jour	451,4	422,6	6,4	5	10	196,25	2,15	98	10	51,98	51,98
2-07jour	450,5	421,9	6,3	5	10	196,25	2,15	98	10	51,98	
1-28jour	450	420	6,7	5	10	196,25	2,14	98	8	41,58	
2-28jour	450	420	6,7	5	10	196,25	2,14	98	9	46,78	44,18
1-28jour D	450	420	6,7	5	10	196,25	2,14	98	4	5,2	5,2
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

L'Opérateur

Visa du Responsable

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE MODE OPÉRATOIRE

Structure:.....”
 Lieu de travail :.....”
 Dossier n° :.....”
 Nature du matériau :.....”
 Échantillon :... TVR avec 3% de ciment.....”
 Temps de séchage:.....”
 N° D'inventaire :.....”
 Température de séchage :.....”
 Yd max :.....”
 W opm :.....”
 Date :.....”
 Opérateur :.....”
 Équipements utilisés :.....”
 N° D'inventaire :.....”

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
98	2,08	407,73	30,99	438,72

N° d'éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC Moyenne (bars)
1-07jour	436	410,9	5,8	5	10	196,25	2,09	99	16	83,16	
2-07jour	435,4	410,9	5,6	5	10	196,25	2,09	99	16	83,16	83,16
1-28jour	436,8	408	6,6	5	10	196,25	2,08	98	14	72,77	
2-28jour	435,2	409	6,0	5	10	196,25	2,08	98	14	72,77	72,77
1-28jour D	435,9	400	8,2	5	10	196,25	2,04	96	5	6,5	6,5

L'Opérateur

Visa du Responsable

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE MODE OPÉRATOIRE

Structure:.....”
 Dossier n° :”
 Échantillon :... TVR avec 5% de ciment.....”
 Température de séchage :.....”
 Lieu de travail :”
 Nature du matériau :”
 Date :”
 Opérateur :”
 Équipements utilisés :”
 N° D'inventaire :”
 W_{d max} :”
 W_{opm} :”

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
98	2,07	405,81	30,84	436,65
/	/	/	/	/
/	/	/	/	/

N° d'éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC Moyenne (bars)
1-07jour	420,2	392,3	6,6	5	10	192,4	2,04	94	16	83,16	85,76
2-07jour	436,9	406,9	6,9	5	10	192,4	2,11	100	17	88,36	
1-28jour	431,7	406	6,0	5	10	196,25	2,07	98	20	103,95	111,74
2-28jour	436,6	409	6,3	5	10	196,25	2,08	99	23	119,54	
1-28jour D	435,4	405	7,0	5	10	196,25	2,06	98	7	9,1	9,1
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

L'Opérateur

Visa du Responsable

ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE MODE OPÉRATOIRE

Structure:.....”
 Dossier n° :.....”
 Échantillon : TVR avec 7% de ciment.....”
 Température de séchage :.....”
 γ_d max :.....”
 Lieu de travail :.....”
 Nature du matériau :.....”
 Temps de séchage:.....”
 W_{optm} :.....”
 Date :.....”
 Opérateur :.....”
 Équipements utilisés :.....”
 N° D'inventaire :.....”

Compacité théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids du sol humide
98	2,07	405,81	30,84	453
/	/	/	/	/

N° d'éprouvette	Poids réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC Moyenne (bars)
1-07jour	449,6	422,3	6,1	5	10	196,25	2,15	99	25	129,94	129,94
2-07jour	448,3	420,8	6,1	5	10	196,25	2,14	98	25	129,94	
1-28jour	449,8	420	6,6	5	10	196,25	2,14	98	30	155,93	166,32
2-28jour	449,7	420	6,6	5	10	196,25	2,14	98	34	176,72	
1-28jour D	449,0	420	6,5	5	10	196,25	2,14	98	10	13	13
/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

L'Opérateur

Visa du Responsable

Contrôle et suivi géotechnique des travaux de réalisation d'un tronçon de route RN 06 reliant Reggane à BBM (lot n° 04 sur 50km)

La vérification des caractéristiques des matériaux et analyse

Les emprunts des matériaux utilisés pour la construction du corps de chaussée sont situés le long du tracé vers droite Reggane de point kilométrique:

- PK 2+000 à 300 m de l'axe de route.
- PK 5+500 à 300 m de l'axe de route.
- PK 9+500 à 300 m de l'axe de route.
- PK 12+500 à 300 m de l'axe de route.
- PK 32+000 à 300 m de l'axe de route.
- PK 34+000 à 500 m de l'axe de route.
- PK 25+000 à 400 m de l'axe de route.

Les résultats obtenus sont les suivant :

Carrière n°1

- ✓ La densité maximale donnée par l'essai proctor modifié est 2.11 t/m^3 , pour une teneur en eau qui est de l'ordre de 8.97%
- ✓ Limites d'Atterberg mesurées sur la fraction 0.4 mm donnent un indice de plasticité non mesurable, pour une limite de liquidité qui est de l'ordre de 38.88
- ✓ L'analyse granulométrique réalisée sur les prélèvements effectués offre des courbes continues et une granulométrie étalée, le taux de fines est de 13%

Carrière n°2

- ✓ La densité maximale donnée par l'essai proctor modifié est 2.16 t/m^3 , pour une teneur en eau qui est de l'ordre de 7.44%
- ✓ Limites d'Atterberg mesurées sur la fraction 0.4 mm donnent un indice de qui est l'ordre de 15.57, pour une limite de liquidité qui est de 36.53
- ✓ L'analyse granulométrique réalisée sur les prélèvements effectués offre des courbes continues et une granulométrie étalée, le taux de fines est de 24%

Carrière n°3

- ✓ La densité maximale donnée par l'essai proctor modifié est 2.16 t/m^3 , pour une teneur en eau qui est de l'ordre de 8.05%

- ✓ Limites d'Atterberg mesurées sur la fraction 0.4 mm donnent un indice de qui est l'ordre de 6.86, pour une limite de liquidité qui est de 30.34
- ✓ L'analyse granulométrique réalisée sur les prélèvements effectués offre des courbes continues et une granulométrie étalée, le taux de fines est de 21%

Carrière n°4

- ✓ La densité maximale donnée par l'essai proctor modifié est 2.23 t/m^3 , pour une teneur en eau qui est de l'ordre de 7.59%
- ✓ Limites d'Atterberg mesurées sur la fraction 0.4 mm donnent un indice de qui est l'ordre de 14.99, pour une limite de liquidité qui est de 37.67
- ✓ L'analyse granulométrique réalisée sur les prélèvements effectués offre des courbes continues et une granulométrie étalée, le taux de fines est de 24%

Carrière n°5

- ✓ La densité maximale donnée par l'essai proctor modifié est 2.15 t/m^3 , pour une teneur en eau qui est de l'ordre de 8.48%
- ✓ Limites d'Atterberg mesurées sur la fraction 0.4 mm donnent un indice de plasticité non mesurable, pour une limite de liquidité qui est de l'ordre de 38.27
- ✓ L'analyse granulométrique réalisée sur les prélèvements effectués offre des courbes continues et une granulométrie étalée, le taux de fines est de 13%

Carrière n°6

- ✓ La densité maximale donnée par l'essai proctor modifié est 2.13 t/m^3 , pour une teneur en eau qui est de l'ordre de 5.43%
- ✓ Limites d'Atterberg mesurées sur la fraction 0.4 mm donnent un indice de plasticité non mesurable, pour une limite de liquidité qui est de l'ordre de 26.92
- ✓ L'analyse granulométrique réalisée sur les prélèvements effectués offre des courbes continues et une granulométrie étalée, le taux de fines est de 14%

Carrière n°7

- ✓ La densité maximale donnée par l'essai proctor modifié est 1.95 t/m^3 , pour une teneur en eau qui est de l'ordre de 7.37%
- ✓ Limites d'Atterberg mesurées sur la fraction 0.4 mm donnent un indice de plasticité non mesurable, pour une limite de liquidité qui est de l'ordre de 41.21
- ✓ L'analyse granulométrique réalisée sur les prélèvements effectués offre des courbes continues et une granulométrie étalée, le taux de fines est de 10%