

TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE
AMELIORATION DE LEUR PORTANCE

Mr. N. AHMAR LEGROUN
Chef du Service Sols et
Matériaux - C.N.E.R.

INTRODUCTION

Le traitement des sols à l'aide de liant, est une technique très anciennement connue puisqu'en 1932 déjà aux Etats-Unis cette technique avait déjà été amplement utilisée.

En Europe cette technique a connu un grand développement pour les grands axes routiers, pour les pistes d'aviation et pour les routes rurales durant les deux dernières décennies pendant lesquelles cette technique parallèlement à celle du traitement à la chaux a été largement utilisée pour améliorer les plates formes des chaussées.

Les raisons qui justifient le développement de cette technique sont nombreuses. Le traitement des sols, extraits sur le tracé et immédiatement réutilisables, permet d'éviter les emprunts extérieurs. On économise ainsi des transports, donc de l'énergie d'autant plus qu'actuellement les contraintes de l'environnement rendent difficile l'ouverture d'emprunts. Dans la plupart des cas, le traitement des sols non seulement il rend utilisable des sols qui ne l'étaient pas au départ en augmentant leur portance, mais aussi il permet de diminuer notablement les épaisseurs de chaussée après application des méthodes de dimensionnement, conséquence de la nette amélioration de la portance de ces sols, ce qui économise également des transports et des matériaux, donc de l'énergie et des ressources naturelles. Nous avons réalisé une étude de laboratoire sur deux types de sols susceptibles d'être traités au ciment, le dehs qui l'on rencontre souvent dans le Gharb et en particulier dans les environs immédiats du Sebou, mais que l'on peut trouver dans d'autres régions, et sur les sables qui recouvrent de grands étendues dans les voisinages de la côte atlantique et méditerranéenne, nous nous sommes intéressés cette fois au sable de Mamora pour réaliser l'étude de laboratoire.

En ce qui concerne le dehs, cette étude vient compléter celle de la stabilisation à la chaux des tirs, un résumé des résultats obtenus sur différents sites est présenté dans ce rapport. Ces deux techniques devraient dans l'avenir aider à résoudre en partie le problème de la rareté de matériau dans les régions comme le Gharb, d'une part et d'autre part permettre une meilleure tenue dans le temps des chaussées, sur ce type de sol. Il faut rappeler que la DRCR s'oriente actuellement vers la technique des routes en béton de ciment et de grave ciment, toutes les deux faisant partie de la catégorie des chaussées rigides qui sont très sensibles à la qualité de compactage et qui nécessitent obligatoirement des supports non déformables, ce qui nous pousse à croire que logiquement l'on aura dans l'avenir inévitablement recourt à la stabilisation des sols pour augmenter leur portance.

Actuellement nous pensons non seulement stabiliser les sols de fondation pour augmenter la portance des sols en tant que tels, mais aussi orienter les études à venir, en vue de l'utilisation des sols traités sur place, en couche de base, en l'occurrence pour les routes faiblement à moyennement circulées, ceci est bien entendu pour le moment une orientation que l'on

compte prendre dès l'année prochaine et l'on ne pourra avoir une idée claire sur ce sujet qu'après avoir réalisé des essais de laboratoire, en particulier des essais de fatigue sur ces sols traités, et résolu le problème de l'accrochage entre la couche de roulement et de sol traité.

I - CARACTERISTIQUES DU SOL POUR SA STABILISATION AU CIMENT.

Si l'éventail des types de sol stabilisables au ciment est grand, tous les sols ne conviennent cependant pas à cet effet. Les critères de convenance des sols, stabilisables au ciment, les plus connus sont, les spécifications anglaises ou américaines.

Nous citerons ces spécifications et nous citerons également celles de Belgique qui ouvrent le champs d'action à beaucoup plus de types de sols. D'une façon générale, on prend en considération les caractéristiques d'identification du sol, à savoir, la granulométrie et la plasticité, ensuite certaines matières pouvant nuire à la prise et au durcissement du ciment, une analyse de la composition chimique du sol s'impose.

A- Granulométrie

Le Transport Road Research Laboratory (Angleterre) et le Highway Research Board (CF-U) proposent pour la stabilisation d'un sol au ciment, les limites granulométriques suivantes. (voir ci-après)

Ces limites semblent être d'après les Belges très strictes car selon leurs expériences et celles de l'étranger, les passants au tamis 74 microns peuvent atteindre 100% et les passants à 2 microns se situent entre 30 et 50%, sous réserve d'avoir des engins ayant un grand pouvoir de pulvérisation.

Les limites que proposent les Belges et qui reflètent mieux une situation réelle sont données ci après. On y voit également la courbe, de filler 0/50 qui correspond pratiquement à la courbe inférieure des limites proposées.

On remarque surtout qu'il n'y a aucune restriction aux passants de 74 microns, on peut avoir 100% de passant à 74 microns et la teneur en élément inférieure à 2 microns, doit être inférieure à 30%.

En ce qui concerne le sable et le dehss que nous avons étudiés le dehss ayant un passant à 80 microns de 99% se trouve dans la zone des sols fins (voir fig 2) et nécessitent un grand pouvoir de pulvérisation. Malheureusement pour le moment il n'a pas été fait de sédimentométrie sur les sols étudiés ici pour avoir leurs passants à 2 microns

Néanmoins, la courbe granulométrique du sable rentre bien dans le fuseau des sols stabilisables au ciment, celle du dehss n'a pas été tracée. En fait les inférieurs à 2 microns, des argiles peuvent être choisis entre 30 et 50%. Mais les Américains, les Anglais et les Belges le fixent à 30%, car sinon la stabilisation nécessiterait beaucoup de ciment et un tel traitement ne serait plus économique.

Il en est de même pour les sols à granulométrie serrée, qui exigent un pourcentage élevé de ciment en raison de l'importance des vides par suite de la similitude des dimensions des grains, une partie servant à combler les vides, à titre indicatif, la courbe du villafranchien rentre pratiquement dans ce fuseau (voir fig 2)

les sols les plus économiquement stabilisables sont ceux qui présentent une courbe granulométrique continue et dont la concavité se tourne vers le haut.

B- Plasticité

La plasticité d'un sol est exprimée par ses limites d'Atterberg. Les anglais et les américains proposent les limites suivantes :

$$\begin{aligned} LL &< 40\% \\ LP &< 22\% \end{aligned}$$

Mais on peut si les moyens de mise en oeuvre sont puissants aller jusqu'à :

$$\begin{aligned} LL &< 60\% \\ LP &< 30\% \end{aligned}$$

Les belges préfèrent réduire les limites du HRB et TRRL comme suit :

$$\begin{aligned} LL &< 40\% \\ LP &\leq 15\% \end{aligned}$$

En ce qui concerne les sols étudiés ici, le sable répond à ces spécifications .

C- Equivalent de sable.

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées français propose comme moyen d'évaluer les quantités de fines du sol, l'équivalent de sable (ES) qui doit être :

$$\begin{array}{cc} 0 & \text{ES} & 50 \end{array}$$

D-Composition chimique du sol

a) Teneur en matériau matières organiques

On tolérerait au départ 2% de matières organiques admissibles puis on s'est rendu compte qu'il faut prendre en compte la nature de ces matières et que certains types même à 0,5% jusqu'à 3% empêchaient la prise ,d'autres par contre, ne sont pas néfastes, aussi est il préférable d'écarter les sols contenant les matières organiques.

En général l'essai de compression à 7 jours est déterminant pour détecter l'action des matières organiques.

b) Teneur en sulfates:

Il faut signaler que les sulfates sont parmi les éléments chimiques pouvant nuire à la stabilisation, en empêchant la prise et le durcissement du ciment.

Nous voudrions simplement attirer l'attention sur le fait que dans cette étude, nous n'avons étudié que deux types, un limon et un sable, mais en fait les sols susceptibles de recevoir ce traitement sont beaucoup plus importants au Maroc; parmi les plus connus par exemple nous citerons le Villa-franchien recouvrant de grandes étendues dans le nord du pays entre Kénitra et Larache (Arbaou, Lalla Mimouna, Dar Bel Amri), qui constituent des ballastières importantes contenant des sables et des roulés parfaitement stabilisables au ciment, ces derniers stabilisés au ciment pourraient être utilisés également comme couche de base pour les routes économiques et même pour des trafics plus importants.

N.B: voir courbes fig 2

On voit que la courbe du sable rentre dans la zone des matériaux stabilisables au ciment, le Villafranchien rentre en partie seulement. Il n'a pas été fait de sédimentométrie pour le dehss il devrait se situer dans la zone des limons.

II-DEHSS DE SIDI ABDELAZIZ

Définition.

Le dehss est la dénomination locale d'un sol limoneux que l'on rencontre surtout dans les voisinages immédiats des fleuves, mais que l'on peut rencontrer même loin de ceux-ci. Ils sont caractérisés par un passant à 80 microns très important qui peut aller jusqu'à 100% et qui a une plasticité relativement pas très élevée de 12 à 23, de toutes façons moins élevée que celle des tirs et qui peut contenir un pourcentage d'argile; c'est parallèlement un très bon sol agricole. (voir fig 3 -ci-après)

A - Analyse minéralogique.

B - Courbe granulométrique.

Il n'a malheureusement pas été fait de sédimentométrie, il a seulement été effectué les passants à 80 microns qui sont de 99,5%.

C - Limites d'Atterberg
(voir tableau ci-après.)

On retiendra que c'est un sol qui a une limite de liquidité de 50, et une plasticité assez importante pour un dehss de 24 ce qui signifie qu'il contient un pourcentage non négligeable d'argile qui augmente sa plasticité.

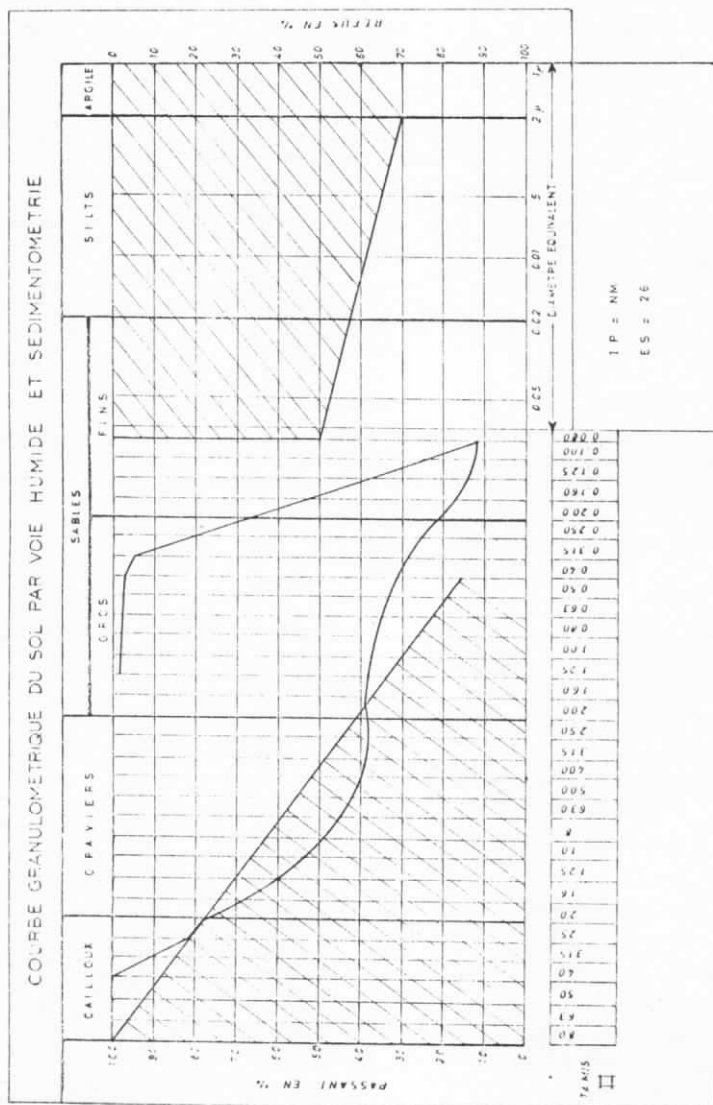


Fig. 2 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE

A titre indicatif nous citons 3 autres dehss du Gharb avec les pourcentages à 80 microns et les plasticités.

DPE	ORIGINE	80 microns	WL	WP	IP
KENITRA	CT 2303	83	28	16	12
SIDI KACEM	CT 2634	86	32	17	15
	CT 2632	98	37	19	18

On voit que pour ces dehss ils ont tous un très fort pourcentage de passant à 80 microns au delà des 80% et une plasticité comprise entre 10 et 20.

D - Proctor modifié.

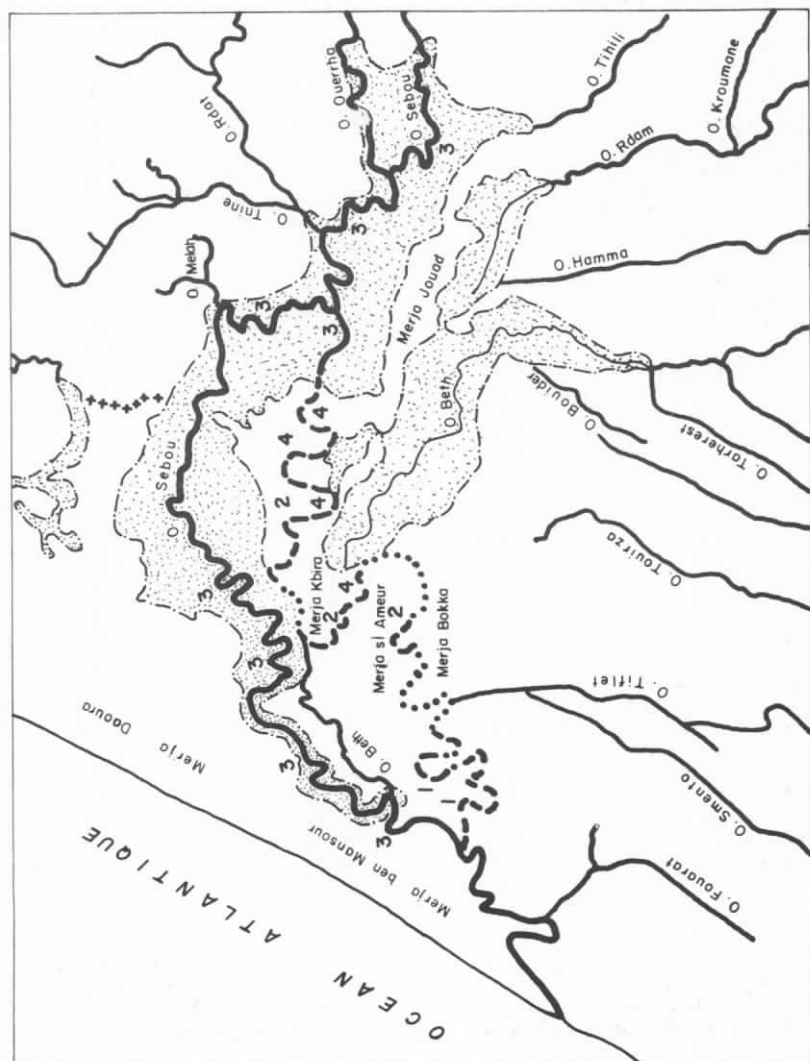
Dehs + ciment	P.V.S	W.O.P.M
% ciment	1.767	14,8
2%	1.839	14,9
4%	1.822	14,46
6%	1.750	17
8%	1.820	14,34
10%	1.766	16,90

Contrairement au mélange tirs chaux ou il y avait un décollage vers la droite des W.O.P.M et une diminution des densités de l'optimum proctor modifié, ici on ne constate pas que les densités de l'optimum proctor modifié sont aux environs de 1,8 et la teneur optimale vers les 15%.

E - Essais C.B.R.

Nous proposons le tableau récapitulatif des différentes valeurs C.B.R suivantes : Ce tableau permet de déduire que ce type de sol est très sensible à l'eau et fait chuter le C B R de 57 et 75 à 3 après imbibition à quatre jours dans l'eau.

Il montre aussi qu'avec ajout de 2% de ciment seulement le C.B.R est nettement amélioré puisqu'il passe de 2 ou 3 à 22 en 28 jours même après 4 jours d'imbibition, il atteint les 128 en 28 jours sans l'imbibition.



Avec 4% de ciment le C.B.R atteint les 57 et 74 après 28 jours d'âge et 4 jours d'imbibition, ce qui est nettement et de loin meilleur qu'un très bon sol S4

Avec 6% et 8% de ciment, le C.B.R atteint 81 et 121 après 28 jours d'âge et 4 jours sous eau. Pour ces 6 et 8% il pourrait y avoir une anomalie, les valeurs obtenues après 7 jours étant meilleures que celles de 28 jours d'âge.

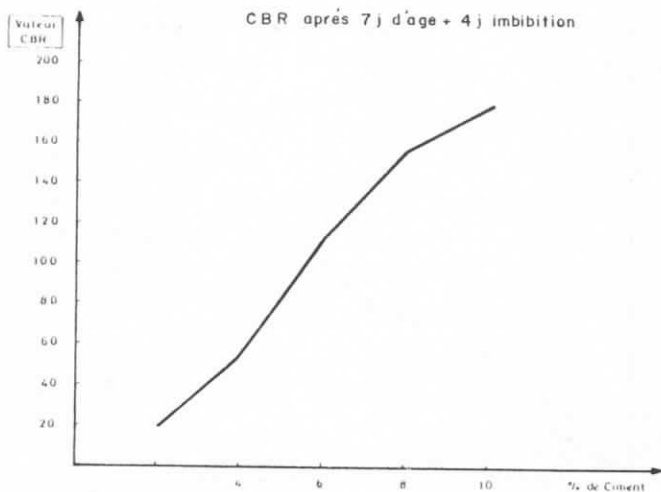
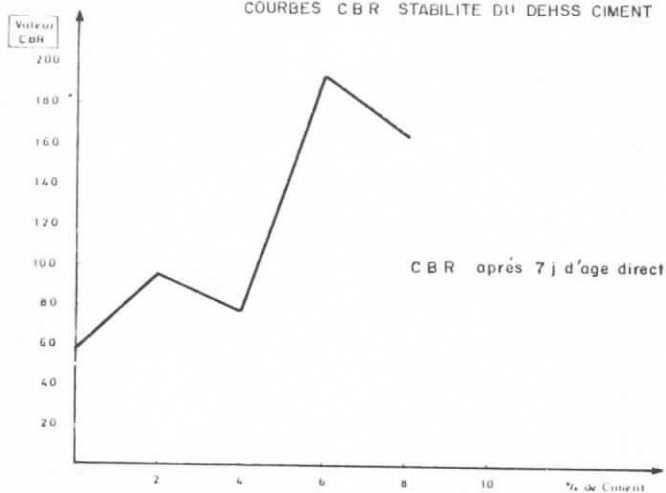
Enfin avec 10% de ciment, on ne peut plus parler de C.B.R. l'enfoncement n'étant pratiquement dans tous les cas plus possible tellement le gain en portance est important (voir fig 4 et fig 5)

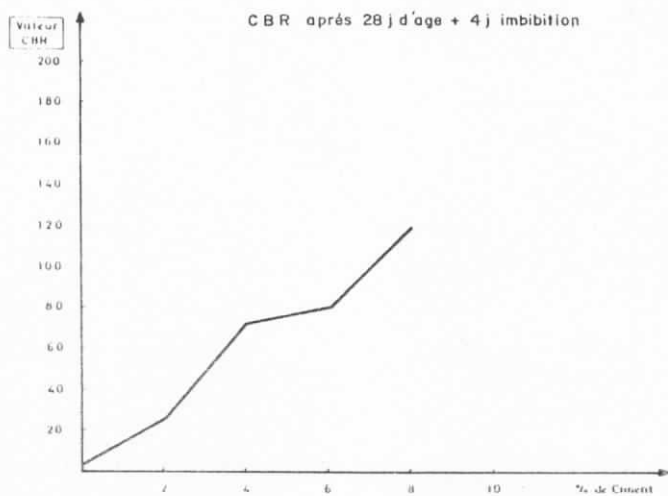
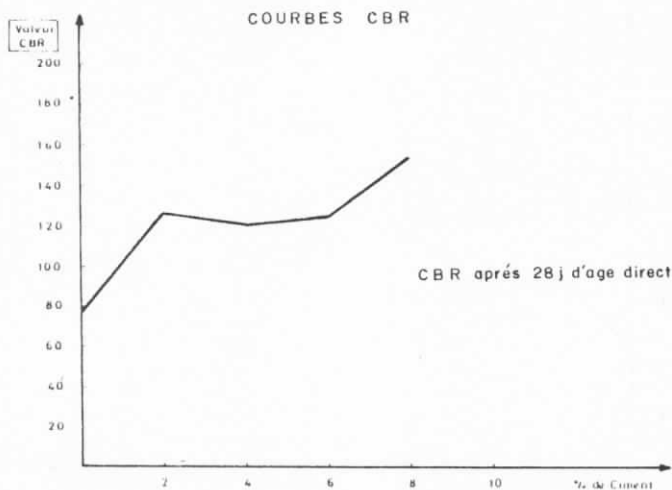
Les C.B.R ont été réalisés après 28 jours d'âge, or si on avait effectué des essais à long terme, on aurait certainement constaté que les réactions de cimentation continuent dans le temps et les C.B.R seraient encore plus importants même avec des faibles teneurs en ciment, le C.a.O en présence d'eau, donnant l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 qui est de la chaux en fait, qui en combinant avec les particules argileuses du sol prolongent les réactions dans le temps

Essais CBR et stabilité du DEHSS ciment.

CBR après dehss + x% ciment	CBR après 7 j d'âge (a)	CBR après 7 j +4j imbibition (b)	Rapport S =b/a	CBR après 28 j d'âge	CBR après 22j +4j imbibition	Rapport S=d/c
Dehss + 0%	57	2.86	0.05	75.71	3.57	0.05
Dehss + 2%	92.86	20.95	0.23	128	28	0.22
Dehss + 4%	77	57	0.74	121	74	0.61
Dehss + 6%	192	144	0.59	127	81	0.64
Dehss + 8%	164	157	0.96	157	121	0.77
Dehss + 10%	Enfoncement Impossible	178		Enfoncement Impossible	Enfoncement Impossible	

COURBES CBR STABILITE DU DEHSS CIMENT





F - Stabilité à l'eau du dehss ciment.

En examinant le tableau ci avant, on constate que le dehss comme toutes les argiles a une mauvaise stabilité à l'eau, et est très sensible à cette dernière. On remarque que l'ajout du ciment augmente d'une façon croissante en fonction du pourcentage de ciment la stabilité du mélange puisqu'elle est proche de 1 avec 8% de ciment alors qu'elle est pratiquement égale à 0 pour le dehss naturel. (voir fig.6)

N.B les stabilités sont les rapports suivants:

$$S = \frac{C B R \text{ à } 7 \text{ jours} + 4 \text{ jours/eau}}{C B R \text{ à } 7 \text{ jours}}$$

et

$$S = \frac{C B R \text{ à } 28 \text{ jours} + 4 \text{ jours/eau}}{C B R \text{ à } 22 \text{ jours}}$$

Compression Simple

(voir tableau ci-après et fig 7)

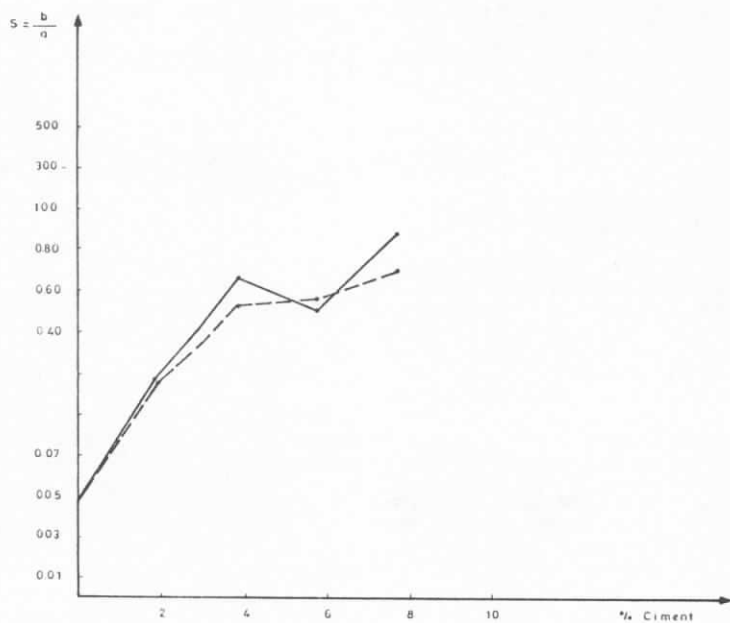
Les essais de compression simple sont réalisés sur des éprouvettes Bss dites anglaises de 10 cm de hauteur, et 5 cm de diamètre. Comme il est signalé dans le tableau ci-après, les essais ont été réalisés après 7, 28, 56 et 90 jours avec successivement 0, 2, 4, 6, 8 et 10% de ciment. On constate qu'avec 2% de ciment on atteint facilement les 10 bars, on atteint 12,3 bars après 90 jours.

A 4% de ciment, on se situe vers les 17 et 18 bars, valeurs très intéressantes, avec relativement peu de ciment, du point de vue économique, le pourcentage de 4% sera à retenir. Avec 6% à 28 jours, on atteint 20 bars, et à 90 jours 24 bars. Avec 8% on obtient 25 bars à 56 jours et 21 à 90 jours, c'est une petite anomalie qui peut être due à plusieurs raisons : manipulation ou autres; néanmoins le gain en résistance par rapport à 6% est faible.

Enfin avec 10 % de ciment, on atteint 25 bars à 28 jours et 37 bars à 90 jours qui sont des valeurs nettement meilleures, mais, économiquement, ce ne sera peut être pas intéressant.

D'une façon générale, on constate que les valeurs croissent en fonction de l'âge des écrasements de 7 à 90 jours et en fonction du pourcentage de ciment de 0 à 10 %. On retiendra toutefois qu'avec 2 et 4 %, les gains en résistance sont très importants, surtout celui de 4% qui donne des valeurs de 18 bars ce qui est très bon. Les pourcentages de 2 et 4% sont intéressants car il donnent des améliorations très nettes au point de vue C B R et résistance à la compression simple à la fois. Il n'a malheureusement pas été réalisé d'essai après immersion dans l'eau qui aurait donné une idée sur la stabilité du dehss sans et avec traitement au ciment au point de vue compression simple.

836 COURBES CBR STABILITE DU DEHSS CIMENT

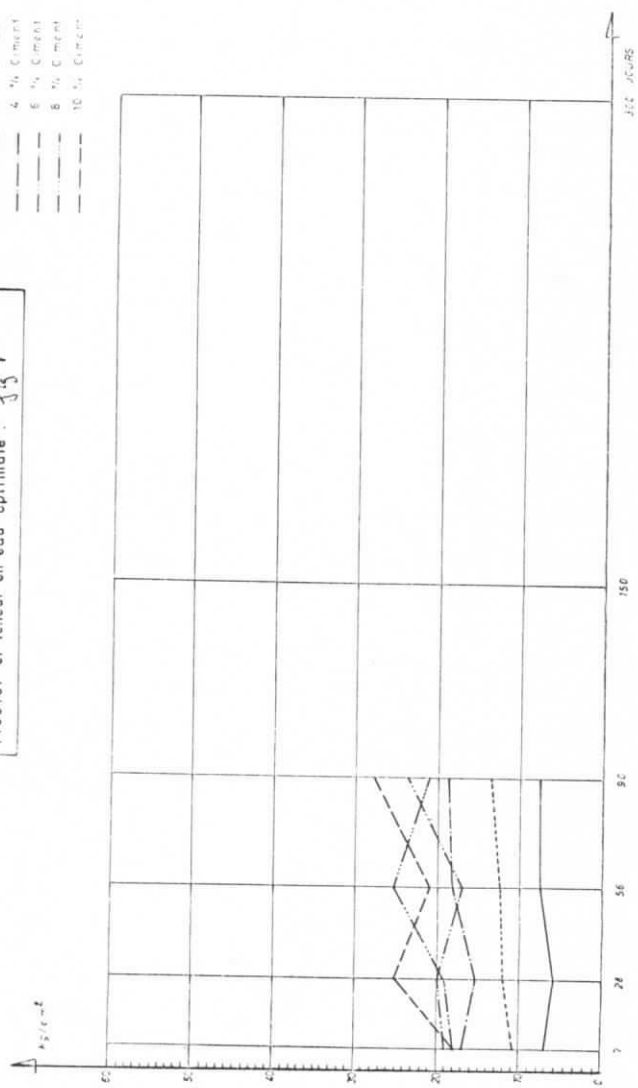


$$S = \frac{b}{a} = \frac{\text{CBR direct}}{\text{CBR 4j sous eau}}$$

— 7 j d'age
 - - - 28 j d'age

Evolution de la résistance à la compression, à densité Proctor et teneur en eau optimale. $f_{c,7}$

- 0 % Ciment
- 2 % Ciment
- 4 % Ciment
- 6 % Ciment
- 8 % Ciment
- 10 % Ciment



DEHSS DE SIDI ABDELAZIZ+ CIMENT

! % de CIMENT !	RESULTATS			
	! 7 jours	! 28 jours	! 56 jours	! 90 jours
! 0%	! 7,5	! 7	! 7,5	! 7
! 2%	! 10,5	! 11,5	! 12	! 12,3
! 4%	! 17	! 16	! 18	! 18,5
! 6%	! 19	! 20	! 17	! 24
! 8%	! 18	! 19	! 25	! 21
! 10%	! 18	! 25	! 21	! 37

Essais de compression simple sur dehss stabilisé au ciment

II.2 - ETUDE SUR LA STABILISATION D'UN SABLE AU CIMENT

A - Localisation du prélèvement

Le sable étudié dans cette étude a été prélevé dans la région de Rabat aux environs du CT 2531, où est prévue la construction de chemins tertiaires sur sols sablonneux.

B - Caractéristiques de ce sable

-Limites d'atterberg.

N.M (non mesurable).

Donc non plastique.

-Equivalent de sable

E.S=25

-Teneur matière calacareuse

néant.

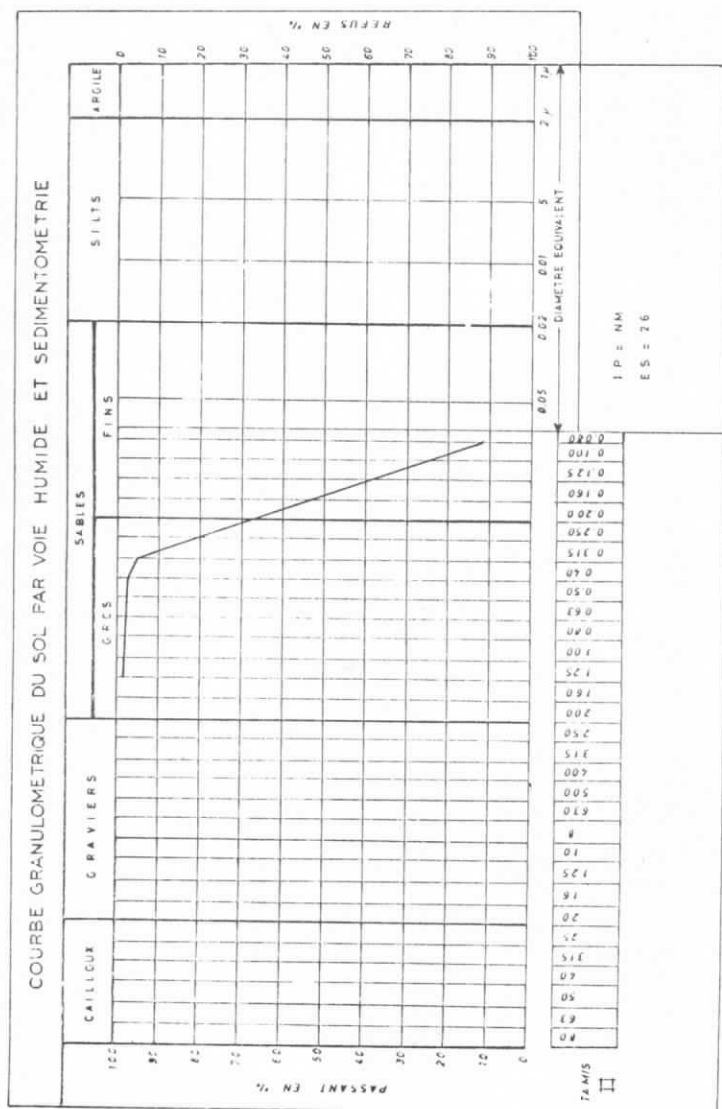
-Courbe granulométrique (voir fig 8)

Il contient 11%de fines inférieures à 80 microns

C - Sables du littoral

Tout le long du littoral atlantique et méditerranéen, on trouve une bande de sable fin qui n'est malheureusement pas valable pour la construction, qui peut être plus au moins limoneux. Ainsi que dans toute la Maâmora qui est couverte de sable très fin et propre.(voir carte ci-après du Gharb où l'on voit les dunes littorales.)

En stabilisant ce sable au ciment on augmente nettement la portance de ces sols.



F_{1.7} ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SABLE

S.C.I. N° 0726

LEGENDE

	Zone inondée en janvier 1953 (Déhès)
	Plaine non inondée
	Dunes littorales (Sable)
	Bordure rifaine
	Collines
	Plateaux

Echelle : 0 10 20 Km



D - Courbes Proctor modifié.

On ne constate pas, comme ceci a été, le cas pour le tirs chauds, un décalage vers la droite et une diminution de la densité sèche en fonction des pourcentages croissants des teneurs en chaux.

On constate que pour le sable seul, la teneur en eau est aux environs de 8% et la densité de 1,78 T/m et que pour 2,4,6,8 et 10% de ciment la teneur optimale est aux alentours de 10 à 12% et la densité variable allant de 1,790 à 2,02 T/m³ (voir fig 9 et 10 ci-après)

E - Essais C.B.R.

D'une façon générale, il n'a pas été possible de réaliser cet essai convenablement n'ayant pas pu obtenir d'enfoncement à 5mm, on a seulement obtenu celui de 2,5; le matériau étant devenu rigide cet essai ne s'adaptant plus aux essais de portance que l'on cherche. Néanmoins, il montre l'amélioration qu'apporte l'adjonction du ciment à ce sable fin; les pressions en Kg/cm² pour l'enfoncement à 2,5mm se situant entre 100 et 140 (voir courbe ci-après fig 11)

F - Compression simple.

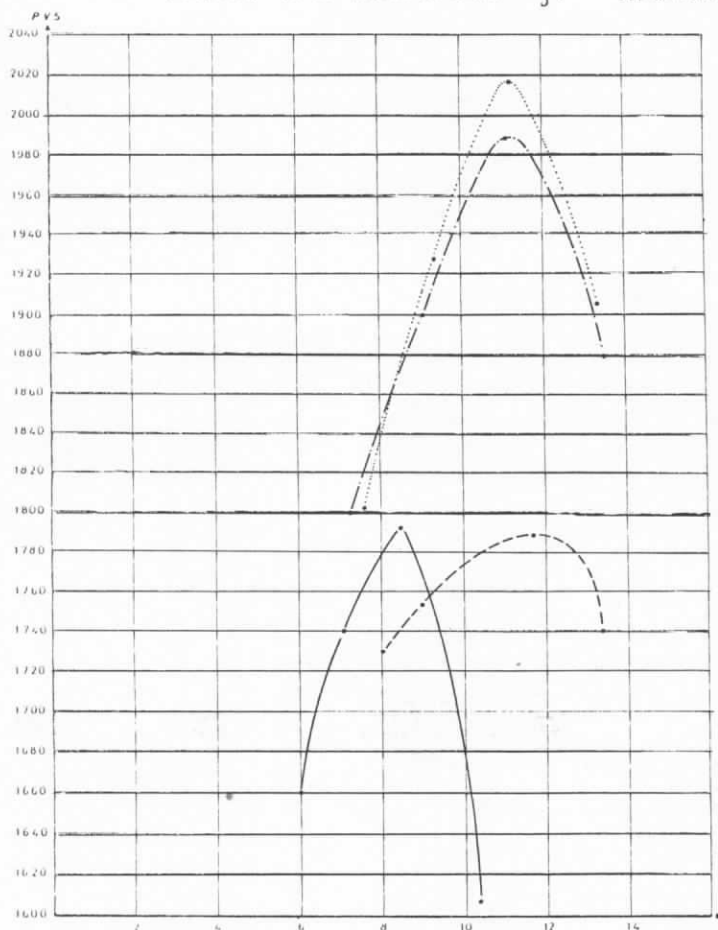
SABLE + CIMENT
Essais à la compression.

Résistance			
% de ciment	Rc	Résultats	
	7 jours	28 jours	
2% de ciment	2,5	2,8	
4% de ciment	3,5	7	
6% de ciment	7	11	
8% de ciment	10	19	
10% de ciment	21	31	

On constate que pour 7 jours et 28 jours d'âge, les résistances à la compression simple sont croissantes en fonction des % de ciment, allant de 2,5 pour 2% de ciment à 21 bars pour 10% à 7 jours et 2,8 à 31 à 28 jours d'âge. Néanmoins, il faut 8% de ciment pour avoir 19 bars en 28 jours qui est une valeur intéressante mais on obtient respectivement 7 et 11 bars qui restent des valeurs assez faibles. Il sera nécessaire d'effectuer d'autres essais pour voir s'il n'est pas possible d'obtenir des résistances meilleures; en complétant notamment l'étude par des essais de compression simple après imbibition pour voir la stabilité du mélange à la compression simple vis à vis de l'eau. (voir fig 12).

EVOLUTION DES COURBES PROCTOR EN
FONCTION DE LA TENEUR EN CIMENT Fig 9

SOL N° 0228

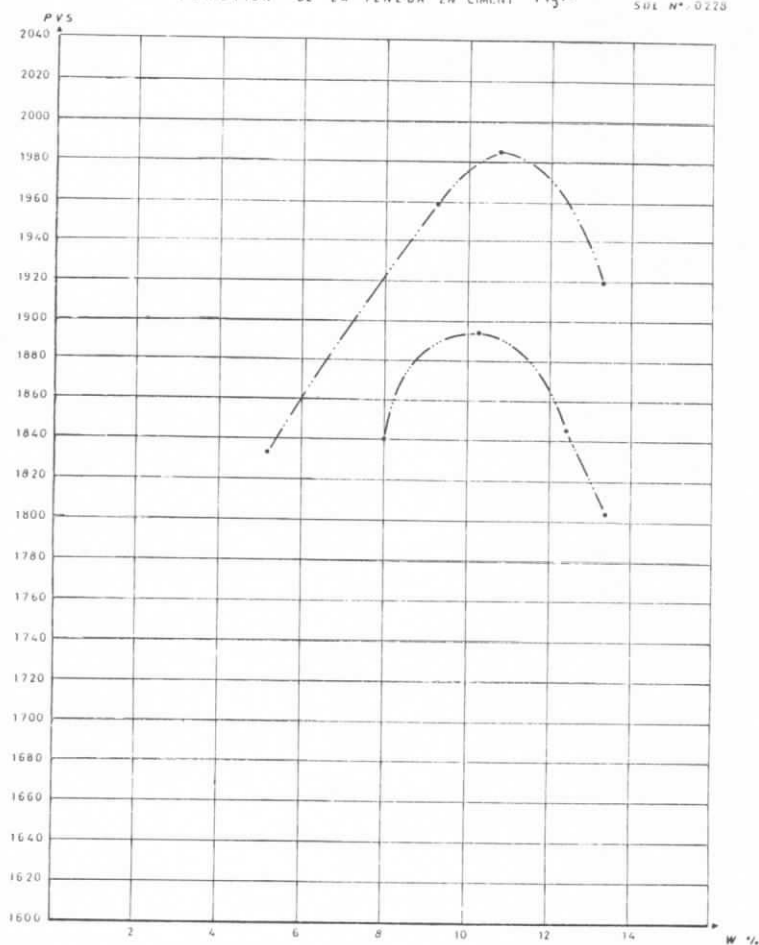


CIMENT	P V H	P V S	W %
0	1941	1792	8.30
2	1987	1784	11.40
4	2207	1987	11.00
6	2258	2014	11.11

————— 0% Ciment
 - - - - - 2% Ciment
 - . - . - 4% Ciment
 6% Ciment

EVOLUTION DES COURBES PROCTOR EN
 FONCTION DE LA TENEUR EN CIMENT $\bar{F}_{10}^{10}$

SOL N° 0228



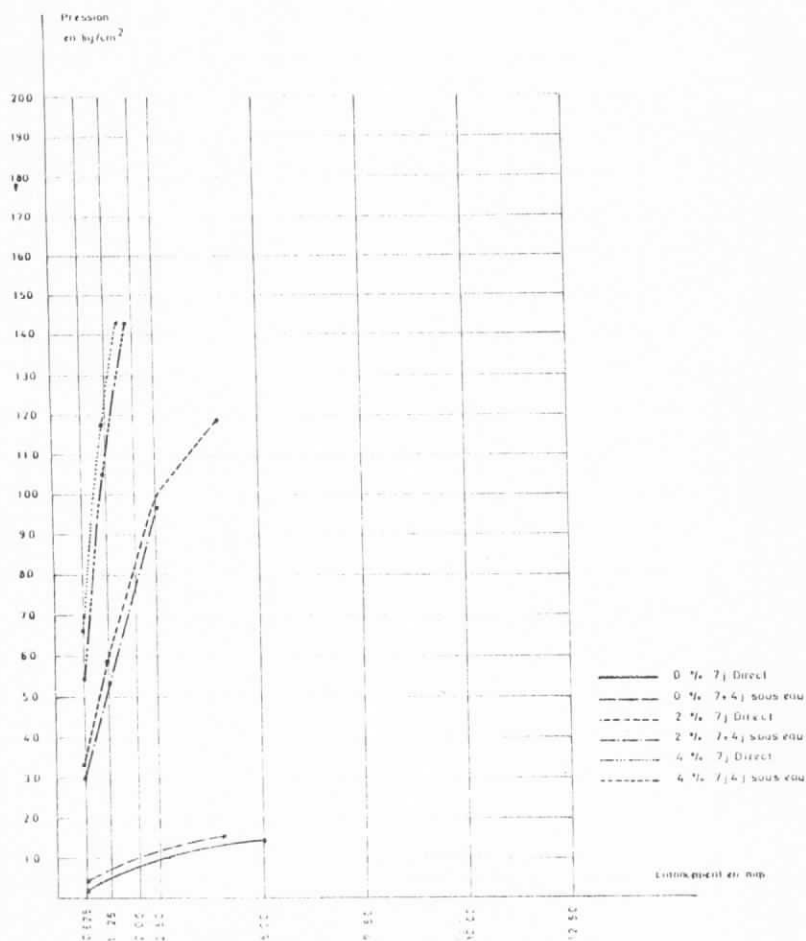
CIMENT	P V H	P V S	W %
8	2199	1988	10.60
10	2090	1896	10.20

— 8 % Ciment

- - - 10 % Ciment

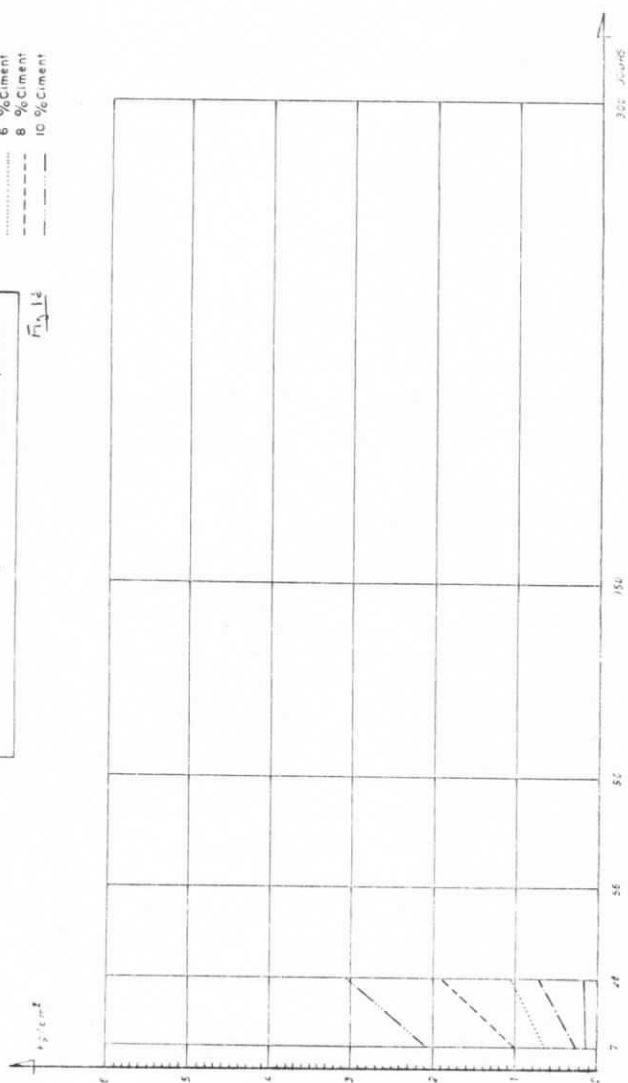
Evolution de la Resistance en fonction de l'Enfoncement en mm
pour l'Evaluation de l'Indice CBR

Fig 11.



Evolution de la résistance à la compression dans le temps
d'éprouvettes à densité proctor et teneur en eau optimale

— 2 % Ciment
— 4 % Ciment
— 6 % Ciment
- - - 8 % Ciment
- . - . 10 % Ciment



III - STABILISATION A LA CHAUX DE DIFFERENTS "TIRS" DU NORD OUEST DU MAROC.

A - Différents sites étudiés:

- 1 - DPE de Tanger	RS 612	PK 10+500
- 2 - DPE de Kénitra	RP 6	PK 65+000
- 3 - DPE de Kénitra	CT 2309	PK 1+000
- 4 - DPE de Sidi Kacem	CT 2010	PK 0+000
- 5 - DPE de Sidi Kacem	CT 2632	PK 16+800
- 6 - DPE de Tétouan	RS 603	PK 9+500

B - Identification de ces "Tirs"

1) Analyses granulométriques

L'examen des courbes granulométriques quoi qu'elles soient inachevées montre que plus de 90 ou 95 % d'éléments sont inférieurs à 0,08 mm. Il s'agit donc de sols contenant un grand pourcentage de fines.

2) Limites d'Atterberg

! N° échantillon	! LL	! LP	! IP	!
! 1	! 60	! 21	! 39	!
! 2	! 61	! 23	! 38	!
! 3	! 63	! 24	! 39	!
! 4	! 57	! 22	! 25	!
! 5	! 38	! 18	! 20	!
! 6	! 59	! 25	! 34	!

Comme on peut le constater dans le tableau ci-dessus, la plupart des sols étudiés ont des limites de liquidité et des indices de plasticité assez élevés (mis à part l'échantillon (5))

$$\begin{array}{l} 59 \leq LL \leq 63 \\ 34 \leq IP \leq 39 \end{array}$$

Ce sont des sols très plastiques, ce qui est confirmé par les classifications des sols AASHO et LPC suivantes :

!	! 1	! 2	! 3	! 4	! 5	! 6	!
! AASHO	! A-7-6	! A-7-6	! A-7-6	! A-7-6	! A 6	! A-7-6	!
! LPC	! AT	! AT	! AT	! AT	! AP	! AT	!

3- Etude physico-chimique

L'étude physico-chimique qui a été effectuée pour les 4 sols provenant de Tétouan, Kénitra et Sidi Kacem a montré que leur fraction argileuse est principalement constituée de montmorillonite mélangée en faible quantité à la Kaolinite et de l'illite. Ceci explique en grande partie leur pouvoir de gonflement important. Notons au passage que les tirs ont une granulométrie très fine avec très peu de sable, avec une fraction silteuse de 20 à 50 % et une fraction argileuse de 40 à 70 %. Ils contiennent par ailleurs 5 à 10 % de calcaire.

4- Proctor Modifié avec respectivement 0- 4- 6% de chaux

On constate un déplacement vers la droite des teneurs en eau optimales avec une diminution légère des densités optimales. Par ailleurs, la marge de variation des densités sèches du matériau traité est assez faible quelque soit la teneur en eau.

5- Essai CBR et gonflement

On constate que tous ces sols ont marqué un CBR assez important lors des essais immédiats. Comme toutes les argiles, ce CBR a chuté aux alentours de 0 une fois les éprouvettes imbibées. Avec ajout de 4 et 6 % de chaux, les CBR directs ont nettement augmenté avec notamment un résultat très positif et l'eau ne semble pas avoir d'effets sur les sols traités, ils sont même légèrement meilleurs une fois imbibés.

Ceci a été vérifié par des éprouvettes agées de 28 jours et imbibées pendant 28 jours dans l'eau.

On retiendra que la chaux augmente d'une manière spectaculaire les CBR, donc la portance de ces sols. Quant au gonflement, il est très important pour ces sols à leur état naturel (jusqu'à 14,80mm pour un moule CBR) et a été pratiquement jugulé avec ajout de 4 à 6 % de chaux. Après 28 jours d'imbibition, on a noté que le gonflement est complètement jugulé après ajout de 4 et 6 % de chaux.

6- Essais de compression simple

Il est à noter que les éprouvettes fabriquées à l'OPM avec 0-4- et 6 % de chaux et conservées à l'air libre pendant 150 jours ce qui a permis à la chaux d'agir, permettent d'obtenir des résistances très intéressantes avec 4 % de chaux seulement (fabrication artisanale) qui varient entre 12,37 et 24,03 bars et qui est dans la plupart des cas supérieure à 16 bars.

Avec 6 % des valeurs des résistances encore meilleures et varient entre 13,13 et 26,86 bars. On constate que suivant la nature des argiles; les résistances à la compression simple sont plus ou moins bonnes, il est en effet connu que certains types

d'argiles agissent mieux que d'autres; de plus leurs pourcentages dans un sol influent directement sur les résistances. Une fois imbibées (4 jours sous eau) ces résistances restent très intéressantes puisqu'elles ne diminuent que très peu par rapport à celles qui ne sont pas imbibées.

En conclusion, la chaux semble avoir une bonne affinité avec les tirs étudiés, permettant d'obtenir des résistances assez élevées ce qui devrait permettre des applications intéressantes dans le domaine routier et dans celui de la construction.

OPTIMUM PROCTOR MODIFIE-RESULTATS

Echantillon n°	Teneur en Chaux	P.V.H-T/m ³ maximum	P.V.S-T/m ³ maximum	W % optimum
1	0%	2,079	1,744	19,20
	4%	2,042	1,690	21,00
	6%	2,002	1,656	22,30
2	0%	2,067	1,808	14,30
	4%	2,033	1,762	15,70
	6%	2,026	1,730	17,10
3	0%	2,060	1,774	16,12
	4%	2,055	1,752	17,30
	6%	2,048	1,719	19,11
4	0%	2,096	1,805	16,10
	4%	2,098	1,790	17,20
	6%	2,082	1,760	18,30
5	0%	2,171	1,935	12,20
	4%	2,137	1,867	14,5
	6%	2,139	1,838	16,4
6	0%	2,048	1,750	17,00
	4%	2,034	1,708	19,10

4-ESSAIS CBR

- Essais immédiats
- Essais après 28 jours d'imbibition
- Essais après 28 jours de conservation à l'air
- Essai après 28 jours de conservation à l'air +28 jours sans eau

Echant-		C B R	en %	
illon n°	Essais immédiats	Essais après 28j	Essais après 28j	Essais après 28j
		d'imbibition	de conservation	j de conserva-
			à l'air	tion à l'air +
				28j sous eau
pourcen-	0% 4% 6%	0% 4% 6%	0% 4% 6%	0% 4% 6%
age chaux				
1	42: 57: 45	2: 60: 122	-: 135: 80	-: 91: 155
2	74: 68: 70	1: 65: 89	-: 183: 203	-: 153: 202
3	67: 77: 58	1: 53: 78	-: 197: 197	-: 169: 207
4	69: 74: 72	4: 74: 87	-: -: -	-: 285: 341
5	76: 77: 55	2: 89: 99	-: 184: 175	-: 122: 216
6	71: 76: 77	5: 103: 112	-: 164: 160	-: 183: 187

ESSAIS DE COMPRESSION - RESULTATS

- * les éprouvettes sont fabriquées à la teneur en eau et à la densité sèche de l'optimum Proctor.
- * éprouvettes à 150 jours à l'air libre
- * éprouvettes à 150 jours à l'air libre + 4 jours sous eau .

Echantillon	Teneur en chaux (%)	Valeur de résistance à la compression simple en bar Kg/cm	
		après 150 jours de conservation à l'air	après 150 jours de conservation plus 4 jours sous eau
1	0	5,5	*
	4	16,54	5,06
	6	13,13	9,13
2	0	6	*
	4	16,99	8,70
	6	19,18	14,80
3	0	5,58	*
	4	12,37	8,48
	6	14,94	11,56
4	0	5,3	*
	4	18,21	17,48
	6	25,72	21,71
5	0	5,6	*
	4	24,03	16,41
	6	26,86	*
6	0	5,6	*
	4	18,50	12,72
	6	27	22

* éprouvettes délitées.

CONCLUSION.

Cette étude de laboratoire a permis de montrer que le dehs et le sable très répandus dans notre pays sont stabilisables au ciment puisqu'on a vu que les caractéristiques mécaniques pouvaient être améliorées très nettement par ajout d'un faible pourcentage de ciment, notamment en ce qui concerne le CBR et la résistance à la compression simple.

Nous remarquons notamment que les résultats obtenus sur le dehs-ciment étaient meilleurs que ceux du sable-ciment, puisqu'à pourcentage égal, les résistances à la compression simple sont meilleures. En utilisant un matériel adéquat sur chantier en l'occurrence un pulvimixer pour bien pulvériser le sol en place et bien homogénéiser le mélange sol ciment et un compacteur adéquat, on devrait ainsi se rapprocher nettement in situ des résultats de laboratoire que nous avons obtenus. On pourra obtenir une meilleure tenue de la chaussée, voire même diminuer l'épaisseur du corps de chaussée. Les tirs étudiés quant à eux sur différents sites du Nord du pays ont montré qu'ils ont une bonne affinité avec la chaux, puisque pour les 6 sols, elle a permis d'augmenter de beaucoup leur caractéristiques mécaniques. Cette technique devrait résoudre le problème des chaussées construites sur sols gonflants.

Notons au passage qu'une expérimentation a déjà été mise en oeuvre et a pratiquement 2 ans d'âge et semble donner des résultats satisfaisants.

Il faut signaler que ces sols traités peuvent aussi avoir une application directe dans le domaine de la construction, les résistances en compression simple obtenues étant particulièrement intéressantes.